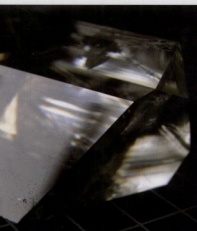


第三版  
修订版

# 非线性光学晶体手册

Handbook of Nonlinear Optical Crystals



[俄罗斯]V. G. Dmitriev

[亚美尼亚]G. G. Gurzadyan

[俄罗斯]D. N. Nikogosyan

王继扬 译

吴以成 校



高等教育出版社



第三版  
修订版

# 非线性光学晶体手册

Handbook of Nonlinear Optical Crystals

[俄罗斯]V. G. Dmitriev

[亚美尼亚]G. G. Gurzadyan

[俄罗斯]D. N. Nikogosyan

王继扬 译

吴以成 校

资源分享  
PDG

## 内 容 简 介

本书是根据施普林格出版社(Springer)出版的 V. G. Dmitriev 等著《非线性光学晶体手册》(Handbook of Nonlinear Optical Crystals)1999 年第三版译出。原著第一版于 1990 年出版,第二版于 1997 年出版,第三版是在前两版的基础上修订而成的。

本书收集了 1999 年以前被人们广泛研究和应用的 77 种非线性光学晶体,按照基本的非线性光学晶体、常用的非线性光学晶体、其他无机非线性光学晶体和其他有机非线性光学晶体的次序排列。对于每一种晶体都给出了包括当时最新发表的所有基本数据:晶体的对称性及结构、密度、硬度、线性吸收系数、折射率、折射率温度系数、相位匹配角、“走离”角、非线性过程的群速失配、有效非线性系数、热导率、光损伤阈值以及晶体的电光系数和非临界相位匹配温度等,并给出了所有数据的来源(参考文献),当有不同来源数据时,除悉数收入外,还给出适当的评论与指导。

本书还简明、扼要、准确地给出了非线性晶体光学的基本框架,介绍了涉及非线性光学晶体的基本概念、主要类型、基本特性,给出了常用的基本公式和图表。除此外,还介绍了非线性光学晶体的应用,包括和频、差频、光学参量振荡以及各类激光器的谐波发生结果。

本书概念清晰,实际应用性强、数据翔实准确,实为从事与非线性光学晶体及激光技术相关的科研人员、技术人员和教学人员必备的工具书和重要的参考书。

科学出版社  
PDG

# 中译本序

自 20 世纪 60 年代激光问世以来,非线性光学得到了快速发展。它是研究激光与物质相互作用所产生的各种非线性光学现象的一门学科。非线性光学有许多应用:开辟新的激光波段,压缩激光脉宽,提高光谱分辨率,消除光在传播中的畸变等。非线性光学晶体是非线性光学的重要基础。利用非线性光学晶体可以制作改变激光波长频率的变化装置:光开关等。由于它们的特殊重要性,非线性光学晶体已经成为晶体材料基础上发展起来和激光技术相关的新型交叉学科。

由 V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan 和 D. N. Nikogosyan 三人编著的《非线性光学晶体手册》历经三版,收集了自 20 世纪 60 年代开始到 1999 年为止被广泛研究和应用的 77 种非线性光学晶体的基本数据资料,并完整而简明地介绍了非线性晶体光学和非线性光学晶体应用相关的基础理论,有很重要的学习和参考价值。其后,《非线性光学晶体手册》作者之一的 D. N. Nikogosyan 又在该书手册的基础上,重新编著了《非线性光学晶体——一份完整的总结》一书。这本书从体例上基本上继承了《非线性光学晶体手册》的特色和优点,翔实地、有分析和选择地给出了述及晶体的重要数据,并对晶体的特点及应用作出了自己的评价。这本书根据研究和应用工作的进展,保留了《非线性光学晶体手册》中仍然有重要应用和参考价值的 34 种晶体(剔除了 43 种),又代之以新的 30 种晶体,并对所有的数据进行了更新和校对。这两本书的出版,从一个侧面反映了非线性光学晶体研究领域的快速发展。

从上述两本书所收集的晶体,我们可以欣慰地看到中国晶体生长工作者在非线性光学晶体领域的成就和贡献。自 20 世纪 80 年代以来,我国非线性光学晶体的研究从跟踪仿制到走上独立研究和发展新材料的历史,是我国科学发展的一个缩影。其中值得指出的是,我国科学工作者运用分子设计学方法相继发现了  $\beta$ -BBO、LBO 和 KBBF 等重要的非线性光学晶体。2009 年 2 月《自然》杂志专门撰文介绍了中国深紫外非线性光学晶体研究在国际上的领先状况,认为“其他国家在晶体生长方面的研究目前来看是无法赶上中国的”。从第一本书修订出版的 1999 年,到后一本书出版的 2005 年,新发展的 30 种晶体中,至少有一半以上的晶体是由中国科学家首先发现或已经做了大量工作的。这两本书从一个角度反映了中国非线性光学晶体研究领域的成就。



这两本书既有相通之处又各有特点。《非线性光学晶体手册》一书总结和反映了自 20 世纪 60 年代以来非线性光学晶体的概貌,并且为读者提供了与非线性光学晶体及其应用相关的最基础和较为完整的理论基础;《非线性光学晶体——一份完整的总结》注重自 21 世纪以来在非线性光学晶体研究和应用方面的成就,并为读者提供了最新的发展领域和发展趋势。两本书都提供了在出版时能够找到的全面、可靠和有出处的资料。因此两本书的结合,为我们基本了解非线性光学晶体研究和发展的全貌提供了重要的基础。

正如 D. N. Nikogosyan 教授所指出的那样,尽管今天我们可以在互联网上查到大量的信息,但真正要获得有用和可靠的数据,却要消耗大量的时间和精力。这两本手册类的专著为我们提供了可以信赖和实用的数据。

中国有一支高水平的晶体研究队伍,同时中国也有一支高水平的激光及非线性光学的应用队伍,因此非常需要一套可供参考的非线性光学晶体手册。这两本书中译本的出版将满足读者的这一需要。

非线性光学晶体的研究是我一生的追求和钟爱,能为非线性光学晶体这一领域作点贡献,是我人生中的最大快乐。值此《非线性光学晶体手册》和《非线性光学晶体——一份完整的总结》(中译本)出版之际,我也愿意和每一位读者分享这一快乐。

陈树天



# 第二版和第三版序言

当我们完成手册第一版的编辑工作时，我们绝不会想到三年以后这本书就需要进行很大的修改，将其材料更新而出第二版。这是由于以下的发展所造成的：

1. 现代非线性光学晶体的巨大发展，发明了如 BBO、LBO、KTP 和  $\text{ZnGeP}_2$  等晶体；
2. 激光技术的迅速进步（飞秒 CPM 激光器、掺钛宝石激光器和激光极管泵浦全固态激光器等）；
3. 出现了大量可以根据设定性质来合成的有机晶体；
4. 在利用双轴晶体进行频率转换的理论、飞秒脉冲理论方面的进步；
5. 非线性光学晶体性质新数据的积累。

由于上述原因，在第二版的内容中有了许多改变。第一章是由 D. N. Nikogosyan 修改的，第二章是由 V. G. Dmitriev 和 D. N. Nikogosyan 共同修改的，第四章是由 G. G. Gurzadyan 修改的，第三章是主要的参考材料，包括了 77 种非线性光学晶体，是由 D. N. Nikogosyan 编撰的。在第三版中又对几处图示进行了修改，并再次对实验数据进行了更新。

我们非常感谢 H. K. V. Lotsch 与我们长期卓有成效的合作。

V. G. Dmitriev (俄罗斯, Moscow)

G. G. Gurzadyan (亚美尼亚, yerevan)

D. N. Nikogosyan (爱尔兰, cork)

1999 年 2 月

新  
平  
和  
PDG

# 第一版序言

自从 30 年前第一台激光器发明以来,利用非线性光学晶体进行激光辐射的频率转换已经成为量子电子学和激光物理学中用以解决各种科学和工程问题的一种广泛采用的重要技术。在非线性光学晶体中三波束光线相互作用的基本原理已被人们很好理解。这使得基于非线性光学晶体制作的各种不同的谐波发生器件、和频及差频发生器件以及光学参量振荡器等到现在已经商业化。同时,科学家们继续在积极地搜寻新的、高效的非线性光学材料。

因此,我们认为,编著一本非线性光学手册是急需的,本书的对象是有关专家以及有工程背景的实践工作者。这本书包含了 20 世纪 90 年代开始以来文献中所报道的有实用意义的所有非线性晶体的性质及有关应用的完整说明。此外,书中还包含了用于计算非线性频率变换器件主要参数的最重要的方程式(诸如相匹配方向、有效非线性和转换效率)。

V. G. Dmitriev(苏联,Dolgoprudnyi)

G. G. Gurzadyan(苏联,yerevan)

D. N. Nikogosyan(苏联,Troktzk)

1990 年 10 月



# 目 录

## 缩略语表

第 1 章 引言 .....	1
第 2 章 非线性晶体光学 .....	3
2.1 在非线性质中三波和四波(三频率和四频率)相互作用 .....	3
2.2 相位匹配条件 .....	5
2.3 单轴晶体的光学 .....	6
2.4 单轴晶体相位匹配类型 .....	8
2.5 在单轴晶体中相位匹配角的计算 .....	11
2.6 单轴晶体表面光波的反射和折射 .....	12
2.7 双轴晶体光学 .....	13
2.8 双轴晶体的相位匹配类型 .....	15
2.9 双轴晶体中相位匹配角的计算 .....	16
2.10 晶体对称性和有效非线性:单轴晶体 .....	20
2.11 晶体对称性和有效非线性:双轴晶体 .....	22
2.12 非线性频率转换效率理论 .....	30
2.13 波失配和相位匹配带宽 .....	36
2.14 在一些特殊情况下非线性频率转换效率的计算 .....	44
2.14.1 平面波固定场近似 .....	44
2.14.2 基波亏损("非线性范围") .....	47
2.14.3 在固定场近似下发散基波辐射线束的 SHG .....	49
2.14.4 在非线性质范围内发散基波辐射线束的 SHG .....	49
2.14.5 固定强度近似 .....	51
2.14.6 超短激光脉冲的频率转换 .....	53
2.14.7 在稳态范围内有限孔径激光束的频率转换 .....	55
2.14.8 线性吸收 .....	58
2.15 其他评论 .....	58

<b>第3章 非线性光学晶体的性质</b> .....	61
<b>3.1 基本的非线性光学晶体</b> .....	62
3.1.1 $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , 三硼酸锂(LBO) .....	62
3.1.2 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 磷酸二氢钾(KDP) .....	71
3.1.3 $\text{KD}_2\text{PO}_4$ , 氘化磷酸二氢钾(DKDP) .....	78
3.1.4 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , 磷酸二氢铵(ADP) .....	83
3.1.5 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , 偏硼酸钡(BBO) .....	89
3.1.6 $\text{LiIO}_3$ , 碘酸锂 .....	97
3.1.7 $\text{KTiOPO}_4$ , 磷酸钛氧钾(KTP) .....	103
3.1.8 $\text{LiNbO}_3$ , 铌酸锂 .....	114
3.1.9 $\text{KNbO}_3$ , 铌酸钾 .....	122
3.1.10 $\text{AgGaS}_2$ , 硫镓银 .....	128
3.1.11 $\text{ZnGeP}_2$ , 磷锗锌 .....	132
<b>3.2 常用的非线性光学晶体</b> .....	138
3.2.1 $\text{KB}_3\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 四水合五硼酸钾(KB5) .....	138
3.2.2 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , 尿素 .....	142
3.2.3 $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ , 砷酸二氢铯(CDA) .....	145
3.2.4 $\text{CsD}_2\text{AsO}_4$ , 氘化砷酸二氢铯(DCDA) .....	148
3.2.5 $\text{KTiOAsO}_4$ , 砷酸钛氧钾(KTA) .....	151
3.2.6 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ , 氧化镁掺杂铌酸锂 .....	154
3.2.7 $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ , 淡红银矿 .....	157
3.2.8 $\text{GaSe}$ , 硒化镓 .....	161
3.2.9 $\text{AgGaSe}_2$ , 硒镓银 .....	164
3.2.10 $\text{CdSe}$ , 硒化镉 .....	168
3.2.11 $\text{CdGeAs}_2$ , 砷锗镉 .....	171
<b>3.3 其他无机非线性光学晶体</b> .....	173
3.3.1 $\text{KB}_3\text{O}_8 \cdot 4\text{D}_2\text{O}$ , 氘化四水合五硼酸钾(DKB5) .....	173
3.3.2 $\text{CaB}_3\text{O}_5$ , 三硼酸铯(CBO) .....	174
3.3.3 $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 四水合硫酸铍 .....	175
3.3.4 $\text{MgBaF}_4$ , 氟化钡镁 .....	178
3.3.5 $\text{NH}_4\text{D}_2\text{PO}_4$ , 氘化磷酸二氢铵(DADP) .....	179
3.3.6 $\text{RbH}_2\text{PO}_4$ , 磷酸二氢铷(RDP) .....	181
3.3.7 $\text{RbD}_2\text{PO}_4$ , 氘化磷酸二氢铷(DRDP) .....	185
3.3.8 $\text{KH}_2\text{AsO}_4$ , 砷酸二氢钾(KDA) .....	185
3.3.9 $\text{KD}_2\text{AsO}_4$ , 氘化砷酸二氢钾(DKDA) .....	188

3.3.10	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$ , 砷酸二氢铵 (ADA)	188
3.3.11	$\text{NH}_4\text{D}_2\text{AsO}_4$ , 氘化砷酸二氢铵 (DADA)	191
3.3.12	$\text{RbH}_2\text{AsO}_4$ , 砷酸氢铷 (RDA)	192
3.3.13	$\text{RbD}_2\text{AsO}_4$ , 氘化砷酸二氢铷 (DRDA)	195
3.3.14	$\text{LiCOOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 水合甲酸锂 (LFM)	197
3.3.15	$\text{NaCOOH}$ , 甲酸钠	200
3.3.16	$\text{Ba}(\text{COOH})_2$ , 甲酸钡	202
3.3.17	$\text{Sr}(\text{COOH})_2$ , 甲酸锶	203
3.3.18	$\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 二水合甲酸锶	204
3.3.19	$\text{LiGaO}_2$ , 镓酸锂	206
3.3.20	$\alpha - \text{HIO}_3$ , $\alpha$ - 碘酸	207
3.3.21	$\text{K}_2\text{La}(\text{NO}_3)_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 二水合硝酸镱钾 (KLN)	210
3.3.22	$\text{CsTiOAsO}_4$ , 砷酸钛氧铯 (CTA)	212
3.3.23	$\text{NaNO}_2$ , 亚硝酸钠	213
3.3.24	$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ , 铌酸钡钠	215
3.3.25	$\text{K}_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 二水合硝酸铈钾 (KCN)	218
3.3.26	$\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ , 铌酸锂钾	220
3.3.27	$\text{HgGa}_2\text{S}_4$ , 硫镓汞	221
3.3.28	$\text{HgS}$ , 硫化汞	223
3.3.29	$\text{Ag}_5\text{SbS}_3$ , 硫锑银	225
3.3.30	$\text{Se}$ , 硒	227
3.3.31	$\text{Ti}_3\text{AsS}_5$ , 硫砷铌 (TAS)	228
3.3.32	$\text{Te}$ , 碲	230
3.4	其他有机非线性光学晶体	233
3.4.1	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ , 蔗糖 (食糖)	233
3.4.2	L - 水合精氨酸磷酸 (LAP)	235
3.4.3	氘化 L - 水合精氨酸磷酸 (DLAP)	237
3.4.4	左旋吡咯烷酮 - 2 - 羧酸 (L - PCA)	239
3.4.5	$\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 四水合酒石酸钙 (L - CTT)	241
3.4.6	$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 水合草酸铵 (AO)	242
3.4.7	m - 双 (甲基) 苯 (BAMB)	244
3.4.8	3 - 甲氧基 - 4 - 羟基 - 苯甲醛 (MHBA)	245
3.4.9	2 - 呋喃异丁烯酸酐 (FMA)	248
3.4.10	3 - 甲基 - 4 - 硝基吡啶 - 1 - 氧化物 (POM)	249
3.4.11	噻嗪查耳酮 (T - 17)	251

3.4.12	5-硝基脲嘧啶(SNU)	252
3.4.13	2-(N-脯氨酸)-5-硝基吡啶(PNP)	254
3.4.14	2-环辛氨基-5-硝基吡啶(COANP)	255
3.4.15	L-N-(5-硝基-2-吡啶基)亮氨酸(NPLO)	257
3.4.16	$C_6H_4(NO_2)_2$ , m-双硝基苯(mDNB)*	259
3.4.17	4-(N,N-双甲基)-3-乙酰氨基苯(DAN)	260
3.4.18	甲基-(2,4-双硝基苯)-氨基丙酮(MAP)	262
3.4.19	m-硝基苯胺(mNA) <sup>△</sup>	264
3.4.20	N-(4-硝基苯)-N-甲基氨基丙腈(NPAN)	266
3.4.21	N-(4-硝基苯)-L-脯氨酸(NPP)	267
3.4.22	3-甲基-4-甲氧基-4'-硝基芪(MMONS)	269
3.5	结晶石英的性质( $\alpha$ -SiO <sub>2</sub> )	270
3.6	新进展	273

## 第4章 非线性晶体的应用 277

4.1	铍激光器的激光谐波发生	277
4.1.1	在无机晶体中铍激光辐射的二次谐波发生	277
4.1.2	在有机晶体中1.064 $\mu$ m辐射的二次谐波发生	282
4.1.3	腔内SHG	284
4.1.4	三次谐波发生	286
4.1.5	四次谐波发生	288
4.1.6	五次谐波发生	289
4.1.7	1.318 $\mu$ m辐射的谐波发生	290
4.2	高功率大口径铍玻璃激光辐射的谐波发生	291
4.2.1	“角度失谐”方式	293
4.2.2	“偏振失配”方式	293
4.2.3	“偏振旁通”方式	293
4.2.4	各种方式的比较	293
4.2.5	实验结果	294
4.2.6	“正交”方式	295
4.3	其他激光光源的谐波发生	296
4.3.1	红宝石激光器	296

\* 译者注: 原文为“MDNB”, 按照化学命名法应为“mDNB”。

△ 译者注: 原文为“MNA”, 按照化学命名法应为“mNA”。

4.3.2 钛宝石激光器 .....	297
4.3.3 半导体激光器 .....	297
4.3.4 染料激光器 .....	299
4.3.5 气体激光器 .....	306
4.3.6 碘离子激光器 .....	307
4.3.7 CO <sub>2</sub> 激光器 .....	308
4.3.8 其他激光器 .....	310
4.3.9 飞秒脉冲的频率转换 .....	310
4.4 和频发生 .....	311
4.4.1 上转换到紫外区 .....	312
4.4.2 红外上转换 .....	319
4.4.3 CO <sub>2</sub> 激光辐射上转换到近 IR 和可见区 .....	321
4.5 差频发生 .....	325
4.5.1 在可见区的 DFG .....	325
4.5.2 在中红外区的 DFG .....	325
4.5.3 在远红外区的 DFG .....	331
4.6 光参量振荡 .....	332
4.6.1 在紫外、可见及近红外光谱范围的 OPO .....	332
4.6.2 中红外区的 OPO .....	350
4.6.3 OPO 辐射转换到紫外区 .....	352
4.7 晶体中的受激拉曼散射和皮秒连续谱发生 .....	353
参考文献 .....	357
附录 常用激光器的波长 .....	415
名词索引 .....	417
译者后记 .....	438



# 第1章

## 引言

1960年, Maiman(USA)发明了第一台相干光辐射光源, 称为红宝石激光器, 发射波长在红光谱区( $\lambda = 0.694\ 3\ \mu\text{m}$ )<sup>[1.1]</sup>。几年后, 已经发展形成了一个激光器大家庭。已知的激光器有以下几类:

(1) 固态激光器, 即发射  $1.065\ \mu\text{m}$  激光的  $\text{Nd: CaWO}_4$  激光器<sup>[1.2]</sup>, 钕玻璃激光器( $\lambda = 1.06\ \mu\text{m}$ )<sup>[1.3]</sup>,  $\text{Nd: YAG}$  激光器( $\lambda = 1.064\ \mu\text{m}$ )<sup>[1.4]</sup>;

(2) 气体激光器, 即  $\text{He - Ne}$  激光器( $\lambda = 0.632\ 8, 1.152\ 3, 3.391\ 3\ \mu\text{m}$ )<sup>[1.5]</sup>, 氦离子激光器( $\lambda = 0.488\ 0, 0.514\ 5\ \mu\text{m}$ )<sup>[1.6]</sup>,  $\text{CO}_2$  激光器( $\lambda = 9.6, 10.6\ \mu\text{m}$ )<sup>[1.7]</sup>;

(3) 染料激光器<sup>[1.8,9]</sup>;

(4) 半导体激光器<sup>[1.10-12]</sup>;

以及其他激光器等。上述激光器的波长或者是固定的, 或者是在一个小的范围内可调。扩展由激光光源所产生激光波长的范围是一件有实际重要意义的事情。

电磁波通过非线性介质传播，会在和它的基波谐振处，即和频或差频的频率等处产生振动。在光频范围内，当光通过弱非线性电介质传播时也观察到相同的效应。当一束或两束有足够强度的激光辐射线束通过这些电介质时，这一辐射的频率可以转换为二次、三次及更高次谐振或其组合（和频或差频）的频率。这样，一台产生固定频率激光的激光器的波长范围就能得到显著的扩展。例如，红宝石激光器辐射的二次谐波就位于紫外区（ $\lambda = 0.347\ 15\ \mu\text{m}$ ），而钕玻璃激光器辐射的二次谐波位于绿光光谱区（ $\lambda = 0.53\ \mu\text{m}$ ）。

早在 1961 年，Franken 等人<sup>[1.13]</sup>在红宝石激光器的光直接通过石英晶体时观察到了在倍频频率处的辐射。然而，由于在石英晶体中基波和倍频波在传播中的相位失配，结果证明其二次谐波的转换效率是非常低的（小于  $10^{-12}$ ）。

在 1962 年，Giordmaine<sup>[1.14]</sup>和 Maker 等人<sup>[1.15]</sup>同时提出了在基波和倍频波频率处相速度匹配的一种巧妙方法。他们的技术利用了在一个光学各向异性的（单轴或双轴）非线性晶体中不同偏振波的折射率之间的差（相位匹配法），借助于这一技术，激光辐射向二次谐波的转换效率可以提高到百分之几十。

自 20 世纪 60 年代初期开始，在对二次谐波发生研究的同时，也首次开展了关于产生混频处光学辐射的实验，即从两台激光器产生和频辐射<sup>[1.16]</sup>，以及从一台激光器或一台非相干光源中产生和频辐射<sup>[1.17]</sup>，还进行了差频发生实验<sup>[1.18,19]</sup>。我们要特别提及光学参量振荡，这是一种可以让我们获得连续可调谐相干光辐射的非线性效应<sup>[1.20]</sup>。

用于制作电光和弹光器件的铁电体 ADP 和 KDP 是最早用于非线性频率转换的两种晶体（非线性光学晶体）<sup>[1.21]</sup>。它们可以采用普通的方法来生长。然而，一些特殊的非线性光学问题需要具有更好性质的新晶体（更好的透明性、更高的非线性、更低的吸湿性等）。为此而广泛开展的寻求新材料的科学研究工作中，已经合成了数目众多具有高光学质量的非线性晶体：1964 年的  $\text{LiNbO}_3$ <sup>[1.22]</sup>，1967 年的  $\text{BaNaNb}_5\text{O}_{15}$ <sup>[1.23]</sup>，1967 年的硫镓银<sup>[1.24]</sup>，1969 年的  $\text{LiIO}_3$ <sup>[1.25]</sup>，1976 年的 KTP<sup>[1.26]</sup>以及其他晶体。随后发表了第一批对于不同非线性晶体进行比较和总结的文章<sup>[1.27,28]</sup>。

最近，由陈创天等人从硼酸盐家族中发明了两种具有优异性能的非非线性光学晶体：1985 年的  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  (BBO)<sup>[1.29]</sup> 和 1989 年的  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO)<sup>[1.30]</sup>。

# 第2章

## 非线性晶体光学

在这一章引进了非线性光学物理的主要概念：三波相互作用、相位匹配和相位匹配角、平面波相互作用的不匹配规律、群速失配和超短光脉冲的相互作用、单轴晶体和双轴晶体光学、晶体对称性和有效非线性、“走离”角、相位匹配带宽(角度、温度、谱区)和热效应，等等。本章给出了用于相位匹配计算以及评价在非线性晶体中光学谐波发生及其混频(和频和差频)和光学参量振荡等频率转换实际情况所需的材料。为了方便起见，引进了所谓的“有效长度”用于相应的过程：在比较相应过程具有有效长度的非线性晶体的长度时，我们可以对在转换效率的计算中是否必须考虑这一过程作出结论。本章包括了许多表格，表格中列出了计算相位匹配角和“走离”角、带宽、有效非线性和转换效率的方程式。

### 2.1 在非线性介质中三波和四波(三频率和四频率)相互作用

在非线性光学晶体中，一种光波频率的转变(倍增、等分、混

合)是可能的,因为折射率  $n$  是光波电场强度矢量  $E$  的函数:

$$n(E) = n_0 + n_1 E + n_2 E^2 + \cdots \quad (2.1)$$

这里  $n_0$  是没有电场时的折射率(这一量用于传统的“线性”光学),  $n_1$  和  $n_2$  等是  $n(E)$  系数的一系列扩展。

在非线性光学中,引入了一个介电极化矢量  $P$  (单位体积物质的偶极矩惯量)。它与电场  $E$  的关系由物质方程来描述<sup>[2.1-4]</sup>:

$$P(E) = \kappa(E)E = \kappa_0 E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \cdots \quad (2.2)$$

这里  $\kappa$  是线性介电极化率(在没有电场存在时标为  $\kappa_0$ ),  $\chi^{(2)}$  和  $\chi^{(3)}$  等是非线性介电极化率(分别称二阶、三阶等)。以下方程式总是成立的:

$$\begin{aligned} \kappa_0 &= \frac{1}{4\pi}(\epsilon_0 - 1) = \frac{1}{4\pi}(n_0^2 - 1) \\ \chi^{(2)} &\approx \frac{1}{2\pi}n_0 n_1, \quad \chi^{(3)} \approx \frac{1}{2\pi}n_0 n_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

这里  $\epsilon_0$  是无电场情况下的介电常数。在各向异性晶体的一般情况下,  $\epsilon_0$ 、 $n$ 、 $\kappa$  和  $\chi$  是相应阶的张量<sup>[2.4]</sup>。

二阶非线性仅在非中心对称的晶体中存在( $\chi^{(2)} \neq 0$ ), 即在不具有对称中心的晶体中存在; 在具有对称中心以及各向同性的物质中  $\chi^{(2)} = 0$ 。相反, 三阶非线性存在于所有晶体和各向同性介质中。

具有频率为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的两束单色波在具有二阶非线性的晶体中传播会产生具有  $\omega_{3,4} = \omega_2 \pm \omega_1$  频率的混频波; 加号相应于和频, 减号相应于差频(三波或三频率相互作用)。和频发生(SFG)常常用于长波辐射, 例如红外(IR), 向短波辐射的转变, 例如紫外(UV)或可见光。差频发生(DFG)用于短波辐射向长波辐射的转换。

在  $\omega_1 = \omega_2$  的情况下, 我们得到这种转换的两种特殊情况, 即二次谐波发生(SHG)作为 SFG 的一个特例,  $\omega_3 = 2\omega_1$ ; 光学整流(OR)作为(DFG)的一个特例,  $\omega_4 = 0$ 。

参量发光(PL)效应或光学参量振荡(OPO)是 SFG 相反过程, 涉及在具有频率  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  的强光波的场中产生具有频率为  $\omega_{1,2}$  的两束光。

连续进行 SFG 和/或 SHG 过程, 可能获得更为复杂的混频发生。例如, 三次谐波发生(THG)就能通过以下 SFG 过程来实现:

$$\omega_3 = 3\omega_1 = \omega_1 + 2\omega_1 \quad (2.4)$$

四次谐波发生(FOHG,  $\omega_4 = 4\omega_1$ )可以由  $2\omega_1$  频率的 SHG 过程来实现。以一种相似的方式, 五次和六次谐波(FIHG 和 SIHG)也能实现:

$$\omega_5 = 5\omega_1 = \omega_1 + 4\omega_1 \quad (2.5)$$

或

$$\omega_5 = 5\omega_1 = 2\omega_1 + 3\omega_1 \quad (2.6)$$

$$\omega_6 = 6\omega_1 = \omega_1 + 5\omega_1 \quad (2.7)$$

或

$$\omega_6 = 6\omega_1 = 2\omega_1 + 4\omega_1 \quad (2.8)$$

在具有三阶非线性的物质中，二束具有  $\omega_{1,2}$  频率光波的传播产生具有混频频率为  $2\omega_1 \pm \omega_2$  和  $\omega_1 \pm 2\omega_2$  的新的光波（四波或四频率相互作用）。对于  $\omega_1 = \omega_2$  的特殊情况，可以是直接三倍频过程， $\omega_3 = 3\omega_1$ ，也可以是自作用过程， $\omega_4 = 2\omega_1 - \omega_1 = \omega_1$ ，或者是产生相同频率  $\omega_1$  的过程。

由于在具有三阶非线性物质中的频率转换相对来说用得非常少（普遍规律是  $\chi^{(3)} E \ll \chi^{(2)}$ ），在本章中，我们只考虑在具有二阶非线性（ $\chi^{(2)} \neq 0$ ）晶体中发生的三波相互作用。

## 2.2 相位匹配条件

在通常条件下，所有光学介质的非线性是弱的，即不等式  $\chi^{(3)} E^2 \ll \chi^{(2)} E \ll \kappa_0$  是成立的。只有当光波在满足所谓相位匹配条件，在相当长的晶体中传播时才能观察到显著的非线性效应。相位匹配条件是

$$k_3 = k_2 + k_1 \quad (2.9)$$

或

$$k_4 = k_2 - k_1 \quad (2.10)$$

这里  $k_i$  是相应于具有频率  $\omega_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 频率波的波矢量：

$$|k_i| = k_i = \frac{\omega_i n(\omega_i)}{c} = \frac{\omega_i}{v(\omega_i)} = \frac{2\pi n_i}{\lambda_i} = 2\pi n_i \nu_i \quad (2.11)$$

这里  $v_i$ ,  $n_i = n(\omega_i)$ ,  $\lambda_i$  和  $\nu_i$  分别是相速度、折射率、波长和频率  $\omega_i$  处的波数。

在相位匹配情况下波矢量的相对位置可以是共线的（标量相位匹配）或非共线的（矢量相位匹配）（图 2.1）。

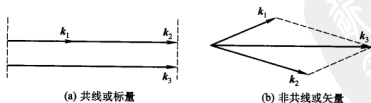


图 2.1 三波相互作用的相位匹配

在标量（共线）相位匹配情况下，对于 SFG 我们有

$$k_3 = k_2 + k_1, \text{ 或 } \omega_3 n_3 = \omega_2 n_2 + \omega_1 n_1 \quad (2.12)$$

以及对 SHG ( $\omega_1 = \omega_2, \omega_3 = 2\omega_1$ ) 我们有

$$k_3 = 2k_1 \text{ 或 } n_3 = n_1 \quad (2.13)$$

相位匹配条件(2.9)、(2.10)式的物理意义是传播波束的空间共振,即对于 SFG 来说,是频率为  $\omega_3$  的非线性介质极化波(或对 DFG 是  $\omega_4$ ),与在同一频率  $\omega_3$ (或为  $\omega_4$ )处其光波所产生的非线性极化波之间的空间共振。注意在各向同性晶体的光学透明区(对于各向异性晶体中平等的偏振波也是这样)中,因为正常色散( $n_1 < n_3$ ),对于 SHG 来说,(2.13)式是永远满足不了的。而由于能量吸收非常大,采用异常色散也几乎是不可能的。相位匹配条件只能在各向异性晶体中不同偏振的波束之间才能够得到满足。

对于有效的三波相互作用来说,必要和充分的条件是具有非零二次非线性的光学透明晶体,并且可以实现相位匹配。

## 2.3 单轴晶体的光学

在单轴晶体中,有一个特别的方向被称为光轴( $Z$ 轴)。包含  $Z$  轴和光波矢  $k$  的平面被称为主平面。一束偏振方向(即矢量  $E$  振荡的方向)垂直于主平面的光线被称为寻常光束或  $o$  光(图 2.2);在主平面内偏振的光束被称为异常光束或  $e$  光(图 2.3)。 $o$  光的折射率与其传播方向无关,而对于  $e$  光来说,其折射率与其传播方向有关。因此,在各向异性晶体中,折射率一般是与光的偏振及其传播方向有关的。

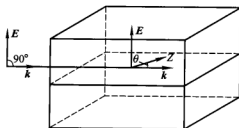


图 2.2 晶体的主平面( $kZ$ )和寻常光束

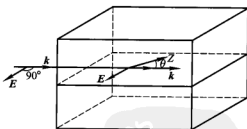


图 2.3 晶体的主平面( $kZ$ )和异常光束

寻常光和异常光的折射率之差被称为双折射率  $\Delta n$ 。 $\Delta n$  的值沿光轴  $Z$  方向为零,而在垂直于光轴的方向达到极大。在垂直于  $Z$  轴的面上,寻常光和异常光的折射率被称为主折射率的值,并分别标记为  $n_o$  和  $n_e$ ;  $n_o$  不要与(2.1)式中无电场时的折射率  $n_0$  相混淆。异常光的折射率一般是  $Z$  轴和其矢量  $k$  之间极角  $\theta$  的函数(图 2.4),并由以下方程所决定(在这种情况下指数  $e$  写作上标):

$$n^*(\theta) = n_o \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + (n_o/n_e)^2 \tan^2 \theta}} \quad (2.14)$$

以下的关系式是显而易见成立的：

$$n^*(\theta) \equiv n_o \quad (2.15)$$

$$n^*(\theta = 0^\circ) = n_o \quad (2.16)$$

$$n^*(\theta = 90^\circ) = n_e \quad (2.17)$$

$$\Delta n(\theta = 0^\circ) = 0 \quad (2.18)$$

$$\Delta n(\theta = 90^\circ) = n_e - n_o \quad (2.19)$$

$$\Delta n(\theta) = n^*(\theta) - n_o \quad (2.20)$$

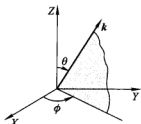


图 2.4 描述单轴晶体折射率性质的极坐标系  
k 是光的传播方向，Z 是光轴， $\theta$  和  $\phi$  是坐标角

如果  $n_o > n_e$ ，晶体称为负的；如果  $n_o < n_e$ ，则称为正的。 $n^*$  的值与方位角  $\phi$  (k 在 xy 面的投影与 x 轴之间的夹角，见图 2.4) 无关。在单轴晶体内部折射率与传播方向的关系既取决于半径为  $n_o$  的球 (对寻常光)，也取决于  $n_o$  和  $n_e$  为半轴旋转形成的椭球 (对异常光，椭球的旋转轴为 Z 轴)，在 Z 轴方向上圆球与椭球相交。在负晶体中，椭球体内切于球体 [图 2.5(a)]，而在正晶体中，球体内切于椭球体 [图 2.5(b)]。

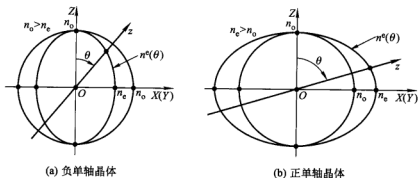


图 2.5 晶体中折射率与传播方向及偏振的关系图

当一束平面光波在单轴晶体中传播时，波的相位 (矢量  $\mathbf{k}$ ) 的传播方向一般不和其波能量 (矢量  $\mathbf{s}$ ) 的传播方向一致。 $\mathbf{s}$  的方向可以定义为垂直于矢量  $\mathbf{k}$  和  $n(\theta)$  曲线交点处所作的正切线方向。对于寻常光来说， $n(\theta)$  的函数是半径为  $n_o$  的一个球体，因此，垂直于其正切线则与波矢量  $\mathbf{k}$  重合。对于异常光垂直于正切线方向 (除了  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  外) 并不与波矢量  $\mathbf{k}$  重合，而是转开一个双折射或“走离”角 (图 2.6)：

$$\rho(\theta) = \pm \arctan[(n_o/n_e)^2 \tan \theta] \mp \theta \quad (2.21)$$

在该式中，上面的减号用于负单轴晶体，而下面的加号用于正单轴晶体。

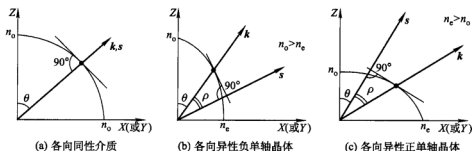


图 2.6 波矢量( $k$ )和线矢量( $s$ )在介质中的配置

$\rho$  是双折射角

$\rho$  和  $\theta$  的相互关系可以作为单轴晶体定向简单方法的基础<sup>[2.5]</sup>。在入射面中, 令一束有任意线性偏振性的激光垂直入射于厚度为  $L$  的晶片, 当其通过晶体后, 光线分解为两束正交偏振的光束。在晶体的出射面, 两束光的分离角 (图 2.7)

$$\delta = L \tan \rho \quad (2.22)$$

晶体的切角  $\theta_c$ , 即晶体光轴  $Z$  和晶面法线的夹角相应于两个值中的一个, 是

$$\theta_c = \arctan \left( \frac{|n_o^2 - n_e^2| L}{2\delta n_o^2} \pm \left| \frac{(n_o^2 - n_e^2)^2 L^2}{4\delta^2 n_e^4} - \frac{n_e^2}{n_o^2} \right|^{1/2} \right) \quad (2.23)$$

关于各向异性介质晶体光学更为严格的推导可见 [2.6]。

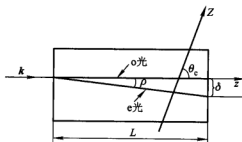


图 2.7 单轴晶体切角  $\theta_c$  的确定

## 2.4 单轴晶体相位匹配类型

在三频率相互作用中, 必须要利用不同偏振的光波才能满足相位匹配。让我们考虑 SFG 的情况: 如果两束混合波具有相同的偏振性, 和频(SF)处的辐射将会在其垂直的方向上偏振; 在这种情况下, 可以实现 I 类相位匹配。在负单轴晶体中

$$k_{o1} + k_{o2} = k_s^*(\theta) \quad (2.24)$$



(这被称为“*oeo*”相位匹配或者“*oeo*”相互作用或者  $I^{(-)}$  类相位匹配)。在正单轴晶体中

$$k_1^*(\theta) + k_2^*(\theta) = k_{\omega_3} \quad (2.25)$$

(这被称为“*eeo*”相位匹配或“*eeo*”相互作用或  $I^{(+)}$  类相位匹配)。对于 SFG 来说, 这里以及以后表达式 *oeo*, *eeo*, *oeo* 等的第一个符号表示较低频率的波, 第三个符号表示较高频率的波。注意寻常光的波矢量  $k_o$  应该不要与线性介电极化率系数  $\kappa_o$  相混淆; 见(2.2)–(2.3)式。

如果两束混合的波是正交偏振的, 就产生 II 类相位匹配。在负单轴晶体中相应于异常光的 SF 波:

$$k_{o1} + k_2^*(\theta) = k_3^*(\theta) \quad (2.26)$$

(“*oeo*”相位匹配或“*oeo*”相互作用或  $II^{(-)}$  类相位匹配), 或

$$k_1^*(\theta) + k_{\omega_2} = k_3^*(\theta) \quad (2.27)$$

(“*oeo*”相位匹配或“*oeo*”相互作用或  $II^{(-)}$  类相位匹配); 对于在正单轴晶体中的寻常光:

$$k_{o1} + k_2^*(\theta) = k_{\omega_3} \quad (2.28)$$

(“*oeo*”相位匹配或“*oeo*”相互作用或  $II^{(-)}$  类相位匹配), 或

$$k_1^*(\theta) + k_{\omega_2} = k_{\omega_3} \quad (2.29)$$

(“*eeo*”相位匹配或“*eeo*”相互作用或  $II^{(+)}$  类相位匹配)。

所有上述各式也可用于参量发光(光学参量振荡)。这里具有较高频率  $\omega_3$  的光波是泵浦光; 其他两种光, 即闲频光  $\omega_1$  和信号光  $\omega_2$ , 是参量发光(振荡)的光波。

将本节的各个方程用于 DFG 时, 在方程中  $k$  的指数应该要作变换:  $2 \rightarrow 4$ ,  $3 \rightarrow 2$  (或  $1 \rightarrow 4$ ,  $3 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 1$ )。

注意在一般情况下, 所发生的是非共线或矢量相位匹配[图 2.1(b)]。然而, 在实际上, 共线的或标量相位匹配, 虽然是一个特例, 但仍被广泛采用[图 2.1(a)]。

图 2.8 说明了我们怎样在负单轴晶体中对于  $I^{(-)}$  类 SHG( $\omega_3 = 2\omega_1$ ), 找到共线相位匹配的方向。对于 *oeo* 相互作用,

$$n_{o1}(\omega_1) = n_3^*(2\omega_1, \theta_{pm}^{(1)}) \quad (2.30)$$

或

$$2k_{o1}(\omega_1) = k_3^*(2\omega_1, \theta_{pm}^{(1)}) \quad (2.31)$$

因此, 在这种情况下, 相位匹配方向  $Oz$  ( $z$  是传播方向, 不要和光轴  $Z$  相混淆) 是在频率  $\omega_1$  处寻常光折射率圆与频率为  $2\omega_1$  的异常光的折射率椭圆的交点处形成的[图 2.8(a)], 或是在  $2k_{o1}$  的圆与  $k_3^*(\theta)$  的椭圆相交处[图 2.8(b)]。

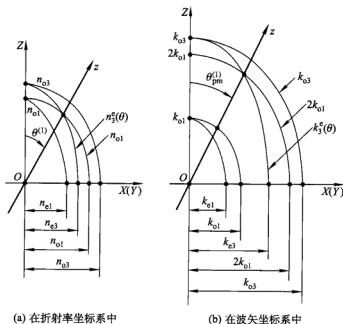


图 2.8 在负单轴晶体中 I 类 (“o-o”) 标量相位匹配  
所示为  $XZ(YZ)$  面的第一象限

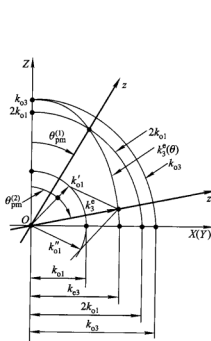


图 2.9 在负单轴晶体中 I 类 (“o-o”) 标量 (共线) 和矢量 (非共线) 相位匹配

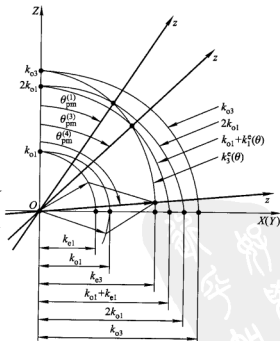


图 2.10 在负单轴晶体中 I 类 (“o-o”) 和 II 类 (“e-o”) 标量 (共线) 相位匹配和 II 类 (“e-o”) 矢量 (非共线) 相位匹配

相位匹配角为  $\theta_{\text{pm}}^{(2)}$  的  $I^{(-)}$  类矢量相位匹配 (图 2.9) 只能在  $\theta_{\text{pm}}^{(1)} \leq \theta_{\text{pm}}^{(2)} \leq \pi - \theta_{\text{pm}}^{(1)}$  的范围内实现, 即在特定的“异常”色散区内, 因为对于这些角, 不等式  $n_2^e(2\omega_1) \leq n_{o1}(\omega_1)$  是成立的。

图 2.10 说明了在负单轴晶体中 II 类 SHG 标量 (角  $\theta_{\text{pm}}^{(3)}$ ) 和矢量 (角  $\theta_{\text{pm}}^{(4)}$ ) 相位匹配的位置。在前一种情况, 相匹配方向是由  $k_3^o(\theta)$  椭圆和  $k_{o1} + k_1^e(\theta)$  腰椭圆的交点确定的。II 类矢量相匹配可能在  $\theta_{\text{pm}}^{(3)} < \theta_{\text{pm}}^{(4)} < \pi - \theta_{\text{pm}}^{(3)}$  的范围内实现。

如果在  $\theta_{\text{pm}} = 90^\circ$  处实现共线相位匹配, 同一类型的矢量相位匹配就不存在了。此外, 如果  $\theta_{\text{pm}}^{(1)} = 90^\circ$ , II 类相位匹配就不能实现了。

## 2.5 在单轴晶体中相位匹配角的计算

单轴非线性晶体的色散性质仅由极角  $\theta$  决定。因此, 对于某些三波相互作用来说, 要在单轴晶体中获得相位匹配方向, 只要确定相应的相位匹配角  $\theta_{\text{pm}}$  就足够了。表 2.1 列出了关于  $\theta_{\text{pm}}^{\text{oe}}$ 、 $\theta_{\text{pm}}^{\text{eo}}$  和  $\theta_{\text{pm}}^{\text{oo}}$  的精确解析式以及  $\theta_{\text{pm}}^{\text{oe}}$ 、 $\theta_{\text{pm}}^{\text{eo}}$  以及  $\theta_{\text{pm}}^{\text{oo}}$  的近似表达式 (确信精度约为  $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ )<sup>[2.7]</sup>。

实现相位匹配和方位角  $\phi$  无关, 即在一个顶角为  $2\theta_{\text{pm}}$  的锥体面上就可以实现。同时, 非线性过程的效率是由  $\theta_{\text{pm}}$  和  $\phi$  决定的。

表 2.1 在单轴晶体中计算相位匹配的方程式

负单轴晶体	正单轴晶体
$\tan^2 \theta_{\text{pm}}^{\text{oe}} = (1 - U)/(W - 1)$	$\tan^2 \theta_{\text{pm}}^{\text{oe}} \approx (1 - U)/(U - S)$
$\tan^2 \theta_{\text{pm}}^{\text{eo}} \approx (1 - U)/(W - R)$	$\tan^2 \theta_{\text{pm}}^{\text{eo}} = (1 - V)/(V - Y)$
$\tan^2 \theta_{\text{pm}}^{\text{oo}} \approx (1 - U)/(W - Q)$	$\tan^2 \theta_{\text{pm}}^{\text{oo}} = (1 - T)/(T - Z)$

注释:

$$\begin{aligned}
 U &= (A + B)^2 / C^2; \quad W = (A + B)^2 / F^2; \quad R = (A + B)^2 / (D + B)^2; \\
 Q &= (A + B)^2 / (A + E)^2; \quad S = (A + B)^2 / (D + E)^2; \quad V = B^2 / (C - A)^2; \\
 Y &= B^2 / E^2; \quad T = A^2 / (C - B)^2; \quad Z = A^2 / D^2; \\
 A &= n_{o1} / \lambda_1; \quad B = n_{o2} / \lambda_2; \quad C = n_{o3} / \lambda_3; \\
 D &= n_{e1} / \lambda_1; \quad E = n_{e2} / \lambda_2; \quad F = n_{e3} / \lambda_3.
 \end{aligned}$$

表 2.1 中的表达式能推广到非共线相位匹配。在这种情况下, 例如相位匹配角  $\theta_{\text{pm}}^{\text{oe}}$ , 是由上面所列方程采用新的系数  $U$  和  $W$  来确定:

$$U = (A^2 + B^2 + 2AB \cos \gamma) / C^2, \quad W = (A^2 + B^2 + 2AB \cos \gamma) / F^2$$

这里  $\gamma$  是波矢  $k_1$  和  $k_2$  间的夹角。

## 2.6 单轴晶体表面光波的反射和折射

在真空-介电体界面处, 必须考虑光波的反射和折射。因此, 我们将给出单轴晶体中的界面处具有不同入射角和不同偏振态的光波入射时的折射角和反射系数的表达式。在所有情况下, 反射角都等于入射角。

(1)  $E$  矢量垂直于主平面,  $\alpha$  是入射角,  $\psi_o$  是折射角[图 2.11(a)];  $\psi_o$  能从下式得到:

$$\sin \alpha = n_o \sin \psi_o \quad (2.32)$$

反射系数为

$$R^\circ = \frac{\sin^2(\alpha - \psi_o)}{\sin^2(\alpha + \psi_o)} \quad (2.33)$$

对于垂直入射( $\alpha = \psi_o = 0$ )

$$R_{\alpha=0}^\circ = \frac{(n_o - 1)^2}{(n_o + 1)^2} \quad (2.34)$$

(2)  $E$  矢量在主平面上,  $\alpha$  是入射角,  $\psi^*$  是折射角[图 2.11(b)、(c)];  $\psi^*$  能从下式得到:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \psi^*} = n^*(\theta) = \frac{n_o [1 + \tan^2(\theta_c \pm \psi^*)]^{1/2}}{[1 + (n_o/n_e)^2 \tan^2(\theta_c \pm \psi^*)]^{1/2}} \quad (2.35)$$

这里  $\theta_c$  是晶体的切角,  $\theta$  是在晶体中光轴  $Z$  和矢量  $k$  之间的夹角。如果矢量  $k$  和光轴  $Z$  位于晶体表面法线的两侧[图 2.11(b)], 在(2.35)式中采用正号; 当矢量  $k$  和光轴  $Z$  位于晶体法线的同一侧[图 2.11(c)], 则采用负号。反射系数为

$$R^* = \frac{\tan^2(\alpha - \psi^*)}{\tan^2(\alpha + \psi^*)} \quad (2.36)$$

对于垂直入射( $\alpha = \psi^* = 0$ )

$$R_{\alpha=0}^* = \frac{[n^*(\theta) - 1]^2}{[n^*(\theta) + 1]^2} \quad (2.37)$$

其中

$$n^*(\theta) = n^*(\theta_c) = n_o \left[ \frac{1 + \tan^2 \theta_c}{1 + (n_o/n_e)^2 \tan^2 \theta_c} \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

注意, 在单轴晶体中入射面和出射面的反射系数是等同的, 与各向同性介电体一样。

这节给出的方程式能用于计算, 在相位匹配条件下角度调谐时需要旋转的

晶体外角，以及用于估计反射损耗。

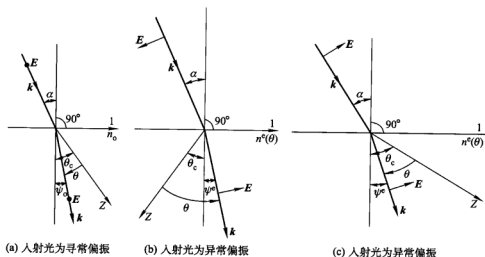


图 2.11 波在单轴晶体表面上的反射和折射

## 2.7 双轴晶体光学

对于双轴晶体来说，其折射率与光的传播方向及其偏振态（折射率面）的关系要比单轴晶体复杂得多。双轴晶体构成的折射率面具有双层结构，两层之间有四个点相接，由此，两根光轴从中穿出<sup>[2,6]</sup>。与单轴晶体相似，平面光波的传播方向由两个角限定：极角  $\theta$  和方位角  $\phi$ 。

注意，在双轴晶中光传播的一般情况下，采用寻常光(o)或异常光(e)的术语已经是没有意义了。我们下面考虑要用的术语是慢(符号s)和快(符号f)光(波)( $n_s > n_f$  和  $v_s < v_f$ )。老术语(o光或e光)的应用只有在双轴晶的主平面里有一定的意义。

为简单起见，我们限定研究范围为光在主平面  $XY$ 、 $YZ$  和  $XZ$  中传播的情况。在这些主平面中，具有相互垂直偏振态的两束光，其折射率与传播方向之间的关系可以用一个椭圆和一个圆来表示[图 2.12(a)、(b)]。在双轴晶体中，我们应该这样来规定介电轴( $X, Y, Z$ )和晶体学轴( $a, b, c$ )之间的关系：对于光轴来说，其方向由椭圆和圆的交点决定，总是位于主平面  $XZ$  中。

考虑两种可能情况中的一种： $n_x < n_y < n_z$ [图 2.12(a)]，这里  $n_x$ 、 $n_y$  和  $n_z$  是主折射率的值。 $V_z$  角是由一根光轴和  $Z$  轴所形成的角，可以从以下表达式求得：

$$\sin V_z = \frac{n_z(n_y^2 - n_x^2)^{1/2}}{n_y(n_z^2 - n_x^2)^{1/2}} \quad (2.39)$$

在  $XZ$  平面中, 两光轴间夹角等于  $2V_z$ 。在  $XY$  面上垂直于这一平面偏振的光, 其折射率是不变的并等于  $n_x$ , 而在这一平面上偏振的光, 其折射率从  $n_y$  变到  $n_x$ , 同时角度  $\phi$  从  $0^\circ$  变到  $90^\circ$ 。因此, 对于双轴晶体, 在  $XY$  面中, 有  $n_x < n_y < n_z$ , 这种情况则类似于负单轴晶体, 且有  $n_o = n_z$  和

$$n^*(\phi) = n_y \frac{(1 + \tan^2 \phi)^{1/2}}{[1 + (n_y/n_x)^2 \tan^2 \phi]^{1/2}} \quad (2.40)$$

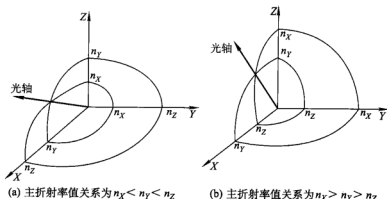


图 2.12 双轴晶体中折射率与传播方向及偏振态(折射率面)的关系图

在  $YZ$  平面中, 垂直于这一平面偏振的光, 其折射率是恒定的并等于  $n_x$ , 而在这一平面上偏振的光, 其折射率从  $n_y$  变到  $n_z$ , 随之, 其  $\theta$  角从  $0^\circ$  变到  $90^\circ$ 。因此, 对于双轴晶体, 在  $YZ$  平面中, 有  $n_x < n_y < n_z$ , 这种情况则类似于正单轴晶体, 且有  $n_o = n_x$  和

$$n^*(\theta) = n_y \frac{(1 + \tan^2 \theta)^{1/2}}{[1 + (n_y/n_z)^2 \tan^2 \theta]^{1/2}} \quad (2.41)$$

我们也可以知道, 在  $XZ$  平面中, 在  $\theta < V_z$  时, 有  $n_x < n_y < n_z$  的双轴晶体与负单轴晶体类似, 而在  $\theta > V_z$  时, 类似于正单轴晶体。

我们可以用类似的方法来考虑  $n_x > n_y > n_z$  的双轴晶体[图 2.12(b)]。这里光轴与  $Z$  轴之间的夹角  $V_z$  可以表达为

$$\cos V_z = \frac{n_x(n_y^2 - n_z^2)^{1/2}}{n_y(n_x^2 - n_z^2)^{1/2}} \quad (2.42)$$

如果光轴之间锐角平分线处折射率和  $n_{\max}$  一致, 则称这种双轴晶体为正光性的; 如果与其  $n_{\min}$  一致, 则称其为负光性的。

要在双轴晶体中估算“走离”角也是可能的, 作为第一近似, 可以采用单轴晶体的(2.21)式; 在非线性双轴晶体中, 沿相位匹配方向准确计算“走

离”角已有文章发表,可参看[2.8]。以上所列的用于单轴晶体的(2.32)——(2.38)式也可以用于计算双轴晶体表面光波的反射和折射,特别是光在主平面的传播;然而,双轴晶体的精确表达式则要复杂得多。

## 2.8 双轴晶体的相位匹配类型

我们可以知道,在双轴晶体中,只能够实现三种普遍类型的相位匹配: ss-f、sf-f 和 fs-f(第三个符号代表较高的频率  $\omega_3$ ); ss-f 的情况我们称之为 I 类相位匹配, sf-f 或 fs-f 的情况称之为 II 类相位匹配。注意,在文献[2.9,10]中,不仅讨论了 I 类和 II 类相位匹配,还引进了 I、II 和 III 类相位匹配(sf-f 类为 II 类, fs-f 类为 III 类),但是按我们的观点来看,这种分类并不十分成功,因为这样就造成了相位匹配类型的不一致。这样分类只有在这些面中关于双轴晶体主轴面的“符号”(负或正)的一致性方面有一定意义。

Hobden<sup>[2.11]</sup>考虑了在双轴晶体中 14 种相位匹配可能的情况, Stepanov 等人<sup>[2.10]</sup>因此将其推广,考虑了 SFG 和 DFG,并发现了共线相位匹配的 30 种情况;在文献[2.9]中,给出了关于双轴晶体相位匹配完整的分类和对于在单轴和双轴非线性晶体中共线相位匹配 72 种可能情况的计算以及方向的轨迹。

在 SHG( $\omega_3 = 2\omega_1$ )的情况下,在双轴晶体的所有主平面中,只可能实现两类共线相位匹配,即

$$n_x(\omega_1) = n_{s1} = n_t(\omega_3) = n_B \quad (2.43)$$

(ss-f 或 I 类相位匹配);

$$n_{s1} + n_B = 2n_B \quad (2.44)$$

(sf-f 或 II 类相位匹配)。

对于不同主平面这些相位匹配类型的不同在于“符号”(正或负相位匹配),以及在单轴晶体情况下,相位匹配与 ooe、oeo、eoo 或 eoo 类型的一致性。对于在  $n_x < n_y < n_z$  情况下,在 XY 平面中,我们有负类型相位匹配(I<sup>(-)</sup>和 II<sup>(-)</sup>),在 YZ 平面中,我们有正类型相位匹配(I<sup>(+)</sup>和 II<sup>(+)</sup>),在 XZ 平面中,当  $\theta < V_z$  时,为负类型,当  $\theta > V_z$  时,为正类型相位匹配。同一波束(慢光或快光)可以是 o 光,也可以是 e 光,取决于其位置及所在坐标空间。对于  $n_x > n_y > n_z$  的情况,也可以用类似的方法来考察相位匹配的类型。

与单轴晶体相似,是否存在这一类相位匹配或另一类相位匹配取决于主折射率值之间的关系(即取决于双折射率)。例如,在  $n_x < n_y < n_z$  的情况下,当

满足以下不等式:  $n_z(\omega_1) < n_y(\omega_3)$  时, 在  $XY$  平面中可实现 I<sup>(-)</sup> 类相位匹配, 更详细的推导可参看文献[2.9—11]。

## 2.9 双轴晶体中相位匹配角的计算

表 2.2 给出了在双轴晶体主平面中相互作用光束共线传播情况下计算相位匹配角  $\theta_{pm}$  或  $\phi_{pm}$  的方程式<sup>[2.12]</sup>。注意, 有一些方程是近似的。

为精确计算相位匹配角, 即  $\theta_{pm}(\phi_{pm})$  的依赖关系, Hobden<sup>[2.11]</sup> 给出了一个普遍方法, Stepanov 等人<sup>[2.10]</sup> 以及 Kashke 和 Koch<sup>[2.13]</sup> 的文章也可以用。考虑普遍化的菲涅耳方程, 我们可以计算具有任意方向  $\theta$ 、 $\phi$  角的慢光(s)和快光(f)的相速度<sup>[2.13]</sup>:

$$v_j^{s,f} = \frac{P_j}{2} \pm \left( \frac{P_j^2}{4} \right)^{1/2} - Q_j \quad (2.45)$$

这里  $j=1, 2, 3$  (记住, 三频率相互作用是  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ ),

$$P_j = s_x^2 v_{jx}^2 + s_x^2 v_{jy}^2 + s_y^2 v_{jx}^2 + s_y^2 v_{jz}^2 + s_z^2 v_{jx}^2 + s_z^2 v_{jy}^2 \quad (2.46)$$

$$Q_j = s_x^2 v_{jy}^2 v_{jz}^2 + s_y^2 v_{jx}^2 v_{jz}^2 + s_z^2 v_{jx}^2 v_{jy}^2 \quad (2.47)$$

$s_{x,y,z}$  是单位波矢量  $k/k$  在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴上的投影:

$$s_x = \cos \theta \cos \phi, \quad s_y = \sin \theta \sin \phi, \quad s_z = \cos \theta \quad (2.48)$$

在(2.45)式中, 符号“正”是对快光的, “负”是对慢光的; 对于共线相位匹配:

$$\frac{1}{v_3} = \frac{1}{v_1^{s,f}} \frac{\omega_1}{\omega_3} + \frac{1}{v_2^{s,f}} \frac{\omega_2}{\omega_3} \quad (2.49)$$

将(2.45)式代入(2.49)式, 就得到了所需的关系式  $\theta_{pm} = \theta_{pm}(\phi_{pm})$  (在一般情况下, 只有数值形式的); 对于这样的计算, 所需知道的只是主折射率值  $n_{jx}$ 、 $n_{jy}$  和  $n_{jz}$ 。

注意, 当  $\omega_1 \neq \omega_2$  时,  $sf-f$  和  $fs-f$  的情况是完全不同的。

可以在文献[2.14]中找到对于共线相位匹配方向更为简单的解析近似方程, 即在 SHG( $\omega_3 = 2\omega_1$ ) 情况下双轴晶体中  $\theta_{pm}(\phi_{pm})$  的关系式, 其精确度在 8% 以内。例如, 对于正双轴晶体的 I 类相位匹配, 下式是成立的<sup>[2.14]</sup>:

$$\sin^2 \theta_{pm} = \frac{1}{K} \left[ \frac{1}{n_{3y}^2} - \frac{1}{n_{1x}^2} + \left( \frac{1}{n_{1x}^2} - \frac{1}{n_{1y}^2} + \frac{1}{n_{3x}^2} - \frac{1}{n_{3y}^2} \right) \sin^2 \phi_{pm} \right] \quad (2.50)$$

这里

$$K = \frac{1}{n_{1z}^2} - \frac{1}{n_{1x}^2} + \left( \frac{1}{n_{1x}^2} - \frac{1}{n_{1y}^2} \right) \sin^2 \phi_{pm} \quad (2.51)$$



表 2.2 双轴晶体中根据主平面中光的传播方向计算相位匹配角的方程

(a)  $n_x < n_y < n_z$

主平面	相互作用类型	方程	注释
1	2	3	4
XY	ooe	$\tan^2 \phi = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{z1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y1}}{\lambda_3}$ ; $F = \frac{n_{z3}}{\lambda_3}$
	eoe	$\tan^2 \phi \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $R = \left( \frac{A+B}{D+B} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z1}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y1}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $F = \frac{n_{z1}}{\lambda_3}$
	oeo	$\tan^2 \phi \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $Q = \left( \frac{A+B}{A+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{z1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y1}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{z1}}{\lambda_2}$ ; $F = \frac{n_{z2}}{\lambda_3}$
	eco	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $S = \left( \frac{A+B}{D+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z1}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y1}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{z1}}{\lambda_1}$ ; $F = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$
YZ	ooo	$\tan^2 \theta = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left( \frac{B}{C-A} \right)^2$ ; $Y = \left( \frac{B}{E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y3}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$
	ooo	$\tan^2 \theta = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left( \frac{A}{C-B} \right)^2$ ; $Z = \left( \frac{A}{D} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y3}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{z1}}{\lambda_1}$
	XZ	$\tan^2 \theta = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y3}}{\lambda_3}$ ; $F = \frac{n_{z2}}{\lambda_3}$
$\theta < V_z$	eoe	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $R = \left( \frac{A+B}{D+B} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z1}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y1}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{z1}}{\lambda_1}$ ; $F = \frac{n_{z2}}{\lambda_3}$
	oeo	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $Q = \left( \frac{A+B}{A+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{y1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{z1}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{y1}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{z1}}{\lambda_2}$ ; $F = \frac{n_{z2}}{\lambda_3}$

主平面	相互作用类型	方程	注释
1	2	3	4
$XZ$	eco	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $S = \left( \frac{A+B}{D+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{11}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{12}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{21}}{\lambda_1}$ ; $E = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$
$\theta > V_z$	ooo	$\tan^2 \theta = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left( \frac{B}{C-A} \right)^2$ ; $Y = \left( \frac{B}{E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{11}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{12}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$
	ooo	$\tan^2 \theta = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left( \frac{A}{C-B} \right)^2$ ; $Z = \left( \frac{A}{D} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{11}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{12}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{21}}{\lambda_1}$

(b)  $n_x > n_y > n_z$ 

主平面	相互作用类型	方程	注释
1	2	3	4
$XY$	eco	$\tan^2 \phi \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $S = \left( \frac{A+B}{D+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{11}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{12}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{21}}{\lambda_1}$ ; $E = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$
	ooo	$\tan^2 \phi = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left( \frac{B}{C-A} \right)^2$ ; $Y = \left( \frac{B}{E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{11}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{12}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$
	ooo	$\tan^2 \phi = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left( \frac{A}{C-B} \right)^2$ ; $Z = \left( \frac{A}{D} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{11}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{22}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{12}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{21}}{\lambda_1}$

主平面	相互作 用类型	方程	注释
1	2	3	4
YZ	oeo	$\tan^2 \theta = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$
	eoe	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $R = \left( \frac{A+B}{D+B} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $F = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$
	oeo	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $Q = \left( \frac{A+B}{A+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$ ; $F = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$
XZ	eoo	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{U-S}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $S = \left( \frac{A+B}{D+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $E = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$
$\theta < V_z$	oeo	$\tan^2 \theta = \frac{1-V}{V-Y}$	$V = \left( \frac{B}{C-A} \right)^2$ ; $Y = \left( \frac{B}{E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$
	eoo	$\tan^2 \theta = \frac{1-T}{T-Z}$	$T = \left( \frac{A}{C-B} \right)^2$ ; $Z = \left( \frac{A}{D} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$
XZ	oeo	$\tan^2 \theta = \frac{1-U}{W-1}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$
$\theta > V_z$	eoe	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-R}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $R = \left( \frac{A+B}{D+B} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $D = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $F = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$
	oeo	$\tan^2 \theta \approx \frac{1-U}{W-Q}$	$U = \left( \frac{A+B}{C} \right)^2$ ; $W = \left( \frac{A+B}{F} \right)^2$ ; $Q = \left( \frac{A+B}{A+E} \right)^2$ ; $A = \frac{n_{x1}}{\lambda_1}$ ; $B = \frac{n_{x2}}{\lambda_2}$ ; $C = \frac{n_{x2}}{\lambda_3}$ ; $E = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$ ; $F = \frac{n_{x3}}{\lambda_3}$

为了得到负双轴晶体中 I 类相位匹配相应的表达式, 必须将(2.50) — (2.51) 式中的下标 1 和 3 作交换。

对于正晶体的 II 类相位匹配, 可以用以下近似表达式<sup>[2.14]</sup>:

$$\left[ \frac{\sin^2 \phi}{n_x^2} + \frac{\cos^2 \phi}{n_y^2} \right]^{-1/2} \approx n_y \left[ 1 - (n_y - n_x) \frac{\sin^2 \phi}{n_x} \right] \quad (2.52)$$

这样, 我们有

$$\sin^2 \theta_{pm} = K^{-1} \{ [2n_{3Y} - n_{1Y} + (2n_{3X} - n_{1X} - 2n_{3Y} + n_{1Y}) \sin^2 \phi_{pm}]^{-2} - n_{1X}^{-2} + (n_{1X}^{-2} - n_{1Y}^{-2}) \sin^2 \phi_{pm} \} \quad (2.53)$$

对于负晶体的 II 类相位匹配, 可以得到

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[ \frac{1}{n_{1Z}^2} - \frac{\cos^2 \phi_{pm}}{n_{1X}^2} - \frac{\sin^2 \phi_{pm}}{n_{1Y}^2} \right] + \frac{\cos^2 \phi_{pm}}{n_{1X}^2} + \frac{\sin^2 \phi_{pm}}{n_{1Y}^2} \right\}^{-1/2} + \left[ \frac{\sin^2 \phi_{pm}}{n_{1X}^2} + \frac{\cos^2 \phi_{pm}}{n_{1Y}^2} \right]^{-1/2} \\ & = 2 \left\{ \left[ \frac{1}{n_{3Z}^2} - \frac{\cos^2 \phi_{pm}}{n_{3X}^2} - \frac{\sin^2 \phi_{pm}}{n_{3Y}^2} \right] \sin^2 \theta_{pm} + \frac{\cos^2 \phi_{pm}}{n_{3X}^2} + \frac{\sin^2 \phi_{pm}}{n_{3Y}^2} \right\}^{-1/2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

## 2.10 晶体对称性和有效非线性: 单轴晶体

对于各向异性介质, (2.2) 式中的介电极化系数  $\kappa_0$  和  $\chi^{(2)}$  在一般情况下分别为二阶和三阶张量。在后面我们将考虑单轴晶体的情况。在介电参考系  $X, Y, Z$  中,  $Z$  是光轴,  $\kappa_0$  和  $\varepsilon_0$  张量是对称的。

以下分量

$$\varepsilon_{0XX} = \varepsilon_{0YY} = n_o^2, \quad \varepsilon_{0ZZ} = n_e^2 \quad (2.55)$$

是线性介电极化张量  $\varepsilon_0$  中的非零分量。在实际中, 用张量  $d_{ijk}$  来代替张量  $\chi_{ijk}$ , 这两种张量可由以下关系式来联系:

$$\chi_{ijk} = 2d_{ijk} \quad (2.56)$$

不像张量  $\varepsilon_0$ 、张量  $\chi$  和  $d$  只能用三维的图像来表示。通常采用  $d_{il}$  形式的“平面”图像来表示张量  $d_{ijk}$ , 这里  $i=1$  相应于  $(X)$ ,  $i=2$  相应于  $(Y)$ ,  $i=3$  相应于  $(Z)$ ,  $l$  取以下值:

$$\begin{array}{cccccc} XX & YY & ZZ & YZ = ZY & XZ = ZX & XY = YX \\ l = & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \quad (2.57)$$

表达式(2.2)可以写成简化的形式(就分量而论):

$$P_i = \kappa_{0ik} E_k + 2d_{il} E_l^2 + \dots \quad (2.58)$$

这里  $E_l^2$  是一个场积分六维的矢量(对于重复指数进行累加)。对于 SHG, 我们有以下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_y E_z \\ 2E_x E_z \\ 2E_x E_y \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

二阶非线性张量  $d_{ij}$  的分量总数为 18 个。在中心对称晶体中 (在这里中心是一个对称元素), 二阶非线性张量  $d$  的所有分量均等于零。在 32 个结晶学点群中包含着 21 个非中心对称的晶体种类, 通常在其中具有一个或更多的对称元素 (不同阶的轴或平面), 这会显著减少张量  $d_{ij}$  的独立分量数目。

Kleinman<sup>[2.15]</sup> 为非色散电子非线性极化率的情况设定了附加的对称条件。当满足 Kleinman 对称条件时 (绝大多数实际情况是这样的), 张量  $d_{ij}$  的独立分量数目从 18 减少到 10 个, 因为

$$\begin{aligned} d_{21} &= d_{16}, \quad d_{24} = d_{32}, \quad d_{31} = d_{15} \\ d_{13} &= d_{35}, \quad d_{12} = d_{26}, \quad d_{32} = d_{24} \\ d_{14} &= d_{36} = d_{25} \end{aligned} \quad (2.60)$$

因为, 在单轴晶体中, 任何线性极化波都能表达为具有“寻常”或“异常”偏振的两束波, 我们给出一个单位极化矢量  $\mathbf{p}$ , 是由沿介电轴  $X, Y, Z$  的极坐标  $\theta$  和  $\phi$  给定的, 这里  $Z$  是光轴并且  $|\mathbf{p}| = 1$ :

$$\begin{aligned} p_{ox} &= -\sin \phi, \quad p_x^* = \cos \theta \cos \phi \\ p_{oy} &= \cos \phi, \quad p_y^* = \cos \theta \sin \phi \\ p_{oz} &= 0, \quad p_z^* = -\sin \theta \end{aligned} \quad (2.61)$$

利用有效非线性  $d_{\text{eff}}$  来计算转换效率的方程, 这包括了沿相互作用光波的极化方向所有的求和操作:

$$d_{\text{eff}} = \mathbf{p}_1 d \mathbf{p}_3 \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_2 d \mathbf{p}_3 \mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_3 d \mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2 \quad (2.62)$$

$d_{\text{eff}}$  的值代表了在 (2.62) 式中第一个矢量和  $d\mathbf{p}\mathbf{p}$  类的张量-矢量积的标量积, 这也是一个矢量。依据作用的类型 (ooe, oee 等), 矢量分量  $p_i$  由 (2.61) 式来计算, 积 (2.62) 式由熟悉的矢量代数规则来得到。表 2.3 列举了以这种方式所确定的 13 个点群非线性单轴晶体的  $d_{\text{eff}}$  的值<sup>[2.3,16]</sup>。

表 2.3 当 Kleinman 对称关系成立时不同点群单轴晶体的  $d_{\text{eff}}$  表达式

点群	相互作用类型	
	ooe, oeo, eoo	eeo, eoe, oee
42m ( $D_{2d}$ )	$d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$	$d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$
3m ( $C_{3v}$ )	$d_{31} \sin \theta - d_{32} \cos \theta \sin 3\phi$	$d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$

点群	相互作用类型	
	oeo, oeo, eoo	eeo, eoe, oee
$\left. \begin{array}{l} 4(C_4) \\ 4mm(C_{4v}) \\ 6(C_6) \\ 6mm(C_{6v}) \end{array} \right\}$	$d_{31} \sin \theta$	0
$\bar{4}(S_4)$	$(d_{36} \sin 2\phi + d_{31} \cos 2\phi) \sin \theta$	$(d_{36} \cos 2\phi - d_{31} \sin 2\phi) \sin 2\theta$
$3(C_3)$	$(d_{11} \cos 3\phi - d_{22} \sin 3\phi) \cos \theta +$ $d_{31} \sin \theta$	$(d_{11} \sin 3\phi + d_{22} \cos 3\phi) \cos^2 \theta$
$32(D_3)$	$d_{11} \cos \theta \cos 3\phi$	$d_{11} \cos^3 \theta \sin 3\phi$
$\bar{6}(C_{3h})$	$(d_{11} \cos 3\phi - d_{22} \sin 3\phi) \cos \theta$	$(d_{11} \sin 3\phi + d_{22} \cos 3\phi) \cos^2 \theta$
$\bar{6}m2(D_{3h})$	$d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$	$d_{22} \cos^3 \theta \cos 3\phi$
$422(D_4)$	0	0
$622(D_6)$	0	0

由于包含了双折射或“走离”角(图 2.6),造成了对于非线性耦合系数(见下面)和有效非线性表达式的不同。尽管定义了角  $\theta$  为光轴  $Z$  和传播方向  $z$  之间的夹角,而单位极化矢量  $p_i$  是垂直于能量  $s$  的传播方向的。所以必须校正由(2.61)式给出的单位极化矢量  $p$  分量的表达式。符号双折射率角  $\rho$  在这个表达式中将依赖于“走离”方向。 $\rho$  即在单轴晶体的情况下,取决于晶体的符号(图 2.6):对于负光性晶体,角必须加上  $\theta$ ,对于正光性晶体,必须从中减去  $\theta$ 。这样,在(2.61)式中,角  $\theta$  必须改为:对负晶体为  $(\theta + \rho)$ ,对正晶体为  $(\theta - \rho)$ 。记住对于单轴晶体来说  $\rho$  的值是角  $\theta$  的函数[(2.21)式]。还必须考虑  $\rho$  的色散。所以在(2.61)式中,我们要用  $\theta \pm \rho(\omega, 2\omega)$  来取代  $\theta$ ,而在  $d_{eff}$  的表达式(表 2.3)中也应该作相应的改变。

## 2.11 晶体对称性和有效非线性:双轴晶体

在介电参考系  $X, Y, Z$  中,一个双轴晶体的张量  $\varepsilon_0$  的非零分量等于

$$\varepsilon_{0xx} = n_x^2, \varepsilon_{0yy} = n_y^2, \varepsilon_{0zz} = n_z^2 \quad (2.63)$$

在双轴晶体中,光学折射率面是一个以  $n_x$ 、 $n_y$  和  $n_z$  为三个不同半轴的三轴椭球体:

$$\frac{X^2}{n_x^2} + \frac{Y^2}{n_y^2} + \frac{Z^2}{n_z^2} = 1 \quad (2.64)$$

为了得到慢光(s)和快光(f)波的极化矢量方向, 必须要定义垂直于光线传播方向的这个椭球的椭圆截面轴的方向<sup>[2.17,18]</sup>。单位极化矢量  $\mathbf{p}$  的分量(称为方向余弦)方程取以下形式:

$$\begin{aligned} p_x^s &= \cos \theta \cos \phi \cos \delta - \sin \phi \sin \delta \\ p_y^s &= \cos \theta \cos \phi \cos \delta + \cos \phi \sin \delta \\ p_z^s &= -\sin \theta \cos \delta \\ p_x^f &= -\cos \theta \cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \\ p_y^f &= -\cos \theta \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \\ p_z^f &= -\sin \theta \sin \delta \end{aligned} \quad (2.65)$$

在这里角  $\delta$  可以从下式得到:

$$\cot \delta = \frac{\cot^2 V_z \sin^2 \theta + \sin^2 \phi - \cos^2 \theta \cos^2 \phi}{\cos \theta \sin 2\phi} \quad (2.66)$$

对于  $n_x < n_y < n_z$ , 角  $\delta$  限定在  $0 < \delta < \pi/2$  范围内, 对于  $n_x > n_y > n_z$ , 则限定在  $-\pi/2 < \delta < 0$ 。注意引入角  $\delta$  的原因只是为了方便<sup>[2.17-23]</sup>。三个角:  $\theta$ 、 $\phi$  和  $\delta$  确定了在双轴晶体中慢光和快光的极化矢量方向。

让我们来考虑, 在  $mm2$  点群对于  $d_{\text{eff}}$  公式的推导,  $mm2$  是双轴晶体中分布最广的晶类。在晶体学直角坐标系( $a, b, c$ )中, 对于这类晶体二次极化张量  $d_{ijk}$  的非零分量来说, 在一般情况下具有下列形式<sup>[2.24]</sup>:

$$\begin{aligned} d_{caa} &= d_{31}, \quad d_{cbb} = d_{32}, \quad d_{ccc} = d_{33} \\ d_{aac} &= d_{15}, \quad d_{bbc} = d_{24} \end{aligned} \quad (2.67)$$

如果 Kleinman 对称关系<sup>[2.15]</sup>成立, 在  $d_{ijk}$  张量中所有的下标能够交换序列, 这样有  $d_{15} = d_{31}$  以及  $d_{24} = d_{32}$ 。

在表 2.4 中, 给出了在介电坐标系( $X, Y, Z$ )中  $d_{ijk}$  的分量, 并给出了相应于介电( $X, Y, Z$ )和结晶学( $a, b, c$ )参考系之间不同的变换。

表 2.4 对应于介电和晶体学参考系的变换在介电坐标系中的  $d_{ijk}$  张量的分量

$N$	变换	$d_{caa} = d_{31}$	$d_{cbb} = d_{32}$	$d_{ccc} = d_{33}$	$d_{aac} = d_{15}$	$d_{bbc} = d_{24}$
1	$X, Y, Z \rightarrow a, b, c$	$d_{xxx}$	$d_{zyy}$	$d_{zzz}$	$d_{xxz}$	$d_{yyz}$
2	$X, Y, Z \rightarrow b, a, c$	$d_{zyy}$	$d_{xxx}$	$d_{zzz}$	$d_{yyz}$	$d_{xxz}$
3	$X, Y, Z \rightarrow a, c, b$	$d_{yxk}$	$d_{yzz}$	$d_{yyy}$	$d_{xxy}$	$d_{zzy}$
4	$X, Y, Z \rightarrow b, c, a$	$d_{yzz}$	$d_{yxk}$	$d_{yyy}$	$d_{zzy}$	$d_{xxy}$
5	$X, Y, Z \rightarrow c, b, a$	$d_{xzz}$	$d_{xyy}$	$d_{xxx}$	$d_{zzx}$	$d_{yyx}$
6	$X, Y, Z \rightarrow c, a, b$	$d_{xyy}$	$d_{xzz}$	$d_{xxx}$	$d_{yyx}$	$d_{zzx}$

从表 2.4 中将  $d_{ijk}$  和(2.65)式中的矢量  $\mathbf{p}$  的分量代入(2.62)式,  $d_{\text{eff}}$  的完全表达式为

$$d_{\text{eff}} = \sum_i p_i \sum_j \sum_k d_{ijk} p_j p_k \quad (2.68)$$

对于 mm2 点群的双轴晶体，我们要在  $(X, Y, Z)$  和  $(a, b, c)$  坐标系的不同变换情况下得到  $d_{\text{eff}}$  的值，见表 2.5<sup>[2.22]</sup>，在这里

$$\begin{aligned} A &= \sin \theta, \quad B = \cos \theta, \quad C = \sin \phi \\ D &= \cos \phi, \quad E = \sin \delta, \quad H = \cos \delta \end{aligned} \quad (2.69)$$

在两个坐标系  $(X, Y, Z)$  和  $(a, b, c)$  相一致的特殊情况下，Lavrovskaya 等人<sup>[2.1]</sup>首先获得了  $d_{\text{eff}}^{af-i}$  和  $d_{\text{eff}}^{as-i}$  的准确表达式。注意，早一些时间所发表的相应表达式<sup>[2.17-19]</sup>是不正确的。在 [2.22] 中，可以找到在 6 种不同坐标系的变换中 mm2 点群双轴晶体的一般表达式，对于  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$  的特殊情况下的表达式，在下面以开放的形式给出：

$$\begin{aligned} d_{\text{eff}}^{as-i} &= (d_{32} - d_{31}) \cos \theta \sin \theta \sin 2\phi \cos \delta \sin^2 \delta \\ &+ (d_{15} - d_{24}) \cos \theta \sin \theta \sin 2\phi \cos \delta \cos 2\delta \\ &+ (d_{32} \cos^2 \phi + d_{31} \sin^2 \phi) \sin \theta \sin^3 \delta \\ &+ (d_{32} \sin^2 \phi + d_{31} \cos^2 \phi) \cos^2 \theta \sin \theta \cos^2 \delta \sin \delta \\ &- 2(d_{24} \cos^2 \phi + d_{15} \sin^2 \phi) \sin \theta \cos^2 \delta \sin \delta \\ &+ 2(d_{24} \sin^2 \phi + d_{15} \cos^2 \phi) \cos^2 \theta \sin \theta \cos^2 \delta \sin \delta \\ &+ d_{33} \sin^3 \theta \cos^2 \delta \sin \delta \end{aligned} \quad (2.70)$$

$$\begin{aligned} d_{\text{eff}}^{af-i} &= (d_{32} - d_{31}) \cos \theta \sin \theta \cos \phi \sin \phi \sin \delta \cos 2\delta \\ &+ (d_{24} - d_{15}) \cos \theta \sin \theta \cos \phi \sin \phi \sin \delta (4 \cos^2 \delta - 1) \\ &- (d_{31} \cos^2 \phi + d_{32} \sin^2 \phi) \cos^2 \theta \sin \theta \cos \delta \sin^2 \delta \\ &+ (d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi) \sin \theta \cos \delta \sin^2 \delta \\ &- 2(d_{15} \cos^2 \phi + d_{24} \sin^2 \phi) \cos^2 \theta \sin \theta \cos \delta \sin^2 \delta \\ &- (d_{15} \sin^2 \phi + d_{24} \cos^2 \phi) \sin \theta \cos \delta \cos 2\delta \\ &- d_{33} \sin^3 \theta \cos \delta \sin^2 \delta \end{aligned} \quad (2.71)$$

表 2.5 mm2 点群双轴晶体在介电和结晶学坐标系之间不同变换的有效非线性

变换	$d_{\text{eff}}^{af-i}$ (I 类)	$d_{\text{eff}}^{af-i}$ (II 类)
$X, Y, Z \rightarrow a, b, c$	$2d_{15}AH(BDH - CE)(BDE + CH)$ $+ 2d_{24}AH(BCE - DH)(BCH + DE)$ $+ d_{31}AE(BDH - CE)^2$ $+ d_{32}AE(BCH + DE)^2$ $+ d_{33}A^3H^2E$	$-d_{15}[AH(BDE + CH)^2]$ $+ AE(BDH - CE)(BDE + CH)$ $- d_{24}[AH(BCE - DH)^2]$ $+ AE(BCE - DH)(BCH + DE)$ $- d_{31}AE(BDH - CE)(BDE + CH)$ $- d_{32}AE(BCE - DH)(BCH + DE)$ $- d_{33}A^3E^2H$



变换	$d_{\text{eff}}^{u-I}$ (I类)	$d_{\text{eff}}^{u-I}$ (II类)
$X, Y, Z \rightarrow b, a, c$	$2d_{15}AH(BCE - DH)(BCH + DE)$ $+ 2d_{24}AH(BDH - CE)(BDE + CH)$ $+ d_{31}AE(BCH + DE)^2$ $+ d_{32}AE(BDH - CE)^2$ $+ d_{33}A^3H^2E$	$-d_{15}[AH(BCE - DH)^2$ $+ AE(BCE - DH)(BCH + DE)]$ $-d_{24}[AH(BDE + CH)^2$ $+ AE(BDH - CE)(BDE + CH)]$ $-d_{31}AE(BCE - DH)(BCH + DE)$ $-d_{32}AE(BDH - CE)(BDE + CH)$ $-d_{33}A^3E^2H$
$X, Y, Z \rightarrow a, c, b$	$2d_{15}AH(BDH - CE)(BDE + CH)$ $- 2d_{24}A^2EH(BCH + DE)$ $- d_{31}(BCE - DH)(BDH - CE)^2$ $- d_{32}A^2H^2(BCE - DH)$ $- d_{33}(BCE - DH)(BCH + DE)^2$	$d_{15}[(BCH + DE)(BDE + CH)^2$ $+ (BCE - DH)(BDH - CE)(BDE + CH)]$ $+ d_{24}[A^2EH(BCE - DH)$ $+ A^2E^2(BCH + DE)]$ $+ d_{31}(BCE - DH)(BDH - CE)(BDE + CH)$ $+ d_{32}A^2EH(BCE - DH)$ $+ d_{33}(BCE - DH)^2(BCH + DE)$
$X, Y, Z \rightarrow b, c, a$	$-2d_{15}A^2EH(BCH + DE)$ $+ 2d_{24}AH(BDH - CE)(BDE + CH)$ $- d_{31}A^2H^2(BCE - DH)$ $- d_{32}(BCE - DH)(BDH - CE)^2$ $- d_{33}(BCE - DH)(BCH + DE)^2$	$d_{15}[A^2EH(BCE - DH)$ $+ A^2E^2(BCH + DE)]$ $+ d_{24}[(BCH + DE)(BDE + CH)^2$ $+ (BCE - DH)(BDH - CE)(BDE + CH)]$ $+ d_{31}A^2EH(BCE - DH)$ $+ d_{32}(BCE - DH)(BDH - CE)(BDE + CH)$ $+ d_{33}(BCE - DH)^2(BCH + DE)$
$X, Y, Z \rightarrow c, b, a$	$-2d_{15}A^2EH(BDH - CE)$ $- 2d_{24}(BCE - DH)$ $\times (BDH - CE)(BCH + DE)$ $- d_{31}A^2H^2(BDE + CH)$ $- d_{32}(BCH + DE)^2(BDE + CH)$ $- d_{33}(BDH - CE)^2(BDE + CH)$	$d_{15}[A^2E^2(BDH - CE) + A^2EH(BDE + CH)]$ $+ d_{24}[(BCE - DH)^2(BDH - CE)$ $+ (BCE - DH)(BCH + DE)(BDE + CH)]$ $+ d_{31}A^2EH(BDE + CH)$ $+ d_{32}(BCE - DH)(BCH + DE)(BDE + CH)$ $+ d_{33}(BDH - CE)(BDE + CH)^2$
$X, Y, Z \rightarrow c, a, b$	$-2d_{15}(BCE - DH)$ $\times (BDH - CE)(BCH + DE)$ $- 2d_{24}A^2EH(BDH - CE)$ $- d_{31}(BCH + DE)^2(BDE + CH)$ $- d_{32}A^2H^2(BDE + CH)$ $- d_{33}(BDH - CE)^2(BDE + CH)$	$d_{15}[(BCE - DH)^2(BDH - CE)$ $+ (BCE - DH)(BCH + DE)(BDE + CH)]$ $+ d_{24}[A^2E^2(BDH - CE) + A^2EH(BDE + CH)]$ $+ d_{31}(BCE - DH)(BCH + DE)(BDE + CH)$ $+ d_{32}A^2EH(BDE + CH)$ $+ d_{33}(BDH - CE)(BDE + CH)^*$

\* 译者注: 原文有误, 漏了两个加号。

正如上面已经提到的,同时存在非零的  $d_{\text{eff}}$  值和相位匹配方向  $(\theta_{\text{pm}}, \phi_{\text{pm}})$  是有效的三波相互作用的必要和充分条件。应该强调的是:当  $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\delta$  和  $d_{\text{eff}}$  一起变化时,其他三波相互作用的参数,例如角度带宽、热(温度)带宽和光谱带宽、各向异性(“走离”)角等也发生变化。因此,在一般情况下,  $d_{\text{eff}}$  的极大值并不对应于相互作用的最高效率。

从实用的观点来看,在一些特殊情况下的  $d_{\text{eff}}$  计算是有重要意义的,如双轴晶体主平面(XY, YZ, ZX; 在 ZX 平面中,两种不同情况:  $\theta < V_z$  和  $\theta > V_z$  应该区分)中光的传播。相应的表达式可以从表 2.5 中利用角  $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\delta$  的值以及从表 2.6 中主平面中光传播的系数 A、B、C、D、E、H 来推导。

表 2.6 光在 mm2 点群双轴晶体主平面传播情况下从表 2.5 获得的角及系数的意义

角和系数	主平面			
	XY	YZ	XZ	
			$\theta < V_z$	$\theta > V_z$
$\theta$	$\pi/2$	$\theta$	$\theta$	$\theta$
A	1	$\sin \theta$	$\sin \theta$	$\sin \theta$
B	0	$\cos \theta$	$\cos \theta$	$\cos \theta$
$\phi$	$\phi$	$\pi/2$	0	0
C	$\sin \phi$	1	0	0
D	$\cos \phi$	0	1	1
$n_x < n_y < n_z$				
$\delta$	0	0	$\pi/2$	0
E	0	0	1	0
H	1	1	0	1
$n_x > n_y > n_z$				
$\delta$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
E	-1	-1	0	-1
H	0	0	1	0

应该注意的是当计算  $\delta$  角的主平面值时,必须要正确地评价由(2.66)式引起的不确定形式,每次都要考虑  $\delta$  角的定义范围。

主平面的“符号”(负或正)确定“s、f”和“o、e”指数之间的变换。例如,对于在 ZX 平面中  $n_x < n_y < n_z$  的情况,在  $\theta < V_z$  时寻常光相应于慢光,在  $\theta > V_z$  时则相应于快光[图 2.12(a)];对于  $n_x > n_y > n_z$ , 情况是正性的[图 2.12(b)]。表 2.7 和表 2.8 列出了相互作用的可能类型,而表 2.9 和表 2.10 包含了在主平面光传播各种情况中  $d_{\text{eff}}$  的计算表达式。要想利用这些表格,(记住它们相应于 mm2 点群的双轴晶体!)应该首先确定坐标系(X, Y, Z)和(a, b, c)之间的变换。然后对给定的变换采用表 2.5 中的数据,就可以确定 ss-f 作用或 sf-f 作用的  $d_{\text{eff}}$  的表达式。对

于这些表达式的具体化就需要利用(2.69)式代入系数 $A$ 、 $B$ 等。注意 $\theta$ 和 $\phi$ 角确定了在双轴晶体中光波的三波相位匹配共线相互作用的方向,而 $\delta$ 角则是由 $\theta$ 、 $\phi$ 角的给定值从(2.66)式中推导出来的,并要考虑 $\delta$ 角的定义范围。在主平面中光传播的情况中,应该应用表2.7—2.10。首先利用表2.7、表2.8对处理不同的坐标系之间的变换以及处理折射率的主值之间的关系、确定可能的相匹配类型,接着从表2.9,表2.10能找到 $d_{\text{eff}}$ 的表达式。

表 2.7  $mm2$  点群双轴晶体( $n_x < n_y < n_z$ )中主平面上可能存在的相位匹配类型

变换	主平面			
	XY	YZ	XZ	
			$\theta < V_z$	$\theta > V_z$
$X, Y, Z \rightarrow a, b, c$	$\Pi^{(-)}$	$\Pi^{(+)}$	$I^{(-)}$	$\Pi^{(+)}$
或 $\rightarrow b, a, c$	oe-e, eo-e	oe-o, eo-o	oo-e	oe-o, eo-o
$X, Y, Z \rightarrow a, c, b$	$I^{(-)}$	$\Pi^{(+)}$	$\Pi^{(-)}$	$I^{(+)}$
或 $\rightarrow b, c, a$	oo-e	oe-o, eo-o	oe-e, eo-e	ee-o
$X, Y, Z \rightarrow c, b, a$	$I^{(-)}$	$I^{(+)}$	$I^{(-)}$	$\Pi^{(+)}$
或 $\rightarrow c, a, b$	oo-e	ee-o	oo-e	oe-o, eo-o

表 2.8  $mm2$  点群双轴晶体( $n_x > n_y > n_z$ )中主平面上可能存在的相位匹配类型

变换	主平面			
	XY	YZ	XZ	
			$\theta < V_z$	$\theta > V_z$
$X, Y, Z \rightarrow a, b, c$	$I^{(+)}$	$I^{(-)}$	$\Pi^{(+)}$	$I^{(-)}$
或 $\rightarrow b, a, c$	ee-o	oo-e	oe-o, eo-o	oo-e
$X, Y, Z \rightarrow a, c, b$	$\Pi^{(+)}$	$I^{(-)}$	$I^{(+)}$	$\Pi^{(-)}$
或 $\rightarrow b, c, a$	oe-o, eo-o	oo-e	ee-o	oe-e, eo-e
$X, Y, Z \rightarrow c, b, a$	$\Pi^{(+)}$	$\Pi^{(-)}$	$\Pi^{(+)}$	$I^{(-)}$
或 $\rightarrow c, a, b$	oe-o, eo-o	oe-e, eo-e	oe-o, eo-o	oo-e

表 2.9  $mm2$  点群双轴晶体( $n_x < n_y < n_z$ )中主平面上 $d_{\text{eff}}$ 的表达式

变换	平面	$d_{\text{eff}}^{u-i}$ (I类)	$d_{\text{eff}}^{u-i}$ (II类)
$X, Y, Z \rightarrow a, b, c$	XY	0	$d_{13} \sin^2 \phi + d_{24} \cos^2 \phi$
	YZ	0	$d_{13} \sin \theta$
	XZ, $\theta < V_z$	$d_{32} \sin \theta$	0
	XZ, $\theta > V_z$	0	$d_{24} \sin \theta$
$X, Y, Z \rightarrow b, a, c$	XY	0	$d_{24} \sin^2 \phi + d_{13} \cos^2 \phi$

续表

变换	平面	$d_{\text{eff}}^{u-f}$ (I 类)	$d_{\text{eff}}^{u-f}$ (II 类)
$X, Y, Z \rightarrow a, c, b$	$YZ$	0	$d_{24} \sin \theta$
	$XZ, \theta < V_z$	$d_{31} \sin \theta$	0
	$XZ, \theta > V_z$	0	$d_{15} \sin \theta$
	$XY$	$d_{32} \cos \phi$	0
	$YZ$	0	$d_{15} \cos \theta$
	$XZ, \theta < V_z$	0	$d_{24} \sin^2 \theta + d_{15} \cos^2 \theta$
$X, Y, Z \rightarrow b, c, a$	$XZ, \theta > V_z$	$d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$	0
	$XY$	$d_{31} \cos \phi$	0
	$YZ$	0	$d_{24} \cos \theta$
	$XZ, \theta < V_z$	0	$d_{15} \sin^2 \theta + d_{24} \cos^2 \theta$
	$XZ, \theta > V_z$	$d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$	0
	$XY$	$d_{31} \sin \phi$	0
$X, Y, Z \rightarrow c, b, a$	$YZ$	$d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$	0
	$XZ, \theta < V_z$	$d_{32} \cos \theta$	0
	$XZ, \theta > V_z$	0	$d_{24} \cos \theta$
$X, Y, Z \rightarrow c, a, b$	$XY$	$d_{32} \sin \phi$	0
	$YZ$	$d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$	0
	$XZ, \theta < V_z$	$d_{31} \cos \theta$	0
	$XZ, \theta > V_z$	0	$d_{15} \cos \theta$

表 2.10  $\text{mm}2$  点群双轴晶体 ( $n_x > n_y > n_z$ ) 中主平面上  $d_{\text{eff}}$  的表达式

变换	平面	$d_{\text{eff}}^{u-f}$ (I 类)	$d_{\text{eff}}^{u-f}$ (II 类)
$X, Y, Z \rightarrow a, b, c$	$XY$	$d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$	0
	$YZ$	$d_{31} \sin \theta$	0
	$XZ, \theta < V_z$	0	$d_{24} \sin \theta$
	$XZ, \theta > V_z$	$d_{32} \sin \theta$	0
$X, Y, Z \rightarrow b, a, c$	$XY$	$d_{32} \sin^2 \phi + d_{31} \cos^2 \phi$	0
	$YZ$	$d_{32} \sin \theta$	0
	$XZ, \theta < V_z$	0	$d_{15} \sin \theta$
	$XZ, \theta > V_z$	$d_{31} \sin \theta$	0
$X, Y, Z \rightarrow a, c, b$	$XY$	0	$d_{24} \cos \phi$
	$YZ$	$d_{31} \cos \theta$	0
	$XZ, \theta < V_z$	$d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$	0

续表

变换	平面	$d_{\text{eff}}^{u-i}$ (I 类)	$d_{\text{eff}}^{u-i}$ (II 类)
$X, Y, Z \rightarrow b, c, a$	$XZ, \theta > V_Z$	0	$d_{24} \sin^2 \theta + d_{15} \cos^2 \theta$
	$XY$	0	$d_{15} \cos \theta$
	$YZ$	$d_{32} \cos \theta$	0
	$XZ, \theta < V_Z$	$d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$	0
$X, Y, Z \rightarrow c, b, a$	$XZ, \theta > V_Z$	0	$d_{15} \sin^2 \theta + d_{24} \cos^2 \theta$
	$XY$	0	$d_{15} \sin \theta$
	$YZ$	0	$d_{13} \sin^2 \theta + d_{24} \cos^2 \theta$
	$XZ, \theta < V_Z$	0	$d_{24} \cos \theta$
$X, Y, Z \rightarrow c, a, b$	$XZ, \theta > V_Z$	$d_{32} \cos \theta$	0
	$XY$	0	$d_{24} \sin \theta$
	$YZ$	0	$d_{24} \sin^2 \theta + d_{15} \cos^2 \theta$
	$XZ, \theta < V_Z$	0	$d_{15} \cos \theta$
	$XZ, \theta > V_Z$	$d_{31} \cos \theta$	0

以上讨论的关于计算 mm2 点群晶体的方法能够应用于其他非线性双轴晶体和其他点群中去。在 222 点群双轴晶体情况下进行的计算证明, 由于 Kleinman 对称关系成立, 单一的非零分量  $d_{XYZ}$  在两个坐标系间所有可能的变换中都不存在(表 2.11)。

表 2.11 当 Kleinman 对称关系成立时, 222 点群双轴晶体主平面上相位匹配的可能类型和  $d_{\text{eff}}$  的表达式

平面	$n_x < n_y < n_z$	$n_x > n_y > n_z$
$XY$	$d_{14} \sin 2\phi$ , II <sup>(-)</sup> 类	$-d_{14} \sin 2\phi$ , I <sup>(+)</sup> 类
$YZ$	$d_{14} \sin 2\theta$ , I <sup>(+)</sup> 类	$-d_{14} \sin 2\theta$ , II <sup>(-)</sup> 类
$XZ, \theta < V_Z$	$-d_{14} \sin 2\theta$ , II <sup>(-)</sup> 类	$d_{14} \sin 2\theta$ , I <sup>(+)</sup> 类
$XZ, \theta > V_Z$	$-d_{14} \sin 2\theta$ , I <sup>(+)</sup> 类	$d_{14} \sin 2\theta$ , II <sup>(-)</sup> 类

关于点群 2 的双轴晶体, 应该提到的是在文献[2.25]中, 在介电参考系( $X, Y, Z$ )中, 利用在结晶学参考体系( $a, b, c$ )定义的非线性系数推导了 MAP 晶体的有效非线性表达式。在随后其他的工作中(例如参看[2.26—28]), 直接在介电坐标系( $X, Y, Z$ )中确定了  $d$  张量。表 2.12 给出了当 Kleinman 关系成立时, 在介电坐标系中测量非线性系数时, 点群 2 双轴晶体的相位匹配可能的类型及  $d_{\text{eff}}$  的表达式。

光在双轴晶体中传播的  $d_{\text{eff}}$  计算中要包含双折射率(各向异性)是足够复杂的, 我们在这里没有涉及。然而, 作为一级近似, 在(2.65)式中将

( $\theta \pm \rho$ ) 代替  $\theta$  来代入是可能的, 这里取决于晶体的“符号”。通常, 我们有  $\rho \ll \theta_{pm}$ , 但是包含角  $\rho$  对于物理图像的完整性以及提高计算的精度来说是必要的。

总体来说, 由于缺乏统一的术语和统一的非线性光学的相应规则(首先, 对于双轴晶体是这样), 因此, 在文献中导致混淆不清的情况正在增加。在文献[2.29]中, 提出了一些规定和标准, 以及消除在定义非线性张量分量、有效非线性、“走离”角等方面可能产生的随意性。

## 2.12 非线性频率转换效率理论

计算非线性频率转换效率的最基本的方程, 是从 Maxwell 方程引出的波动方程<sup>[2.1-4]</sup>:

$$\nabla \times E(r, t) + \frac{\epsilon_0}{c^2} \frac{\partial^2 E(r, t)}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_{NL}(r, t)}{\partial t^2} \quad (2.72)$$

结合非线性极化率(2.2式)(二次非线性项近似), 我们得到

$$P_{NL}(r, t) = \chi^{(2)} E^2(r, t) \quad (2.73)$$

要有电场  $E(r, t)$  的初始和边界条件。在(2.72)、(2.73)式中,  $r$  是径矢量,  $t$  是时间,  $c$  是光速。

我们设电场  $E$  是三个相互作用波的叠加:

$$E(r, t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 (P_n A_n(r, t) \exp[j(\omega_n t - k_n \cdot r)] + C. C.) \quad (2.74)$$

这里  $A(r, t)$  是复合波振幅;  $\omega_n$  和  $k_n$  分别是频率和波矢量; C. C. 意为“复共轭”。将(2.74)式代入(2.72)式, 并考虑(2.73)式的条件, 并利用慢变振幅法, 给出以下复振幅的主干方程<sup>[2.4]</sup>:

$$\hat{M}_1 A_1 = j\sigma_1 A_3 A_2^* \exp(j\Delta k z) \quad (2.75)$$

$$\hat{M}_2 A_2 = j\sigma_2 A_3 A_1^* \exp(j\Delta k z) \quad (2.76)$$

$$\hat{M}_3 A_3 = j\sigma_3 A_1 A_2 \exp(-j\Delta k z) \quad (2.77)$$

其中算子  $M_n$  有以下形式:

$$\hat{M}_n = \frac{\partial}{\partial z} + \rho \frac{\partial}{\partial x} + \frac{j}{2k_n} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + u_n^{-1} \frac{\partial}{\partial t} + jg_n \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \delta_n + Q_n(A) \quad (2.78)$$

计算是在直角坐标系( $x, y, z$ )中进行的,  $z$  是传播方向(不要与介电轴  $X, Y, Z$  相混淆)。在(2.75)–(2.78)式中,  $\rho_n$  是双折射率(或“走离”)角(异常光线的“走离”假设在  $XZ$  平面中),  $\sigma_n$  是非线性耦合系数,  $u_n$  是群速,  $g_n$  是色散系数,  $\Delta k$  是总的波失配,  $\delta_n$  是线性吸收系数,  $Q_n$  是非线性(通常是双光子)吸收。这样, 就得到了以下方程:

表 2.12 当 Kleinman 对称关系成立, 且非线性系数限定在介电参考系情况下, 点群 2 双轴晶体主平面上相位匹配的可能类型及  $d_{\text{eff}}$  的表达式

平面	$n_x < n_y < n_z$	$n_x > n_y > n_z$
XY	$d_{23} \sin 2\phi$ , II <sup>(-)</sup> 类 $d_{23} \cos \phi$ , I <sup>(-)</sup> 类	$d_{25} \sin 2\phi$ , I <sup>(+)</sup> 类 $d_{23} \cos \phi$ , II <sup>(+)</sup> 类
YZ	$d_{21} \cos \theta$ , II <sup>(+)</sup> 类 $d_{25} \sin 2\theta$ , I <sup>(+)</sup> 类	$d_{21} \cos \theta$ , I <sup>(-)</sup> 类 $d_{25} \sin 2\theta$ , II <sup>(-)</sup> 类
XZ, $\theta < V_z$	$d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \phi + d_{25} \sin 2\theta$ , II <sup>(-)</sup> 类	$d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \phi + d_{25} \sin 2\theta$ , I <sup>(+)</sup> 类
XZ, $\theta > V_z$	$d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \phi + d_{25} \sin 2\theta$ , I <sup>(+)</sup> 类	$d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \phi + d_{25} \sin 2\theta$ , II <sup>(-)</sup> 类

$$\sigma_{1,2} = 4\pi k_{1,2} n_{1,2}^{-2} p_{1,2} dp_{2,1} p_3 \quad (2.79)$$

$$\sigma_3 = 2\pi k_3 n_3^{-2} p_3 dp_1 p_2 \quad (2.80)$$

$$\delta_n = k_n (2n_n^2)^{-1} p_n [\text{Im} \{ \varepsilon_0(\omega_n) \}] p_n \quad (n=1,2,3) \quad (2.81)$$

$$g_n = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right)_{\omega=\omega_n} \quad (2.82)$$

$$u_n = \left( \frac{\partial \omega}{\partial k} \right)_{\omega=\omega_n} = c \left[ \frac{\partial \omega}{\partial (n\omega)} \right]_{\omega=\omega_n} = c \left[ n_n + \omega_n \left( \frac{\partial n}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_n} \right]^{-1} \quad (2.83)$$

在(2.81)式中,  $\text{Im} \{ \varepsilon_0(\omega_n) \}$  是线性电极化率张量的虚部, 与辐射的线性吸收相关。(2.79)–(2.81)式中所写矢量和张量的顺序不要颠倒。最后有

$$\Delta k = \Delta k_L + \Delta k_{\text{tsa}} + \Delta k_{\text{pr}} + \Delta k_{\text{fig}} \quad (2.84)$$

其中  $\Delta k_L$  是线性波失配:

$$\Delta k_L = |\Delta k_L|_z = |k_1 + k_2 - k_3|_z \quad (2.85)$$

$\Delta k_{\text{tsa}}$  是由于在非线性晶体中的热自作用(tsa)造成的失配,  $\Delta k_{\text{fig}}$  是由于在导带中产生自由载流子非线性吸收造成的失配。在热导率方程中出现热失配项, 对于一个静态过程有以下形式:

$$\Delta_r \{ \Delta k_{\text{tsa}}(r, z) \} = -c P_{\text{cr}}^{-1} \sum_{n=1}^3 \delta_n n_n \langle a_n^2(r, t) \rangle \quad (2.86)$$

其中  $\Delta_r$  是拉普拉斯算子, 相关于横坐标  $r = (x, y)$ ;  $P_{\text{cr}}$  是自聚焦的临界功率, 即

$$P_{\text{cr}} = \gamma \lambda_1 [4L(\partial B / \partial T)_{T=T_0}]^{-1} \quad (2.87)$$

其中  $B$  是所谓色散双折射, 对于 SHG,  $B = n_{o1} - n_2^2$ ;  $T$  是温度;  $T_0$  是与相位匹配方向一致的  $z$  轴处(垂直于入射晶体面)的晶体温度;  $\gamma$  是晶体的热导率;  $L$  是晶体长度。实部振幅的均方  $a_n = |A_n|$  等于

$$\langle a_n^2(r, t) \rangle = f \int_{-\infty}^{\infty} a_N^2(r, z, t) dt \quad (2.88)$$

其中  $f$  是激光辐射的脉冲重复频率。

热失配的出现从物理上来说是与非线性晶体(在光束照射截面上)的不均匀辐射加热相关。利用(2.86)式给出的热导率方程结合相关边界条件以及主干方程(2.75)——(2.77)能解出这一问题。晶体中的非线性吸收( $Q_n \neq 0$ )必须予以考虑,不但在主干方程中要考虑,在(2.86)式中关于 $\delta_n$ 的值也要考虑。

对于 SHG( $a_1 = a_2$ )我们有<sup>[2,4]</sup>

$$Q_1 = \beta_{12} a_3^2, \quad Q_2 = 2\beta_{12} a_1^2 + \beta_{22} a_3^2 \quad (2.89)$$

其中 $\beta_{12}$ 和 $\beta_{22}$ 是混合( $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 > E_g$ )和双光子( $2\hbar\omega_3 > E_g$ )非线性吸收( $E_g$ 是禁带的值,即带隙)。注意,对于在极大值(和)频率 $\omega_3$ 处很大的非线性吸收(通常是从光子吸收),以及在频率 $\omega_{1,2}$ 和 $\omega_3$ 处总的(线性和非线性)吸收是不相等的。这可能会造成最终辐射能量的温度关系不对称甚至是滞后的(在相位匹配温度附近)。

光折变(光致折变效应)在一些非线性晶体(铌酸锂一类晶体)中发生,并有辐射诱导的折射率改变。在铌酸锂晶体中以能量密度 $S_3 \geq 200 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的频率为 $\omega_3$ 光连续照射,  $\Delta B = \Delta(n_o - n_e)^* \approx 10^{-3}$ 。对铌酸锂晶体以 $S_3 \leq 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的脉冲光照射,  $\Delta B \approx \beta S_3^{-1/2}$ , 这里 $\beta = 6 \times 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1/2}$ 。在 $\Delta B$ 较小时,  $\Delta k_{pe}$ 的值能由 $\Delta k_L$ 的损耗来补偿,即由相位失配补偿(这在实际中总是可实现的)。记住,光折变可以造成晶体带色、吸收增加及热自作用。

非线性吸收的同时,会有电子从价带向导带跃迁,即产生自由载流子( $\Delta k_{fcg}$ )反过来fcg效应导致双光子吸收:在所有三个频率上的额外吸收(对自由载流子的吸收)造成额外的波失配。波失配 $\Delta k_{fcg}$ 正比于双光子吸收辐射能量密度的平方(即振幅的4次方),一般在频率极大值处:

$$\Delta k_{fcg} = -qa_3^4 \quad (2.90)$$

其中 $q$ 是与非线性吸收参数、自由载流子寿命等相关的一个系数。当使用铌酸锂和铌酸钽钠等晶体时,必须要考虑fcg效应;然后在所有三个频率,对于自由载流子的吸收可以忽略,但是在方程中仍然保持 $\Delta k_{fcg}$ 失配项。

现在,我们应该再次考虑算子 $M_n$ [(2.78)式]。它的第一项(对 $z$ 的求导)描述了在它们的传播和相互作用过程中的振幅改变。第二项(对 $x$ 的求导)描述了晶体各向异性的影响(沿 $x$ 轴寻常光的“走离”)。第三项包含了对横坐标 $x$ 和 $y$ 的二阶微商,相应于衍射效应(线束的衍射传播);第四项(对时间的微商)描述了瞬时调制(脉冲模式),包括了脉冲的群速失配效应。含有对时间二次微商的项相关于脉冲的色散传播效应。 $\delta_n$ 和 $Q_n(A)$ 项分别描述了线性和非线性吸收。

(2.75)——(2.77)式的右边部分描述了波的非线性相互作用。

\* 译者注:原文为“( $n_o - n^*$ )”,应为“( $n_o - n_e$ )”。



根据(2.75)一(2.77)式所进行的 SHG、SFG 和 DFG 换效率的精确计算是非常复杂的, 一般需要采用数值模式。只有在一些非常简单的情况下, 可以允许人们采用解析解来粗略地估算转换效率。为了对转换效率有适当的估价, 必须已知初始(待转变)辐射以及晶体变频器件的参数, 并按照以下的建议来适当选择计算程序。

让我们引入相互作用过程的有效长度:

(1) 孔径长度  $L_a$ :

$$L_a = d_0 / \rho \quad (2.91)$$

其中  $d_0$  是线束的特征口径,  $\rho$  是各向异性(“走离”)角。

(2) 准静态相互作用长度  $L_{qs}$ :

$$L_{qs} = \tau / v \quad (2.92)$$

其中  $\tau$  是辐射的脉冲持续时间,  $v$  是逆群速失配。对于 SHG

$$v = u_1^{-1} - u_3^{-1} \quad (2.93)$$

其中  $u_1$  和  $u_3$  是在相应波长的群速[(2.83)式]。

(3) 衍射长度  $L_{dif}$ :

$$L_{dif} = k d_0^2 \quad (2.94)$$

(4) 色散传播长度  $L_{ds}$ :

$$L_{ds} = \tau^2 / g \quad (2.95)$$

其中  $g$  是色散传播系数[(2.82)式]。还引进了非线性作用长度  $L_{NL}$ :

$$L_{NL} = \frac{1}{\sigma a_0} \quad (2.96)$$

其中  $\sigma$  是非线性耦合系数[(2.79)、(2.80)式],  $a_0$  由下面方程来表达:

$$a_0 = [a_1^2(0) + a_2^2(0) + a_3^2(0)]^{1/2} \quad (2.97)$$

其中  $a_i(0)$  是在晶体入射面处( $z=0$  处)的波振幅。

在非线性转换的数学表达中是否要考虑某一种特定的效应是将晶体长度  $L$  和(2.91)一(2.96)式所表达的相关有效长度  $L_{eff}$  相比较来确定的。如果  $L < L_{eff}$ , 相应的长度可以忽略。例如, 当  $L < L_a$ , 就可以忽略各向异性效应, 而将算子  $\hat{M}_a$  中的第二项等于零; 当  $L < L_{dif}$ , 波束的色散则可以忽略, 如此等等。

注意非线性相互作用长度  $L_{NL}$  的规律。当满足  $L < L_{NL}$  时, 就实现了所谓固定场近似; 例如, 对于 SFG, 这就意味着 SF 场振幅是

$$a_3(z) \ll a_{1,2}(0) \quad (2.98)$$

由(2.75)一(2.77)的非线性方程转为线性方程(相关于实总振幅  $a = |A|$ )。特别是对于 SF 场振幅, 我们有

$$\dot{\hat{M}}_3 = -j\sigma_3 a_1(0) a_2(0) \exp[j(-\Delta kz - \phi_1 - \phi_2)] \quad (2.99)$$

其中  $\phi_{1,2}$  是波相。当  $L \geq L_{NL}$ ，我们必须解精确（非线性）方程。

当  $L < L_{NL}$  和所有  $L_{eff} = \infty$ ，我们有平面波固定场近似。如果有  $L < L_{qs} \ll L_{dis}$ （不等式  $L_{qs} \ll L_{dis}$  总是成立的），就实现了准静态近似；同样，对于  $L < L_{qs}$ ， $L < L_a$  和  $L < L_{diff}$  我们有准平面波近似。在平面波近似和准平面波近似之间很重要的差异在于，在准平面波近似中，必须要考虑相互作用光波的空间（波束）和瞬时（脉冲）强度分布的不均匀性（关于时间对于脉冲或对于整个波束面积作简单积分，见下面）。但是，在这种情况下，不需要考虑“走离”角、衍射、群速失配和色散。

因此，在计算前我们应该：

（1）确定过程中所有有效长度  $L_{eff}$ ，将其与非线性晶体的长度  $L$  进行比较，找出必须要考虑的效应；

（2）计算非线性作用长度  $L_{NL}$ ，将其与晶体长度  $L$  进行比较，确定固定场近似是否使用，或者必须要解精确的非线性方程。

这里是一些实际的例子，其中有相关的建议。

在连续波激光辐射条件下，我们可以忽略群速失配（ $L_{qs} = \infty$ ）和脉冲的色散（ $L_{dis} = \infty$ ）。在实际所用的晶体中  $L \approx 1$  cm，我们可以忽略以下事项：对于直径  $d_0 \approx 1$  cm 的线束的衍射和各向异性；在  $\tau \geq 10^{-9}$  s 时的群速失配；在  $\tau \geq 10^{-12}$  s 的色散；以及在  $2\hbar\omega_3 < E_g$  时的非线性吸收和 feg 效应。光折变在计算时可以忽略，因为  $\Delta k_p$  的值（但不是由于双光折变效应引起的额外吸收）很容易由晶体的额外旋转所补偿（在铌酸锂晶体中，在  $T_0 \geq 170$  °C 时光折变效应完全消失了）。只有在聚焦线束的频率转换中才必须考虑衍射<sup>[2.4,30]</sup>。

如果晶体的长度  $L$  比各个有效长度都小，(2.78) 式中的算子  $\hat{M}_s$  就具有以下形式：

$$\hat{M}_s = \delta_s + \frac{d}{dz} \quad (2.100)$$

在  $L < L_{eff}$  的情况下，所要转换的辐射是瞬态的和空间调制的（脉冲宽  $\tau$ 、线束直径  $d_0$ ），其调制形状为不均匀的（例如高斯光束、高斯脉冲），以下的程序可用于计算并具有良好的精度。

被转换辐射的波束（或脉冲）外形可由台阶型函数（图 2.13）来表示，在每一个台阶内部场的振幅是恒定的。对于每一个台阶，即对于每一个场振幅值，其转换效率可由平面波方程来计算。然后，其结果对于横坐标（或时间）以及线束（或脉冲）的功率（或能量）进行求和（积分），就可以确定所获得的辐射。

如果  $P_0 < P_m$  的条件满足， $P_0$  是在晶体表面入射要转换辐射的平均（或连续）功率，这样热自作用效应可以忽略（就不需要解热导率方程了）。如果反向不等式成立，就必须解主干方程以及热导率方程，两种变换是可能的。在其中一个变换中吸收系数没有色散（ $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ ），因此，热导率方程可以作

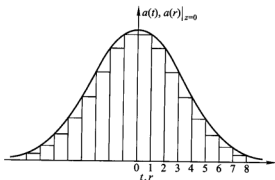


图 2.13 在准静态(脉冲)和无衍射(线束)近似情况下用于计算转换效率的具有台阶型函数的脉冲(线束)近似

为一级近似独立于主干方程求解。如果在这种情况下,晶体和外部介质(恒温器)的热接触是理想的,即在晶体-恒温器界面处没有温度突变,对温度失配我们有

$$\Delta k_{\text{iss}} = \frac{4\pi\gamma}{P_{\text{cr}}} [T(r) - T_0] \quad (2.101)$$

$$T(r) = T(0) - \frac{\delta P_0}{2\pi\gamma} \left[ \ln\left(2 \frac{r^2}{w_0^2}\right) - \text{Ei}\left(-2 \frac{r^2}{w_0^2}\right) + C \right] \quad (2.102)$$

其中  $T(0)$  是线束轴上的温度,  $w_0$  是可变换辐射线束的特征半径,  $C = 0.5772 \dots$

是 Euler - Mascheroni 常数,  $\text{Ei}(x) = \int_{-x}^{\infty} \frac{\exp(y)}{(y)} dy$ , 是指数函数积分<sup>[2.31]</sup>。例

如,对于铌酸锂晶体( $\delta \approx 0.01 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\gamma = 2.6 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), 在  $P_0 \approx 10 \text{ W}$  时,晶体轴和线束边界之间的温度梯度约为  $2 \text{ K}$ ,这已经超过了温度带宽(见下面)。

从(2.101)式计算得到的温度梯度代入主干方程中去,对每一个横坐标值  $r$ ,对于整个表面积作积分可以确定最终辐射的功率。

在第二种变化中,当  $\delta_{1,2} \neq \delta_3$  时,热导方程就不能独立于主干方程去求解,只有用数值方法才能得到解。这一情况类似于在晶体-恒温器界面有一跳跃的情况。

图 2.14 说明了 SHG 转换效率与基波激光辐射平均输入功率  $P_1(0)$  之间的典型依赖关系,所用的是广泛应用的具有典型吸收的 CDA 和 DCDA

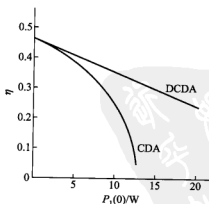


图 2.14 在 3 cm 长的 CDA 和 DCDA 晶体中 SHG 转换效率和激光基波平均功率关系图

$\lambda_1 = 1.06 \mu\text{m}$

晶体。在非线性晶体中降低的损耗是消除热自作用效应的一个基本方法。

## 2.13 波失配和相位匹配带宽

在实际的频率转换器件中,情况与理想情况相去甚远:所要转换的辐射并非平面波,即它是发散的、脉冲的和非单色的,并且晶体器件的温度是不稳定的。因此,在实践中,我们必须计算非线性频率转换器件的以下参数:角度、光谱以及温度带宽,相应于可允许的最大发散、可转换辐射的光谱宽度以及温度的不稳定性。

$\Delta k$  值是晶体温度  $T$ 、相互作用波的频率  $\nu_n$  以及对相位匹配角的偏离  $\delta\theta = \theta - \theta_{pm}$  的函数。在作一级(线性)近似的情况下,对这些参数的关系可以由一阶微商来确定:

$$\Delta k(T, \delta\theta, \nu) \approx \Delta k(0) + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)} \Delta\theta + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \nu} \Delta\nu \quad (2.103)$$

其中  $\Delta k(0)$  是对精确相位匹配[因此  $\Delta k(0) = 0$ ] 的失配,设定两个变量是恒定的,而对于其余的一个变量作偏导。

下面,我们将证明在固定场近似下得到的辐射的功率为原来的一半,如果波失配为

$$\Delta k = 0.886 \frac{\pi}{L} \quad (2.104)$$

这样,就可能来估算角度带宽( $\Delta\theta$ )、温度带宽( $\Delta T$ )和光谱带宽( $\Delta\nu$ ):

$$\Delta\theta = 1.772 \frac{\pi}{L} \left[ \frac{\partial(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)} \right]_{\theta=\theta_{pm}}^{-1} \quad (2.105)$$

$$\Delta T = 1.772 \frac{\pi}{L} \left[ \frac{\partial(\Delta k)}{\partial T} \right]_{T=T_{pm}}^{-1} \quad (2.106)$$

$$\Delta\nu = 1.772 \frac{\pi}{L} \left[ \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \nu} \right]_{\nu=\nu_{pm}}^{-1} \quad (2.107)$$

在(2.105)–(2.107)式中所用的微分取决于折射率的色散以及相位匹配的类型。注意,(2.104)–(2.107)的表达式,在严格意义上来说,只有在固定场近似下才成立,然而不论如何,它们可以成功地应用于数值评价。

表 2.13、表 2.14 包括了用于计算 SHG 和 SFG 内角(晶体内部)带宽( $\Delta\theta$ )的方程。如果其相互作用波的极化方向的认定是以频率增加的顺序排列的时候,用于 SFG 的方程同样可以用于 DFG。

对于  $\theta_{pm} = 90^\circ$  ( $90^\circ$  相位匹配),一级微商  $\partial(\Delta k)/\partial(\delta\theta)$  为零,相应的二阶微商就变得重要了。因此,对于  $90^\circ$  相位匹配,相位匹配内角带宽是

$$\Delta\theta|_{\theta_{pm}=90^\circ} \approx 2 \left[ 0.886 \frac{\pi}{L} \left( \frac{\partial^2(\Delta k)}{\partial(\delta\theta)^2} \right)^{-1} \right]^{1/2} \quad (2.108)$$

表 2.13 不同相互作用类型情况下计算 SHG 内角带宽的方程

作用类型	SHG( $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$ )的内角带宽
oeo	$\Delta\theta = \frac{0.443\lambda_1 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]}{L \tan \theta [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2  n_2^*(\theta) ]}$
oeo, oee	$\Delta\theta = \frac{0.886}{L \tan \theta} \left  \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_2^*(\theta) [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} \right ^{-1}$
eeo	$\Delta\theta = \frac{0.443\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]}{L \tan \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2  n_1^*(\theta) ]}$
eeo, oeo	$\Delta\theta = \frac{0.866\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]}{L \tan \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2  n_1^*(\theta) ]}$

表 2.14 不同相互作用类型情况下计算 SFG 内角带宽的方程

作用类型	SFG( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ )的内角带宽
oeo	$\Delta\theta = \frac{0.886\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \tan^2 \theta]}{L \tan \theta [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2  n_3^*(\theta) ]}$
oeo	$\Delta\theta = \frac{0.886}{L \tan \theta} \left  \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_3^*(\theta) [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \tan^2 \theta]} \right ^{-1}$
oeo	$\Delta\theta = \frac{0.886}{L \tan \theta} \left  \frac{n_2^*(\theta) [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_3^*(\theta) [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \tan^2 \theta]} \right ^{-1}$
eeo	$\Delta\theta = \frac{0.886}{L \tan \theta} \left( \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]} + \frac{n_2^*(\theta) [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} \right)^{-1}$
eeo	$\Delta\theta = \frac{0.886\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]}{L \tan \theta [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2  n_1^*(\theta) ]}$
eeo	$\Delta\theta = \frac{0.886\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]}{L \tan \theta [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2  n_2^*(\theta) ]}$

表 2.15 在所有相互作用类型中 90°相位匹配情况下计算 SHG 内角带宽的方程

作用类型	SHG( $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$ )的内角带宽
oeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.443\lambda_1}{L n_{o2} [1 - (n_{o2}/n_{e2})^2]} \right)^{1/2}$
oeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886}{L} \left  \frac{n_{e1}}{\lambda_1} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e1}}{n_{o1}} \right)^2 \right] - \frac{n_{e2}}{\lambda_2} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e2}}{n_{o2}} \right)^2 \right] \right  \right)^{-1/2}$

作用类型	SHG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 的内角带宽
oeo	
eeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.443\lambda_1}{Ln_{e1} \left  1 - (n_{e1}/n_{o1})^2 \right } \right)^{1/2}$
ooo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886\lambda_1}{Ln_{e1} \left  1 - (n_{e1}/n_{o1})^2 \right } \right)^{1/2}$
oeo	

表 2.16 在所有相互作用类型中 90° 相位匹配情况下计算 SFG 内角带宽的方程

作用类型	SFG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 的内角带宽
oeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886\lambda_3}{Ln_{e3} \left[ 1 - (n_{e3}/n_{o3})^2 \right]} \right)^{1/2}$
oeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886}{L} \left  \frac{n_{e1}}{\lambda_1} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e1}}{n_{o1}} \right)^2 \right] - \frac{n_{e3}}{\lambda_3} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e3}}{n_{o3}} \right)^2 \right] \right ^{-1} \right)^{1/2}$
oeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886}{L} \left  \frac{n_{e2}}{\lambda_2} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e2}}{n_{o2}} \right)^2 \right] - \frac{n_{e3}}{\lambda_3} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e3}}{n_{o3}} \right)^2 \right] \right ^{-1} \right)^{1/2}$
eeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886}{L} \left  \frac{n_{e1}}{\lambda_1} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e1}}{n_{o1}} \right)^2 \right] + \frac{n_{e2}}{\lambda_2} \left[ 1 - \left( \frac{n_{e2}}{n_{o2}} \right)^2 \right] \right ^{-1} \right)^{1/2}$
ooo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886\lambda_1}{Ln_{e1} \left  1 - (n_{e1}/n_{o1})^2 \right } \right)^{1/2}$
oeo	$\Delta\theta = 2 \left( \frac{0.886\lambda_2}{Ln_{e2} \left  1 - (n_{e2}/n_{o2})^2 \right } \right)^{1/2}$

表 2.17 不同相互作用类型情况下计算 SHG 温度带宽的方程

作用类型	SHG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 的内角带宽
oeo	$\Delta T = \frac{0.443\lambda_1}{L} \left  \frac{\partial n_{e1}}{\partial T} - \frac{\partial n_o^*(\theta)}{\partial T} \right ^{-1}$
oeo, oeo	$\Delta T = \frac{0.886\lambda_1}{L} \left  \frac{\partial n_{e1}^*(\theta)}{\partial T} + \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{2\partial n_o^*(\theta)}{\partial T} \right ^{-1}$
eeo	$\Delta T = \frac{0.443\lambda_1}{L} \left  \frac{\partial n_{e1}^*(\theta)}{\partial T} - \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} \right ^{-1}$
ooo, oeo	$\Delta T = \frac{0.886\lambda_1}{L} \left  \frac{\partial n_{e1}^*(\theta)}{\partial T} + \frac{\partial n_{e1}}{\partial T} - \frac{2\partial n_{e2}}{\partial T} \right ^{-1}$

表 2.18 不同相互作用类型情况下计算 SFG 的温度带宽的方程

作用类型	SFG( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ )的内角带宽
ooe	$\Delta T = \frac{0.886}{L} \left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right ^{-1}$
oeo	$\Delta T = \frac{0.886}{L} \left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right ^{-1}$
oeo	$\Delta T = \frac{0.886}{L} \left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right ^{-1}$
eeo	$\Delta T = \frac{0.886}{L} \left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right ^{-1}$
ooo	$\Delta T = \frac{0.886}{L} \left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right ^{-1}$
eeo	$\Delta T = \frac{0.886}{L} \left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right ^{-1}$

表 2.19 不同相互作用类型情况下计算 SHG 光谱带宽的方程

作用类型	SHG( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_2$ )的内角带宽
ooe	$\Delta \nu_1 = \frac{0.443}{\lambda_1 L} \left  \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} \right ^{-1}$
oeo, oee	$\Delta \nu_1 = \frac{0.886}{\lambda_1 L} \left  \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} - 2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} \right ^{-1}$
eeo	$\Delta \nu_1 = \frac{0.443}{\lambda_1 L} \left  \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_{e2}}{\partial \lambda_2} \right ^{-1}$
ooo, oeo	$\Delta \nu_1 = \frac{0.886}{\lambda_1 L} \left  \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{2 \partial n_{e2}}{\partial \lambda_2} \right ^{-1}$

对于 90°相位匹配,SHG 和 SFG 的相位匹配带宽可以用表 2.15、表 2.16 给出的方程计算。相位匹配的温度和光谱带宽可以由表 2.17—表 2.21 所列的方程来计算。在表 2.22—表 2.27 中,所给出的方程用来计算描述角度和温度调谐的微商 $\partial \nu / \partial \theta$ 和 $\partial \nu / \partial T$ 。这些微商分别表征了可转换辐射频率随角度和温度的变化。表 2.20、2.21、2.23、2.24、2.26、2.27 包括了对于 SFG 当相互作用的光波中有一个宽带光谱时的计算方程。

表 2.20 当低频作用光波有宽带光谱时计算 SFG 光谱带宽的方程

作用类型	SFG( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 光谱带宽	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
ooe	$\Delta\nu_1 = \frac{0.886}{L} \left  n_{o1} - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
oeo	$\Delta\nu_1 = \frac{0.886}{L} \left  n_1^*(\theta) - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
oeo	$\Delta\nu_1 = \frac{0.886}{L} \left  n_{o1} - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
eeo	$\Delta\nu_1 = \frac{0.886}{L} \left  n_1^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
ooo	$\Delta\nu_1 = \frac{0.886}{L} \left  n_1^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
oeo	$\Delta\nu_1 = \frac{0.886}{L} \left  n_{o1} - n_{o3} - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	

表 2.21 当高频作用光波有宽带光谱时计算 SFG 光谱带宽的方程

作用类型	SFG( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 光谱带宽	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
ooe	$\Delta\nu_2 = \frac{0.886}{L} \left  n_{o2} - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
oeo	$\Delta\nu_2 = \frac{0.886}{L} \left  n_{o2} - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
oeo	$\Delta\nu_2 = \frac{0.886}{L} \left  n_2^*(\theta) - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
eeo	$\Delta\nu_2 = \frac{0.886}{L} \left  n_2^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
ooo	$\Delta\nu_2 = \frac{0.886}{L} \left  n_{o2} - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	
oeo	$\Delta\nu_2 = \frac{0.886}{L} \left  n_2^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right ^{-1}$	

表 2.22 对于不同相互作用类型在 SHG 相位匹配情况下计算角度调谐的方程

作用类型	SHG( $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$ ) 光谱带宽	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
ooe	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{n_2^*(\theta) \left  1 - (n_{o2}/n_{e2})^2 \right  \tan \theta}{\lambda_1^2 \left[ 1 + \left( \frac{n_{o2}}{n_{e2}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} \right }$	



作用类型	SHG( $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$ )光谱带宽	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
oeo, oee	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{\left[ \frac{1 - (n_{o1}/n_{e1})^2}{1 + (n_{o1}/n_{e1})^2} \tan^2 \theta \right] n_1^*(\theta) - 2 \frac{1 - (n_{e2}/n_{o2})^2}{1 + (n_{e2}/n_{o2})^2} \tan^2 \theta}{\lambda_1^2 \left  \frac{\partial n_{e1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{2 \partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} \right } \tan \theta$	
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2] \tan \theta}{\lambda_1^2 \left[ 1 + \left( \frac{n_{o1}}{n_{e1}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{\partial n_{e2}}{\partial \lambda_2} \right }$	
ooo, oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2] \tan \theta}{\lambda_1^2 \left[ 1 + \left( \frac{n_{o1}}{n_{e1}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} - \frac{2 \partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} \right }$	

表 2.23 当低频作用光波具有宽带光谱时在 SFG 情况下计算相位匹配角度调谐的方程

作用类型	SFG( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ )光谱带宽	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{n_3^*(\theta) [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2] \tan \theta}{\lambda_3 \left[ 1 + \left( \frac{n_{e3}}{n_{o3}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  n_{o1} - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{e1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{\left  \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{e1}/n_{o1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_3^*(\theta) [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{\lambda_3 [1 + (n_{e3}/n_{o3})^2 \tan^2 \theta]} \right  \tan \theta}{\left  n_1^*(\theta) - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{e1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{\left  \frac{n_2^*(\theta) [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_3^*(\theta) [1 - (n_{o3}/n_{e3})^2]}{\lambda_3 [1 + (n_{e3}/n_{o3})^2 \tan^2 \theta]} \right  \tan \theta}{\left  n_{o1} - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{e1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{\left\{ \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2]}{\lambda_1 [1 + (n_{e1}/n_{o1})^2 \tan^2 \theta]} + \frac{n_2^*(\theta) [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2]}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} \right\} \tan \theta}{\left  n_1^*(\theta) - n_{e3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	
ooo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{n_1^*(\theta) [1 - (n_{o1}/n_{e1})^2] \tan \theta}{\lambda_1 \left[ 1 + \left( \frac{n_{e1}}{n_{o1}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  n_1^*(\theta) - n_{e3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	
oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial \theta} = \frac{n_2^*(\theta) [1 - (n_{e2}/n_{o2})^2] \tan \theta}{\lambda_2 \left[ 1 + \left( \frac{n_{e2}}{n_{o2}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  n_{e1} - n_{e3} - \lambda_1 \frac{\partial n_{e1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	

表 2.24 当高频作用波具有宽带光谱时在 SFG 情况下计算相位匹配角度调谐的方程

作用类型	SFG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 光谱带宽 $\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_3$ : 固定波长
ooe	$\frac{\partial \nu_2}{\partial \theta} = \frac{n_3^*(\theta) \left  1 - (n_{o3}/n_{e3})^2 \tan \theta \right }{\lambda_3 \left[ 1 + \left( \frac{n_{e3}}{n_{o3}} \right)^2 \tan^2 \theta \right] \left  n_{o2} - n_2^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial \theta} = \frac{\left  \frac{n_1^*(\theta) (1 - n_{o1}^2/n_{e1}^2)}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_3^*(\theta) (1 - n_{o3}^2/n_{e3}^2)}{\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \tan^2 \theta]} \right  \tan \theta}{\left  n_{o2} - n_2^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial \theta} = \frac{\left  \frac{n_2^*(\theta) (1 - n_{o2}^2/n_{e2}^2)}{\lambda_1 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_3^*(\theta) (1 - n_{o3}^2/n_{e3}^2)}{\lambda_3 [1 + (n_{o3}/n_{e3})^2 \tan^2 \theta]} \right  \tan \theta}{\left  n_2^*(\theta) - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$
eeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial \theta} = \frac{\left  \frac{n_1^*(\theta) (1 - n_{o1}^2/n_{e1}^2)}{\lambda_1 [1 + (n_{o1}/n_{e1})^2 \tan^2 \theta]} - \frac{n_2^*(\theta) (1 - n_{o2}^2/n_{e2}^2)}{\lambda_2 [1 + (n_{o2}/n_{e2})^2 \tan^2 \theta]} \right  \tan \theta}{\left  n_1^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$
eeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial \theta} = \frac{n_1^*(\theta) (1 - n_{o1}^2/n_{e1}^2) \tan \theta}{\lambda_1 \left( 1 + \frac{n_{o1}^2}{n_{e1}^2} \tan^2 \theta \right) \left  n_{o2} - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial \theta} = \frac{n_2^*(\theta) (1 - n_{o2}^2/n_{e2}^2) \tan \theta}{\lambda_1 \left( 1 + \frac{n_{o2}^2}{n_{e2}^2} \tan^2 \theta \right) \left  n_2^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$

表 2.25 不同相互作用类型时在 SHG 情况下计算温度调谐的方程

作用类型	SHG ( $\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$ ) 相位匹配温度调谐
ooe	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \partial n_{e1}/\partial T - \partial n_2^*(\theta)/\partial T \right }{\lambda_1^2 \left  \partial n_{e1}/\partial \lambda_1 - \partial n_2^*(\theta)/\partial \lambda_2 \right }$
oeo, oee	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \partial n_{e1}/\partial T + \partial n_{o1}/\partial T - 2 \partial n_2^*(\theta)/\partial T \right }{\lambda_1^2 \left  \partial n_1^*(\theta)/\partial \lambda_1 + \partial n_{o1}/\partial \lambda_1 - 2 \partial n_2^*(\theta)/\partial \lambda_2 \right }$
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \partial n_{e1}/\partial T - \partial n_{o2}/\partial T \right }{\lambda_1^2 \left  \partial n_1^*(\theta)/\partial \lambda_1 - \partial n_{o2}/\partial \lambda_2 \right }$
eeo, oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \partial n_1^*(\theta)/\partial T + \partial n_{o1}/\partial T - 2 \partial n_{o2}/\partial T \right }{\lambda_1^2 \left  \partial n_1^*(\theta)/\partial \lambda_1 + \partial n_{o1}/\partial \lambda_1 - 2 \partial n_{o2}/\partial \lambda_2 \right }$

表 2.26 当低频作用光波具有宽带光谱时在 SFG 情况下计算相位匹配温度调谐的方程

作用类型	SFG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 相位匹配温度调谐	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right }{\left  n_{o1} - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right }{\left  n_1^*(\theta) - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
oeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right }{\left  n_{o1} - n_3^*(\theta) - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right }{\left  n_1^*(\theta) - n_{e3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right }{\left  n_1^*(\theta) - n_{e3} - \lambda_1 \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	
eeo	$\frac{\partial \nu_1}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right }{\left  n_{o1} - n_{e3} - \lambda_1 \frac{\partial n_{o1}}{\partial \lambda_1} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	

表 2.27 当高频作用光波具有宽带光谱时在 SFG 情况下计算相位匹配温度调谐的方程

作用类型	SFG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 相位匹配温度调谐	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right }{\left  n_{e2} - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{e2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{e2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right }{\left  n_{e2} - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_{e2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	

作用类型	SFG ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ) 相位匹配温度调谐	$\lambda_1$ : 宽带光谱; $\lambda_2$ : 固定波长
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial T} \right }{\left  n_2^*(\theta) - n_3^*(\theta) - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_3^*(\theta)}{\partial \lambda_3} \right }$	
eeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{e3}}{\partial T} \right }{\left  n_2^*(\theta) - n_{e3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{e3}}{\partial \lambda_3} \right }$	
ooo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_1^*(\theta)}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_{o2}}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{o3}}{\partial T} \right }{\left  n_{o2} - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_{o2}}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$	
oeo	$\frac{\partial \nu_2}{\partial T} = \frac{\left  \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial n_{o1}}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial T} - \frac{1}{\lambda_3} \frac{\partial n_{o3}}{\partial T} \right }{\left  n_2^*(\theta) - n_{o3} - \lambda_2 \frac{\partial n_2^*(\theta)}{\partial \lambda_2} + \lambda_3 \frac{\partial n_{o3}}{\partial \lambda_3} \right }$	

## 2.14 在一些特殊情况下非线性频率转换效率的计算

在普遍情况下要满足各种参数对于频率转换效率进行精确计算是非常复杂的。只有在一些简单特殊的情况下才能推导出解析解，但是它们只能用于估算非线性频率转换器件的极限效率。在下面，给出了一些特殊的解析方程，用于计算转换效率。

### 2.14.1 平面波固定场近似

在这一近似中，我们可以忽略一些限制因素，如衍射、各向异性、群速失配和色散传播。此外，我们还忽略了热效应、线性和非线性吸收（以及由此产生的 fcg 效应）。换言之，在这一近似下，必须满足以下条件：

$$L < L_{NL} \quad (2.109)$$

$$L < L_{eff} \quad (2.110)$$

$$P_0 < P_{cr} \quad (2.111)$$

$$2h\omega_3 < E_g \quad (2.112)$$

特别地，对于 SFG（这是固定场近似），(2.109) 式意味着有

$$a_3(z) \ll a_{1,2}(0) \quad (2.113)$$

对于 DFG, 有

$$a_1(z) \ll a_{2,3}(0) \quad (2.114)$$

或

$$a_2(z) \ll a_{1,3}(0) \quad (2.115)$$

并且对于 SHG, 有

$$a_3(z) \ll a_1(0) = a_2(0) \quad (2.116)$$

条件(2.110)~(2.112)式表明了平面波近似, 加上(2.109)式就表明了平面波固定场近似。我们同时假设波束和脉冲的瞬态和空间分布是均匀的。

表 2.28、表 2.29 列出了利用(2.94)~(2.97)式在 SI 和 CGS 中计算 SHG、SFG 和 DFG 的转换效率的方程。其中  $d_{\text{eff}}$  是在相位匹配方向上的有效非线性(见表 2.3、表 2.14);  $n_i$  是在考虑波极化率情况下匹配方向上波长为  $\lambda_i$  的光的折射率;  $A = \pi w_0^2$  是半径为  $w_0$  的激光光束的截面积(所有相互作用的波束的面积假设是相等的);  $P_i$  是频率为  $\omega_i$  的相应波束的功率。对于脉冲(准静态)辐射, 脉冲功率  $P_i$  为

$$P_i = E_i \tau_i^{-1} \quad (2.117)$$

其中  $E_i$  是频率  $\omega_i$  的脉冲能量,  $\tau_i$  为相应的脉冲间隔。当混合波的功率总是相等的时候, SFG 的转换频率可由下式确定:

$$\eta = \frac{P_3}{\sqrt{P_1 P_2}} \quad (2.118)$$

对于 DFG, 有

$$\eta = \frac{P_1}{\sqrt{P_2 P_3}} \quad (2.119)$$

表 2.28 在 SI 中在平面波固定场近似下计算 SHG、SFG 和 DFG 转换效率的方程

非线性过程	转换效率
SHG	
$\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$ $\Delta k = 2k_1 - k_2$	$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_1}{\epsilon_0 c n_1^2 n_2 \lambda_2^2 A} \text{sinc}^2( \Delta k L/2)$
SFG	
$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$\frac{P_3}{P_1} = \frac{2^3 \pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 A} \text{sinc}^2( \Delta k L/2)$
DFG	
$\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$ $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$\frac{P_1}{P_3} = \frac{2^3 \pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_1^2 A} \text{sinc}^2( \Delta k L/2)$
	$[d_{\text{eff}}] = \text{m/V}; [P] = \text{W}; [L] = \text{m}; [\lambda] = \text{m}; [A] = \text{m}^2;$
	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s}/(\text{V} \cdot \text{m}); c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

表 2.29 在 CGS 中在平面波固定场近似下, 计算 SHG、SFG 和 DFG 转换效率的方程

非线性过程	量子转换效率
SHG	
$\omega_1 + \omega_1 = \omega_2$	$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2^7 \pi^5 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_1}{c n_1^2 n_2 \lambda_1^2 A} \text{sinc}^2( \Delta k L/2)$
$\Delta k = 2k_1 - k_2$	
SFG	
$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$	$\frac{P_3}{P_1} = \frac{2^9 \pi^5 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1^2 A} \text{sinc}^2( \Delta k L/2)$
$\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	
DFG	
$\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$	$\frac{P_1}{P_3} = \frac{2^9 \pi^5 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1^2 A} \text{sinc}^2( \Delta k L/2)$
$\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$	$[d_{\text{eff}}] = \text{cm}/\text{dyn}^{1/2}; [P] = \text{erg/s}; [L] = \text{cm}; [\lambda] = \text{cm}; [A] = \text{cm}^2;$
	$c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$

根据表 2.28、表 2.29, 我们知道转换效率正比于泵浦功率密度、正比于晶体长度的平方以及有效非线性的平方[即正比于非线性晶体的“品质参数” $d_{\text{eff}}^2(n_1, n_2, n_3)^{-1}$ ], 并且下式

$$\text{sinc}^2(|\Delta k|L/2) = \frac{\sin^2(|\Delta k|L/2)}{(|\Delta k|L/2)^2} \quad (2.120)$$

表征了转换效率的波失配效应。当  $\Delta k = \pm 0.886\pi/L$  时, 转换效率减半, 如在 (2.105) — (2.107) 式中得到的。

将  $\omega_1 = \omega_2$ ,  $\omega_3 = 2\omega_1$  以及  $P_1 = P_2$  代入 SFG 的转换效率表达式中, 得到的转换效率要比 SHG 方程得到的转换效率高 4 倍。这一悖论是因为在 SHG 中只有一束波的频率为  $\omega_1$ , 而在 SFG 中, 在  $\omega_1 = \omega_2$  的情况下, 有两束具有相同功率的波相互作用。对于 SFG 获得的辐射强度是由可转换的波束的功率的乘积所决定的, 因此在 SFG 方程中给出了因子 4。

表 2.30 给出了 SFG 和 DFG 在精确相位匹配 ( $\Delta k = 0$ ) 情况下的量子转换效率 (即起始辐射和获得辐射的量子数的比) 的方程。这些方程能够用于估算在达到 100% 量子转换效率时所需非线性光学晶体的长度。

表 2.30 在 SI 和 CGS 中, SFG 和 DFG 精确相位匹配情况下计算量子转换效率的方程

非线性过程	量子转换效率
SFG	$\frac{P_3 \lambda_3}{P_1 \lambda_1} = \sin^2 \left( 2\pi d_{\text{eff}} L \sqrt{\frac{2P_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right) \quad \text{SI}$
$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$	$\frac{P_3 \lambda_3}{P_1 \lambda_1} = \sin^2 \left( 16\pi^2 d_{\text{eff}} L \sqrt{\frac{2\pi P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right) \quad \text{CGS}$

非线性过程	量子转换效率
DFG	$\frac{P_1 \lambda_1}{P_3 \lambda_3} = \sin^2 \left( 2\pi d_{\text{eff}} L \sqrt{\frac{2P_2}{\varepsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right)$ SI
$\omega_1 = \omega_3 - \omega_2$	$\frac{P_1 \lambda_1}{P_3 \lambda_3} = \sin^2 \left( 16\pi^3 d_{\text{eff}} L \sqrt{\frac{2\pi P_2}{c n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_3 A}} \right)$ CGS

### 2.14.2 基波亏损(“非线性范围”)

在任意的  $L/L_{\text{NL}}$  条件下, 我们必须要考虑基频波功率的亏损。在一些情况下, 我们能够在非线性范围内, 用平面波近似推导出计算转换效率的解析方程。

在精确相位匹配(零失配)条件下, 起始条件为  $a_3(0) = 0$ ,  $a_{1,2}(0) = a_0$ , SHG 的功率转换效率由下式给出:

$$\eta(L) = \frac{P_3(L)}{P_1(0)} = \tanh^2(\sigma_3 a_0 L) = \tanh^2(L/L_{\text{NL}}) \quad (2.121)$$

其中  $\tanh x$  是双曲正切(一个平面特殊函数)<sup>[2.31]</sup>。在非零失配情况下, 经过一些近似, 我们有

$$\eta(L) = \kappa \text{sn}^2(u; \kappa) \quad (2.122)$$

其中  $\text{sn}(u; \kappa)$  是双参数椭圆正弦(一个平面特殊 Jacoby 函数<sup>[2.31]</sup>),

$$u = \sigma_3 a_0 L \kappa^{-1/2} = \kappa^{-1/2} L/L_{\text{NL}} \quad (2.123)$$

$$\kappa = [(1 + \Delta_0^2/4)^{1/2} - \Delta_0/2]^2 \quad (2.124)$$

$$\Delta_0 = \Delta k (2\sigma_3 a_0)^{-1} = 1/2 \Delta k L_{\text{NL}} \quad (2.125)$$

如果  $\Delta k = 0$ , 于是  $\Delta_0 = 0$ ,  $\kappa = 1$  并且椭圆正弦变换成双曲正切(图 2.15a)。如果  $\Delta_0 \gg 1$ , 于是  $\kappa \rightarrow 0$ , 椭圆正切就变换为普通的圆正弦(图 2.15d)。由(2.121)–(2.125)式计算 SHG 的程序如下: 首先计算  $L_{\text{NL}}$ , 接着利用(2.125)式估算  $\Delta_0$ 。如果  $\Delta_0 \ll 1$ , 可以用(2.121)式或者图 2.15 中的图形  $a_0$ 。如果  $\Delta_0 \gg 1$ , 就用表 2.28、表 2.29 给出的方程进行计算, 或者用等价方程:

$$\eta(L) = \left( \frac{L}{L_{\text{NL}}} \right)^2 \text{sinc}^2(1/2 |\Delta k| L) \quad (2.126)$$

为了计算  $L_{\text{NL}}$ , 我们必须从已知的基频波辐射的功率  $P_1(0)$  来确定  $a_0$  和求得  $\sigma_3 [L_{\text{NL}} = 1/(\sigma_3 a_0)]$ , 借助于方程

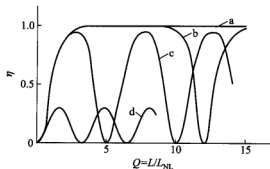


图 2.15 在不同  $\kappa^2$  值下 SHG 转换效率和

$L/L_{NL}$  的关系

a:  $\kappa^2 = 1$ ; b:  $\kappa^2 = 1 - 10^{-4}$ ;

c:  $\kappa^2 = 0.9$ ; d:  $\kappa^2 = 0.1$

$$a_0 = \left[ \frac{752 P_1(0)}{\pi w_0^2 n} \right]^{1/2} \quad (2.127)^{**}$$

其中各个量的量纲如下:  $[a_0] = V \cdot cm^{-1}$ ,  $[w_0] = cm$  以及  $[P_1(0)] = W$ 。参数  $\sigma_3$  根据 (2.59) 式来计算:

$$\sigma_3 = 8\pi^2 d_{eff} / n\lambda_1 \quad (2.128)$$

其中各量采用了以下量纲:  $[d_{eff}] = m \cdot V^{-1}$ ,  $[\sigma_3] = V^{-1}$  以及  $[\lambda_1] = m$ 。

对于以 (2.121) 式描述的精确相位匹配 SHG, 在  $L \geq 1.5 L_{NL}$  时, 可以实现二次谐波的 100% 转换。例如, 对于 KDP 晶体, 当基波光输入能量密度  $P_1(0)/\pi w_0^2 = 5 \times 10^8 W \cdot cm^{-2}$ ,  $\lambda_1 = 10^{-4} cm$  (钕激光), 以及  $n = 1.5$ , 我们有  $a_0 = 5 \times 10^5 V \cdot cm^{-1}$ ,  $\sigma_3 \approx 10^{-6} V^{-1}$  以及  $L_{NL} = 2 cm$ 。这样, 在不存在所有限制因素(除了考虑了基波亏损以外)的条件下, 当  $L = 3 cm$  时二次谐波 100% 转换是可能的。当然, 为了达到这一极限效率, 基波辐射和晶体变换器件必须有理想的参数。

注意, 当  $\kappa^2 \leq 0.3$ , 或者与之相同的  $\Delta_0 \geq 0.6$  时, (2.122) 式中的椭圆正弦可以用圆正弦来代替, 即

$$\eta(L) \approx \kappa \sin^2 u \quad (2.129)$$

其中  $\kappa$  和  $u$  由 (2.123) — (2.125) 式来计算。利用 (2.129) 式而不是 (2.122) 式所造成的相对误差不超过 10%。这种近似类似于所谓的固定强度近似 (2.14.5 节)。

\* 译者注: 原文为 “ $L/L$ ”, 应为 “ $L/L_{NL}$ ”。

\*\* 译者注: 原文为: “(2.126)” 与上一个公式编号重复, 改为 “(2.127)”。



## 2.14.3 在固定场近似下发散基波辐射线束的 SHG

前面几节的方程适用于平面波。在作几何近似的情况下，这些方程能够用于计算发散线束的基频光的 SHG 效率。基频光有一个轴对称发散角

$$\phi_0 \gg \phi_{\text{diff}} = 0.61\lambda_1 w_0^{-1} \quad (2.130)$$

其中  $\phi_{\text{diff}}$  是衍射发散角。在几何光学近似下，局部光的 SHG 过程是独立的。每一束局部光沿其自己的方向（即在  $\phi_0$  角的内部以自己对于  $Z$  轴的  $\theta$  角方向）传播。所以，每一个  $\theta$  值都可以和相应的失配值相联系<sup>[2.4]</sup>：

$$\Delta k(\theta) = \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \theta} \bigg|_{\theta=\theta_{\text{pm}}} (\theta - \theta_{\text{pm}}) = \gamma_1(\theta - \theta_{\text{pm}}) \quad (2.131)$$

其中  $\gamma_1$  是一阶的角色散系数；近  $90^\circ$  相位匹配必须考虑二阶色散系数<sup>[(2.108) 式]</sup>。对于 I 类相位匹配（“ooe”）SHG， $\gamma_1$  参数由下式计算：

$$\gamma_1 = 2n_{o1}\omega_1 [(n_{o1}^2 - n_{e3}^2)(n_{e3}^2 - n_{o3}^2)]^{1/2} (cn_{e3}n_{o3})^{-1} \quad (2.132)$$

在发散限  $\phi_0$  内，对所有角度积分可以得到积分的 SHG 效率：

$$\eta(L, \phi_0) = P_3(L, \phi_0)/P_1(0) = (L/L_{\text{NL}})^2 [\Omega^{-1} \text{Si}(2\Omega) - \Omega^{-2} \sin^2 \Omega] \quad (2.133)$$

其中  $\Omega = \gamma_1 \phi_0 L/4$ （光束的角平分线假设与相位匹配方向一致），函数  $\text{Si}(x)$  是积分正弦（一个平面特殊函数<sup>[2.31]</sup>）：

$$\text{Si}(x) = \int_0^x y^{-1} \sin y dy \quad (2.134)$$

这里，极限情况是：

(1)  $\Omega \ll 1$ （发散、晶体长度和角色散系数都是小的）；于是  $\text{Si}(2\Omega) \approx 2\Omega$ ， $\text{sinc } \Omega \approx 1$ ，并且

$$\eta(L, \Omega) \approx (L/L_{\text{NL}})^2 \quad (2.135)$$

这与精确相位匹配的情况一致（ $\Delta k = 0$ ）。

(2)  $\Omega \gg 1$ （发散、晶体长度和角色系数都是大的）；于是  $\text{Si}(2\Omega) \approx \frac{\pi}{2}$ ， $\text{sinc } \Omega \approx 0$ ，并且

$$\eta(L, \Omega) \approx \frac{\pi}{2\Omega} \frac{L^2}{L_{\text{NL}}^2} \quad (2.136)$$

## 2.14.4 在非线形范围内发散基波辐射线束的 SHG

平面波近似下 SHG 的非线性范围由 (2.122) — (2.125) 式描述。(2.122) 式对角（这里  $\phi = \theta - \theta_{\text{pm}}$ ）积分得到

$$\eta(L, \phi_0) = \phi_0^{-1} \int_{-\phi_0/2}^{+\phi_0/2} \kappa(\phi) \text{sn}^2[u(\phi); \kappa(\phi)] d\phi \quad (2.137)$$

在(2.129)式的近似下, (2.137)式要求有一个适于实际运算的形式:

$$\eta(\Omega, Q) \approx \frac{Q^2}{3\Omega} \left\{ Q - \frac{Q^2}{v} + \frac{1}{Q} \sin^2 Q + \frac{1}{2} \sin(2Q) - \frac{Q^2}{v^3} \left[ \sin^2 v + \frac{v}{2} \sin(2v) \right] + (3 - 2Q^2) \left[ \text{Si}(2v) - \frac{1}{v} \sin^2 v - \text{Si}(2Q) + \frac{1}{Q} \sin^2 Q \right] \right\} \quad (2.138)$$

其中

$$Q = \frac{L}{L_{\text{NL}}}, \quad v = [Q^2 + (\Omega/2)^2]^{1/2} + \Omega/2 \quad (2.139)$$

当  $Q \ll 1$  或  $\Omega/Q \gg 1$  时, (2.138)式就变换为(2.133)式。

注意以下情况: 利用近似式(2.129)时, 在  $\Delta_0 \geq 0.6$  范围内有效时, 其精确度优于 10%; 对于  $\phi = \theta - \theta_{\text{pm}}$  角的积分, 我们也将  $-0.6 \leq \Delta_0 \leq +0.6$  包括在内, 在这一范围内(2.133)式是不正确的。然而, 在这一范围内, 在  $Q \leq 2$  时, 对误差的贡献也是很小的, 利用(2.138)式所产生的误差也不超过 10%。只有在大  $Q$  值范围内, 并且  $\Omega$  的值很小 ( $Q \geq 2; \Omega \leq 1, \dots, 2$ ) 的情况下, 误差会增加到 25% ~ 30%, 此时(2.138)式只适用于估算。

图 2.16、图 2.17 给出了以  $\Omega$  和  $Q$  为坐标对 SHG 效率等值曲线按(2.137)式作计算的结果。图 2.16 是关于连续激光功率计算的结果; 图 2.17 的曲线是具有高斯形基频脉冲激光的脉冲能量计算的结果。因为参数  $\Omega$  和  $Q$  正比于晶体长度, 当  $L$  变化时(但是轴的标度没有改变!), 图 2.16、图 2.17 的曲线仍保持不变。在  $Q \approx 1$  时, 实际所用的效率值 ( $\eta \geq 0.2$ ) 集中于小的  $\Omega$  ( $\Omega \leq 5, \dots, 7$ ) 范围内。从这点出发, 我们作以下建议(对于合理的近似): 为了获得高的 SHG 效率, 我们应该采用高功率密度的基频光 ( $Q \geq 1$  直至破碎值) 和低的  $\Omega$  值

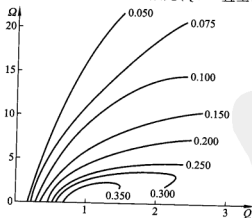


图 2.16 对于 SHG 在非线性范围内, 以  $\Omega$  和  $Q$  为坐标, 连续激光的功率转换效率等值曲线

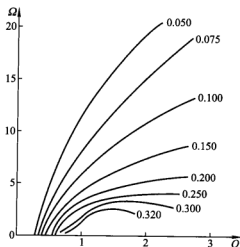


图 2.17 对于 SHG 在非线性范围内, 以  $\Omega$  和  $Q$  为坐标, 具有近高斯脉冲形状的基频激光的能量转换效率等值曲线

( $\Omega < 5$ )。换言之, 应该采用低的角色散系数的晶体(CDA 类晶体), 并且尽可能降低激光束的发散。

注意在上两节中, 我们忽略了吸收(线性的和非线性的)、衍射、各向异性、群速失配、脉冲色散、热自作用、光折变以及 feg 效应。除了一些极其简单的情况以外, 对包括这些现象的精确解需要进行数值计算。

## 2.14.5 固定强度近似

上述固定场近似在非线性频率转变理论中被广泛用于频率估算。很明显, 在这一近似中, 基波(“强波”)的复振幅是恒定的; 对于 SHG, 我们有  $a_1(z) = a_2(z) \equiv a(0)$ ;  $\phi_1(z) = \phi_2(z) \equiv \phi(0)$ 。这一近似允许我们简化计算, 但是在这里, 其相互作用的非线性机理这样非常重要的信息遗漏了, 即关于光波相位的机理。在固定强度近似中, 只是假设了基波的振幅是恒定的, 而相位不是恒定的。因此, 下面的近似更有保证<sup>[2,4]</sup>:

$$a_{1,2}(z) \equiv a(0); \phi_{1,2}(z) \neq \phi(0) \quad (2.140)$$

因此, 在这一近似中, 只有“强波”的强度(即实部振幅的平方)是恒定的, 但没有假设复振幅是恒定的。下一步要推导出一个更严格估算的转换效率近似解析式。

在没有损耗的情况下, 对于 SHG, 让我们以如下形式来重写平面波近似 [(2.75)–(2.77) 式]:

$$\frac{dA_1}{dz} = -j\sigma_1 A_1^* A_2 \exp(-j\Delta kz) \quad (2.141)$$

$$\frac{dA_3}{dz} = -j\sigma_3 A_1^2 \exp(+j\Delta kz) \quad (2.142)$$

让我们对(2.141)—(2.142)式关于  $z$  微分, 引进波强度  $I_1 = I_2$  和  $I_3 (\omega_3 = 2\omega_1)$ :

$$I_1 = A_1 A_1^* = a_1^2; \quad I_3 = A_3 A_3^* = a_3^2 \quad (2.143)$$

结果, 替代(2.141)—(2.142)式我们有

$$\frac{d^2 A_1}{dz^2} + j\Delta k \frac{dA_1}{dz} - \sigma_1 (\sigma_1 I_3 - \sigma_3 I_1) = 0 \quad (2.144)$$

$$\frac{d^2 A_3}{dz^2} - j\Delta k \frac{dA_3}{dz} - 2\sigma_1 \sigma_3 A_3 I_1 = 0 \quad (2.145)$$

在固定强度近似中, 我们必须假设  $I_1(z) \approx I_1(0)$ , 代替(2.145)式, 我们会有

$$\frac{d^2 A_3}{dz^2} - j\Delta k \frac{dA_3}{dz} + 2\sigma_1 \sigma_3 I_1(0) A_3 = 0 \quad (2.146)$$

(2.146)式可以求得解析解, 其边界条件为  $A_3(0) = 0$ ,  $(dA_3/dz)_{z=0} = -j\sigma_3 A_1^2(0)$ ,

$$A_3(z) = -j\sigma_3 A_1^2(0) z \exp(j\Delta kz/2) \operatorname{sinc}(\Lambda z) \quad (2.147)$$

其中

$$\Lambda = [(\Delta k/2)^2 + 2\sigma_1 \sigma_3 I_1(0)]^{1/2} = (\Delta k/2) [1 + 8(\Delta k L_{NL})^{-2}]^{1/2} \quad (2.148)$$

在固定场强近似下, 在(2.147)式中, 将  $\Lambda$  代入包含有  $\Delta kz/2$  的  $A_3$  相应方程中去<sup>[2,4]</sup>, 也可参看(2.120)式。因此在固定强度近似中, 失配因素  $\operatorname{sinc}^2 x = \sin^2 x/x^2$  不仅与失配有关, 而且和输入的激光强度有关。对于足够大的失配:

$$\Delta k \gg 2[2\sigma_1 \sigma_3 I_1(0)]^{1/2} \quad (2.149)$$

固定强度近似与固定场近似相一致。

对于实部振幅和相位(2.148)式能重写为

$$a_3(z) = \sigma_3 a_1^2(0) z \operatorname{sinc}(\Lambda z) \quad (2.150)$$

$$\phi_3(z) = 2\phi_1(0) - \pi/2 + \Delta kz/2 \quad (2.151)$$

在固定强度近似中 SHG 转换效率计算的结果, 实际上和在  $\Lambda > \sigma_3 a_1(0)$  条件下在非线形范围(两者都在平面波近似前提下)内仔细考虑的结果相一致。上面这个不等式在失配小时不成立, 但是不论如何, 在固定强度近似中能给出更为精确的解析估算。例如, 在这种情况下, 基频(激光)波的相位方程  $\phi_1(z)$  可以推导出来:

$$\phi_1(z) = \phi_1(0) + \frac{\Delta kz [1 - \operatorname{sinc}(\Lambda z)]}{8 + (\Delta k)^2 / [\sigma_1 \sigma_3 I_1(0)]} \quad (2.152)$$

从(2.152)式可以知道基波相速度产生了对强度的依赖关系, 即在媒介中产生了非线性自作用。而在固定强度近似中不存在这种非常重要的现象。

前面清楚地表明<sup>[2.4]</sup>, 在平面波近似中, 精确非线性方程(对 SHG 转换效率)的解与固定强度近似的解相一致, 其精确度由一个正比于  $(L/L_{NL})^6$  的项所决定。对于固定场近似, 其精度只有  $(L/L_{NL})^4$ 。对于确切的非线性范围和采用固定强度近似, 甚至在  $\Delta k = 0$  的情况下, SHG 转换效率与  $L/L_{NL}$  的关系实际上是一样的, 其运用范围最高可以达到  $L/L_{NL} \approx 1$ , 而采用固定场近似, 只可以应用在  $L/L_{NL} < 0.3$  的范围内。

## 2.14.6 超短激光脉冲的频率转换

当激光在脉冲范围内运转时, 必须在非线性相互作用中考虑非稳(非稳性)现象, 即晶体长度  $L$  和以下两个有效长度的关系: 准静态长度  $L_{qs}$  [(2.92) 式] 和色散长度  $L_{dis}$  [(2.95) 式]。我们考虑一个实例, 具有复振幅  $A_{1,2}$  和频率  $\omega_{1,2}$  ( $\omega_2 = 2\omega_1$ ) 并且在足够宽线束 ( $L_s, L_{dif} \gg L$ ) 情况下的 SHG 过程。在色散理论<sup>[2.32]</sup> 一级近似下, 即对于  $L_{dis} \gg L$ , 可以写出以下主干方程:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} = -j\sigma_1 A_1^* A_2 \exp(j\Delta kz) \quad (2.153)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{u_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} = -j\sigma_2 A_1^2 \exp(-j\Delta kz) \quad (2.154)$$

其中  $u_{1,2}$  为群速,  $\sigma_1 \approx \sigma_2 = \sigma$  为非线性系数。有两种不同情况:

(1)  $u_1 = u_2 = u$ , 即实现群速匹配(或准静态范围<sup>[2.32,33]</sup>)。在这种情况下 (2.153) — (2.154) 有解析解; 特别是, 对于  $\Delta k = 0$ :

$$a_1(t, \eta) = |A_1(t, \eta)| = a_1(\eta, 0) \operatorname{sech}[\sigma a_1(\eta, 0)z] \quad (2.155)$$

$$a_2(t, \eta) = |A_2(t, \eta)| = a_1(\eta, 0) \tanh[\sigma a_1(\eta, 0)z] \quad (2.156)$$

$$\phi_1(t, \eta) = \phi_1(\eta), \phi_2(t, \eta) = 2\phi_1(\eta) - \frac{\pi}{2} \quad (2.157)$$

其中  $\eta = t - z/u$ 。

在固定场近似中,  $a_2(\eta, z) = \sigma a_1^2(\eta, 0)z$ , 所以高斯型激光脉冲  $a_1(\eta, 0) = a_1(0, 0) \exp(-t^2/2\tau_1^2)$  转变为高斯型二次谐波脉冲  $a_2(\eta, 0) = a_2(0, 0) \exp(-t^2/2\tau_2^2)$ , 其中  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别是基波脉冲和二次谐波脉冲的脉宽。在低转换效率时,  $\tau_2 = \tau_1/\sqrt{2}$ , 而在高转换效率时(非线性范围)我们有  $\tau_2 \rightarrow \tau_1$ 。

注意, 对于准静态范围, 采用在平面波近似理论中的结果, 并用这些结果对时间作积分(见上面)是可能的。数值结果与他们利用 (2.155) — (2.156) 式得到的结果一样。

(2)  $u_1 \neq u_2$ , 即发生群速失配(或非稳态范围)。在这种情况下, 对逆群速失配  $v = u_2^{-1} - u_1^{-1}$  作考虑, 并且需要考虑  $L$  和  $L_{qs}$  的关系。注意 (2.92) 式给出了  $L_{qs}$  对脉冲时间  $\tau_1$  的关系, 并只对所谓光谱限制脉冲 ( $\tau_1 \Delta \omega_1 \approx 1$ , 其中  $\Delta \omega_1$

是脉冲的光谱宽度)适用。在许多情况下,超短脉冲是频率(或相)调制的,由此等式  $\tau_1 \Delta \omega_1 \approx 1$  不再成立了。所以,在一般情况下,为取代(2.92)式,必须引入一个新的准静态长度,即

$$L'_{qs} = (|v| \Delta \omega_1)^{-1} \quad (2.158)$$

这表征了在群速失配能忽略时的实际长度。所以,如果起始的(激光)脉冲是光谱限制脉冲,这样  $L'_{qs} < L_{qs}$ , 必须考虑最短的有效长度。如果以下不等式是可能的:  $L'_{qs} < L < L_{qs}$ , 很容易看到, 仅仅考虑激光脉冲脉宽时间(但不是激光脉冲的光谱宽度)来估算有效长度, 会导致不正确的结果。

在  $L < L_{qs} < L'_{qs}$  的条件下, 我们有一个准静态范围, 这等效于  $u_1 = u_2$  的情况(见上面)。当  $L > L_{qs}$ ,  $L'_{qs}$  时非线性相互作用是非稳态的, 并且在固定场近似下, (2.153) — (2.154) 式的解是<sup>[2.32]</sup>

$$A_2(t, z) = -j\sigma_2 \int_0^t A_1^2 \left( t - \frac{z}{u_2} + vx, 0 \right) \exp(-j\Delta kx) dx \quad (2.158')^*$$

二次谐波辐射的光谱密度等于

$$S_2(\Omega, z) = \text{sinc}^2[(v\Omega - \Delta k)z/2] S_2(\Omega) \quad (2.159)$$

其中

$$S_2(\Omega) = (\sigma_2 z)^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} A_{10}(\Omega - \Omega') A_{10}(\Omega') d\Omega' \right|^2 \quad (2.160)$$

并且  $A_{10}(\Omega)$  是复振幅  $A_1(t, 0)$  的傅里叶光谱,  $\text{sinc } x = (\sin x)/x$ 。(2.159)、(2.160)式对频率(相)调制的任意形式均成立, 对任意脉冲形式也成立。

对于  $L \gg L'_{qs}$ , 二次谐波脉冲的光谱宽度比基波光谱宽度要窄, 所以在非线性过程中, 会同时有二次谐波脉冲的强传播。对于一个光谱限制激光脉冲, 二次谐波脉冲的时间间隔是  $\tau_2(z) \approx vz$ , 即  $\tau_2$  实际上是依赖于  $\tau_1$  的。二次谐波谱在  $\omega_{\max} = 2\omega_1 - v^{-1} \Delta k$  处有一个极大值, 并且其光谱宽度等于  $\Delta \omega_2 = 2\pi(vz)^{-1}$ 。所以, 我们通过改变  $\Delta k$  来调制平均二次谐波频率。

在非线性范围中, 情况更为复杂(见[2.32, 34, 35])。对于脉冲形状、光谱宽度和转换效率, 能成功地在固定强度近似中得到一些解析解<sup>[2.32]</sup>。因为相关关系的畸变, 激光脉冲的相调制的存在使最优转换不能实现。在一般情况下, (2.153)、(2.154)式只能以数值计算来解。

当  $u_1 = u_2$  时, 非线性介质色散对转换效率的影响与脉冲的色散传播相关,  $L \approx L_{\text{dis}}$  (色散理论的二次近似<sup>[2.32]</sup>)。然而, 在实际上不发生这种情况(只有在  $\tau_1 < 10^{-14}$  s 时才可能)因为色散传播参数  $g$  的值很小。其典型值约为  $10^{-27}$  s<sup>2</sup>。

\* 译者注: 原文为“(2.158)”与上一个公式编号重复, 改为“(2.158)’”。

$\text{cm}^{-1[2.4]}$ , 甚至对于  $\tau = 10^{-13} \text{ s}$ , 我们有  $L_{\text{dis}} = \tau^2/g = 10 \text{ cm}$ 。

注意对于超短激光脉冲的有效频率转换效率来说, 群速和相匹配两个条件都必须满足, 但这只是非常偶然的情况。可以发现<sup>[2.39]</sup>, 对于 SHG 过程来说只有对具体波长, 基频光的群速失配(同时有共线类型的  $\text{I}^{(-)}$  类相位匹配)才能实现: 对 KDP 是  $1.04 \mu\text{m}$ , 对于  $\text{LiNbO}_3$  是  $2.04 \mu\text{m}$ , 对于  $\text{LiIO}_3$  是  $2.16 \mu\text{m}$ 。

与激光超短脉冲的频率转换相似的考虑能用于 SFG、DFG、光学参量振荡(OPO)、拉曼散射等方面<sup>[2.32,34,35]</sup>。

对于非稳现象的更为详细的考虑, 是折射和各向异性。为方便起见, 引入复数场振幅的傅里叶表示, 即计算空间频率谱。精确的计算表明空间的(衍射和各向异性)和瞬态或非稳态的(群速失配)现象对频率转换整个过程施加控制作用, 并在这种情况下, 我们有这两种效应的非线性性叠加。

## 2.14.7 在稳态范围中有限孔径激光束的频率转换

当激光在稳态(连续波或 cw)范围, 首要需要考虑和空间波束调制相关的限制因素以及相关的现象, 诸如衍射和各向异性等。所以, 在这种情况下  $L_{\text{qs}} = L_{\text{dis}} = \infty$ ,  $L_s \sim L$ , 以及  $L_{\text{diff}} \sim L$ 。将单轴晶体的 SHG  $\text{I}^{(-)}$  类作为例子, 我们写出相应的主干方程:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + j \frac{1}{2k_1} \left( \frac{\partial A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial A_1}{\partial y^2} \right) = -j\sigma_1 A_1^* A_2 \exp(-j\Delta k z) \quad (2.161)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + j \frac{1}{2k_2} \left( \frac{\partial A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial A_2}{\partial y^2} \right) + \rho \frac{\partial A_2}{\partial x} = -jA_1^2 \exp(+j\Delta k z) \quad (2.162)$$

有两种可能的情况:

(1)  $L_{\text{diff}} \gg L$ , 所以在(2.161)、(2.162)式中, 衍射以及相应的二次微分项可以忽略, 但是双折射应该予以考虑( $L_s \approx L$ )。理论上, 有两条不同途径: 通过在没有衍射项时直接解(2.161)、(2.162)式或是利用有限激光光束表示, 对于恒定横向强度分布依次对于线束平方作积分。在两种情况下得到的数值结果当然是一样的。注意利用第二种方法的条件是不存在衍射, 并且相应地可以在几何光学近似条件下考虑空间调制线束<sup>[2.41]</sup>。

表 2.31 阐明了在上述几何光学或者准平面波近似结合场固定近似条件下单轴晶体中两类相位匹配( $\text{I}^{(-)}$  和  $\text{II}^{(-)}$ ) 的 SHG 效率表达式  $\eta = P_2(L)/P_1(0)$ 。记住, 对于  $\text{II}^{(-)}$  类相位匹配, 在主干方程(2.161)和(2.162)中需要包括两个方程(而不是一个方程), 用于基波辐射的 o 光和 e 光。我们利用表 2.31 中的方程对于  $\text{II}^{(-)}$  类相位匹配作以下规定:  $P_1^o(0)$  和  $P_1^e(0)$  分别为 o 光和 e 光的入射功率;  $P_1(0) = P_1^o + P_1^e$  为总的入射激光功率(所有都在  $z=0$  处);  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别

为对于基频和二次谐波频率处异常光的“走离角”； $L_{a1} = 2\omega_0/\rho_1$  和  $L_{a2} = 2\omega_0/\rho_2$  为对 e 光相应的孔径长度。

表 2.31 中的公式表明了各向异性的存在导致了 SHG 效率显著地降低，特别是对于  $\text{II}^{(-)}$  类相位匹配。这一事实的物理意义是清楚的：对于 ooe 情况，二次谐波辐射的 e 光连续地从基波的 o 光分离，没有中断 SHG 过程。相反，在 oee 情况下，一旦基频辐射的 e 光从同一基频辐射的 o 光中分离出来，则 SHG 过程马上中断。在窄光束的情况下，消除这种现象的适当途径是利用  $90^\circ$  相位匹配[符合(2.21)式，在  $\theta = 90^\circ, \rho = 0, L_s \rightarrow \infty$ ]。但是，这只是在  $\text{I}^{(-)}$  类相位匹配是正确的，因为对  $\text{II}^{(-)}$  类相位匹配  $d_{\text{eff}}$  在  $\theta = 90^\circ$  时为零(表 2.3)。第二种途径是利用 SHG 的特殊形式，即利用两块光轴方向相反的晶体以串联的形式放置时的 SHG<sup>[2,4]</sup>。在这种情况下，在第一块晶体中的“走离”角被第二块晶体相反的“走离”角所补偿。第三种途径是利用宽的激光束( $L_s \gg L$ )。注意具有大“走离”角晶体( $\text{LiIO}_3$ )中，在 SHG 的同时，输出的 SH 光波的空间分布有很强的畸变。

表 2.31 在精确相位匹配和固定场近似条件下空间限制

激光束 SHG 转换效率的计算方程

相互作用类型	$L$ 与 $L_s$ 间的关系	转换效率 $\eta = P_2(L)/P_1(0)$
ooe	$L \leq L_s$	$\eta = \frac{2^7 \pi^3 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_1(0)}{c n_{a1}^2 n_{a2} \lambda_2^2 \pi w_0^2} \left( 1 - \frac{L}{3L_s} \right)$
ooe	$L > L_s$	$\eta = \frac{2^7 \pi^3 d_{\text{eff}}^2 P_1(0)}{c n_{a1}^2 n_{a2} \lambda_2^2 \rho^2} \left( \frac{L}{L_s} - \frac{1}{3} \right)$
oee	$L \leq L_s$	$\eta = \frac{2^7 \pi^3 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_1'(0) P_1''(0)}{c n_{a1} n_{a1} n_{a2} \lambda_2^2 \pi w_0^2 P_1(0)} \times \left( 1 - \frac{L}{3L_{a1}} - \frac{L}{3L_{a2}} \right)$
oee	$L > L_s$	$\eta = \frac{2^7 \pi^3 d_{\text{eff}}^2 P_1''(0) P_1'(0)}{3 c n_{a1} n_{a1} n_{a2} \lambda_2^2 \pi \rho_1 \rho_2 P_1(0)} \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{L}{L_{a1}} \right)^3 \frac{\rho_2}{ \rho_2 - \rho_1 } \right]$

注：不计衍射，但考虑了晶体的各向异性，单位制为 CGS。

(2) 当  $L_s \gg L$ ，主要的限制因素是衍射，对于窄光束特别是聚焦激光束来说(例如在  $\theta_{\text{pm}} = 90^\circ$ )，更要考虑这一点。在这种情况下，(2.162)式中的  $\rho \partial A_2 / \partial z$  项可以忽略，但不是全部两阶微商项都可忽略。注意，如果  $\theta_{\text{pm}} \neq 90^\circ$ ，(2.161)、(2.162)式中的所有项都要保留。

当所用的是聚焦激光束时，有两种相反的过程：首先由于激光辐射聚焦到



非线性晶体中, 晶体中的激光功率密度增加, 应该同时要考虑矢量相位匹配; 然后, 激光束的发散和晶体的双折射也增加了, 由此相位失配出现了。第一个过程提高了 SHG 效率, 而第二个过程则降低了 SHG 效率。因此, 聚焦有一个最优化(见下面介绍)。在所有重要的实际情况中, 对于高斯型线束能用固定场近似, 由此在(2.161)式中右手的非线性项可以忽略, (2.161)式在这种情况下可以独立于(2.162)式在线性近似下解出。对  $A_1(x, y, z)$  的最终解应该代入(2.162)式。结果, 可以导出以下二次谐波的表达式<sup>[2.4]</sup>:

$$P_2(L) = CkLP_1^2(0)h(v, \alpha, \xi, \mu) \quad (2.163)$$

这里  $h(v, \alpha, \xi, \mu)$  是所谓的孔径函数, 由 Boyd 和 Kleinman<sup>[2.36]</sup> 引进; 也可参看 [2.4]:

$$h(v, \alpha, \xi, \mu) = \frac{2\pi\sqrt{\pi}}{\xi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-4s^2) |H(v', \alpha, \xi, \mu)|^2 ds \quad (2.164)$$

$$|H(v', \alpha, \xi, \mu)| = \frac{1}{2\pi} \int_{-\xi(1-\mu)}^{\xi(1+\mu)} \frac{\exp(jv'T)}{1+jT} dT \quad (2.165)$$

$v = kw_0^2 \Delta k/2$ ,  $v' = v + 4\alpha s$ ,  $\alpha = \rho kw_0/2$ ,  $\xi = L/kw_0^2$  为非线性晶体  $L$  与聚焦长度  $kw_0^2$  或聚焦参数之比,  $\mu = (L - 2z_0)/L$  为晶体中聚焦的相对位置,  $z_0$  为最小线束半径  $w(z)$  的坐标, 即  $w(z_0) = w_0$ ; 当  $z_0 = L/2$ , 即当焦点在晶体的中部时,  $\mu = 0$ ;  $s$  为积分变量,  $C = 2^7 \pi^4 d_{\text{eff}}^2 / cn_1^2 n_2 \lambda_2^2$ 。这里引入的相位失配  $\Delta k$  表示对光束轴的失配。

对于  $90^\circ$  相位匹配 ( $\theta_{\text{pm}} = 90^\circ, \rho = 0, \alpha = 0$ ), 有两种极端情况(通常  $\mu = 0$ ), 这使我们获得简单的解析表达式:

(a) 弱聚焦,  $\xi \ll 1$ 。在这种情况下, 孔径函数(2.164)式有下面的形式:

$$h(v, 0, \xi, 0) = \xi \text{sinc}^2(\Delta kL/2) \quad (2.166)$$

对于 SHG 效率, 我们有

$$\eta(L) = P_2(L)/P_1(0) = CP_1(0)L^2 \frac{\text{sinc}^2(\Delta kL/2)}{w_0^2} \quad (2.167)$$

由此, 在这种情况下  $\eta(L)$  的表达式与在平面波固定场近似条件下, 高斯型线束 SHG 的表达式( $\Delta k \neq 0$ )是相同的<sup>[2.4]</sup>。

(b) 强聚焦,  $\xi \gg 1$ 。在这种情况下, 对于  $\Delta k < 0$ :

$$h(v, 0, \xi, 0) = \xi^{-1} |\pi \exp(v) + \text{Si}(-\Delta kL/2) - \pi/2|^2 \quad (2.168)$$

并且对于  $\Delta k > 0$ :

$$h(v, 0, \xi, 0) = \xi^{-1} |\text{Si}(\Delta kL/2 - \pi/2)|^2 \quad (2.169)$$

这里  $\text{Si } x$  是积分正弦 [(2.134)式]。

从(2.168)、(2.169)式可以看到,  $h$  函数对于相位匹配符号是不对称的。

作为一个例子, 对  $\xi = 10$ ,  $h$  的极大值 (并由此, 二次谐波功率) 不在  $\Delta k = 0$  处出现, 而是在  $\Delta k L / 2 \approx -3$  处出现, 即对于负相位匹配时出现。这一效应是由于矢量 (非共线) 相位匹配造成的, 这只有在负相位匹配区域内条件才能满足, 即在异常色散处能满足 (记住, 对于  $\Delta k < 0$ , 或对  $\theta > \theta_{pm}$ , 不等式  $n_2^s < n_{e1}$  成立, 其相应于异常散射)。在  $\theta < \theta_{pm}$  区, 无论是标量 (共线) 还是矢量 (非共线) 相位匹配都不满足, 因此, SHG 效率随聚焦参数的增加而降低。

为了得到最佳聚焦并由此获得最大效率, 需要优化参数  $v$  (失配) 和  $\xi$  (聚焦) 以优化函数  $h$  [(2.164) 式]。数值计算表明  $h$  的极大值在  $\xi_{opt} = 2.84$ ,  $v_{opt} = -0.55$  (相应于  $\Delta k_{opt} L / 2 = -1.6$ ) 和  $h(v_{opt}, \xi_{opt}) = 1.07$  处实现<sup>[2.41]</sup>。

在  $\theta_{pm} < 90^\circ$  ( $\rho \neq 0$ ) 时, 计算更为复杂, 见 [2.4, 36]; 注意晶体的各向异性导致在非聚焦窄激光束情况下 SHG 效率降低。

## 2.14.8 线性吸收

在没有热效应存在的情况下, 将以  $\delta = 0$  时计算的转换效率乘以  $\exp(-2\delta L)$  因子来考虑  $\delta \neq 0$  时的吸收参数。因为对于相互作用光波非线性晶体一般是透明的, 可利用下式:

$$\exp(-2\delta L) \approx 1 - 2\delta L \quad (2.170)$$

注意文献中所普遍采用的线性吸收系数  $\alpha$  等于  $2\delta$ 。对于吸收, 更为严格的考虑是可以在转换效率的解析式中用  $L' = \delta^{-1} [1 - \exp(-\delta L)]$  中来代替  $L$ 。注意, 这些修正常低于实验测量的精确度。所以, 这些修正只有在高转换效率 (近于 100%) 的情况下才有意义, 并让我们可以定义一个极限效率 (例如, 对于  $\delta \approx 0.01 \text{ cm}^{-1}$  以及  $L \approx 3 \text{ cm}$ ,  $\eta_{lim} \approx 94\%$ )。当考虑加热现象时, 线性吸收系数就产生了更强的影响, 这会引起非均匀波失配, 弛豫现象的出现, 最终降低转换效率及其温度稳定性。在强脉冲范围内, 也需要考虑二次谐波辐射的非线性 (一般是双光子) 吸收 [(2.12) 式]。应该强调的是晶体的表面吸收和晶体的体吸收是不一样的: 由于晶体表面存在着阻挡层以及相应的表面缺陷, 表面吸收比体吸收可以大几个量级。由于阻挡表面层的厚度很小 ( $2 \sim 10 \text{ nm}$ ), 这一吸收不能影响转换效率, 但是对表面损伤阈值会产生重要的影响。一般而言, 如果阻挡表面层很薄 ( $\leq 2 \text{ nm}$ ), 这样表面损伤阈值和体损伤阈值是一致的。这一观点表明, 在强激光辐射的非线性光学中, 需要考虑表面加工质量。

## 2.15 其他评论

正如我们已经提及的, 在所谓上转换器件中用了和频发生, 在这种器件中

红外信号转换为可见信号或可见信号转换为紫外信号。上转换效率可由 SFG 的方程来估算, 见表 2.28—表 2.30<sup>[2,3]</sup>。

**参量发光和光学参量振荡**被广泛用于设计可调谐激光辐射光源(包括 IR 区), 对于 OPO 转换效率的估算可参看[2.4,33,37]。

近年来, **高强度和超高强度激光器**得到了广泛的发展; 这些激光器的电子光场要比原子场强得多。在这些场中可以观察到复合非线性现象<sup>[2,32,34,35]</sup>。注意一种非线性晶体的损伤阈值随脉冲脉宽时间的减小而增高(第3章)。

注意近年来在腔内 SHG(ICSHG)领域取得了巨大的进展, 在这一过程中非线性晶体被置于激光谐振腔内。在先进的 ICSHG 激光器中, 实现了所谓“100% 的转换效率”。这意味着这种激光器中腔内激光辐射转变为二次谐波的实际转换效率达到了最优化, 因此二次谐波的输出功率与这一激光器在**非线性晶体中没有相位匹配的基频**以及具有激光输出镜**最佳透过率**处是一致的(记住, 在 ICSHG 中, 激光输出镜的透过率在激光频率处等于零)。

在现代非线性光学中一个非常有意义的方向是光学介质非线性的量子理论的发展, 这与所给定的晶体的非线性与其分子结构相关<sup>[2,38,39]</sup>。这一理论可能成为预测和指导探寻具有要求性质的非线性光学新材料的工具。

最后, 注意在前几年中, 已成功地发展了所谓活性非线性(激光自倍频)晶体。这些年中, 活性(激光)和非线性性质在同一晶体中复合。例如,  $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}:\text{Nd}$  晶体( $\lambda_1 = 1.085 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0.542 \mu\text{m}$ )、 $\text{KTiOPO}_4:\text{Cr}$  晶体(可调辐射  $\lambda_1 = 800 \sim 850 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 400 \sim 425 \text{ nm}$ )、 $\text{BBO}:\text{Nd}$  晶体、 $\text{YVO}_4:\text{Nd}$ , 等等。这些晶体的理论基础可见文献[2.4]。





## 第 3 章

# 非线性光学晶体的性质

本章包括了主要的参考材料，即在非线性光学中用于激光频率转换的 77 种晶体的光学和非线性光学性质。在本章中所描述的所有非线性光学晶体被分为四类：基本的、常用的、其他无机以及其他有机晶体。结晶石英的性质也在独立的一节中给出，尽管这种材料不能相位匹配，然而常用作  $d$  张量系数测量的标准。在各类晶体中，排列顺序是根据晶体吸收边的最短波长来安排的。

对于每一种晶体，都给出了所有与非线性频率转换相关的性质，诸如点群、透明范围、线性和双光子吸收系数、折射率和它们的温度微商、相位匹配角的实验值、非临界相位匹配的温度、在相位匹配方向上的有效非线性系数表达式、非线性系数、激光诱导的表面和整体损伤阈值以及热导率系数等。

我们对于已有文献中的一系列 Sellmeier 方程（色散关系）进行了比较。对于每一种晶体，采用在 2.5、2.9 节中给出的公式，对不同来源的色散关系，我们计算了每一种晶体相位匹配角的理论值，然后将这些计算值与实验数据相比较，确定

了一套最佳的色散关系。再利用这一套晶体的色散关系，我们对于绝大多数激光器的常用频率计算了相位匹配角的理论值以及相应的双折射（走离）角的值。对于一些基本的非线性光学晶体，我们也确定了其 SHG 过程的逆群速失配。

在相互作用的光波偏振的标注中，无论在何处，其首个符号代表波长最长的光波，而第三个符号代表波长最短的光波。所有给出的有关内角、温度和光谱带宽等实验数据都是对应于 1 cm 长度的晶体。如果文献来源中包含外角带宽，那么在计算 II 类相互作用的内角值的情况下，我们所用的是折射率的最小值。Kleinman 对称关系在这里都假设是成立的，否则就要有特定说明。在各处给出的  $d$  张量的分量是在晶体学主轴体系  $a, b, c$  (晶体学参考系) 中给出的，除了属于点群 2 的晶体以外，对于这一晶系的晶体用了介电主轴体系 ( $X, Y, Z$ ) 或者称介电参考系。所有的参考材料都在 SI 中给出。要将非线性系数转换到 CGS 中去时，应该记住  $1 \text{ m/V} = (3/4\pi) \times 10^4 \text{ esu}$ 。

这一章中包含了到 1994 年为止的约 650 篇参考资料。在 3.6 节“新的发展”中给出了一些重要的新参考资料。在手册的最后提供晶体索引。

### 3.1 基本的非线性光学晶体

#### 3.1.1 $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , 三硼酸锂 (LBO)

负双轴晶：在  $\lambda = 0.532 \text{ } \mu\text{m}$  时  $2V_z = 109.2^\circ$  [3.1]；

点群：mm2；

介电轴和晶体学轴的变换： $X, Y, Z \rightarrow a, c,$

$b$  (图 3.1)；

密度：2.47  $\text{g/cm}^3$ ；

莫氏硬度：6；

以“0”透过计的透过范围：0.155 ~

3.2  $\mu\text{m}$  [3.1,2]；

线性吸收系数  $\alpha$  [3.3]：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.35 ~ 0.36	0.003 1
1.064 2	0.000 35

折射率的实验值：

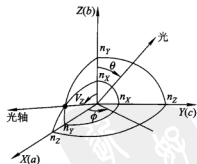


图 3.1 LBO 晶体在介电坐标系 ( $X, Y, Z$ ) 第一象限中折射率与光传播方向和偏振 (折射率面) 之间的关系。定义： $\theta$  是极角， $\phi$  是方位角， $V_z$  是光轴和  $Z$  方向之间的夹角

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	参考文献
0.253 7	1.633 5	1.658 2	1.679 2	3.1
0.289 4	1.620 9	1.646 7	1.668 1	3.1
0.296 8	1.618 2	1.645 0	1.667 4	3.1
0.312 5	1.609 7	1.641 5	1.658 8	3.1
0.334 1	1.604 3	1.634 6	1.650 9	3.1
0.365 0	1.595 23	1.625 18	1.640 25	3.3
	1.595 4	1.625 0	1.640 7	3.1
0.400 0	1.589 95	1.619 18		3.3
0.404 7	1.590 7	1.621 6	1.635 3	3.1
0.435 8	1.585 9	1.614 8	1.629 7	3.1
0.450 0	1.584 49	1.613 01	1.627 93	3.3
0.486 1	1.581 7	1.609 9	1.624 8	3.1
0.500 0	1.580 59	1.608 62	1.623 48	3.3
0.525 0	1.579 06	1.606 86		3.3
0.532 1	1.578 68	1.606 42	1.621 22	3.3
	1.578 5	1.606 5	1.621 2	3.1
0.539 8	1.578 2	1.621 2	1.606 3	3.4
0.546 1	1.578 0	1.605 7	1.620 6	3.1
0.550 0	1.577 72	1.605 35	1.620 14	3.3
0.578 0	1.576 5	1.603 9	1.618 7	3.1
0.589 3	1.576 0	1.603 5	1.618 3	3.1
0.600 0	1.575 41	1.602 76	1.617 53	3.3
0.632 8	1.574 2	1.601 4	1.616 3	3.1
0.656 3	1.573 4	1.600 6	1.615 4	3.1
0.700 0		1.598 93	1.613 63	3.3
0.800 0	1.569 59	1.596 15	1.610 78	3.3
0.900 0	1.567 64	1.593 86	1.608 43	3.3
1.000 0	1.565 86	1.591 87	1.606 37	3.3
1.064 2	1.564 87	1.590 72	1.605 15	3.3
	1.565 6	1.590 5	1.605 5	3.1
1.079 6	1.565 5	1.605 3	1.590 2	3.4
1.100 0	1.564 32	1.590 05	1.604 49	3.3

光谱范围 0.4 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  中 20 ~ 65  $^{\circ}\text{C}$  温度区间中折射率的温度微商<sup>[3,3]</sup>:

$$\text{d}n_x/\text{d}T \times 10^6 = -1.8$$

$$\text{d}n_y/\text{d}T \times 10^6 = -13.6$$

$$\text{d}n_z/\text{d}T \times 10^6 = -6.3 - 2.1\lambda$$

其中  $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $\text{d}n_x/\text{d}T$ 、 $\text{d}n_y/\text{d}T$  和  $\text{d}n_z/\text{d}T$  是以  $\text{K}^{-1}$  计。

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(\circ)$	$\phi_{\text{理论}}/(\circ)$		
		[3.2]	[3.5]	[3.6]
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.908 $\Rightarrow$ 0.954	23.8[3.5]	24.04	23.98	31.32
1.5 $\Rightarrow$ 0.75	7[3.5]	7.03	6.81	10.18
1.079 6 $\Rightarrow$ 0.539 8	10.6[3.5]	10.64	10.39	10.42
	10.7[3.1]			
	10.7[3.4]			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	11.3[3.3]	11.60	11.36	11.39
	11.4[3.7]			
	11.4[3.8]			
	11.6[3.2]			
	11.6[3.5]			
	11.6[3.9]			
	11.8[3.10]			
0.896 $\Rightarrow$ 0.448	23.3[3.11]	23.25	23.01	23.14
0.88 $\Rightarrow$ 0.44	24.5[3.11]	24.53	24.29	24.44
0.84 $\Rightarrow$ 0.42	27.9[3.11]	27.94	27.70	27.88
0.80 $\Rightarrow$ 0.40	31.7[3.11]	31.69	31.47	31.66
0.78 $\Rightarrow$ 0.39	33.7[3.11]	33.72	33.51	33.71
0.75 $\Rightarrow$ 0.375	37.1[3.11]	37.02	36.83	37.03
0.709 4 $\Rightarrow$ 0.354 7	41.8[3.5]	42.09	41.94	42.12
	41.9[3.12]			
	42[3.13]			
	43.5[3.14]			
0.63 $\Rightarrow$ 0.315	55.6[3.15]	55.32	55.29	55.42
0.555 $\Rightarrow$ 0.277 5	86[3.5]	85.75	85.74	85.97
0.554 $\Rightarrow$ 0.277	90[3.16]	88.97	88.87	无相位匹配
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	37.1[3.6]	37.21	36.86	37.30
	37.2[3.2]			
	37.2[3.3]			
1.064 2 + 0.354 73 $\Rightarrow$ 0.266 05	60.7[3.2]	60.63	61.35	61.02
	61[3.5]			
1.318 8 + 0.266 05 $\Rightarrow$ 0.221 39	70.2[3.2]	70.13	78.47	71.32
1.341 4 + 0.670 7 $\Rightarrow$ 0.447 13	20[3.6]	20.02	19.41	20.18
0.212 84 + 2.355 24 $\Rightarrow$ 0.195 2	50.3[3.6]	48.41	68.17	52.48
0.212 84 + 1.900 07 $\Rightarrow$ 0.191 4	63.8[3.6]	60.99	无相位匹配	64.07
0.212 84 + 1.589 10 $\Rightarrow$ 0.187 7	88[3.6]	81.21	无相位匹配	无相位匹配



YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.2]	[3.5]	[3.6]
SHG, $o + e \Rightarrow o$				
1.908 $\Rightarrow$ 0.954	46.2[3.5]	49.00	46.24	60.13
1.5 $\Rightarrow$ 0.75	14.7[3.5]	14.19	14.18	12.78
1.079 6 $\Rightarrow$ 0.539 8	19.2[3.5]	18.52	19.04	18.94
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	19.9[3.3]	20.45	20.94	20.85
	20.6[3.2]			
	20.5[3.17]			
	21.0[3.5]			
SFG, $o + e \Rightarrow o$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	42.2[3.2]	42.19	42.16	42.63
	42.5[3.6]			
	43.2[3.3]			

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.2]	[3.5]	[3.6]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
1.341 4 $\Rightarrow$ 0.670 7	4.2[3.5]	4.67	4.17	5.00
	5.0[3.9]			
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	5.2[3.2]	5.10	4.62	5.29
1.3 $\Rightarrow$ 0.65	5.4[3.9]	5.26	4.78	5.36

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.2]	[3.5]	[3.6]
SHG, $e + e \Rightarrow o$				
1.341 4 $\Rightarrow$ 0.670 7	86.3[3.5]	86.47	86.22	88.93
	86.6[3.9]			
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	86.0[3.2]	86.26	86.03	87.79
1.3 $\Rightarrow$ 0.65	86.1[3.9]	86.25	86.01	87.41

注: 从[3.1, 18, 3, 19, 20, 8, 21, 22, 23]获得的其他几组色散关系与实验的一致性差。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3,2]</sup>:

$$n_x^2 = 2.4542 + \frac{0.01125}{\lambda^2 - 0.01135} - 0.01388\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.5390 + \frac{0.01277}{\lambda^2 - 0.01189} - 0.01848\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.5865 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.01223} - 0.01861\lambda^2$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_s/(^{\circ})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$		
$2.098 \Rightarrow 1.049$	31.61	0.840
$1.1523 \Rightarrow 0.57615$	6.06	0.213
$1.0642 \Rightarrow 0.5321$	11.60	0.403
$0.6943 \Rightarrow 0.34715$	44.19	1.086
$0.5782 \Rightarrow 0.2891$	69.91	0.730
SFG, $o+o \Rightarrow e$		
$1.0642 + 0.5321 \Rightarrow 0.35473$	37.21	1.046
$1.0642 + 0.35473 \Rightarrow 0.26605$	60.63	1.006
$1.3188 + 0.6594 \Rightarrow 0.4396$	21.11	0.705

YZ 平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_s/(^{\circ})$
SHG, $o+e \Rightarrow o$		
$2.098 \Rightarrow 1.049$	72.90	0.307
$1.1523 \Rightarrow 0.57615$	9.28	0.169
$1.0642 \Rightarrow 0.5321$	20.45	0.348
SFG, $o+e \Rightarrow o$		
$1.0642 + 0.5321 \Rightarrow 0.35473$	42.19	0.533

XZ 平面,  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $e+o \Rightarrow e$			
$1.3188 \Rightarrow 0.6594$	5.10	0.248	0.262

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	86.26	0.191

在 LBO 中 SHG 过程逆群速失配的计算值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			0.9 $\Rightarrow$ 0.45	22.94	86
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	2.36	18	0.8 $\Rightarrow$ 0.4	31.69	123
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	9.37	37	0.7 $\Rightarrow$ 0.35	43.38	175
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	15.74	59	0.6 $\Rightarrow$ 0.3	62.63	257

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $o + e \Rightarrow o$			0.9 $\Rightarrow$ 0.45	45.36	139
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	15.98	82	0.8 $\Rightarrow$ 0.4	76.88	186
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	28.96	106			

沿  $X$  轴 NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	参考文献
SHG, I 类		
1.25 $\Rightarrow$ 0.625	-2.9	3.7, 8
1.215 $\Rightarrow$ 0.607 5	21	3.8
1.211 $\Rightarrow$ 0.605 5	20	3.2
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	24.3	3.7, 8
1.15 $\Rightarrow$ 0.575	61.1	3.7, 8
1.135 $\Rightarrow$ 0.567 5	77.4	3.10
1.11 $\Rightarrow$ 0.555	108.2	3.7, 8
1.079 6 $\Rightarrow$ 0.539 8	112	3.1
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	148	3.7, 8
	148.5	3.24, 25

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
1.047 $\Rightarrow$ 0.523 5	149	3.10
	149.5	3.26
	151	3.17
	166.5	3.27
	167	3.28
	172	3.29
	175	3.30
	176.5	3.31
	180	3.32
1.025 $\Rightarrow$ 0.512 5	190.3	3.7, 8
SFG, I 类		
1.908 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.683 2	81	3.10
1.135 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.549 1	112	3.10

沿  $X$  轴内角、温度和光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, I 类					
1.135 $\Rightarrow$ 0.567 5	77.4			4.7	3.10
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	148	3.54	2.57	3.9	3.7
	148.5			2.7	3.24
	148.5			4.2	3.25
	149	2.3	1.9	4.0	3.10
	149.5			4.1	3.26
	151	2.1	2.1	2.9	3.17
1.047 $\Rightarrow$ 0.523 5	175			3.5	3.30
	176.5			3.5	3.31
SFG, I 类					
1.908 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.683 2	81			7.4	3.10
1.135 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.549 1	112			5.0	3.10

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$  ( $T = 20^\circ\text{C}$ )

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$						
1.079 6 $\Rightarrow$ 0.539 8	10.7	0.31				3.4
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	10.8 (?)	0.27	2.63			3.17
	11.4	0.24	1.79			3.8
	11.6			5.8		3.2
		0.34	2.64	6.7	8.8	3.33
0.886 $\Rightarrow$ 0.443	24.1			7.8	15.9	3.11
0.870 $\Rightarrow$ 0.435	25.4	0.12				3.34
		0.10				3.11
0.78 $\Rightarrow$ 0.39	33.7	0.08				3.34
		0.07				3.11
0.760 5 $\Rightarrow$ 0.380 25	35.9			15.3	10.5	3.11
0.715 $\Rightarrow$ 0.357 5	41	0.06				3.34
SFG, $\text{o} + \text{o} = \text{e}$						
1.064 2 + 0.354 7 $\Rightarrow$ 0.266 1	60.7			3.8		3.2

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$  ( $T = 20^\circ\text{C}$ )

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{o}$						
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20.6	0.77	3.20			3.17
		0.81	3.00		11.5	3.33
				6.2		3.2
SFG, $\text{o} + \text{o} = \text{e}$						
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	42.2	0.18				3.2
		0.18	3.11			3.18

在 LBO 晶体的主平面上三波相互作用在相位匹配方向上的有效非线性的表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{ooe}} = d_{32} \cos \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

\* 译者注: 原书为 " $d_{\text{eoo}}$ ", 应为 " $d_{\text{eoo}}$ "。

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{eeo}} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$$

[3.36] 给出了 LBO 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性的表达式。

非线性系数<sup>[3.37]</sup>:

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) = \mp 0.67 \text{ pm/V}$$

$$d_{32}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 0.85 \text{ pm/V}$$

$$d_{33}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 0.04 \text{ pm/V}$$

激光引起的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.266 1	12	> 0.4	3.38	
0.307 8	17	> 0.6	3.39	
	17	> 0.6	3.40	
	10	> 1.0	3.41	
	0.000 3	470 000(?)	3.42	
0.354 7	18	> 1.8	3.43	10 Hz
	10	> 0.4	3.12	
	10	> 2.0	3.44	
	8	> 1.3	3.19	
	7	> 1.4	3.45	
	0.03	> 94	3.46	10 Hz
	0.03	> 180	3.47	10 Hz
	0.015	> 28	3.14	
	0.018	> 50	3.13	
	0.025	> 60	3.48	10 Hz
0.514 5	cw	> 0.000 3	3.49	
0.523 5	0.055	> 11	3.32	500 Hz
	0.055	> 50	3.50	500 Hz
0.532 1	cw	> 0.004	3.26	
	60	> 0.7	3.51	900 Hz
	10	> 2.2	3.9	
	0.1	> 45	3.52	500 Hz
	0.035	> 31	3.24	
	0.015	> 44	3.20	
0.605	0.000 2	> 250	3.53	
0.616	0.000 4	310 000(?)	3.42	
	0.000 4	350 000(?)	3.54	
	0.000 4	380 000(?)	3.55	
0.652	0.02	> 8.1	3.21	
0.7 ~ 0.9	10	> 0.3	3.11	10 Hz

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.71 ~ 0.87	25	11 ~ 14	3.34	25 Hz
0.72 ~ 0.85	0.001	> 80	3.56	
1.064 2	cw	> 0.01	3.26	
	60	> 0.6	3.51	1 333 Hz
	18	> 6	3.43	10 Hz
	9	> 9	3.57	10 Hz
	8	> 5	3.17	
	1.3	190	3.33	
	0.1	250	3.1	
	0.035	> 48	3.24	
	0.025	> 33	3.48	10 Hz
1.079 6	0.04	300	3.42	

热导率<sup>[3.58]</sup>;

$$\kappa = 3.5 \text{ W/mK}$$

### 3.1.2 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 磷酸二氢钾 (KDP)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;密度: 在 293 K 时为  $2.338 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.59]</sup>;

莫氏硬度: 2.5;

以“0”透过计的透过范围:  $0.174 \sim 1.57 \mu\text{m}$ <sup>[3.59,60]</sup>;对一块 0.8 cm 长的晶体, 以 0.5 透过计的透过范围:  $0.178 \sim 1.45 \mu\text{m}$ <sup>[3.59,60]</sup>;线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.212	0.2	3.61	
0.257 25	0.01 ~ 0.2	3.62	e 光, $\perp c$
	0.007	3.63	e 光, $\perp c$
0.3 ~ 1.15	< 0.07	3.64	
0.351 3	0.003	3.65	e 光, $\perp c$
0.514 5	0.000 05	3.62	o 光
0.526 5	0.01	3.66	o 光
0.94	0.01	3.67	
1.053	0.05	3.66	o 光
1.054	0.058	3.65	o 光

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
	0.02	3.65	e 光, $\perp c$
1.22	0.1	3.68	o 光
1.315 2	0.3	3.69	
1.32	0.1	3.68	e 光, $\perp c$

双光子吸收系数  $\beta$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献	备注
0.216	$60 \pm 5$	3.70	
0.266 1	$27 \pm 8.1$	3.71	$\theta = 41^\circ$ , $\phi = 45^\circ$
	40 ~ 80	3.72	
0.354 7	$0.59 \pm 0.21$	3.71	e 光, $\perp c$

在  $T = 298 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3,73]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.213 856 0	1.601 77	1.546 15	0.390 641 0		1.480 89
0.228 801 8	1.585 46		0.404 656 1	1.523 41	1.479 27
0.244 690 5	1.572 28		0.407 781 1	1.523 01	1.478 98
0.246 406 8	1.571 05		0.435 835 0	1.519 90	1.476 40
0.253 651 9	1.566 31	1.515 86	0.491 603 6		1.472 54
0.280 086 9	1.552 63	1.504 16	0.546 074 0	1.511 52	1.469 82
0.298 062 8	1.546 18	1.498 24	0.576 958 0	1.509 87	
0.302 149 9	1.544 33	1.497 08	0.579 065 4	1.509 77	1.468 56
0.303 578 1		1.496 67	0.632 816 0	1.507 37	1.466 85
0.312 566 3	1.541 17	1.494 34	1.013 975 0	1.495 35	1.460 41
0.313 154 5	1.540 98	1.494 19	1.128 704 0	1.492 05	1.459 17
0.334 147 8		1.489 54	1.152 276 0	1.491 35	1.458 93
0.365 014 6	1.529 32	1.484 32	1.357 070 0	1.484 55	
0.365 483 3	1.529 23	1.484 23	1.523 100 0		1.455 21
0.366 287 8	1.529 09	1.484 09	1.529 525 0		1.455 12

折射率的温度微商<sup>[3,74]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.405	-3.27	-3.15	0.578	-3.25	-2.87
0.436	-3.27	-2.88	0.633	-3.94	-2.54
0.546	-3.28	-2.90			



从室温冷却到  $T$  [K] 时折射率的温度关系:

光谱范围  $0.365 \sim 0.690 \mu\text{m}$  <sup>[3.75]</sup>:

$$n_o(T) = n_o(298) + 0.402 \times 10^{-4} \{ [n_o(298)]^2 - 1.432 \} (298 - T)$$

$$n_e(T) = n_e(298) + 0.221 \times 10^{-4} \{ [n_e(298)]^2 - 1.105 \} (298 - T)$$

光谱范围  $0.436 \sim 0.589 \mu\text{m}$  <sup>[3.76]</sup>:

$$n_o(T) = n_o(300) + 10^{-4} (143.3 - 0.618T + 4.81 \times 10^{-4} T^2)$$

$$n_e(T) = n_e(300) + 10^{-4} (153.3 - 0.969T + 1.57 \times 10^{-3} T^2)$$

相位匹配角的实验值 ( $T = 293$  K) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.73]	[3.77]	[3.78]K
SHG, $o+o\Rightarrow e$				
0.517 $\Rightarrow$ 0.258 5	90[3.74]	无相位匹配	无相位匹配	73.6
0.657 6 $\Rightarrow$ 0.328 8	53.6[3.69]	53.6	53.6	53.2
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	50.4[3.79]	50.6	50.6	50.4
0.870 7 $\Rightarrow$ 0.435 35	42.4[3.80]	42.8	42.7	42.8
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	41[3.81]	41.2	41.0	40.9
	41[3.82]			
1.315 2 $\Rightarrow$ 0.657 6	44.3[3.69]	44.6	44.7	44.1
SFG, $o+o\Rightarrow e$				
1.415 + 0.220 27 $\Rightarrow$ 0.190 6	88.7[3.83]	83.7	83.6	54.3
1.364 8 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.460 19	40.9[3.80]	41.7	41.7	41.6
1.315 2 + 0.657 6 $\Rightarrow$ 0.438 4	42.2[3.69]	42.1	42.1	42.0
1.064 2 + 0.270 7 $\Rightarrow$ 0.215 81	87.6[3.84]	87.5	87.3	62.9
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	47.3[3.85]	47.3	47.3	47.1
1.06 + 0.53 $\Rightarrow$ 0.353 33	47.5[3.82]	47.4	47.4	47.3
0.657 6 + 0.438 4 $\Rightarrow$ 0.263 04	74[3.86]	75.2	75.4	68.6
SHG, $e+o\Rightarrow e$				
1.315 2 $\Rightarrow$ 0.657 6	61.4[3.69]	61.8	61.8	60.7
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	59[3.82]	59.0	58.8	58.6
SFG, $e+o\Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	58.3[3.85]	58.2	58.3	57.9
1.06 + 0.53 $\Rightarrow$ 0.353 33	59.3[3.82]	58.5	58.5	58.1

注: 从 [3.74] 和 [3.78]E 得到的其他色散关系系列与实验一致性差。

[3.78]K  $\Rightarrow$  见 [3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E  $\Rightarrow$  见 [3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.514 $5 \Rightarrow$ 0.257 25	-13.7	3.63
	-11	3.62
0.517 $\Rightarrow$ 0.258 5	20	3.74
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	177	3.87
	177	3.88
SFG, $o + o \Rightarrow e$		
1.06 + 0.265 $\Rightarrow$ 0.212	-70	3.61
1.064 2 + 0.266 05 $\Rightarrow$ 0.212 84	-40	3.89
	-35	3.90

最佳的色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.74]</sup>:

$$n_o^2 = 2.259\,276 + \frac{13.005\,22\lambda^2}{\lambda^2 - 400} + \frac{0.010\,089\,56}{\lambda^2 - (77.264\,08)^{-1}}$$

$$n_e^2 = 2.132\,668 + \frac{3.227\,992\,4\lambda^2}{\lambda^2 - 400} + \frac{0.008\,637\,494}{\lambda^2 - (81.426\,31)^{-1}}$$

Sellmeier 方程的温度关系( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T$  以 K 为单位)<sup>[3.77]</sup>:

$$n_o^2 = (1.448\,96 + 3.185 \times 10^{-5}T) + \frac{(0.841\,81 - 1.411\,4 \times 10^{-4}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.012\,8 - 2.13 \times 10^{-7}T)}$$

$$+ \frac{(0.907\,93 + 5.75 \times 10^{-7}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 30}$$

$$n_e^2 = (1.426\,91 - 1.152 \times 10^{-5}T) + \frac{(0.727\,22 - 6.139 \times 10^{-5}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.012\,13 + 3.104 \times 10^{-7}T)}$$

$$+ \frac{(0.225\,43 - 1.98 \times 10^{-7}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 30}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	76.60		0.808
0.578 $2 \Rightarrow$ 0.289 1	64.03		1.391
0.632 $8 \Rightarrow$ 0.316 4	56.15		1.611
0.659 $4 \Rightarrow$ 0.329 7	53.43		1.657
0.694 $3 \Rightarrow$ 0.347 15	50.55		1.687
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	41.21		1.603
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	44.70		1.549

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SFG, $o+o \Rightarrow e$			
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	72.46		1.025
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	47.28		1.712
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	42.05		1.657
SHG, $e+o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	58.98	1.149	1.404
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	61.85	0.922	1.269
SFG, $e+o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	58.23	1.166	1.521
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	49.42	1.104	1.634

KDP 中 SHG 过程逆群速失配的计算值:

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\beta/(fs \cdot mm^{-1})$	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\beta/(fs \cdot mm^{-1})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$			SHG, $e+o \Rightarrow e$		
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	42.45	42	1.2 $\Rightarrow$ 0.6	59.54	89
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	41.38	17	1.1 $\Rightarrow$ 0.55	58.87	67
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	41.22	9	1.0 $\Rightarrow$ 0.5	59.75	89
0.9 $\Rightarrow$ 0.45	42.24	40	0.9 $\Rightarrow$ 0.45	62.97	118
0.8 $\Rightarrow$ 0.4	44.91	77	0.8 $\Rightarrow$ 0.4	70.71	158
0.7 $\Rightarrow$ 0.35	50.14	128			
0.6 $\Rightarrow$ 0.3	60.40	208			

内角和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o+o \Rightarrow e$					
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	20	41	0.074		3.91
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20	41	0.070		3.92
	25			23	3.93
1.064 $\Rightarrow$ 0.532	20	41	0.069		3.94
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	41	0.063		3.81
1.054 $\Rightarrow$ 0.527	25	41	0.060		3.95
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	25			1.7	3.93
	177	90		1.9	3.87
	177	90		2	3.88
0.53 $\Rightarrow$ 0.265	20	77	0.059		3.96
	20	77	0.066		3.97

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	25			5.5	3.93
1.054 + 0.527 $\Rightarrow$ 0.351 33	25	48	0.046		3.95
SHG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	25			18.3	3.93
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	59	0.129		3.96
1.054 $\Rightarrow$ 0.527	25	59	0.126		3.95
SFG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	25			5.2	3.93
1.06 + 0.53 $\Rightarrow$ 0.353 33	20	59	0.062		3.97
1.054 + 0.527 $\Rightarrow$ 0.351 33	25	59	0.059		3.95

光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	41	178	3.81
0.53 $\Rightarrow$ 0.265	20	77	1.2	3.96
SHG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	59	101.5	3.96

相位匹配角的温度变化:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	25		0.002 8	3.93
1.054 $\Rightarrow$ 0.527	25	41	0.004 6	3.95
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	25		0.038 2	3.93
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	25		0.007 3	3.93
1.054 + 0.527 $\Rightarrow$ 0.351 33	25	59	0.004 6	3.95
SHG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	25	59	0.006 9	3.98
	25		0.006 9	3.93
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	59	0.005 7	3.96
1.054 $\Rightarrow$ 0.527	25	59	0.008 6	3.95
	20	59	0.006 9	3.65

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$	参考文献
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	25	58	0.010 6	3.98
	25		0.011 7	3.93
1.054 + 0.527 $\Rightarrow$ 0.351 33	25	59	0.015 2	3.95
	20	59	0.007 5	3.65

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
0.517 $\Rightarrow$ 0.258 5	0.048

非临界 SHG 过程双折射的温度变化:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d(n_2^e - n_1^o)/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	参考文献
0.514 5 $\Rightarrow$ 0.257 25	1.745	3.99
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	1.2	3.87

相位匹配方向上的有效非线性的表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数<sup>[3.37]</sup>:

$$d_{36}(1.064 \mu\text{m}) = 0.39 \text{ pm/V}$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.52	330	2	3.101
0.526 5	20	30	3.66
	0.6	90	3.66
0.527	0.5	> 140	3.102
0.53	0.2	170	3.103
	0.005	10 000(?)	3.104
0.532 1	0.6	> 80	3.72
	0.03	300	3.105
0.596	330	2.4	3.101
	20	30	3.101

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.694 3	20	> 4	3. 106
1. 053	25	40	3. 66
	1	180	3. 66
	1	200	3. 107
1. 054	0. 14	> 70	3. 108
1. 06	60	2	3. 109
	12 ~ 25	2. 5	3. 81
	0. 5	> 30	3. 110
	0. 2	230	3. 103
1. 064	20	3 ~ 6	3. 111
	1. 3	80	3. 33
1. 064	1	30 ~ 70	3. 111
	1	50	3. 112
	0. 1	70	3. 1

热导率<sup>[3. 59]</sup>:

$T/\text{K}$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
302	1. 21	
319		1. 34

### 3. 1. 3 $\text{KD}_2\text{PO}_4$ , 氘化磷酸二氢钾 (DKDP)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;密度:  $2.355 \text{ g/cm}^3$ ;

莫氏硬度: 2. 5;

以“0”透过计的透过范围:  $0.2 \sim 2.1 \mu\text{m}$ <sup>[3. 113, 114]</sup>;线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0. 266	0. 035	3. 115	
0. 532 1	0. 004 ~ 0. 005	3. 116	98% ~ 99% 氘化度
0. 82 ~ 1. 21	< 0. 015	3. 67	
0. 94	0. 005	3. 67	
1. 064 2	0. 004 ~ 0. 005	3. 116	98% ~ 99% 氘化度

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
1.315	0.025	3.117	
1.57	0.1	3.68	o 光, 95% 氘化度
1.74	0.1	3.68	e 光, 95% 氘化度

双光子吸收系数  $\beta$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献	备注
0.266 1	$2.0 \pm 1.0$	3.118	
	$2.7 \pm 0.7$	3.115	
0.354 7	$0.54 \pm 0.19$	3.71	e 光, $\perp c$

在  $T = 298 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.95]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.404 7	1.518 9	1.477 6	0.546 1	1.507 9	1.468 3
0.407 8	1.518 5	1.477 2	0.577 9	1.506 3	1.467 0
0.435 8	1.515 5	1.474 7	0.623 4	1.504 4	1.465 6
0.491 6	1.511 1	1.471 0	0.690 7	1.502 2	1.463 9

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^3/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^3/\text{K}^{-1}$
0.405	-3.00	-1.86
0.436	-3.37	-2.13
0.546	-2.99	-1.95
0.578	-3.00	-2.52
0.633	-3.16	-2.03

从室温冷却到  $T[\text{K}]$  时折射率的温度关系:光谱范围  $0.365 \sim 0.690 \mu\text{m}$ <sup>[3.75]</sup>:

$$n_o(T) = n_o(298) + 0.228 \times 10^{-4} \{ [n_o(298)]^2 - 1.047 \} (298 - T)$$

$$n_e(T) = n_e(298) + 0.955 \times 10^{-5} [n_e(298)]^2 (298 - T)$$

光谱范围  $0.436 \sim 0.589 \mu\text{m}$ <sup>[3.76]</sup>:

$$n_o(T) = n_o(300) + 10^{-4} (85.2 - 0.069 5T - 7.25 \times 10^{-4} T^2)$$

$$n_e(T) = n_e(300) + 10^{-4} (21.8 - 0.445T - 1.24 \times 10^{-3} T^2)$$

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.77]	[3.78]K	[3.78]E
SHG, $o+o \Rightarrow e$				
0.530 $\Rightarrow$ 0.265	90[3.119]	无相位匹配	无相位匹配	87.4
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	52[3.79]	50.6	50.9	51.0
1.062 $\Rightarrow$ 0.531	37.1[3.120]	38.6	36.6	36.6
SHG, $e+o \Rightarrow e$				
1.315 2 $\Rightarrow$ 0.657 6	51.3[3.69]	63.2	51.7	49.4

注:从[3.74]得到的一个色散关系系列与实验一致性差。

[3.78]K $\Rightarrow$ 见[3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E $\Rightarrow$ 见[3.78], Eimerl 的数据。

#### NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	备注
SHG, $o+o \Rightarrow e$			
0.528 $\Rightarrow$ 0.264	-30	3.119	
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	42	3.89	99% 氘化度
	45	3.87	95% 氘化度
	46	3.90	99% 氘化度
	49.8	3.121	>95% 氘化度
	60.8	3.122	90% 氘化度
0.536 $\Rightarrow$ 0.268	100	3.119	

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.78]K</sup>:

$$n_o^2 = 2.240\,921 + \frac{2.246\,956\lambda^2}{\lambda^2 - (11.265\,91)^2} + \frac{0.009\,676}{\lambda^2 - (0.124\,981)^2}$$

$$n_e^2 = 2.126\,019 + \frac{0.784\,404\lambda^2}{\lambda^2 - (11.108\,71)^2} + \frac{0.008\,578}{\lambda^2 - (0.109\,505)^2}$$

Sellmeier 方程的温度关系( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T$  以 K 为单位)<sup>[3.77]</sup>:

$$n_o^2 = (1.559\,34 + 3.393\,5 \times 10^{-4}T) + \frac{(0.710\,98 - 4.165\,5 \times 10^{-4}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.014\,07 + 6.490\,4 \times 10^{-6}T)}$$

$$+ \frac{(0.676\,71 + 4.828\,1 \times 10^{-5}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 30}$$

$$n_e^2 = (1.686\,47 + 3.43 \times 10^{-6}T) + \frac{(0.466\,29 - 6.26 \times 10^{-5}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.016\,63 + 1.362\,6 \times 10^{-6}T)}$$

$$+ \frac{(0.596\,14 + 2.41 \times 10^{-7}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 30}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:



相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	86.20		0.225
0.578 $2 \Rightarrow$ 0.289 1	66.87		1.197
0.632 $8 \Rightarrow$ 0.316 4	57.53		1.467
0.659 $4 \Rightarrow$ 0.329 7	54.31		1.522
0.694 $3^* \Rightarrow$ 0.347 15	50.86		1.558
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	36.60		1.450
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	36.36		1.412
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	77.88		0.595
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	46.82		1.580
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	39.18		1.515
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	53.47	1.286	1.427
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	51.70	1.222	1.420
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	59.38	1.174	1.378
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	47.70	1.254	1.527

DKDP 中 SHG 过程逆群速失配的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	35.94	< 1
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	36.28	18
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	37.47	38
0.9 $\Rightarrow$ 0.45	39.79	63
0.8 $\Rightarrow$ 0.4	43.75	96
0.7 $\Rightarrow$ 0.35	50.37	143
0.6 $\Rightarrow$ 0.3	62.54	218
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	51.62	55
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	52.73	71
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	55.37	92
0.9 $\Rightarrow$ 0.45	60.41	120
0.8 $\Rightarrow$ 0.4	70.43	159

\* 译者注: 原文为 "1.694 3", 应为 "0.694 3"。

内角和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$					
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	20	37	0.081		3.92
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	60.8	90		1.8	3.122
	45	90		1.9	3.87
SHG, $e + o \Rightarrow e$					
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	20	54	0.131		3.123
	20		0.126		3.124
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	60	0.143		3.96

光谱带宽的实验值<sup>[3.96]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	60	74.8

相位匹配角的温度微商<sup>[3.96]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	60	0.006 3

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
0.519 $\Rightarrow$ 0.259 5	0.068

相位匹配方向上的有效非线性<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数<sup>[3.37]</sup>:

$$d_{36}(1.064 \mu\text{m}) = 0.37 \text{ pm/V}$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.266	0.03	> 100	3.115
0.532	30	> 0.5	3.122
	8	170	3.125
	0.6	> 80	3.72
	0.03	> 80	3.118
0.6	330	3	3.101
1.062	0.007	> 10	3.120
1.064	40	> 2.5	3.122
	18	> 1.0	3.116
	14	80	3.125
	1	60	3.124
	0.25	> 30	3.116
1.315	1	15	3.69

热导率<sup>[3.78]</sup>;

$$\kappa = 1.86 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) (\parallel c)$$

$$\kappa = 2.09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) (\perp c)$$

### 3.1.4 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , 磷酸二氢铵 (ADP)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度: 在 293 K 时  $1.803 \text{ g}/\text{cm}^3$ <sup>[3.59]</sup>;

莫氏硬度: 2;

以“0”透计计的透过范围:  $0.18 \sim 1.53 \mu\text{m}$ <sup>[3.60,126]</sup>;

对一块 0.8 cm 长的晶体, 以 0.5 透计计的透过范围:  $0.185 \sim 1.45 \mu\text{m}$ <sup>[3.59,60]</sup>。

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.257 25	0.002	3.62	e 光, $\perp c$
0.265	0.07	3.127	e 光, $\perp c$
0.266	0.035	3.115	
0.3 ~ 1.15	< 0.07	3.64	
0.514 5	0.000 05	3.62	o 光, $\perp c$
1.027	0.086	3.67	
1.083	0.208	3.67	
1.144	0.150	3.67	

双光子吸收系数  $\beta$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献	备注
0.266 1	$6 \pm 1$	3.118	
	$11 \pm 3$	3.115	
	$24 \pm 7$	3.71	$\theta = 42^\circ, \phi = 45^\circ$
0.307 8	$23 \pm 5$	3.128	
0.354 7	$0.68 \pm 0.24$	3.71	e 光, $\perp c$

在  $T = 298 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.73, 129]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.213 856 0	1.625 98	1.567 38	0.404 656 1	1.539 69	1.491 59
0.228 801 8	1.607 85	1.551 38	0.407 781 1	1.539 25	1.491 23
0.253 651 9	1.586 88	1.532 89	0.435 835 0	1.535 78	1.488 31
0.296 727 8	1.564 62	1.513 39	0.491 603 6		1.483 90
0.302 149 9	1.562 70	1.511 63	0.546 074 0	1.526 62	1.480 79
0.312 566 3	1.559 17	1.508 53	0.576 959 0	1.524 78	1.479 39
0.313 154 5	1.558 97	1.508 32	0.579 065 4	1.524 66	1.479 30
0.334 147 8	1.553 00	1.503 13	0.632 816 0	1.521 95	1.477 27
0.365 014 6	1.546 15	1.497 20	1.013 975 0	1.508 35	1.468 95
0.365 483 3	1.546 08	1.497 12	1.128 704 0	1.504 46	1.467 04
0.366 287 8	1.545 92	1.496 98	1.152 276 0	1.503 64	1.466 66
0.390 641 0	1.541 74				

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.405	-4.78	$\approx 0$
0.436	-4.94	$\approx 0$
0.546	-5.23	$\approx 0$
0.578	-4.60	$\approx 0$
0.633	-5.08	$\approx 0$

从室温降至  $T[\text{K}]$  时折射率的温度关系:

光谱范围  $0.365 \sim 0.690 \mu\text{m}$ <sup>[3.75]</sup>:

$$n_o(T) = n_o(298) + 0.713 \times 10^{-2} \{ [n_o(298)]^2 - 3.0297n_o(298) + 2.3004 \} (298 - T)$$

$$n_e(T) = n_e(298) + 0.675 \times 10^{-6} (298 - T)$$

光谱范围  $0.436 \sim 0.589 \mu\text{m}^{[3.76]}$ ;

$$n_a(T) = n_a(300) + 10^{-4}(141.8 - 0.322 T - 5.02 \times 10^{-4} T^2)$$

$$n_e(T) = n_e(300) + 10^{-4}(2.5 - 0.017 63 T + 2.901 \times 10^{-5} T^2)$$

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.73]	[3.77]	[3.78]K
		[3.129]		
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.524 $\Rightarrow$ 0.262	90[3.74]	无相位匹配	无相位匹配	83.6
0.530 $\Rightarrow$ 0.265	81.7[3.97]	81.6	82.2	79.6
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	51.9[3.79]	51.1	51.1	51.5
0.703 5 $\Rightarrow$ 0.351 75	50.5[3.130]	50.4	50.5	50.8
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	41.9[3.79]	41.7	41.7	42.2
	42[3.81]			
SFG, $o + o \Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	46.9[3.85]	47.8	47.9	48.3
1.064 2 + 0.281 0 $\Rightarrow$ 0.222 30	90[3.84]	89.0	无相位匹配	74.7
0.812 19 + 0.347 15 $\Rightarrow$ 0.243 20	90[3.131]	无相位匹配	无相位匹配	81.1
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	60.2[3.85]	59.9	60.0	60.4

注: 从[3.74]和[3.78]得到的其他色散关系列与实验一致性差。

[3.78]K $\Rightarrow$ 见[3.78], Kirby 等的数据; [3.78]E $\Rightarrow$ 见[3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	备注
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
$0.492 0 \Rightarrow 0.246 0$	-116	3.132	
$0.496 5 \Rightarrow 0.248 25$	-93.2	3.133	
$0.501 7 \Rightarrow 0.250 85$	-68.4	3.133	
$0.514 5 \Rightarrow 0.257 25$	-11.7	3.99	
	-10.2	3.133	
	-9.2	3.62	
$0.524 \Rightarrow 0.262$	20	3.74	
$0.525 34 \Rightarrow 0.262 67$	30	3.134	
$0.53 \Rightarrow 0.265$	43	3.127	
	47	3.97	

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	备注
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	48	3.135	
	49.6	3.136	
	47.1	3.90	
	49.5	3.137	
	50	3.138	
	51.2	3.139	0.1 ~ 1 Hz
	44.6	3.139	20 Hz
	51 ~ 52	3.140	
0.548 $\Rightarrow$ 0.274	100	3.134	
0.557 $\Rightarrow$ 0.278 5	120	3.119	
SFG, o + o $\Rightarrow$ e			
1.064 2 + 0.266 05 $\Rightarrow$ 0.212 84	-55	3.141	

最佳的色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.73,129]</sup>:

$$n_o^2 = 2.302\,842 + \frac{15.102\,464\lambda^2}{\lambda^2 - 400} + \frac{0.011\,125\,165}{\lambda^2 - (75.450\,861)^{-1}}$$

$$n_e^2 = 2.163\,510 + \frac{5.919\,896\lambda^2}{\lambda^2 - 400} + \frac{0.009\,616\,676}{\lambda^2 - (76.987\,51)^{-1}}$$

Sellmeier 方程的温度关系( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T$  以 K 为单位)<sup>[3.77]</sup>:

$$n_o^2 = (1.699\,6 - 8.783\,5 \times 10^{-4}T) + \frac{(0.649\,55 + 7.200\,7 \times 10^{-4}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.017\,23 - 1.405\,26 \times 10^{-3}T)}$$

$$+ \frac{(1.106\,24 - 1.179 \times 10^{-4}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 30}$$

$$n_e^2 = (1.420\,36 - 1.089 \times 10^{-5}T) + \frac{(0.744\,53 + 5.14 \times 10^{-6}T)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.013 - 2.471 \times 10^{-7}T)}$$

$$+ \frac{(0.420\,33 - 9.99 \times 10^{-7}T)\lambda^2}{\lambda^2 - 30}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, o + o $\Rightarrow$ e			
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	80.15		0.639
0.578 2 $\Rightarrow$ 0.289 1	65.28		1.427
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	56.91		1.703
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	54.07		1.762

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	51.09		1.803
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	41.74		1.746
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	45.55		1.694
SFG, o + o $\Rightarrow$ e			
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	74.84		0.955
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	47.82		1.836
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	42.56		1.794
SHG, e + o $\Rightarrow$ e			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	61.39	1.230	1.449
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	65.63	0.968	1.250
SFG, e + o $\Rightarrow$ e			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	59.85	1.272	1.582
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	50.86	1.274	1.748

ADP 的 SHG 过程逆群速失配的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\beta/(fs \cdot mm^{-1})$
SHG, o + o $\Rightarrow$ e		
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	43.10	49
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	41.94	21
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	41.71	8
0.9 $\Rightarrow$ 0.45	42.68	42
0.8 $\Rightarrow$ 0.4	45.34	85
0.7 $\Rightarrow$ 0.35	50.67	142
0.6 $\Rightarrow$ 0.3	61.39	233
SHG, e + o $\Rightarrow$ e		
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	62.50	105
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	61.39	78
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	62.02	95
0.9 $\Rightarrow$ 0.45	65.24	127
0.8 $\Rightarrow$ 0.4	73.80	173

内角和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{im}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	42	0.057		3.81
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	49.5	90		0.60	3.137
	51	90	1.086	0.53	3.139
0.53 $\Rightarrow$ 0.265	20	82	0.118		3.103
	20	82	0.088		3.96
	20	82	0.089	0.63	3.97

光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	42	178	3.81
0.53 $\Rightarrow$ 0.265	20	82	1.2	3.96

相位匹配角的温度变化<sup>[3.97]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$			
0.53 $\Rightarrow$ 0.265	20	82	0.141 8
	47	90	1.102 0

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$	
0.524 $\Rightarrow$ 0.262	0.306

非临界 SFG 的温度调谐<sup>[3.142]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_3/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$	
0.694 3 + 0.399 61 $\Rightarrow$ 0.253 63	0.171



非临界 SHG 过程的双折射温度变化 ( $0.514\ 5\ \mu\text{m} \Rightarrow 0.257\ 25\ \mu\text{m}$ ,  $o + o \Rightarrow e$ ) :

$$d(n_2^o - n_1^o)/dT = 5.65 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1} [3.99]$$

在相位匹配方向上有效非线性的表达式<sup>[3.100]</sup> :

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数<sup>[3.37]</sup> :

$$d_{36}(1.064\ \mu\text{m}) = 0.47\ \text{pm/V}$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.265	30	> 10	3.127	
0.266	0.03	> 100	3.120	
0.53	0.5	> 130	3.110	
0.532 1	3	> 7.5	3.140	30 Hz
	0.6	> 80	3.72	
	0.03	> 80	3.118	
0.6	330	18	3.101	
1.06	60	5	3.109	

热导率<sup>[3.59]</sup> :

$T/\text{K}$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , $\parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , $\perp c$
315	0.71	1.26
340	0.71	1.34

### 3.1.5 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ , 偏硼酸钡 (BBO)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $3\text{m}$ ;

密度:  $3.85\ \text{g/cm}^3$ ;

莫氏硬度:  $4^{[3.124]}$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.189 \sim 3.5\ \mu\text{m}^{[3.143,144]}$ ;

$0.8\ \text{cm}$  长晶体以  $0.5$  透过计的透过范围:  $0.198 \sim 2.6\ \mu\text{m}^{[3.145]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.532	0.01	3.146	2.55	0.5	3.147

折射率的实验值<sup>[3.148]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.404 66	1.692 67	1.567 96	0.589 30	1.670 49	1.552 47
0.435 83	1.686 79	1.563 76	0.643 85	1.667 36	1.550 12
0.467 82	1.681 98	1.560 24	0.818 90	1.660 66	1.545 89
0.479 99	1.680 44	1.559 14	0.852 12	1.659 69	1.545 42
0.508 58	1.677 22	1.556 91	0.894 35	1.658 62	1.544 69
0.546 07	1.673 76	1.554 65	1.014 00	1.656 08	1.543 33
0.579 07	1.671 31	1.552 98			

在  $\lambda = 0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$  时折射率的温度微商<sup>[3.148]</sup>:

$$\text{dn}_o/\text{dT} = -16.6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

$$\text{dn}_e/\text{dT} = -9.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$		
		[3. 149]	[3. 148]	[3. 145]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.409 6 $\Rightarrow$ 0.204 8	90 [3. 145]	89.36	86.51	88.82
0.41 $\Rightarrow$ 0.205	90 [3. 150]	87.25	85.54	86.97
0.411 52 $\Rightarrow$ 0.205 76	82.8 [3. 145]	84.11	82.99	83.77
0.415 46 $\Rightarrow$ 0.207 73	79.2 [3. 145]	79.80	78.87	79.31
0.476 5 $\Rightarrow$ 0.238 25	57 [3. 151]	57.79	56.57	56.73
0.488 $\Rightarrow$ 0.244	54.5 [3. 151]	55.53	54.29	54.46
0.496 5 $\Rightarrow$ 0.248 25	52.5 [3. 151]	54.00	52.76	52.94
0.514 5 $\Rightarrow$ 0.257 25	49.5 [3. 151]	51.13	49.87	50.06
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	47.3 [3. 148]	48.67	47.42	47.62
	47.5 [3. 145]			

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.149]	[3.148]	[3.145]
	47.5[3.152]			
	47.6[3.153]			
	47.6[3.45]			
	48[3.154]			
0.604 $\Rightarrow$ 0.302	40[3.155]	41.00	39.89	40.13
0.615 6 $\Rightarrow$ 0.307 8	39[3.156]	40.02	38.95	39.18
0.709 46 $\Rightarrow$ 0.354 73	32.9[3.157]	33.65	32.94	33.15
	32.9[3.158]			
	33[3.159]			
	33[3.152]			
	33[3.160]			
	33.1[3.45]			
	33.3[3.147]			
	33.7[3.161]			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	22.7[3.148]	21.42	22.88	22.78
	22.8[3.145]			
	22.8[3.152]			
	22.8[3.33]			
	22.8[3.162]			
	22.8[3.45]			
	22.8[3.163]			
SFG, $\alpha + \alpha \Rightarrow e$				
0.738 65 + 0.257 25 $\Rightarrow$ 0.190 8	81.7[3.164]	72.94	75.27	76.11
0.727 47 + 0.263 25 $\Rightarrow$ 0.193 3	76[3.165]	71.79	73.59	74.22
0.592 2 + 0.296 1 $\Rightarrow$ 0.197 4	88[3.166]	80.44	82.13	83.22
0.596 4 + 0.298 2 $\Rightarrow$ 0.198 8	82.5[3.167]	78.02	79.11	79.81

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3. 149]	[3. 148]	[3. 145]
0. 599 1 + 0. 299 55 $\Rightarrow$ 0. 199 7	80 [3. 166]	76. 71	77. 57	78. 14
0. 604 65 + 0. 302 33 $\Rightarrow$ 0. 201 55	76. 2 [3. 167]	74. 41	74. 92	75. 34
0. 532 1 + 0. 325 61 $\Rightarrow$ 0. 202	83. 9 [3. 145]	80. 88	81. 22	81. 95
0. 609 9 + 0. 304 95 $\Rightarrow$ 0. 203 3	73. 5 [3. 166]	72. 51	72. 82	73. 16
0. 532 1 + 0. 346 91 $\Rightarrow$ 0. 21	71. 9 [3. 145]	72. 11	71. 60	71. 84
1. 064 2 + 0. 266 05 $\Rightarrow$ 0. 212 84	51. 1 [3. 145]	50. 69	51. 04	51. 12
1. 064 2 + 0. 354 73 $\Rightarrow$ 0. 266 05	40. 2 [3. 145]	40. 75	40. 19	40. 31
1. 064 2 + 0. 532 1 $\Rightarrow$ 0. 354 73	31. 1 [3. 148]	31. 52	31. 12	31. 28
	31. 3 [3. 145]			
	31. 4 [3. 161]			
0. 578 2 + 0. 510 6 $\Rightarrow$ 0. 271 15	46 [3. 168]	45. 23	46. 03	46. 24
0. 590 99 + 0. 532 1 $\Rightarrow$ 0. 28	44. 7 [3. 169]	45. 23	44. 03	44. 25
2. 688 23 + 0. 571 2 $\Rightarrow$ 0. 471 1	21. 8 [3. 170]	18. 37	21. 73	21. 39
1. 418 31 + 1. 064 2 $\Rightarrow$ 0. 608	21 [3. 171]	18. 40	21. 26	20. 96
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
0. 532 1 $\Rightarrow$ 0. 266 05	81 [3. 145]	无相位匹配	82. 03	80. 78
0. 709 46 $\Rightarrow$ 0. 354 73	48 [3. 159]	48. 72	47. 61	47. 92
	48. 1 [3. 152]			
1. 064 2 $\Rightarrow$ 0. 532 1	31. 6 [3. 172]	30. 00	31. 94	32. 18
	32. 4 [3. 148]			
	32. 7 [3. 152]			
	32. 7 [3. 33]			
	32. 9 [3. 145]			
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1. 064 2 + 0. 354 73 $\Rightarrow$ 0. 266 05	46. 6 [3. 145]	46. 81	46. 11	46. 31
1. 064 2 + 0. 532 1 $\Rightarrow$ 0. 354 73	38. 4 [3. 148]	38. 39	37. 77	38. 15
	38. 5 [3. 145]			
SFG, $o + e \Rightarrow e$				
1. 064 2 + 0. 532 1 $\Rightarrow$ 0. 354 73	59. 8 [3. 145]	59. 46	58. 91	58. 89

注: 从[3. 143, 154, 170]得到的色散关系系列与实验一致性差。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3, 145]</sup>:

$$n_o^2 = 2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda^2$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_s/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.488 0 $\Rightarrow$ 0.244 0	54.46	4.757
0.510 5 $\Rightarrow$ 0.255 25	50.66	4.861
0.514 5 $\Rightarrow$ 0.257 25	50.06	4.869
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	47.62	4.879
0.578 2 $\Rightarrow$ 0.289 1	42.46	4.782
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	37.87	4.571
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	36.05	4.457
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	33.96	4.306
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	22.78	3.189
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	20.36	2.881
SFG, $o + o \Rightarrow e$		
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	25.39	3.515
1.318 8 + 0.439 6 $\Rightarrow$ 0.329 7	31.19	4.205
1.318 8 + 0.329 7 $\Rightarrow$ 0.263 76	37.40	4.897
1.318 8 + 0.263 76 $\Rightarrow$ 0.219 8	44.52	5.588
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	31.28	4.132
1.064 2 + 0.354 73 $\Rightarrow$ 0.266 05	40.31	4.941
1.064 2 + 0.266 05 $\Rightarrow$ 0.212 84	51.12	5.497
0.694 3 + 0.347 15 $\Rightarrow$ 0.231 43	55.00	4.882
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	46.12	4.872
0.514 5 + 0.488 0 $\Rightarrow$ 0.250 45	52.17	4.831

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	80.78	1.252	1.252	1.446
0.578 $2 \Rightarrow$ 0.289 1	65.08	3.068	3.068	3.460
0.632 $8 \Rightarrow$ 0.316 4	55.98	3.773	3.773	4.163
0.659 $4 \Rightarrow$ 0.329 7	52.77	3.941	3.941	4.310
0.694 $3 \Rightarrow$ 0.347 15	49.25	4.070	4.070	4.408
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	32.18	3.840	3.840	3.940
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	28.77	3.632	3.632	3.663
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	30.88	3.773		3.947
1.318 8 + 0.439 6 $\Rightarrow$ 0.329 7	35.71	4.013		4.444
1.318 8 + 0.329 7 $\Rightarrow$ 0.263 76	41.38	4.140		4.973
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	38.15	4.078		4.441
1.064 2 + 0.354 73 $\Rightarrow$ 0.266 05	46.31	4.108		4.913
1.064 2 + 0.266 05 $\Rightarrow$ 0.212 84	56.96	3.666		5.048
0.694 3 + 0.347 15 $\Rightarrow$ 0.231 43	72.50	2.254		2.860
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	70.05	2.555		2.951
SFG, $o + e \Rightarrow e$				
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	45.50		4.164	4.312
1.318 8 + 0.439 6 $\Rightarrow$ 0.329 7	78.68		1.556	1.640
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	58.89		3.619	3.831
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	84.64		0.737	0.842

BBO 中 SHG 过程逆群速失配的实验值:

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	21.18	54	1.2 $\Rightarrow$ 0.6	29.91	103
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	22.28	76	1.1 $\Rightarrow$ 0.55	31.46	130
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	23.85	104	1.0 $\Rightarrow$ 0.5	33.73	164
0.9 $\Rightarrow$ 0.45	26.07	141	0.9 $\Rightarrow$ 0.45	36.98	210
0.8 $\Rightarrow$ 0.4	29.18	194	0.8 $\Rightarrow$ 0.4	41.67	276
0.7 $\Rightarrow$ 0.35	33.65	275	0.7 $\Rightarrow$ 0.35	48.74	373
0.6 $\Rightarrow$ 0.3	40.47	415	0.6 $\Rightarrow$ 0.3	60.91	531
0.5 $\Rightarrow$ 0.25	52.34	695			

$T = 293 \text{ K}$  时内角、温度和光谱宽度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	47.3	0.010	4		3.148
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	22.8	0.021	37	9.7	3.33
	21.9	0.028			3.154
	22.7	0.030	51		3.148
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ 0.354 73	31.1	0.015	16		3.148
2.447 02 $+ 0.571 2 \Rightarrow$ 0.463 1	22.1	0.026			3.170
2.688 23 $+ 0.571 2 \Rightarrow$ 0.471 1	21.8	0.028			3.170
SHG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	32.7	0.034		8.8	3.33
	32.4	0.046	37		3.148
SFG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ 0.354 73	38.4	0.020	13		3.148
SFG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{e}$					
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ 0.354 73	58.4	0.050	12		3.148

$T = 293 \text{ K}$  时相位匹配角的温度变化<sup>[3.148]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$		
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	47.3	0.002 50
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	22.7	0.000 57
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$		
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ 0.354 73	31.1	0.000 99
SHG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	32.4	0.001 20
SFG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$		
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ 0.354 73	38.4	0.001 50
SFG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{e}$		
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ 0.354 73	58.4	0.004 21

在相位匹配方向上有效非线性的表达式<sup>[3, 100]</sup>：

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数<sup>[3, 37, 143, 170]</sup>：

$$d_{22}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = \pm 2.3\ \text{pm/V}$$

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = \mp 0.16\ \text{pm/V}$$

激光诱导的损伤阈值：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.266	8	> 1.2	3.153	
0.307 8	12	> 2.0	3.173	
0.354 7	10	50	3.147	
	8	250	3.125	1 个脉冲
	8	190	3.125	1 800 个脉冲
	0.03	> 4	3.46	10 Hz
	0.015	> 30	3.157	
0.510 6	20	> 2.5	3.174	4 kHz
0.51 ~ 0.58	20	10	3.175	4 ~ 14 kHz, 表面损伤
	20	100	3.176	体损伤
0.514 5	cw	> 0.004	3.177	
0.532 1	8	480	3.125	1 个脉冲
	8	320	3.125	1 800 个脉冲
	1	70	3.154	
	0.25	100	3.124	
	0.075	> 70	3.144	
	0.025	> 42	3.158	10 Hz
	0.025	> 40	3.163	
0.539 8	0.015	1 200 ~ 1 500(?)	3.178	1 个脉冲, 表面损伤
0.62	0.000 2	> 500	3.179	
	0.000 1	10 000(?)	3.180	
0.694 3	0.02	100	3.143	
1.054	0.005	500	3.181	



续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
1.064 2	14	500	3.125	1 个脉冲
	14	230	3.125	1 800 个脉冲
	10	50	3.124	
	1.3	100	3.33	
	1.0	135	3.124	
	0.1	100	3.124	
	0.035	> 50	3.158	
1.079 6	0.015	2 500 ~ 3 500 (?)	3.178	1 个脉冲, 表面损伤

热导率:

$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$	参考文献
0.8	0.08	3.148
1.6	1.2	3.58

### 3.1.6 $\text{LiIO}_3$ , 碘酸锂

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群: 6;

密度:  $4.49 \text{ g/cm}^3$  [3.182];

莫氏硬度: 3.5 ~ 4.0;

以“0”透过计的透过范围:  $0.28 \sim 6 \mu\text{m}$  [3.183, 184];线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.347 15	0.1	3.185	$\parallel c$
	0.3	3.185	e 光, $\perp c$
0.514 5	0.002 4	3.186	$\parallel c$
	0.002 5	3.186	e 光, $\perp c$
0.532 1	0.3	3.187	e 光
0.542 2	0.37	3.184	

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.659 4	0.000 7 ~ 0.002 3	3.186	$\parallel c$
	0.000 6 ~ 0.001 7	3.186	e 光, $\perp c$
1.064 2	0.1	3.187	o 光
	0.25	3.187	e 光
	<0.000 2	3.186	$\parallel c$
	0.000 8	3.186	e 光, $\perp c$
1.084 5	0.06	3.184	
1.315	0.000 5	3.182	
1.318 8	0.000 8 ~ 0.003 6	3.186	$\parallel c$
	0.000 7 ~ 0.001 0	3.186	e 光, $\perp c$

$\lambda = 0.532 \mu\text{m}$  处的双光子吸收系数:

$$\beta < 4 \times 10^{-12} \text{ m/W}^{[3.188]}$$

折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
0.354 7	1.982 2	1.811 3	3.189	0.501 7	1.905 3	1.753 7	3.191
0.366 9	1.970 6	1.802 6	3.189	0.508 6	1.903 1	1.751 4	3.189
0.371 2	1.967 1	1.800 0	3.189	0.514 5	1.901 2	1.748 7	3.191
0.379 5	1.960 0	1.794 7	3.189	0.532 0	1.897 5	1.747 5	3.189
0.387 7	1.954 4	1.790 5	3.189	0.546 1	1.895 0	1.745 5	3.96
0.399 6	1.946 4	1.784 2	3.189	0.560 0	1.892 1	1.743 3	3.189
0.404 7	1.944 3	1.782 6	3.190	0.579 1	1.889 4	1.741 3	3.190
0.435 8	1.927 5	1.770 2	3.189	0.580 0	1.888 9	1.740 3	3.189
0.454 5	1.918 4	1.763 8	3.191	0.589 6	1.887 5	1.740 0	3.190
0.457 9	1.917 0	1.763 0	3.191	0.600 0	1.885 9	1.738 3	3.189
0.465 8	1.914 1	1.761 1	3.191	0.620 0	1.882 8	1.736 1	3.189
0.472 7	1.912 2	1.760 0	3.191	0.632 8	1.881 5	1.735 1	3.192
0.476 5	1.910 0	1.758 3	3.191	0.643 8	1.880 7	1.734 6	3.190
0.480 0	1.910 9	1.757 9	3.189	0.656 0	1.878 9	1.733 2	3.96
0.488 0	1.908 3	1.755 6	3.191	0.700 0	1.874 6*	1.730 0	3.96

\* 译者注: 原文为 "8 746", 应为 "1.874 6".

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
0.766 0	1.869 4	1.726 1	3.96	1.529 6	1.848 2	1.710 1	3.190
0.800 0	1.867 3	1.724 5	3.96	1.692 0	1.846 4	1.708 9	3.190
0.863 0	1.864 0	1.722 0	3.96	1.970 1	1.843 1	1.707 2	3.190
0.900 0	1.862 3	1.720 7	3.96	2.249 3	1.838 5	1.705 0	3.190
1.000 0	1.858 7	1.718 0	3.96	2.500 0	1.837 8	1.703 7	3.192
1.100 0	1.855 9	1.716 0	3.96	3.000 0	1.831 9	1.700 1	3.192
1.200 0	1.853 6	1.714 3	3.96	3.500 0	1.826 6	1.697 1	3.192
1.300 0	1.851 7	1.713 0	3.96	4.000 0	1.814 0	1.689 7	3.192
1.367 4	1.850 8	1.712 2	3.190	5.000 0	1.794 0	1.678 3	3.192

 $T = 300 \text{ K}$  时的旋光性:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	参考文献
0.286	1 052.9	3.193	0.429	222.46	3.193
0.290	964.99	3.193	0.448	198.72	3.193
0.295	886.65	3.193	0.470	175.75	3.193
0.299	814.39	3.193	0.492	153.61	3.193
0.304	748.76	3.193	0.520	133.02	3.193
0.310	687.46	3.193	0.546	117.42	3.193
0.317	630.44	3.193	0.551	113.36	3.193
0.324	579.01	3.193	0.600	95.27	3.193
0.331	532.44	3.193	0.628	86.80	3.193
0.339	489.47	3.193	1.084	25.0	3.184
0.347	448.42	3.193	1.1	23.83	3.194
0.355	410.37	3.193	1.6	11.00	3.194
0.363	374.34	3.193	2.1	6.33	3.194
0.374	340.18	3.193	2.6	4.12	3.194
0.386	308.07	3.193	3.1	2.89	3.194
0.399	277.45	3.193	3.6	2.32	3.194
0.412	249.32	3.193			

折射率的温度微商<sup>[3.186]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.532 1	-9.64	-8.61
0.659 4	-9.49	-8.39
1.064 2	-8.93	-7.52
1.318 8	-9.44	-8.49

相位匹配角的实验值( $T=293\text{ K}$ )及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.195]	[3.192]	[3.196]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.586 $\Rightarrow$ 0.293	90[3.195]	87.7	81.0	83.6
0.586 3 $\Rightarrow$ 0.293 15	90[3.196]	86.9	80.7	83.2
0.6 $\Rightarrow$ 0.3	75.6[3.196]	75.5	73.5	73.7
0.62 $\Rightarrow$ 0.31	68.2[3.196]	68.0	67.0	66.3
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	52[3.197]	53.5	53.4	52.0
	52[3.198]			
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	30[3.199]	30.2	30.3	29.5
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	30.2[3.200]	30.1	30.2	29.4
	30.2[3.92]			
	30[3.201]			
	30[3.202]			
1.084 5 $\Rightarrow$ 0.542 25	28.9[3.184]	29.5	29.6	28.8
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	27.2[3.184]	27.6	27.7	27.1
1.388 6 $\Rightarrow$ 0.694 3	23.1[3.203]	23.2	23.2	23.1
1.746 $\Rightarrow$ 0.873	20[3.204]	19.9	19.6	20.3
SFG, $o + o \Rightarrow e$				
5.33 + 1.329 69 $\Rightarrow$ 1.064 2	21[3.202]	20.1	20.0	22.1
4.44 + 1.399 68 $\Rightarrow$ 1.064 2	20.2[3.202]	19.4	19.0	21.2
5.2 + 0.801 29 $\Rightarrow$ 0.694 3	19.5[3.205]	19.6	19.6	20.6

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.195]	[3.192]	[3.196]
2.5 + 0.961 26 $\Rightarrow$ 0.694 3	21[3.206]	21.5	21.4	21.7
5.0 + 0.662 51 $\Rightarrow$ 0.585	20.3[3.207]	20.3	20.3	20.9
2.0 + 0.826 86 $\Rightarrow$ 0.585	25.1[3.207]	25.1	25.1	24.8
4.16 + 0.610 15 $\Rightarrow$ 0.532 1	21.6[3.208]	21.7	21.7	22.0
2.66 + 0.665 14 $\Rightarrow$ 0.532 1	24.5[3.208]	24.6	24.6	24.4
0.946 + 0.548 4 $\Rightarrow$ 0.347 15	50[3.209]	51.0	50.9	49.6
2.67 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.551 02	24.4[3.210]	24.1	24.1	23.9
1.98 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.514 05	27.4[3.210]	27.6	27.6	27.1
1.201 3 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.44	35.1[3.203]	36.2	36.4	35.2
3.391 3 + 0.514 5 $\Rightarrow$ 0.446 73	24[3.211]	25.4	25.4	25.1
2.38 + 0.488 0 $\Rightarrow$ 0.404 97	30.5[3.212]	31.1	31.1	30.5
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	47.5[3.200]	47.8	47.8	46.5

注：从[3.213,214,215,189,202]获得其他色散关系系列与实验一致性差。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.295]</sup>(从[3.213]得到的修正方程组)：

$$n_o^2 = 3.413\,2 + \frac{0.047\,6}{\lambda^2 - 0.033\,8} - 0.007\,7\lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.921\,1 + \frac{0.034\,6}{\lambda^2 - 0.032\,0} - 0.004\,2\lambda^2$$

相位匹配角和“走离”角的计算值：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, o + o $\Rightarrow$ e		
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	64.52	3.90
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	53.48	4.76
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	30.08	4.23
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	24.27	3.63
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	20.15	3.04

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SFG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 733	47.81	5.00
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	35.42	4.67

内角、温度和光谱带宽的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ):

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{m}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$					
0.586 $\Rightarrow$ 0.293	90	0.5 ~ 0.58		2.04	3.195
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	52	0.018			3.197
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	30	0.019		6.27	3.96
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	30	0.022			3.201
	30	0.022	40		3.216
	30	0.024	52.4		3.217
	30	0.026			3.92
1.084 5 $\Rightarrow$ 0.542 25	29	0.020			3.184

相位匹配角的温度变化:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[ (^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1} ]$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.084 5 $\Rightarrow$ 0.542 25	29	$< -1.3 \times 10^{-3}$	3.184
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	30	$-8.4 \times 10^{-4}$	3.217

在相位匹配方向上有效非线性的表达式:

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta$$

有效非线性系数<sup>[3, 37]</sup>:

$$d_{31}(1.064 \mu\text{m}) = 4.4 \text{ pm/V}$$

$$d_{33}(1.064 \mu\text{m}) = 4.5 \text{ pm/V}$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.44 ~ 0.62	200 ~ 300	0.1	3.218	
0.53	15	0.4 ~ 0.5	3.199	
	20	0.7 ~ 0.8	3.219	
0.532 1	0.031	50	3.220	
	0.032	100 ~ 120	3.221	25 Hz
	0.035	80 ~ 100	3.222	1 Hz
	0.035	40 ~ 50	3.222	12.5 Hz
	0.1	10	3.220	
	12	0.3	3.202	
0.64	330	0.04	3.101	
0.694 3	10	1.2	3.206	
	20	1.3	3.185	10 个脉冲
	20	0.25	3.203	500 个脉冲
1.064 2	0.045	190	3.220	
	0.13	80	3.220	
	10	1.2	3.223	100 Hz
	12	1.2	3.202	
	300	0.02	3.201	1 kHz
	$1.8 \times 10^5$	> 0.5	3.224	50 Hz

热导率<sup>[3.182]</sup>;

$$\kappa = 1.47 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

### 3.1.7 KTiOPO<sub>4</sub>, 磷酸钛氧钾 (KTP)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.546 \text{ } \mu\text{m}$  时  $2V_z = 37.4^\circ$ <sup>[3.225]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$  (图 3.2);

密度:  $2.945 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.226, 227]</sup>;  $3.023 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.228]</sup>;  $3.03 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.229]</sup>;

莫氏硬度: 5<sup>[3.227]</sup>;

维氏硬度: 531<sup>[3.228]</sup>, 566<sup>[3.230]</sup>;

努氏硬度：702<sup>[3.228]</sup>；

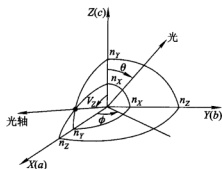


图 3.2 KTP 晶体在介电坐标系  $(X, Y, Z)$  第一象限中折射率与光传播方向和偏振（折射率面）的关系。定义： $\theta$  是极角， $\phi$  是方位角， $V_z$  是一根光轴与  $Z$  轴的夹角

以“0”透过计的透过范围：0.35 ~ 4.5  $\mu\text{m}$ <sup>[3.231, 232]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ ：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.43 ~ 0.78	< 0.004	2.233	氧气氛中退火 + 铋掺杂
0.514 5	0.013	3.186	沿 $a$ 轴
	0.027	3.186	沿 $b$ 轴
	0.026	3.186	沿 $c$ 轴
0.53 ~ 0.78	< 0.005	2.233	氧气氛退火
0.532 1	0.04	3.234	沿 SHG 方向
	< 0.02	3.235	
0.659 4	0.006 5	3.186	沿 $a$ 轴
	0.008 7	3.186	沿 $b$ 轴
	0.006 5	3.186	沿 $c$ 轴
1.06	< 0.01	3.229	
1.064 2	< 0.006	3.235	
	0.005	3.234	沿 SHG 方向
	0.000 2	3.186	沿 $a$ 轴
	0.000 5	3.186	沿 $b$ 轴
	0.000 4	3.186	沿 $c$ 轴
1.318 8	0.001 5	3.186	沿 $a$ 轴
	0.000 4	3.186	沿 $b$ 轴
	0.001	3.186	沿 $c$ 轴



折射率的实验值

水热法生长的 KTP<sup>[3.229]</sup> :

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.53	1.778 7	1.792 4	1.887 3
1.06	1.740 0	1.746 9	1.830 4

熔盐法生长的 KTP

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	参考文献
0.404 7	1.824 9	1.841 0	1.962 9	3.225
0.435 8	1.808 2	1.822 2	1.935 9	3.225
0.491 6	1.788 3	1.800 0	1.904 4	3.225
0.534 3	1.778 0	1.788 7	1.888 8	3.225
0.539 75	1.776 4	1.786 9	1.886 3	3.236
0.541 0	1.776 7	1.787 3	1.886 9	3.225
0.546 1	1.775 6	1.786 0	1.885 0	3.225
0.577 0	1.770 3	1.780 3	1.876 9	3.225
0.579 0	1.769 9	1.779 8	1.876 4	3.225
0.585 3	1.768 9	1.778 7	1.874 9	3.225
0.589 3	1.768 4	1.778 0	1.874 0	3.225
0.623 4	1.763 7	1.773 2	1.867 2	3.225
0.632 8	1.762 2	1.771 4	1.864 9	3.236
0.641 0	1.761 7	1.770 9	1.864 1	3.225
0.693 9	1.756 5	1.765 2	1.856 4	3.225
0.694 3	1.756 4	1.765 2	1.856 4	3.225
0.705 0	1.755 5	1.764 2	1.855 0	3.225
1.064 0	1.738 1	1.745 8	1.830 2	3.225
1.064 2	1.737 9	1.745 4	1.829 7	3.236
1.079 5	1.737 5	1.745 0	1.829 1	3.236
1.341 4	1.731 4	1.738 7	1.821 1	3.236

折射率的温度微商<sup>[3.237]</sup> :

$$dn_x/dT \times 10^5 = 0.132 \, 3\lambda^{-3} - 0.438 \, 5\lambda^{-2} + 1.230 \, 7\lambda^{-1} + 0.770 \, 9$$

$$dn_y/dT \times 10^5 = 0.501 \, 4\lambda^{-3} - 2.003 \, 0\lambda^{-2} + 3.301 \, 6\lambda^{-1} + 0.749 \, 8$$

$$dn_z/dT \times 10^5 = 0.389 \, 6\lambda^{-3} - 1.333 \, 2\lambda^{-2} + 2.276 \, 2\lambda^{-1} + 2.115 \, 1$$

其中  $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位及  $dn_x/dT$ 、 $dn_y/dT$  和  $dn_z/dT$  以  $\text{K}^{-1}$  为单位。

折射率的温度微商<sup>[3, 237]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_x/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_y/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_z/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.532 1	2.41	3.21	4.27
1.064 2	1.65	2.50	3.40

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \, \text{K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较：

水热法生长的 KTP

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[ 3. 238 ]	[ 3. 239 ]
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1. 053 $\Rightarrow$ 0. 526 5	34 [ 3. 240 ]	32. 01	33. 94
1. 062 $\Rightarrow$ 0. 531	25 [ 3. 229 ]	24. 54	27. 52
1. 064 2 $\Rightarrow$ 0. 532 1	24 [ 3. 238 ]	22. 46	25. 81
	26 [ 3. 121 ]		
	26 [ 3. 226 ]		
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1. 318 8 + 0. 659 4 $\Rightarrow$ 0. 439 6	3. 8 [ 3. 241 ]	无相位匹配	13. 64

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3. 238]	[3. 239]
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	65.1 [3. 241]	65.01	65.33
1.338 + 0.669 $\Rightarrow$ 0.446	63.2 [3. 241]	63.17	63.39

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.238]	[3.239]
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	87.7 [3.241]	88.10	无相位匹配
1.338 + 0.669 $\Rightarrow$ 0.446	79.9 [3.241]	80.31	82.33
1.064 2 + 1.458 1 $\Rightarrow$ 0.615 2	78 [3.171]	74.20	76.84
1.064 2 + 1.476 2 $\Rightarrow$ 0.618 4	76.6 [3.171]	73.95	76.66
1.064 2 + 1.591 8 $\Rightarrow$ 0.637 8	75.8 [3.171]	72.77	75.91

熔盐法生长 KTP

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.242]	[3.232]	[3.236]
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	23.0 [3.243]	21.12	24.59	22.89
	23.2 [3.225]			
	23.3 [3.244]			
	24.1 [3.245]			
	25.0 [3.227]			
	25.2 [3.231]			
	25.2 [3.238]			
	25.2 [3.246]			
	25.3 [3.230]			

YZ 面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.242]	[3.232]	[3.236]
SHG, $o + e \Rightarrow o$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	69.0 [3.247]	68.03	68.67	68.83
	69.2 [3.238]			
1.068 $\Rightarrow$ 0.534	67.8 [3.247]	67.52	68.16	68.32
1.182 $\Rightarrow$ 0.591	57.4 [3.247]	56.77	57.41	57.64
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	50.0 [3.238]	49.42	50.25	50.38
1.5 $\Rightarrow$ 0.75	44.6 [3.247]	43.80	45.02	44.87

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[ 3. 242 ]	[ 3. 232 ]	[ 3. 236 ]
SHG, $o + e \Rightarrow o$				
1. 079 6 $\Rightarrow$ 0. 539 8	85. 3 [ 3. 248 ] 86. 7 [ 3. 236 ]	85. 68	无相位匹配	86. 94
1. 318 8 $\Rightarrow$ 0. 659 4	58. 3 [ 3. 238 ] 58. 9 [ 3. 249 ]	59. 03	60. 38	59. 58
1. 341 4 $\Rightarrow$ 0. 670 7	58. 7 [ 3. 236 ]	58. 02	59. 42	58. 58
1. 54 $\Rightarrow$ 0. 77	53 [ 3. 250 ]	52. 02	53. 93	52. 64
1. 907 68 $\Rightarrow$ 0. 953 84	51. 1 [ 3. 249 ]	48. 33	51. 32	49. 07
2. 05 $\Rightarrow$ 1. 025	50. 8 [ 3. 249 ]	48. 6	51. 82	48. 82
2. 128 4 $\Rightarrow$ 1. 064 2	53. 7 [ 3. 251 ] 54 [ 3. 249 ]	48. 63	52. 36	49. 15
SFG, $o + e \Rightarrow o$				
1. 318 8 + 0. 659 4 $\Rightarrow$ 0. 439 6	87. 6 [ 3. 238 ] 87. 1 [ 3. 241 ]	84. 76	86. 84	83. 14
1. 338 + 0. 669 $\Rightarrow$ 0. 446	79. 8 [ 3. 241 ]	79. 21	80. 23	78. 53
1. 341 4 + 0. 670 7 $\Rightarrow$ 0. 447 13	78. 1 [ 3. 252 ]	78. 52	79. 50	77. 91
1. 064 2 + 1. 907 68 $\Rightarrow$ 0. 683 33	77. 2 [ 3. 249 ]	72. 47	75. 21	72. 73
1. 079 6 + 1. 341 4 $\Rightarrow$ 0. 598 17	74. 9 [ 3. 236 ]	75. 03	76. 49	74. 48
1. 54 + 0. 78 $\Rightarrow$ 0. 517 76	61 [ 3. 253 ]	59. 87	60. 79	60. 17
1. 907 68 + 2. 406 88 $\Rightarrow$ 1. 064 2	58. 6 [ 3. 249 ]	52. 79	57. 08	53. 37
1. 580 53 + 1. 54 $\Rightarrow$ 0. 78	52. 1 [ 3. 253 ]	51. 21	53. 15	51. 83
1. 907 68 + 1. 064 2 $\Rightarrow$ 0. 683 33	48. 7 [ 3. 249 ]	46. 70	48. 17	47. 22

注: 从[3. 225, 254, 255, 238]得到的其他色散关系系列与实验一致性差。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^\circ\text{C}$ )

水热法生长的  $\text{KTP}^{[3. 239]}$ :

$$n_x^2 = 2. 114 6 + \frac{0. 891 88 \lambda^2}{\lambda^2 - (0. 208 61)^2} - 0. 013 20 \lambda^2$$

$$n_y^2 = 2. 151 8 + \frac{0. 878 62 \lambda^2}{\lambda^2 - (0. 218 01)^2} - 0. 013 27 \lambda^2$$

$$n_z^2 = 2. 313 6 + \frac{1. 000 12 \lambda^2}{\lambda^2 - (0. 238 31)^2} - 0. 016 79 \lambda^2$$

熔盐法生长的 KTP<sup>[3, 232]</sup>:

$$n_x^2 = 3.0065 + \frac{0.03901}{\lambda^2 - 0.04251} - 0.01327\lambda^2$$

$$n_y^2 = 3.0333 + \frac{0.04154}{\lambda^2 - 0.04547} - 0.01408\lambda^2$$

$$n_z^2 = 3.3134 + \frac{0.05694}{\lambda^2 - 0.05658} - 0.01682\lambda^2$$

熔盐法生长的 KTP 的相位匹配角和“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	24.59	0.202	0.268

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	68.67	1.829
1.1523 $\Rightarrow$ 0.57615	59.59	2.314
1.3188 $\Rightarrow$ 0.6594	50.25	2.544
2.098 $\Rightarrow$ 1.049	43.01	2.481
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	57.95	2.225
SFG, $o + e \Rightarrow o$		
1.3188 + 0.6594 $\Rightarrow$ 0.4396	65.14	2.210

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.1523 $\Rightarrow$ 0.57615	72.01	1.747
1.3188 $\Rightarrow$ 0.6594	60.38	2.487
2.098 $\Rightarrow$ 1.049	52.13	2.671
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	67.36	1.928
SFG, $o + e \Rightarrow o$		
1.3188 + 0.6594 $\Rightarrow$ 0.4396	86.84	0.362

熔盐法生长的 KTP 中 SHG 过程逆群速失配的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	73.18	475
1.05 $\Rightarrow$ 0.525	35.03	434

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $o + e \Rightarrow o$			1.5 $\Rightarrow$ 0.75	45.02	153
1.0 $\Rightarrow$ 0.5	83.17	490	1.6 $\Rightarrow$ 0.8	43.40	126
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	64.36	361	1.7 $\Rightarrow$ 0.85	42.44	103
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	56.22	329	1.8 $\Rightarrow$ 0.9	41.99	84
1.3 $\Rightarrow$ 0.65	51.02	228	1.9 $\Rightarrow$ 0.95	41.98	83
1.4 $\Rightarrow$ 0.7	47.46	186	2.0 $\Rightarrow$ 1.0	42.35	100

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\beta/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$
SHG, $o + e \Rightarrow o$			SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.1 $\Rightarrow$ 0.55	80.31	391	1.6 $\Rightarrow$ 0.8	52.99	135
1.2 $\Rightarrow$ 0.6	67.47	307	1.7 $\Rightarrow$ 0.85	51.94	111
1.3 $\Rightarrow$ 0.65	61.25	246	1.8 $\Rightarrow$ 0.9	51.42	90
1.4 $\Rightarrow$ 0.7	57.32	200	1.9 $\Rightarrow$ 0.95	51.32	81
1.5 $\Rightarrow$ 0.75	54.70	164	2.0 $\Rightarrow$ 1.0	51.57	98

NCPM 温度和相应温度带宽的实验值:

水热法生长的 KTP

沿 X 轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SFG, II类			
$1.318\ 8^{\circ} + 0.659\ 4^{\circ} \Rightarrow 0.439\ 6^{\circ}$	47	8.5	3.241
$1.338^{\circ} + 0.669^{\circ} \Rightarrow 0.446^{\circ}$	463	8.5	3.241

#### 沿 Y 轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, II类			
$0.994\ 3^{\circ} + 0.994\ 3^{\circ} \Rightarrow 0.497\ 15^{\circ}$	20	175	3.256
SFG, II类			
$1.064\ 2^{\circ} + 0.809^{\circ} \Rightarrow 0.459\ 61^{\circ}$	20	122	3.257

#### 熔盐法生长的 KTP

##### 沿 X 轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, II类			
$1.079\ 6^{\circ} + 1.079\ 6^{\circ} \Rightarrow 0.539\ 8^{\circ}$	153(?)	20	3.248
	63	30	3.258
SFG, II类			
$1.090^{\circ} + 1.039^{\circ} \Rightarrow 0.532\ 1^{\circ}$	20		3.259
	20		3.260
$2.15^{\circ} + 1.04^{\circ} \Rightarrow 0.700\ 94^{\circ}$	20		3.261
$3.09^{\circ} + 1.38^{\circ} \Rightarrow 0.953\ 96^{\circ}$	20		3.261
$3.297^{\circ} + 1.571^{\circ} \Rightarrow 1.047^{\circ}$	20		3.262
$3.276^{\circ} + 1.539^{\circ} \Rightarrow 1.064\ 2^{\circ}$	20		3.262
$1.318\ 8^{\circ} + 0.659\ 4^{\circ} \Rightarrow 0.439\ 6^{\circ}$	60.2	8.5	3.241
$1.338^{\circ} + 0.669^{\circ} \Rightarrow 0.446^{\circ}$	484	8.5	3.241

##### 沿 Y 轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, II 类		
$0.99^{\circ} + 0.99^{\circ} \Rightarrow 0.495^{\circ}$	20	3.254
SFG, II 类		
$1.064\ 2^{\circ} + 0.806\ 8^{\circ} \Rightarrow 0.458\ 9^{\circ}$	20	3.254
$1.064\ 2^{\circ} + 0.808^{\circ} \Rightarrow 0.459\ 29^{\circ}$	20	3.238
$1.064\ 2^{\circ} + 0.969\ 1^{\circ} \Rightarrow 0.507\ 2^{\circ}$	20	3.254

注：相互作用波长的上标表明了偏振方向。

内角、温度和光谱带宽的实验值：

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$  ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ )

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $e + o \Rightarrow e$						
$1.058\ 2 \Rightarrow 0.592\ 1$		0.43	2.01			3.263
$1.062 \Rightarrow 0.531$	25	0.49	2.23	25	4.9	3.229
$1.064\ 2 \Rightarrow 0.532\ 1$	23	0.53		20		3.243
	23.2	0.58	1.82	24		3.225
	23.3	0.43		20	4.0	3.244
	25				6.2	3.227
	25.2			25		3.231
	25.2	0.42		17.5		3.246
	25.2	0.52	2.52	25.7		3.230

YZ 平面,  $\phi = 90^{\circ}$  ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ )

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $o + e \Rightarrow o$						
$0.994\ 3 \Rightarrow 0.497\ 15$	90	2.96	5.70	175	7.1	3.256
$1.064\ 2 \Rightarrow 0.532\ 1$	69			100		3.237
	69	0.11			47	3.264
$2.532 \Rightarrow 1.266$	56	0.20			30.7	3.264
SFG, II 类						
$1.064\ 2^{\circ} + 0.809^{\circ} \Rightarrow 0.459\ 61^{\circ}$	90	2.72	6.13		$17.6(\Delta\nu_2)$	3.257



$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^\circ)$	参考文献
SHG, $o + e \Rightarrow o$				
1.079 6 $\Rightarrow$ 0.539 8	20	85.3	0.34	3.248
	153	90	1.70	3.248

注: 相互作用的波长上标表明了偏振方向。

KTP 晶体主平面上三波相互作用在相匹配方向上的有效非线性<sup>[3, 35, 36]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eee}} = d_{\text{oeo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{32} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

文献[3.36]中给出了 KTP 晶体三波相互作用任意方向上的有效非线性。非线性系数<sup>[3, 265]</sup>:

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 1.4\ \text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 2.65\ \text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 10.7\ \text{pm/V}$$

激光诱导的损伤阈值:

水热法生长的 KTP

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.526	0.03	300	3.239	
	0.03	300	3.235	10 Hz
1.064 2	125 000	0.01	3.266	
	30	1.5	3.267	
	20	> 1.5	3.268	
	11	20 ~ 30	3.269	10 Hz

熔盐法生长的 KTP

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.526	0.03	100	3.235	10 Hz
0.529 1	18	0.8 ~ 1.0	3.263	表面损伤
0.532 1	14	0.5	3.246	60 个脉冲
	8	14 ~ 22	3.270	2 Hz, 表面损伤
	8	20 ~ 32	3.270	2 Hz, 整体损伤
	0.06	> 18	3.245	5 Hz
1.058 2	25	1.8 ~ 2.2	3.263	表面损伤
1.064 2	30	> 3.3	3.249	
	25	> 6	3.271	250 000 个脉冲, 整体黑化
	25	> 3	3.271	3 500 000 个脉冲, 整体黑化
	20	1.5	3.246	60 个脉冲
	11	15 ~ 22	3.270	2 Hz, 表面损伤
	11	24 ~ 35	3.270	2 Hz, 整体损伤
	10	9 ~ 10	3.243	
	9	310	3.272	1 个脉冲, 整体损伤
	1.3	46	3.33	表面损伤
	1	150	3.225	1 个脉冲
	1	> 150	3.112	

热导率<sup>[3.235]</sup>:

$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , 沿 $a$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , 沿 $b$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , 沿 $c$
2	3	3.3

### 3.1.8 $\text{LiNbO}_3$ , 铌酸锂

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $3\text{m}$ ;

密度:  $4.628 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.273]</sup>;

莫氏硬度:  $5 \sim 5.5$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.4 \sim 5.5 \mu\text{m}$ <sup>[3.274, 275]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.514 5	0.025	3.276	
	0.019 ~ 0.025	3.186	$\parallel c$
	0.035 ~ 0.045	3.186	e 光, $\perp c$
0.659 4	0.002 1 ~ 0.004 4	3.186	$\parallel c$
	0.008 5 ~ 0.009 6	3.186	e 光, $\perp c$
1.064 2	0.001 9 ~ 0.002 3	3.186	$\parallel c$
	0.001 4 ~ 0.001 9	3.186	e 光, $\perp c$
	0.004 2	3.277	$\parallel c$
	0.002 8	3.277	$\perp c$
1.318 8	0.001 8 ~ 0.004 4	3.186	$\parallel c$
	0.001 7 ~ 0.011 0	3.186	e 光, $\perp c$

双光子吸收系数  $\beta$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{11}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献	备 注
0.528 8	0.15(?)	3.278	
0.53	5.0	3.279	
0.532 1	2.90	3.188	o 光
	1.57	3.188	e 光

富锂的铈酸锂晶体折射率的实验值,  $T = 293 \text{ K}^{[3, 280]}$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.325 0	2.636 0	2.467 0	0.488 0	2.349 5	2.239 8
0.454 5	2.375 1	2.260 8	0.496 5	2.343 7	2.235 2
0.457 9	2.371 9	2.258 4	0.501 7	2.340 5	2.232 9
0.465 8	2.365 8	2.253 0	0.514 5	2.333 4	2.227 0
0.472 7	2.360 4	2.248 9	0.632 8	2.287 8	2.189 0
0.476 5	2.357 3	2.246 5	1.064 2	2.233 9	2.144 0

从化学计量比熔体中生长的铌酸锂(摩尔比  $\text{Li/Nb} = 1.000$ ),  $T = 293 \text{ K}^{[3.274]}$ ;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.42	2.408 9	2.302 5	1.80	2.204 9	2.130 6
0.45	2.378 0	2.277 2	2.00	2.197 4	2.125 0
0.50	2.341 0	2.245 7	2.20	2.190 9	2.118 3
0.55	2.313 2	2.223 7	2.40	2.185 0	2.112 9
0.60	2.296 7	2.208 2	2.60	2.177 8	2.107 1
0.70	2.271 6	2.187 4	2.80	2.170 3	2.100 9
0.80	2.257 1	2.174 5	3.00	2.162 5	2.094 5
0.90	2.244 8	2.164 1	3.20	2.154 3	2.087 1
1.00	2.237 0	2.156 7	3.40	2.145 6	2.080 4
1.20	2.226 9	2.147 8	3.60	2.136 3	2.072 5
1.40	2.218 4	2.141 7	3.80	2.126 3	2.064 2
1.60	2.211 3	2.136 1	4.00	2.115 5	2.055 3

从同成分熔体中生长的铌酸锂(摩尔比  $\text{Li/Nb} = 0.946$ ),  $T = 293 \text{ K}^{[3.281]}$ ;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.435 84	2.392 76	2.292 78
0.546 08	2.316 57	2.228 16
0.632 82	2.286 47	2.202 40
1.152 3	2.227 3	2.151 5
3.391 3	2.145 1	2.082 2

$T = 297.5 \text{ K}^{[3.282]}$ ;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.404 63	2.431 7	2.326 0	0.546 07	2.316 5	2.228 5
0.435 84	2.392 8	2.293 2	0.576 96	2.304 0	2.217 8
0.467 82	2.363 4	2.268 3	0.578 97	2.303 2	2.217 1
0.479 99	2.354 1	2.260 5	0.587 56	2.300 2	2.214 7
0.508 58	2.335 6	2.244 8	0.643 85	2.283 5	2.200 2

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.667 82	2.277 8	2.195 3	1.287 70	2.221 1	2.146 4
0.706 52	2.269 9	2.188 6	1.439 97	2.215 1	2.141 3
0.809 26	2.254 1	2.174 9	1.638 21	2.208 3	2.135 6
0.871 68	2.247 1	2.168 8	1.911 25	2.199 4	2.128 0
0.935 64	2.241 2	2.163 9	2.184 28	2.191 2	2.121 1
0.959 98	2.239 3	2.162 2	2.399 95	2.184 0	2.115 1
1.014 00	2.235 1	2.158 4	2.615 04	2.176 5	2.108 7
1.092 14	2.230 4	2.154 5	2.730 35	2.172 4	2.105 3
1.153 92	2.227 1	2.151 7	2.897 33	2.165 7	2.099 9
1.157 94	2.226 9	2.151 5	3.051 48	2.159 4	2.094 6

铌酸锂晶体折射率的温度微商,  $T = 298 \text{ K}^{[3.280]}$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.325 0	8.71	12.9
0.454 5	1.93	6.22
0.632 8	0.522	4.31
1.064 2	0.141	3.85

化学计量比熔体(摩尔比  $\text{Li/Nb} = 1.000$ ),  $\lambda = 0.45 \sim 0.70 \mu\text{m}$ ,  $T = 293 \text{ K}^{[3.283]}$ :

$$dn_o/dT = 2.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$dn_e/dT = 7.6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

富锂铌酸锂 Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^\circ\text{C}$ )<sup>[3.280]</sup>:

$$n_o^2 = 4.912\,96 + \frac{0.116\,275}{\lambda^2 - 0.048\,398} - 0.027\,3\lambda^2$$

$$n_e^2 = 4.545\,28 + \frac{0.091\,649}{\lambda^2 - 0.046\,079} - 0.030\,3\lambda^2$$

化学计量比熔体(摩尔比  $\text{Li/Nb} = 1.000$ )<sup>[3.284]</sup>:

$$n_o^2 = 4.913\,00 + \frac{0.118\,717}{\lambda^2 - 0.045\,932} - 0.027\,8\lambda^2$$

$$n_e^2 = 4.579\,06 + \frac{0.099\,318}{\lambda^2 - 0.042\,286} - 0.022\,4\lambda^2$$

同成分熔体(摩尔比 Li/Nb = 0.946)<sup>[3.281]</sup>;

$$n_o^2 = 4.9048 + \frac{0.117680}{\lambda^2 - 0.047500} - 0.027169\lambda^2$$

$$n_e^2 = 4.5820 + \frac{0.099169}{\lambda^2 - 0.044432} - 0.021950\lambda^2$$

富锂铌酸锂 Sellmeier 方程的温度关系( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T$  以 K 为单位)<sup>[3.280]</sup>:

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 4.913 + 1.6 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25) \\ &+ \frac{0.1163 + 0.94 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25)}{\lambda^2 - [0.2201 + 3.98 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25)]^2} - 0.0273\lambda^2 \\ n_e^2 &= 4.546 + 2.72 \times 10^{-7} (T^2 - 88506.25) \\ &+ \frac{0.0917 + 1.93 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25)}{\lambda^2 - [0.2148 + 5.3 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25)]^2} - 0.0303\lambda^2 \end{aligned}$$

化学计量比熔体(摩尔比 Li/Nb = 1.000)<sup>[3.284]</sup>:

$$n_o^2 = 4.9130 + \frac{0.1173 + 1.65 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.212 + 2.7 \times 10^{-8} T^2)^2} - 0.0278\lambda^2$$

$$\begin{aligned} n_e^2 &= 4.5567 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 \\ &+ \frac{0.0970 + 2.70 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.201 + 5.4 \times 10^{-8} T^2)^2} - 0.0224\lambda^2 \end{aligned}$$

同成分熔体(摩尔比 Li/Nb = 0.946)<sup>[3.285]</sup>:

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 4.9048 + 2.1429 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25) \\ &+ \frac{0.11775 + 2.2314 \times 10^{-8} (T - 88506.25)}{\lambda^2 - [0.21802 - 2.9671 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25)]^2} - 0.027153\lambda^2 \\ n_e^2 &= 4.5820 + 2.2971 \times 10^{-7} (T^2 - 88506.25) \\ &+ \frac{0.09921 + 5.2716 \times 10^{-8} (T - 88506.25)}{\lambda^2 - [0.21090 - 4.9143 \times 10^{-8} (T^2 - 88506.25)]^2} - 0.021940\lambda^2 \end{aligned}$$

相位匹配角的实验和理论值及“走离”角的计算值:

富锂铌酸锂,  $T = 295 \text{ K}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.280]	
SHG, $o+o \Rightarrow e$			
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	67.5[3.280]	66.76	1.776

化学计量比熔体(摩尔比 Li/Nb = 1.000),  $T = 293 \text{ K}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.284]	
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.118 $\Rightarrow$ 0.559	71.7[3.284]	71.80	1.312
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	67.6[3.284]	67.74	1.543
	68[3.274]		
	69[3.286]		
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
2.179 33 + 0.852 9 $\Rightarrow$ 0.613	55[3.287]	54.75	2.073
4.0 + 0.723 94 $\Rightarrow$ 0.613	47.5[3.287]	47.48	2.212

同成分熔体(摩尔比 Li/Nb = 0.946),  $T = 293\text{ K}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.284]	
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	72 [3.286]	70.39	1.341
2.12 $\Rightarrow$ 1.06	43.8 [3.288]	45.25	1.988
2.128 4 $\Rightarrow$ 1.064 2	44.6 [3.289]	45.28	1.987
	47 [3.290]		
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
1.951 60 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.688 67	52.7 [3.291]	52.86	2.000
2.578 87 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.753 33	48.1 [3.291]	48.13	2.047
3.222 41 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.800 00	46.5 [3.291]	46.50	2.044
4.190 39 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.848 67	47 [3.291]	46.90	2.026

注: PM 角的值对其熔体的化学计量比有很强的依赖关系。

NCPM 温度的实验值:

富铌铈酸锂

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.954 $\Rightarrow$ 0.477	-62.5	3.280
1.064 $\Rightarrow$ 0.532 1	233.7	3.277
	238	3.280
1.318 $\Rightarrow$ 0.659 4	520	3.280

化学计量比熔体 (摩尔比  $\text{Li/Nb} = 1.000$ )

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			1.084 $\Rightarrow$ 0.542	97	3.296
1.029 $\Rightarrow$ 0.514 5	15	3.292	1.118 $\Rightarrow$ 0.559	153.5	3.284
1.058 $\Rightarrow$ 0.529	0	3.293	1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	193	3.293
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	43	3.294		208	3.284
	72	3.295		211	3.295

同成分熔体 (摩尔比  $\text{Li/Nb} = 0.946$ )

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			1.084 $\Rightarrow$ 0.542	38	3.299
1.029 $\Rightarrow$ 0.514 5	-66	3.292		42	3.297
1.057 6 $\Rightarrow$ 0.528 8	-14	3.278		46	3.292
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	-8	3.297	1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	172	3.297
	6	3.298		174	3.282
	11.5	3.294			

注: NCPM 的温度值对熔体的化学计量比有强烈的依赖关系。

内角带宽的实验值<sup>[3.81]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	0.040

温度和光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu_1/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$					
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	68		3.2	3.81
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	51	90	0.72		3.300
	234	90	0.52		3.277
1.084 $\Rightarrow$ 0.542	38	90	0.74		3.292
	46	90	0.74		3.299



续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu_1/\text{cm}^{-1}$	参考文献
1. 152 3 $\Rightarrow$ 0. 576 15 SFG, o + o $\Rightarrow$ e	172	90	0. 66		3. 297
1. 7 + 0. 694 3 $\Rightarrow$ 0. 493	70	90	1. 6	7. 9	3. 301
2. 65 + 0. 488 $\Rightarrow$ 0. 411 5	90	90		2. 9	3. 302

在相位匹配方向上有效非线性的表达式<sup>[3. 100]</sup>：

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{nee}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数：

化学计量比熔体(摩尔比 Li/Nb = 1. 000)

$$d_{22}(1. 058 \mu\text{m}) = 2. 46 \pm 0. 23 \text{ pm/V}^{[3. 274, 37]}$$

$$d_{31}(1. 058 \mu\text{m}) = -4. 64 \pm 0. 66 \text{ pm/V}^{[3. 274, 37]}$$

$$d_{33}(1. 058 \mu\text{m}) = -41. 7 \pm 7. 8 \text{ pm/V}^{[3. 274, 37]}$$

同成分熔体(摩尔比 Li/Nb = 0. 946)

$$d_{22}(1. 06 \mu\text{m}) = 2. 10 \pm 0. 21 \text{ pm/V}^{[3. 303, 37]}$$

$$d_{31}(1. 06 \mu\text{m}) = -4. 35 \pm 0. 44 \text{ pm/V}^{[3. 303, 37]}$$

$$d_{33}(1. 06 \mu\text{m}) = -27. 2 \pm 2. 7 \text{ pm/V}^{[3. 303, 37]}$$

激光诱导的损伤阈值：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0. 53	0. 007	> 100	3. 304	
0. 532 1	0. 002	> 700	3. 305	10 Hz
0. 59 ~ 0. 596	$\approx 10$	> 3. 5	3. 305	10 Hz
0. 694 3	25	1. 5	3. 306	1 个脉冲
1. 06	30	1. 2	3. 307	
	30	1. 7	3. 308	
	10 ~ 30	3. 0	3. 309	
	30	12	3. 307	整体损伤
	0. 006	> 100	3. 288	
1. 064 2	20	> 1	3. 289	
	30	150 ~ 200	3. 310	镀膜

热导率<sup>[3,64]</sup>;

在  $T=300\text{ K}$  时  $\kappa=4.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

### 3.1.9 $\text{KNbO}_3$ , 铌酸钾

负双轴晶: 在  $\lambda=0.532\text{ }\mu\text{m}$  时  $2V_z=66.78^\circ$ <sup>[3,311]</sup>;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, a, c$  (图 3.3)

以“0”透过计的透过范围:  $\approx 0.4 \sim >4\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[3,312,313]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.42 ~ 1.06	<0.05	3.314	
0.82	0.015	3.315	
1.064 2	0.001 8 ~ 0.002 5	3.316	沿 $b$ 轴

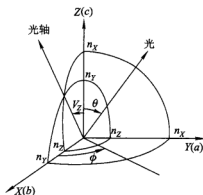


图 3.3  $\text{KNbO}_3$  晶体在介电坐标系  $(X, Y, Z)$  第一象限中折射率与光传播方向和偏振 (折射率面) 的关系。定义:  $\theta$  是极角,  $\phi$  是方位角,  $V_z$  是一根光轴与  $Z$  轴的夹角

在  $T=295\text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3,312]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.430	2.497 4	2.414 5	2.277 1
0.488	2.418 7	2.352 7	2.227 4
0.514	2.395 1	2.333 7	2.212 1
0.633	2.329 6	2.280 1	2.168 7
0.860	2.278 4	2.237 2	2.133 8

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
1.064	2.257 6	2.219 5	2.119 4
1.500	2.234 1	2.199 2	2.102 9
2.000	2.215 9	2.183 2	2.089 9
2.500	2.198 1	2.167 4	2.077 1
3.000	2.178 5	2.149 8	2.063 0

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(\circ)$	$\phi_{\text{理论}}/(\circ)$		
		[3.311]	[3.312]	[3.317]
SHG, $e + e \Rightarrow o$				
0.946 $\Rightarrow$ 0.473	$\approx 30$ [3.318]	26.88	29.97	30.43

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.311]	[3.312]	[3.317]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.86 $\Rightarrow$ 0.43	83.5[3.319]	77.37	83.13	87.98
0.89 $\Rightarrow$ 0.445	70.7[3.319]	69.03	70.67	71.92
0.92 $\Rightarrow$ 0.46	64[3.319]	63.36	63.92	64.94
0.94 $\Rightarrow$ 0.47	60.5[3.319]	60.27	60.43	61.37
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	$\approx 47$ [3.311]	46.57	45.95	46.52

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.311]	[3.312]	[3.317]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	70.4 [3.320]	71.05	71.85	71.16
	$\approx 71$ [3.311]			
	71 [3.314]			
	71 [3.317]			

注: [3.321] 给出的色散关系与实验一致性差。

NCPM 温度的实验值:

沿 X 轴

相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	相互作用的 波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, I 类			1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	178	3.326
0.972 $\Rightarrow$ 0.486	-20	3.322		181	3.311
0.982 $\Rightarrow$ 0.491	20	3.323		182	3.320
0.986 $\Rightarrow$ 0.493	20	3.324		184	3.300
0.988 $\Rightarrow$ 0.494	20	3.314		188	3.327
1.047 $\Rightarrow$ 0.523 5	162	3.325			

沿 Y 轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, I 类		
0.838 5 $\Rightarrow$ 0.419 25	-34.2	3.328
0.840 6 $\Rightarrow$ 0.420 3	-28.3	3.329
0.842 $\Rightarrow$ 0.421	-22.8	3.330
0.856 $\Rightarrow$ 0.428	15	3.331
0.857 $\Rightarrow$ 0.428 5	20	3.332
0.859 3 $\Rightarrow$ 0.429 65	20	3.328
0.86 $\Rightarrow$ 0.43	22	3.324
0.861 5 $\Rightarrow$ 0.430 75	30	3.333
0.862 $\Rightarrow$ 0.431	34	3.334
0.879 $\Rightarrow$ 0.439 5	70	3.334
0.928 9 $\Rightarrow$ 0.464 45	158	3.328
0.95 $\Rightarrow$ 0.475	180	3.324
SFG, I 类		
0.676 4 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.413 55	-4	3.335
0.694 3 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.420 17	27.2	3.335

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=22^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.312]</sup>:

$$n_x^2 = 1 + \frac{1.441\,218\,74\lambda^2}{\lambda^2 - 0.074\,391\,36} + \frac{2.543\,369\,18\lambda^2}{\lambda^2 - 0.018\,770\,36} - 0.028\,450\,18\lambda^2$$

$$n_y^2 = 1 + \frac{1.336\,604\,10\lambda^2}{\lambda^2 - 0.066\,646\,29} + \frac{2.497\,103\,96\lambda^2}{\lambda^2 - 0.016\,665\,05} - 0.025\,174\,32\lambda^2$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{1.048\,249\,55\lambda^2}{\lambda^2 - 0.065\,142\,25} + \frac{2.371\,083\,79\lambda^2}{\lambda^2 - 0.014\,331\,72} - 0.019\,432\,89\lambda^2$$

色散关系与温度的关系( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T$  以 K 为单位)<sup>[3.336]</sup>:

$$\begin{aligned} n_x^2 = 1 + & \frac{(2.538\,940\,9 + 3.863\,630\,3 \times 10^{-6}F)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.137\,163\,9 + 1.767 \times 10^{-7}F)^2} \\ & + \frac{(1.445\,184\,2 - 3.909\,336 \times 10^{-6}F - 1.225\,613\,6 \times 10^{-4}G)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.272\,542\,9 + 2.38 \times 10^{-7}F - 6.78 \times 10^{-5}G)^2} \\ & - (2.837 \times 10^{-2} - 1.22 \times 10^{-8}F)\lambda^2 - 3.3 \times 10^{-10}F\lambda^4 \\ n_y^2 = 1 + & \frac{(2.638\,666\,9 + 1.670\,846\,9 \times 10^{-6}F)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.136\,124\,8 + 0.796 \times 10^{-7}F)^2} \\ & + \frac{(1.194\,847\,7 - 1.387\,263\,5 \times 10^{-6}F - 0.907\,427\,07 \times 10^{-4}G)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.262\,191\,7 + 1.231 \times 10^{-7}F - 1.82 \times 10^{-5}G)^2} \\ & - (2.513 \times 10^{-2} - 0.558 \times 10^{-8}F)\lambda^2 - 4.4 \times 10^{-10}F\lambda^4 \\ n_z^2 = 1 + & \frac{(2.370\,517 + 2.837\,354\,5 \times 10^{-6}F)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.119\,407\,1 + 1.75 \times 10^{-7}F)^2} \\ & + \frac{(1.048\,952 - 2.130\,378\,1 \times 10^{-6}F - 1.825\,852\,1 \times 10^{-4}G)\lambda^2}{\lambda^2 - (0.255\,360\,5 + 1.89 \times 10^{-7}F - 2.48 \times 10^{-5}G)^2} \\ & - (1.939 \times 10^{-2} - 0.27 \times 10^{-8}F)\lambda^2 - 5.7 \times 10^{-10}F\lambda^4 \end{aligned}$$

其中  $F = T^2 - 295.15^2$ ,  $G = T - 293.15$ 。

相位匹配角和“走离”角的计算值:

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_s/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	45.95	3.009
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	29.87	2.507

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_s/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	71.85	2.479
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	57.47	3.553

内角带宽的实验值:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	20	71	0.013 ~ 0.014	3.323

沿  $Y$  轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, I 类					
0.857 $\Rightarrow$ 0.428 5	20	90	0.659	1.117	3.323

温度带宽的实验值:

沿  $X$  轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	参考文献
SHG, I 类				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	181	90	0.27 ~ 0.32	3.311
	182	90	0.28	3.320
	184	90	0.28 ~ 0.29	3.300
	188	90	0.34	3.327

沿  $Y$  轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	参考文献
SHG, I 类				
0.838 5 $\Rightarrow$ 0.419 25	-34.2	90	0.27	3.328
0.842 $\Rightarrow$ 0.421	-22.8	90	0.30	3.330
0.855 $\Rightarrow$ 0.427 5	26.4(?)	90	0.265	3.314
0.92 $\Rightarrow$ 0.46	163.5(?)	90	0.285	3.314
SFG, I 类				
0.676 4 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.413 55	-4	90	0.35	3.335

非临界 SHG 的温度<sup>[3.323]</sup>:

沿  $X$  轴

$$\lambda_1 = 0.976\,04 + 2.53 \times 10^{-4}T + 1.146 \times 10^{-6}T^2$$

沿  $Y$  轴

$$\lambda_1 = 0.850\,40 + 2.94 \times 10^{-4}T + 1.234 \times 10^{-6}T^2$$

其中  $\lambda_1$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T$  以  $^{\circ}\text{C}$  为单位。

非临界 SHG 过程双折射的温度变化<sup>[3.314]</sup>:

沿  $X$  轴 ( $1.064\,2\,\mu\text{m} \Rightarrow 0.532\,1\,\mu\text{m}$ )

$$d[n_z(2\omega) - n_y(\omega)]/dT = 1.10 \times 10^{-4}\text{K}^{-1}$$

沿  $Y$  轴 ( $0.92\,\mu\text{m} \Rightarrow 0.46\,\mu\text{m}$ )

$$d[n_z(2\omega) - n_x(\omega)]/dT = 1.43 \times 10^{-4}\text{K}^{-1}$$

$\text{KNbO}_3$  晶体主平面中三波相互作用在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eff}} = d_{32} \sin^2 \phi + d_{31} \cos^2 \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eff}} = d_{32} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}} = d_{31} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eff}} = d_{31} \sin \theta$$

[3.36]中给出了在  $\text{KNbO}_3$  晶体中任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数<sup>[3.323,37,313]</sup>:

$$d_{31}(1.064\,2\,\mu\text{m}) = -11.9\,\text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\,2\,\mu\text{m}) = -13.7\,\text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\,2\,\mu\text{m}) = -20.6\,\text{pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.527	0.5	88 ~ 94	3.337	沿 $b$ 轴, $E \parallel c$
	0.5	120 ~ 150	3.337	沿 $b$ 轴, $E \perp c$
0.532 1	10	0.55	3.326	
	25	1.5 ~ 1.8	3.300	
1.047	11	>0.3	3.325	4 kHz, 2 000 小时
1.054	0.7	110	3.337	沿 $a$ 轴, $E \perp c$
	0.7	180	3.337	沿 $b$ 轴, $E \perp c$
	0.7	370	3.337	沿 $b$ 轴, $E \perp c$
1.064 2	25	1.5 ~ 1.8	3.300	
	0.1	>1 000	3.323	

热导率:

$$\kappa > 3.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{[3.316]}$$

### 3.1.10 AgGaS<sub>2</sub>, 硫镓银

负单轴晶:  $n_o > n_e$  (当  $\lambda < 0.497 \mu\text{m}$  时,  $n_e > n_o$ );

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度:  $4.58 \text{ g}/\text{cm}^3^{[3.338]}$ ;

莫氏硬度:  $3 \sim 3.5$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.47 \sim 13 \mu\text{m}^{[3.339]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.5 ~ 13	< 0.1	3.340	0.9 ~ 8.5	< 0.9	3.343
0.6 ~ 0.65	0.04	3.341	1.064	0.01	3.342
0.6 ~ 12	< 0.09	3.339	4 ~ 8.5	< 0.04	3.341
0.633	0.05	3.342			

折射率的实验值<sup>[3.344]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.490	2.714 8	2.728 7	1.200	2.441 4	2.388 1	4.500	2.400 3	2.346 1
0.500	2.691 6	2.686 7	1.300	2.435 9	2.381 9	5.000	2.395 5	2.341 9
0.525	2.650 3	2.623 9	1.400	2.431 5	2.378 1	5.500	2.393 8	2.340 1
0.550	2.619 0	2.583 4	1.500	2.428 0	2.374 5	6.000	2.390 8	2.336 9
0.575	2.594 4	2.553 7	1.600	2.425 2	2.371 6	6.500	2.387 4	2.333 4
0.600	2.574 8	2.530 3	1.800	2.420 6	2.367 0	7.000	2.382 7	2.329 1
0.625	2.557 7	2.511 6	2.000	2.416 4	2.363 7	7.500	2.378 7	2.325 2
0.650	2.543 7	2.496 1	2.200	2.414 2	2.368 4	8.000	2.375 7	2.321 9
0.675	2.531 0	2.482 4	2.400	2.411 9	2.358 3	8.500	2.369 9	2.316 3
0.700	2.520 5	2.470 6	2.600	2.410 2	2.356 7	9.000	2.366 3	2.312 1
0.750	2.504 9	2.454 0	2.800	2.409 4	2.355 9	9.500	2.360 6	2.306 4
0.800	2.490 9	2.439 5	3.000	2.408 0	2.354 5	10.00	2.354 8	2.301 2
0.850	2.480 2	2.427 9	3.200	2.406 8	2.353 4	10.50	2.348 6	2.294 8
0.900	2.471 6	2.419 2	3.400	2.406 2	2.352 2	11.00	2.341 7	2.288 0
0.950	2.464 4	2.411 8	3.600	2.404 6	2.351 1	11.50	2.332 9	2.278 9
1.000	2.458 2	2.405 3	3.800	2.402 4	2.349 1	12.00	2.326 6	2.271 6
1.100	2.448 6	2.395 4	4.000	2.402 4	2.348 8	12.50	2.317 7	

旋光性<sup>[3.339,345]</sup>:



在各向同性点  $\rho = 522(^{\circ})/\text{mm}$  ( $n_o = n_e$ ,  $\lambda = 0.4973 \mu\text{m}$ )

折射率的温度关系 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位) <sup>[3.346]</sup>:

$$\frac{dn_o}{dT} = \frac{10^{-5}}{2n_o} \times \left[ -\frac{39.88\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0676} + \frac{112.20\lambda^4}{(\lambda^2 - 0.0676)^2} \right]$$

$$\frac{dn_e}{dT} = \frac{10^{-5}}{2n_e} \times \left[ +\frac{25.50\lambda^2}{\lambda^2 - 0.107584} + \frac{45.72\lambda^4}{(\lambda^2 - 0.107584)^2} \right]$$

注: Canarelli 等 <sup>[3.347]</sup> 观察到这些色散方程与实验之间的离散。

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.348]	[3.349]	[3.350]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
3.391 3 $\Rightarrow$ 1.695 65	33[3.339]	34.1	33.2	33.5
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	67[3.351]	70.7	73.3	71.7
	67.5[3.352]			
	68[3.339]			
	70.8[3.344]			
SFG, $o + o \Rightarrow e$				
11.538 + 1.172 33 $\Rightarrow$ 1.06 42	34.7[3.48]	35.9	35.3	35.7
9.9 + 1.192 37 $\Rightarrow$ 1.064 2	35.9[3.353]	36.4	35.6	36.2
8.7 + 1.212 52 $\Rightarrow$ 1.064 2	37[3.354]	37.3	36.4	37.0
6.24 + 1.283 01 $\Rightarrow$ 1.064 2	41.1[3.355]	40.9	39.8	40.4
5.89 + 1.298 88 $\Rightarrow$ 1.064 2	42.1[3.353]	41.7	40.5	41.2
4.8 + 1.367 35 $\Rightarrow$ 1.064 2	44[3.354]	44.7	43.4	44.1
4.0 + 1.449 96 $\Rightarrow$ 1.064 2	47.7[3.355]	47.7	46.1	46.9
3.09 + 1.623 25 $\Rightarrow$ 1.064 2	51[3.350]	51.9	50.0	50.9
2.53 + 1.836 83 $\Rightarrow$ 1.064 2	53.4[3.350]	54.4	52.4	53.4
6.85 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.921 10	42[3.356]	43.9	42.7	43.6
4.43 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.858 07	55[3.356]	57.1	55.3	56.7
6.6 + 0.775 93 $\Rightarrow$ 0.694 3	60[3.357]	60.5	60.4	61.8
4.8 + 0.811 71 $\Rightarrow$ 0.694 3	75.5[3.357]	79.5	79.0	83.9
11.663 29 + 0.617 $\Rightarrow$ 0.586	64[3.358]	58.9	67.0	63.4
10.124 78 + 0.622 $\Rightarrow$ 0.586	70[3.358]	64.2	75.4	70.1
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
10.9 + 1.179 34 $\Rightarrow$ 1.064 2	38.3[3.359]	38.3	37.5	38.0
8.8 + 1.210 60 $\Rightarrow$ 1.064 2	40.3[3.359]	40.2	39.1	39.9
7.0 + 1.255 00 $\Rightarrow$ 1.064 2	43.6[3.359]	43.7	42.4	43.2
5.2 + 1.338 03 $\Rightarrow$ 1.064 2	50.6[3.359]	50.6	48.7	49.9
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	39.8[3.360]	39.7	38.8	39.5
9.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.958 00	41.5[3.360]	41.0	40.0	40.8
10.6 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 62	55[3.361]	54.0	55.3	55.8

注: 从 [3.348, 362, 48] 获得的其他色散关系系列与实验一致性差。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.350]</sup>:

$$n_o^2 = 3.397\ 0 + \frac{2.398\ 2\lambda^2}{\lambda^2 - 0.093\ 11} + \frac{2.164\ 0\lambda^2}{\lambda^2 - 950.0}$$

$$n_e^2 = 3.587\ 3 + \frac{1.953\ 3\lambda^2}{\lambda^2 - 0.110\ 66} + \frac{2.339\ 1\lambda^2}{\lambda^2 - 1\ 030.7}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o+o\Rightarrow e$			
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	71.68		0.76
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	58.15		1.15
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	32.00		1.17
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	31.04		1.15
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	37.27		1.24
2.128 4 $\Rightarrow$ 1.064 2	54.23		1.18
SFG, $o+o\Rightarrow e$			
10.6 + 3.533 $\Rightarrow$ 2.65	37.40		1.25
10.6 + 2.65 $\Rightarrow$ 2.12	34.79		1.21
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	37.31		1.21
10.6 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 62	52.85		1.04
SFG, $e+o\Rightarrow e$			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	58.15	1.18	1.15
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	39.52	1.32	1.23
10.6 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 62	55.76	1.23	1.00

在  $T=293\text{ K}$  时内角带宽和光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{in}/(^{\circ})$	$\Delta\nu_1/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	67.5	0.41		3.339
SFG, $o+o\Rightarrow e$				
4.6 + 0.817 7 $\Rightarrow$ 0.694 3	82.7	0.42		3.357
10.53 + 0.589 $\Rightarrow$ 0.565 89	90	2.34		3.349
6.24 + 1.283 $\Rightarrow$ 1.064 2	41.1		9.8	3.355
4.817 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.871 63	52		5.9	3.356
10.619 + 0.634 $\Rightarrow$ 0.598	90		1.73	3.341
10.6 + 0.598 $\Rightarrow$ 0.566	90		1.5	3.363
10.6 + 0.596 8 $\Rightarrow$ 0.565	90		1.44	3.364

相位匹配角的温度变化<sup>[3.360]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
$10.6 + 1.0642 \Rightarrow 0.9671$	20	39.8	0.03

非临界 SFG 的温度调谐<sup>[3.347]</sup>;

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
$7.8 + 0.65 \Rightarrow 0.6$	$\approx 4$

非临界 SFG 过程温度带宽的实验值 ( $10.6 \mu\text{m} + 0.598 \mu\text{m} \Rightarrow 0.566 \mu\text{m}, o + o \Rightarrow e$ );

$$\Delta T = 2.5^{\circ}\text{C}^{[3.346]}$$

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oeo}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{ooo}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(10.6 \mu\text{m}) = 0.134 \times d_{36}(\text{GaAs}) \pm 15\% = (11.1 \pm 1.7) \text{pm/V}^{[3.344], [3.37]}$$

$$d_{36}(10.6 \mu\text{m}) = 0.15 \times d_{36}(\text{GaAs}) \pm 20\% = (12.5 \pm 2.5) \text{pm/V}^{[3.351], [3.37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.59	500	0.2	3.358	10 个脉冲
0.598	3	0.15	3.363	
0.625	500	0.25 ~ 0.36	3.358	10 个脉冲
0.6943	30	0.006	3.361	1 Hz, 1 000 个脉冲
	10	0.1	3.357	100 个脉冲
	10	0.2	3.348	
1.06	35	0.2 ~ 0.25	3.348	
1.0642	20	0.1	3.350	10 Hz
	17.5	> 0.12	3.365	1 000 个脉冲
	15	0.2	3.352	
	12	0.35	3.359	10 Hz
	0.023	> 0.75	3.366	10 Hz
	0.025	> 7	3.48	10 Hz
	0.002	> 10	3.367	
	0.021	> 20	3.355	
	0.020	30	3.353	

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{av}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
10.6	150	0.1	3.349	
	150	0.2	3.368	
	220	0.25	3.365	1 000 个脉冲

在  $T = 293 \text{ K}$  时的热导率<sup>[3.58]</sup>;

$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
1.4	1.5

### 3.1.11 $\text{ZnGeP}_2$ , 磷锗锌

正单轴晶:  $n_e > n_o$ ;点群:  $42m$ ;密度:  $4.12 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.338]</sup>;

莫氏硬度: 5.5;

以“0”透过计的透过范围:  $0.74 \sim 12 \mu\text{m}$ <sup>[3.369,370]</sup>线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
1.9	0.8 ~ 0.95	3.371	
2.15	0.6	3.372	
2.5 ~ 8	< 0.1	3.373	
2.5 ~ 8.3	< 0.2	3.374	
2.5 ~ 8.5	< 0.1	3.375	
2.8 ~ 8.3	< 0.1	3.376	
3 ~ 8	< 0.1	3.377	
3.5 ~ 3.9	0.41	3.378	
3.5	0.4	3.379	
3.8	0.1 ~ 0.18	3.371	
4.5 ~ 8	0.03	3.380	
4.65	0.4	3.381	
	0.1 ~ 0.2	3.382	
4.8	0.16	3.383	
5.3 ~ 6.1	0.32	3.378	
8.3 ~ 9.5	< 0.3	3.374	
9	$\approx 1$	3.379	

o 光, SFG 方向

最好样品

e 光, SFG 方向

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
9.28	0.4	3.373	
9.3	0.8	3.381	
	0.4 ~ 0.5	3.382	
9.6	0.56	3.383	
10.3	0.42	3.384	
10.4	0.6	3.372	
10.6	0.9	3.379	
	0.83	3.378	e 光, SFG 方向

折射率的实验值<sup>[3.369]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.64	3.505 2	3.580 2	3.40	3.126 3	3.164 7
0.66	3.475 6	3.546 7	3.60	3.125 7	3.163 2
0.68	3.447 7	3.516 0	3.80	3.123 7	3.161 6
0.70	3.423 3	3.488 5	4.00	3.122 3	3.160 8
0.75	3.373 0	3.432 4	4.20	3.120 9	3.159 5
0.80	3.335 7	3.391 5	4.50	3.118 6	3.156 1
0.85	3.306 3	3.359 3	4.70	3.117 4	3.154 9
0.90	3.283 0	3.333 6	5.00	3.114 9	3.153 3
0.95	3.263 8	3.312 4	5.50	3.113 1	3.151 8
1.00	3.247 8	3.295 4	6.00	3.110 1	3.148 0
1.10	3.223 2	3.268 8	6.50	3.105 7	3.144 5
1.20	3.205 4	3.249 3	7.00	3.104 0	3.142 0
1.30	3.192 4	3.234 6	7.50	3.099 4	3.137 8
1.40	3.182 0	3.224 4	8.00	3.096 1	3.135 0
1.60	3.166 6	3.207 7	8.50	3.091 9	3.131 1
1.80	3.156 2	3.196 5	9.00	3.088 0	3.127 2
2.00	3.149 0	3.188 9	9.50	3.083 6	3.123 1
2.20	3.143 3	3.182 9	10.00	3.078 8	3.118 3
2.40	3.138 8	3.178 0	10.50	3.073 8	3.113 7
2.60	3.135 7	3.174 5	11.00	3.068 9	3.108 7
2.80	3.132 7	3.171 7	11.50	3.062 3	3.100 8
3.00	3.130 4	3.169 3	12.00	3.055 2	3.094 9
3.20	3.128 4	3.167 1			

折射率的温度微商<sup>[3.369]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.64	35.94	37.58	3.40	14.40	15.46
0.66	31.23	37.34	3.60	15.58	16.29
0.68	29.52	32.53	3.80	14.58	16.53
0.70	28.63	31.82	4.00	14.26	15.02
0.75	26.22	28.26	4.20	13.57	15.14
0.80	24.69	26.43	4.50	15.31	16.60
0.85	24.12	25.39	4.70	15.51	16.71
0.90	22.34	24.61	5.00	15.05	16.43
0.95	21.32	24.26	5.50	14.49	15.42
1.00	21.18	23.01	6.00	14.58	16.30
1.10	20.11	22.08	6.50	15.60	16.13
1.20	18.63	20.51	7.00	12.85	15.01
1.30	16.84	20.12	7.50	18.15	18.59
1.40	15.34	16.55	8.00	16.10	17.43
1.60	15.10	16.75	8.50	15.16	17.37
1.80	13.20	14.40	9.00	15.56	17.50
2.00	14.19	15.29	9.50	16.27	17.11
2.20	14.60	15.28	10.00	16.53	18.41
2.40	14.14	15.49	10.50	15.40	16.84
2.60	15.13	16.80	11.00	15.25	16.34
2.80	15.48	16.05	11.50	14.74	18.32
3.00	13.26	13.96	12.00	14.24	16.59
3.20	14.94	16.28			

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.362]	[3.385]
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
3.8 $\Rightarrow$ 1.9	57.8 $\pm$ 0.3 [3.371]	59.8	59.7
4.34 $\Rightarrow$ 2.17	55.8 $\pm$ 0.2 [3.372]	52.5	52.4
4.64 $\Rightarrow$ 2.32	47.5 [3.386]	50.1	49.9
9.2 $\Rightarrow$ 4.6	63.8 [3.387]	64.4	64.0
9.3 $\Rightarrow$ 4.65	61.3 [3.375]	65.5	65.1
	61.3 [3.385]		
	62.7 ~ 64.4 [3.382]		
	64 [3.381]		
9.5 $\Rightarrow$ 4.75	62.1 [3.375]	67.9	67.6

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.362]	[3.385]
	62.1[3.385]		
	66.8[3.387]		
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	64.9[3.382]	69.3	69.0
10.2 $\Rightarrow$ 5.1	72[3.375]	81.6	81.3
10.3 $\Rightarrow$ 5.15	74.3[3.384]	86.9	86.4
SFG, $e + e \Rightarrow o$			
10.668 + 4.34 $\Rightarrow$ 3.085	54.3 $\pm$ 0.2[3.372]	51.5	51.3
9.74 + 4.203 9 $\Rightarrow$ 2.936 5	49.6[3.370]	49.5	49.3
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
6.74 + 5.203 6 $\Rightarrow$ 2.936 5	76[3.388]	75.9	74.9
6.45 + 5.390 8 $\Rightarrow$ 2.936 5	79.2[3.374]	80.1	78.8
6.25 + 5.538 9 $\Rightarrow$ 2.936 5	84.0[3.374]	85.9	83.3
6.15 + 5.619 9 $\Rightarrow$ 2.936 5	85.5[3.374]	无相位匹配	89.0
6.29 + 5.017 3 $\Rightarrow$ 2.791	76[3.376]	77.4	76.5
6.19 + 5.082 8 $\Rightarrow$ 2.791	77.6[3.376]	79.1	78.0
6.06 + 5.173 9 $\Rightarrow$ 2.791	80.5[3.376]	82.0	80.5
6.015 + 5.207 $\Rightarrow$ 2.791	84[3.389]	83.3	81.6
5.95 + 5.256 9 $\Rightarrow$ 2.791	83.4[3.376]	86.1	83.6
5.90 + 5.296 5 $\Rightarrow$ 2.791	87[3.376]	无相位匹配	85.8
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 1	84[3.379]	83.0	83.4

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.385]</sup>:

$$n_o^2 = 4.473\,30 + \frac{5.265\,76\lambda^2}{\lambda^2 - 0.133\,81} + \frac{1.490\,85\lambda^2}{\lambda^2 - 662.55}$$

$$n_e^2 = 4.633\,18 + \frac{5.342\,15\lambda^2}{\lambda^2 - 0.142\,55} + \frac{1.457\,95\lambda^2}{\lambda^2 - 662.55}$$

[3.390]中给出了  $T=93\text{ K}$ ,  $173\text{ K}$ ,  $373\text{ K}$ ,  $473\text{ K}$  和  $673\text{ K}$  时的色散关系, [3.391]给出的是  $T=343\text{ K}$  时的。

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	68.95	0.49	0.49
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	47.08	0.70	0.70
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	48.97	0.69	0.69

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SFG, $e + e \Rightarrow o$			
10.6 + 2.65 $\Rightarrow$ 2.12	50.11	0.72	0.66
9.6 + 2.4 $\Rightarrow$ 1.92	51.08	0.71	0.69
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	72.54	0.42	0.47
9.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.958	82.66	0.18	0.21
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	81.66		0.20
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	69.74		0.46
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	83.31		0.19

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
3.8 $\Rightarrow$ 1.9	1.33	3.371
4.34 $\Rightarrow$ 2.17	1.05	3.372
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	0.69	3.386
9.3 $\Rightarrow$ 4.65	0.74 ~ 0.80	3.382
	1.15	3.381
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	0.8	3.382
10.2 $\Rightarrow$ 5.1	1.35	3.375
10.3 $\Rightarrow$ 5.15	1.20	3.384
SFG, $e + e \Rightarrow o$		
10.668 + 4.34 $\Rightarrow$ 3.085	1.23	3.372
SFG, $o + e \Rightarrow o$		
10.6 + 1.064 $\Rightarrow$ 0.967	0.55	3.379

光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
4.34 $\Rightarrow$ 2.17	7.9	3.372
10.2 $\Rightarrow$ 5.1	4.9	3.375

SHG 过程温度带宽的实验值 (10.2  $\mu\text{m} \Rightarrow$  5.1  $\mu\text{m}$ ,  $e + e \Rightarrow o$ ):

$$\Delta T = 50^{\circ}\text{C}^{[3.375]}$$



相位匹配角的温度变化:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$	参考文献
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
9.2 $\Rightarrow$ 4.6	0.014	3.387
10.3 $\Rightarrow$ 5.15	0.072	3.375
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	0.107	3.375
SFG, $o + e \Rightarrow o$		
10.6 + 1.064 $2\Rightarrow$ 0.967 $\mu\text{m}$	0.007	3.379

相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{eeo}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{ooo}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(10.6 \mu\text{m}) = 0.83 \times d_{36}(\text{GaAs}) \pm 15\% = (68.9 \pm 10.3) \text{ pm/V}^{[3.369], [3.37]}$$

$$d_{36}(9.6 \mu\text{m}) = (75 \pm 8) \text{ pm/V}^{[3.383]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
1.064	30	$>0.03$	3.392	12.5 Hz
	10	0.03	3.369	
2.79	0.15	300	3.376	3.389
	0.1	350	3.389	
2.94	0.11	300	3.388	3.370
	0.11	300	3.370	
5.3 ~ 6.1	cw	$>0.0001$	3.386	3.378
	cw	0.0025	3.378	
9.28	2	12.5	3.373	2 Hz 20 Hz 100 Hz
9.3 ~ 10.6	125	0.3 ~ 0.4	3.384	
	125	0.25	3.384	
9.3	100	0.12	3.381	
9.6	120	0.78	3.383	1500 Hz
10.2 ~ 10.8	$10^5 \sim 10^7$	0.6	3.375	
	cw	$>0.00001$	3.375	3.392
10.6	cw	$>0.0000001$	3.392	
	cw	0.002	3.378	

$T = 293 \text{ K}$  时的热导率<sup>[3, 58]</sup>;

$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
36	35

## 3.2 常用的非线性光学晶体

### 3.2.1 $\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 四水合五硼酸钾 (KB5)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.5461 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 126.3^\circ$ <sup>[3, 393]</sup>;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$  (图 3.4);

密度:  $1.74 \text{ g/cm}^3$ ;

莫氏硬度:  $2.5$ <sup>[3, 394]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.162 \sim 1.5 \mu\text{m}$ <sup>[3, 395]</sup>;

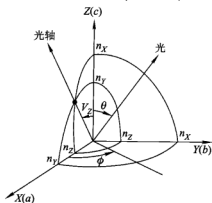


图 3.4  $\text{KB}_5$  晶体在介电坐标系  $(X, Y, Z)$  第一象限中折射率与光传播方向和偏振(折射率面)之间的关系。定义:  $\theta$  是极角,  $\phi$  是方位角,  $V_z$  是一个光轴与  $Z$  轴的夹角

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda / \mu\text{m}$	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.212 8	0.18	3.396	o 光, $XY$ 平面, FIHG 方向
	0.14	3.397	o 光, $XY$ 平面, FIHG 方向
0.231 4	0.12	3.393	o 光, $XY$ 平面, THG 方向
0.266 1	0.12	3.396	e 光, $XY$ 平面, FIHG 方向

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
	0.06	3.397	e 光, XY 平面, FIHG 方向
0.347 2	0.04	3.393	e 光, XY 平面, THG 方向
0.354 7	<0.01	3.398	沿 Y 轴
0.532 1	0.02	3.397	XY 平面, FIHG 方向
	<0.01	3.398	沿 Y 轴
0.694 3	0.03	3.393	e 光, XY 平面, THG 方向
1.064 2	0.06	3.397	e 光, XY 平面, FIHG 方向

双光子吸收系数  $\beta$ (沿 b 轴)<sup>[3.399]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{12}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{12}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$
0.216	$6.5 \pm 1.0$	0.270	$3.5 \pm 0.5$

折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	参考文献
0.217			1.496 9	3.400
0.220			1.493 8	3.400
0.225			1.489 1	3.400
0.230			1.484 8	3.400
0.234 5		1.493 0		3.401
0.235			1.480 9	3.400
0.240			1.477 4	3.400
0.245			1.474 0	3.400
0.250			1.470 8	3.400
0.390	1.502 1	1.445 7	1.432 7	3.401
0.400	1.500 5	1.445 3	1.432 0	3.401
0.420	1.498 4	1.443 8	1.430 3	3.401
0.450	1.495 6	1.441 4	1.428 0	3.401
0.500	1.491 7	1.438 0	1.425 1	3.401
0.546	1.488 8	1.435 7	1.423 0	3.401
0.600	1.485 9	1.433 4	1.421 1	3.401
0.650	1.483 9	1.431 9	1.419 6	3.401
0.700	1.482 3	1.430 6	1.418 2	3.401
0.730	1.481 5	1.429 7	1.417 6	3.401
0.765	1.481 3	1.429 2	1.417 1	3.401

相位匹配角的实验值 ( $T = 293\text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:  
 $XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.401]	[3.402]
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
0.434 $\Rightarrow$ 0.217	90[3.400]	81.6	无相位匹配
0.434 2 $\Rightarrow$ 0.217 1	90[3.403]	81.3	无相位匹配
0.438 4 $\Rightarrow$ 0.219 2	80.5[3.86]	77.3	80.4
0.50 $\Rightarrow$ 0.25	52.8[3.400]	53.8	54.1
0.630 $\Rightarrow$ 0.315	31[3.403]	33.0	32.8
SFG, $e + e \Rightarrow o$			
0.543 5 + 0.351 1 $\Rightarrow$ 0.213 3	90[3.404]	78.9	87.3
0.694 3 + 0.347 2 $\Rightarrow$ 0.231 4	57[3.405]	56.3	57.9
0.573 7 + 0.334 5 $\Rightarrow$ 0.211 3	90[3.404]	77.9	87.2
0.652 2 + 0.326 1 $\Rightarrow$ 0.217 4	68[3.398]	65.7	68.8
0.621 9 + 0.311 0 $\Rightarrow$ 0.207 3	90[3.398]	76.9	无相位匹配
0.694 3 + 0.305 19 $\Rightarrow$ 0.212 0	70[3.406]	66.2	70.5
0.694 3 + 0.284 09 $\Rightarrow$ 0.201 6	90[3.406]	74.2	无相位匹配
1.064 15 + 0.266 04 $\Rightarrow$ 0.212 8	53[3.397]	48.5	52.1
0.789 71 + 0.266 04 $\Rightarrow$ 0.199 0	75[3.407]	67.5	76.1
0.753 22 + 0.266 04 $\Rightarrow$ 0.196 6	90[3.407]	72.5	无相位匹配
0.797 37 + 0.257 25 $\Rightarrow$ 0.194 5	84[3.408]	70.0	83.3
0.792 35 + 0.257 25 $\Rightarrow$ 0.194 2	90[3.408]	70.7	85.6
0.9 + 0.232 87 $\Rightarrow$ 0.185	90[3.409]	68.4	无相位匹配

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.401]	[3.402]
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.434 6 $\Rightarrow$ 0.217 3	90 [3.405]	69.1	83.4
0.469 0 $\Rightarrow$ 0.234 5	17 [3.405]	无相位匹配	12.8
0.479 6 $\Rightarrow$ 0.239 8	0 [3.403]	无相位匹配	无相位匹配
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
0.563 4 + 0.351 1 $\Rightarrow$ 0.216 3	63 [3.404]	49.2	59.9
0.594 8 + 0.334 5 $\Rightarrow$ 0.214 1	63 [3.404]	47.0	59.8
0.626 4 + 0.313 2 $\Rightarrow$ 0.208 8	68 [3.398]	52.2	72.0
0.762 1 + 0.266 04 $\Rightarrow$ 0.197 2	68 [3.407]	38.5	75.3

最佳色散关系方程([3.401]的修正数据在[3.402]中给出,  $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=293\text{ K}$ ):

$$n_x^2 = 1 + \frac{\lambda^2}{0.848\,117\lambda^2 - 0.007\,447\,7}$$

$$n_y^2 = 1 + \frac{\lambda^2}{0.972\,682\lambda^2 - 0.008\,775\,7}$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{\lambda^2}{1.008\,157\lambda^2 - 0.009\,405\,0}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
0.510 5 $\Rightarrow$ 0.255 25	51.62	2.037	2.037
0.532 075 $\Rightarrow$ 0.266 04	47.19	2.073	2.073
0.578 2 $\Rightarrow$ 0.289 1	39.57	2.020	2.020
0.697 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	25.83	1.585	1.585
SFG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 15 + 0.532 075 $\Rightarrow$ 0.354 73	20.65	1.324	1.332
1.064 15 + 0.354 73 $\Rightarrow$ 0.266 04	36.35	1.946	1.979
1.064 15 + 0.266 04 $\Rightarrow$ 0.212 83	52.12	2.015	2.078
0.694 3 + 0.347 15 $\Rightarrow$ 0.231 43	57.93	1.889	1.918
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	45.17	2.017	2.075

NCPM 温度的实验值:

沿  $b$  轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	参考文献
SFG, I 类		
0.694 3 + 0.283 34 $\Rightarrow$ 0.201 22	-15	3.406
0.694 3 + 0.283 61 $\Rightarrow$ 0.201 36	0	3.406
0.694 3 + 0.284 05 $\Rightarrow$ 0.201 58	20	3.406
0.694 3 + 0.284 49 $\Rightarrow$ 0.201 80	35	3.406
0.792 02 + 0.257 25 $\Rightarrow$ 0.194 18	25	3.408
0.793 44 + 0.257 25 $\Rightarrow$ 0.194 27	40	3.408

KB5 晶体主平面三波相互作用在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{ooc}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooc}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooc}} = d_{32} \sin \theta$$

[3.36] 中给出了 KB5 晶体在任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数<sup>[3.37]</sup>:

$$d_{31}(0.532 \text{ } \mu\text{m}) = 0.04 \text{ pm/V}$$

$$d_{32}(0.532 \text{ } \mu\text{m}) = 0.003 \text{ pm/V}$$

$$d_{33}(0.532 \text{ } \mu\text{m}) = 0.05 \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.266 1	8	>0.43	3.397	10 Hz
	0.03	>4.8	3.410	1 Hz
0.311	10	>0.13	3.398	10 Hz
0.347 2	8	>0.9	3.393	
0.45	7	10	3.405	15 Hz
0.622	10	>0.4	3.398	10 Hz
0.694 3	10	>0.8	3.393	
0.74 ~ 0.91	30	>0.5	3.409	
1.064 2	12	>0.85	3.397	10 Hz

### 3.2.2 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , 尿素

正单轴晶:  $n_e > n_o$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度:  $1.318 \text{ g/cm}^3$ ;

莫氏硬度: <2.5;

0.5 cm 长晶体以  $\theta = 74^\circ$  切割时, 以 0.5 透过计的透过范围:  $0.2 \sim 1.43 \text{ } \mu\text{m}$ <sup>[3.411]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ <sup>[3.411]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	备注	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	备注
0.213	0.10	o 光, FIHG 方向	1.064	0.02	e 光, FIHG 方向
0.266	0.04	e 光, FIHG 方向			

在[3.412,413]中给出了  $n_o$  和  $n_e$  与波长的关系图。

相位匹配角的实验值 ( $T=293\text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.414]	[3.415]*	[3.416]
SHG, $e+e\Rightarrow o$				
0.476 $\Rightarrow$ 0.238	90[3.414]	82.2	无相位匹配	无相位匹配
0.500 $\Rightarrow$ 0.250	67.6[3.414]	67.5	76.7	72.2
0.550 $\Rightarrow$ 0.275	54[3.414]	54.2	55.9	55.2
0.600 $\Rightarrow$ 0.300	46.6[3.414]	46.5	46.5	46.5
SFG, $e+e\Rightarrow o$				
0.694 3 + 0.347 15 $\Rightarrow$ 0.231 43	77[3.411]	81.5	无相位匹配	无相位匹配
1.064 2 + 0.266 05 $\Rightarrow$ 0.212 84	72[3.411]	86.7	无相位匹配	无相位匹配
SHG, $o+e\Rightarrow o$				
0.597 $\Rightarrow$ 0.298 5	90[3.414]	无相位匹配	无相位匹配	无相位匹配
0.650 $\Rightarrow$ 0.325	63.6[3.414]	65.4	63.5	64.6
0.700 $\Rightarrow$ 0.350	55.6[3.414]	56.6	54.6	55.6
SFG, $o+e\Rightarrow o$				
1.064 2 + 0.291 46 $\Rightarrow$ 0.228 8	90[3.414]	无相位匹配	无相位匹配	76.6
1.064 2 + 0.296 68 $\Rightarrow$ 0.232 0	80[3.414]	83.6	80.9	72.8
1.064 2 + 0.306 56 $\Rightarrow$ 0.238 0	70.4[3.414]	75.0	70.0	67.8
1.064 2 + 0.427 92 $\Rightarrow$ 0.305 2	47.5[3.414]	49.9	48.8	47.0
1.064 2 + 0.635 01 $\Rightarrow$ 0.397 7	37.7[3.414]	39.1	37.1	37.6
0.720 + 0.537 64 $\Rightarrow$ 0.307 8	63[3.417]	64.7	63.1	62.7
0.646 + 0.587 93 $\Rightarrow$ 0.307 8	69[3.418]	71.6	70.0	70.3
0.628 75 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.288 2	90[3.414]	无相位匹配	无相位匹配	无相位匹配
0.639 80 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.290 5	80.5[3.414]	85.1	84.3	81.5
0.664 06 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.295 4	73.4[3.414]	75.3	74.3	73.1
SFG, $e+o\Rightarrow o$				
1.064 2 + 0.507 87 $\Rightarrow$ 0.343 8	90[3.414]	79.2	84.5	无相位匹配
1.064 2 + 0.53 $\Rightarrow$ 0.353 8	72.2[3.414]	70.9	72.3	74.8
1.064 2 + 0.575 $\Rightarrow$ 0.373 3	62.5[3.414]	61.4	61.5	63.0
1.064 2 + 0.631 95 $\Rightarrow$ 0.396 5	53.5[3.414]	53.9	53.4	54.5

\* 在[3.419]中给出了经修正的数据。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=293\text{ K}$ )<sup>[3.415,419]</sup>:

$$n_o^2 = 2.1548 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.0318}$$

$$n_e^2 = 2.5527 + \frac{0.01784}{\lambda^2 - 0.0294} + \frac{0.0288(\lambda - 1.5)}{(\lambda - 1.5)^2 + 0.03371}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
0.6118 $\Rightarrow$ 0.3059	75.95		2.31
0.6328 $\Rightarrow$ 0.3164	68.01		3.35
0.6594 $\Rightarrow$ 0.3297	61.49		3.98
0.6943 $\Rightarrow$ 0.34715	55.40		4.34
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
1.0642 + 0.5321 $\Rightarrow$ 0.35473	41.10		4.52
1.3188 + 0.6594 $\Rightarrow$ 0.4396	30.46		3.82
SFG, $e + o \Rightarrow o$			
1.0642 + 0.5321 $\Rightarrow$ 0.35473	71.63	2.69	
1.3188 + 0.6594 $\Rightarrow$ 0.4396	48.98	3.97	

内角带宽的实验值<sup>[3.411]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$
FIHG, $e + e \Rightarrow o$	
1.064 + 0.266 $\Rightarrow$ 0.213	0.017

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.414]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(nm \cdot K^{-1})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$	
0.597 $\Rightarrow$ 0.2985	-0.013

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{eoo}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(0.6\mu\text{m}) \approx 3 \times d_{36}(\text{KDP}) = 1.17\text{ pm/V}^{[3.412,37]}$$

$$d_{36}(0.597\mu\text{m}) = 2.4 \times d_{36}(\text{ADP}) \pm 8\% = (1.13 \pm 0.09)\text{ pm/V}^{[3.149,37]}$$

激光诱导的体损伤阈值:



$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.266	10	5	3.420	单脉冲
0.355	10	14	3.420	单脉冲
	10	1.5	3.421	3 000 个脉冲
0.532	10	30	3.420	单脉冲
1.064	10	50	3.420	单脉冲

### 3.2.3 $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ , 砷酸二氢铯 (CDA)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度:  $3.53 \text{ g/cm}^3$ ;

以  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$  切割 17.5 mm 长的晶体, 以 0.5 透过计的透过范围:  $0.26 \sim 1.43 \mu\text{m}^{[3.422]}$ ;

以“0”透过计的透射光谱的 UV 吸收边:  $0.216 \mu\text{m}^{[3.113]}$ ;

以“0”透过计的透射光谱的 IR 吸收边: 对 o 光为  $1.87 \mu\text{m}$ , 对 e 光为  $1.67 \mu\text{m}^{[3.78]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.35 ~ 1.4	0.6	3.113	1.064	0.041	3.422
1.062	0.041	3.120			

双光子吸收系数  $\beta(\theta = 90^\circ, \phi = 45^\circ)^{[3.71]}$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	备注
0.355	2.81	e 光

折射率的实验值<sup>[3.422]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.347 2	1.602 7	1.572 2	0.694 3	1.563 2	1.542 9
0.532 1	1.573 3	1.551 4	1.064 2	1.551 6	1.533 0

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.405	-3.15	-1.89	0.578	-2.76	-2.39
0.436	-3.05	-2.09	0.633	-2.80	-2.56
0.546	-2.59	-2.12			

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.74]	[3.78] K	[3.78] E
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
1.05 $\Rightarrow$ 0.525	90[3.119]	59.8	无相位匹配	无相位匹配
1.052 $\Rightarrow$ 0.526	90[3.74]	59.7	无相位匹配	无相位匹配
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	87[3.423]	59.0	无相位匹配	无相位匹配
	87[3.96]			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	83.5[3.424]	58.6	无相位匹配	88.7
	83.5[3.425]			
	84.2[3.422]			
	84.4[3.426]			
1.068 $\Rightarrow$ 0.534	—	58.3	88.2	86.5

注: [3.78] K  $\Rightarrow$  见 [3.78], Kirby 等的方程组; [3.78] E  $\Rightarrow$  见 [3.78], Eimerl 的方程组。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	备注
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.05 $\Rightarrow$ 0.525	20	3.119	
1.052 $\Rightarrow$ 0.526	20	3.74	
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	31	3.423	
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	40.3	3.427	10 Hz
	41	3.425	
	42	3.428	
	43	3.426	
	44.5	3.90	
	45	3.120	
	46	3.424	12.5 Hz
	48	3.422	0.1 ~ 1 Hz
	39.6	3.422	20 Hz
	49.2	3.429	10 Hz
1.073 $\Rightarrow$ 0.536 5	61	3.428	
1.078 $\Rightarrow$ 0.539	100	3.119	

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=293\text{ K}$ )<sup>[3,78]E</sup>:

$$n_o^2 = 1.877\,632\,8 - 0.036\,022\,22\lambda^2 + 0.005\,234\,121\lambda^4 + \frac{0.550\,395\,1\lambda^2}{\lambda^2 - (0.162\,570\,0)^2}$$

$$n_e^2 = 1.686\,288\,9 - 0.013\,722\,44\lambda^2 + 0.003\,948\,463\lambda^4 + \frac{0.669\,457\,1\lambda^2}{\lambda^2 - (0.146\,471\,2)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o+o\Rightarrow e$		
1.064 $2\Rightarrow$ 0.532 1	88.72	0.035
1.318 $8\Rightarrow$ 0.659 4	74.52	0.384

内角带宽和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{int}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$					
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	22	87	$\approx 0.4$		3.423
	31	90	$\approx 3.8$	$\approx 3$	3.423
	20	87	0.43		3.96
	63(?)	90	3.03		3.96
1.062 $\Rightarrow$ 0.531	45	90	2.85	6.5	3.120
1.064 $2\Rightarrow$ 0.532 1	40.3	90		6.8	3.427
	24	83.5	0.86	$\approx 8$	3.424
	46	90	3.2		3.424
	20	84.2	0.70		3.422
	48	90	2.91	6	3.422
	20	84.4	0.70		3.426
	43	90	$\approx 3$		3.426

相位匹配角的温度变量:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$d\theta_{pm}/dT/[ (^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1} ]$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$				
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	20	87	0.085	3.96
	63(?)	90	0.481	3.96
1.064 $2\Rightarrow$ 0.532 1	24	83.5	0.129	3.424
	20	84.4	0.131	3.426
	35	86.5	0.194	3.426
	39	87.6	0.251	3.426
	41	88.3	0.537	3.426

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3,74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
1.052 $\Rightarrow$ 0.526	0.308

非临界 SHG 过程双折射的温度变化(1.064 2  $\mu\text{m} \Rightarrow$ 0.532 1  $\mu\text{m}$ ,  $o + o \Rightarrow e$ ):

$$\frac{d(n_2^e - n_1^o)}{dT} = 7.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} [3.427]$$

$$\frac{d(n_2^e - n_1^o)}{dT} = (8.0 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} [3.422]$$

相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3,100]</sup>:

$$d_{\text{ooo}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{ooo}} = d_{36} \sin 2\theta \sin 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(1.064 \text{ 2 } \mu\text{m}) = (0.40 \pm 0.05) \text{ pm/V} [3.422]$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.532	10	> 3	3.429	
1.062	0.007	> 40	3.120	
1.064	12	> 2.6	3.422	10 ~ 20 Hz
	10	3.5	3.424	12.5 Hz
	18	4	3.427	2 ~ 50 Hz

### 3.2.4 $\text{CsD}_2\text{AsO}_4$ , 胍化砷酸二氢铯 (DCDA)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

以  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$  切割 13.5 mm 长的晶体在 0.5 透过水平时的透过范围:  
0.27 ~ 1.66  $\mu\text{m}$ <sup>[3,422]</sup>

以“0”透过计透射光谱的 IR 吸收边: 对 o 光为 2.03  $\mu\text{m}$ , 对 e 光为  
1.78  $\mu\text{m}$ <sup>[3,78]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$  :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
1.062	0.01	3.120	1.064	0.02	3.422

双光子吸收系数  $\beta(\theta=90^\circ, \phi=45^\circ)^{[3.71]}$  :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$	参考文献
0.355	8.0	o 光	5.1		e 光

折射率的实验值<sup>[3.422]</sup> :

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.347 2	1.589 5	1.568 5	0.694 3	1.559 6	1.541 8
0.532 1	1.568 1	1.549 5	1.064 2	1.550 3	1.532 6

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup> :

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.405	-2.26	-1.77	0.578	-2.31	-1.71
0.436	-2.26	-1.51	0.633		-1.70
0.546	-2.47	-1.64			

相位匹配角的实验值 ( $T=293\text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.74]	[3.78]K	[3.78]E
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
1.034 $\Rightarrow$ 0.517	90[3.119]	65.2	无相位匹配	无相位匹配
1.037 $\Rightarrow$ 0.518 5	90[3.74]	64.8	无相位匹配	无相位匹配
1.046 $\Rightarrow$ 0.523		63.7	88.4	88.1
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	79.35[3.422]	61.8	82.4	82.3
	80.8[3.426]			

注: [3.78]K $\Rightarrow$ 见[3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E $\Rightarrow$ 见[3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	备注
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.034 $\Rightarrow$ 0.517	20	3.119	
1.037 $\Rightarrow$ 0.518 5	20	3.74	
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	102	3.428	
	102	3.425	
	112.3	3.422	90% 氘化度, <1 Hz
	109.8	3.422	90% 氘化度, 20 Hz
	96.4	3.426	70% 氘化度
	108	3.119	

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=293\text{ K}$ )<sup>[3.78]E</sup>:

$$n_o^2 = 1.627\,849\,6 - 0.018\,220\,310\lambda^2 + 0.000\,281\,333\,1\lambda^4 + \frac{0.780\,817\,0\lambda^2}{\lambda^2 - (0.140\,769\,9)^2}$$

$$n_e^2 = 1.623\,606\,3 - 0.009\,338\,692\lambda^2 + 0.001\,965\,413\,0\lambda^4 + \frac{0.724\,958\,9\lambda^2}{\lambda^2 - (0.141\,485\,0)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	82.32	0.188
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	69.54	0.449

内角带宽和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$					
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20	79.35	0.41		3.422
	112.3	90	2.90	6.1	3.422
	20	80.8	0.50		3.426
	96.4	90	$\approx 3.5$		3.426

相位匹配角的温度变化<sup>[3.426]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20	80.8	0.042
	66.3	84.3	0.081
	80	86.4	0.270
	87.7	88.1	0.533

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.74]</sup>;

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(nm \cdot K^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
1.037 $\Rightarrow$ 0.518 5	0.317

非临界 SHG 过程双折射率的温度变化:  $(1.064\ 2\ \mu\text{m} \Rightarrow 0.532\ 1\ \mu\text{m}, o + o \Rightarrow e)$ ;

$$\frac{d(n_2^e - n_1^o)}{dT} = (7.8 \pm 0.2) \times 10^{-6} K^{-1} [3.422]$$

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>;

$$d_{\text{oeo}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{eee}} = d_{\text{oeo}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (0.40 \pm 0.05) \text{ pm/V} [3.422]$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
1.064	12	> 2.6	3.422	10 ~ 20 Hz
	12	> 2.5	3.139	0.1 ~ 20 Hz

### 3.2.5 $\text{KTiOAsO}_4$ , 砷酸钛氧钾 (KTA)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 34.5^\circ$ ;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.35 \sim 5.3\ \mu\text{m}$ <sup>[3.430, 431]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ <sup>[3.432]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
4.0	0.2	5.0	1.0

折射率的实验值<sup>[3.433]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.632 8	1.808 3	1.814 2	1.904 8

相位匹配角的实验值 ( $T = 293\text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.433]	[3.434]
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.053 $\Rightarrow$ 0.526 5	65[3.434]	无相位匹配	64.97
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	57.8[3.434]	无相位匹配	57.58
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	47.8[3.434]	68.84	47.79
1.064 2 + 1.579 1 $\Rightarrow$ 0.635 8	19.8[3.434]	16.64	19.63

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.433]	[3.434]
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	76.3 [3.434]	无相位匹配	76.28
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	64 [3.434]	69.30	63.94
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	55.9 [3.433]	56.22	53.09
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	71.2 [3.434]	82.37	71.15
1.064 2 + 1.579 1 $\Rightarrow$ 0.635 8	67.3 [3.434]	73.04	67.29
4.15 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.847	30.3 [3.431]	31.19	31.87

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.433]	[3.434]
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
1.153 2 $\Rightarrow$ 0.576 15	82.9[3.434]	80.61	83.00
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	64.2[3.434]	63.28	64.25
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
1.579 1 + 0.635 8 $\Rightarrow$ 0.453 3	73.7[3.434]	72.82	73.74

最佳色散关系方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位) <sup>[3.434]</sup>:

$$n_x^2 = 3.1533 + \frac{0.04029}{\lambda^2 - 0.04932} - 0.01320\lambda^2$$



$$n_y^2 = 3.1775 + \frac{0.04353}{\lambda^2 - 0.05640} - 0.01444\lambda^2$$

$$n_z^2 = 3.4487 + \frac{0.06334}{\lambda^2 - 0.05887} - 0.01646\lambda^2$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	57.58	0.211	0.337
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.3188 + 0.6594 $\Rightarrow$ 0.4396	47.79	0.217	0.511

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	76.28	1.179
1.1523 $\Rightarrow$ 0.57615	63.94	1.978
1.3188 $\Rightarrow$ 0.6594	53.09	2.344
2.098 $\Rightarrow$ 1.049	44.71	2.345
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	59.80	2.042
SFG, $o + e \Rightarrow o$		
1.3188 + 0.6594 $\Rightarrow$ 0.4396	71.15	1.708

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.1523 $\Rightarrow$ 0.57615	83.00	0.676
1.3188 $\Rightarrow$ 0.6594	64.25	2.119
2.098 $\Rightarrow$ 1.049	53.50	2.445
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	69.37	1.657

内角带宽和温度带宽的实验值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.053 $\Rightarrow$ 0.576 15	65	0.4		3.430
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	57.8	0.37	10.4	3.434

YZ 平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	55.9	0.093	3.433

KTA 晶体主平面上三波相互作用在相位匹配方向的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eee}} = d_{\text{eee}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{ooo}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{ooo}} = d_{32} \sin \theta$$

[3.36]中给出了 KTA 晶体在任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。  
非线性系数:

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (2.5 \pm 0.3) \text{ pm/V}^{[3.434]}, (2.8 \pm 0.3) \text{ pm/V}^{[3.433]}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (4.2 \pm 0.4) \text{ pm/V}^{[3.433]}, (4.5 \pm 0.5) \text{ pm/V}^{[3.434]}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (16.2 \pm 1.0) \text{ pm/V}^{[3.433]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.85	2	> 10	3.431	
1.064 2	8	> 12	3.432	20 Hz, 1 000 个脉冲

### 3.2.6 MgO:LiNbO<sub>3</sub>, 氧化镁掺杂铌酸锂

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群: 3m;

以“0”透过计的透过范围:  $\approx 0.4 \sim \approx 5 \mu\text{m}^{[3.435, 436]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.532 1	0.02	3.437	1.064 2	0.003	3.438
1.064 2	<0.01	3.437			

折射率的实验值:

5 mole% MgO, 摩尔比 Li/Nb = 0.97<sup>[3.435]</sup>

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.435 8	2.386 3	2.280 2	0.632 8	2.281 6	2.192 2
0.491 6	2.340 3	2.241 6	0.694 3	2.267 8	2.180 5
0.546 1	2.311 4	2.217 2	0.840 0	2.246 0	2.162 2
0.577 0	2.298 8	2.206 8	1.064 2	2.227 2	2.146 3
0.579 0	2.298 0	2.206 2			

5 mole% MgO, 摩尔比 Li/Nb = 0.946(同成分熔体)<sup>[3.436]</sup>

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.404 7	2.424 7	2.311 1	0.579 0	2.298 2	2.205 6
0.407 8	2.420 2	2.307 3	0.589 3	2.294 5	2.202 7
0.435 8	2.386 3	2.279 5	0.623 4	2.284 0	2.193 8
0.486 1	2.344 1	2.244 4	0.656 3	2.275 6	2.186 7
0.491 6	2.340 4	2.241 2	0.690 7	2.268 1	2.180 2
0.496 2	2.337 6	2.238 9	0.694 3	2.266 9	2.179 3
0.546 1	2.311 2	2.216 7	1.064 0	2.223 7	2.145 6
0.577 0	2.298 9	2.206 3			

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.435]	[3.436]
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	74.5 [3.436] 76 [3.437] 76.5 [3.435]	76.83	82.45
1.079 6 $\Rightarrow$ 0.539 8	74 [3.435]	74.08	78.62

注: PM 角的值与熔体的化学计量比关系密切。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$				107	3.441
1.047 $\Rightarrow$ 0.523 5	75.3	3.439	1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	110	3.442
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	107	3.437		110.6	3.92
	107	3.438		113	3.443
	107	3.440		116	3.444

注: PM 的温度值强烈依赖于熔体的化学计量比。

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.435]</sup>:

$$n_o^2 = 4.901\,7 + \frac{0.112\,280}{\lambda^2 - 0.049\,656} - 0.039\,636\lambda^2$$

$$n_e^2 = 4.558\,3 + \frac{0.091\,806}{\lambda^2 - 0.048\,086} - 0.032\,068\lambda^2$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_s/(^{\circ})$
SHG, $o+o\Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	76.83	1.025
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	55.87	2.076
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	69.09	1.333

角度带宽和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{lm}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$					
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20	76	0.063		3.437
	107	90	2.160	0.73	3.437
	110.6	90		0.73	3.92

相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{eee}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数<sup>[3.92]</sup>:

$$d_{31}(1.064\,2\,\mu\text{m}) = (-4.69 \pm 0.13) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.437]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.532 1	$\approx 20$	3.4
1.064 2	$\approx 20$	6.1

### 3.2.7 $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ , 淡红银矿

属单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $3m$ ;

密度: 在 293 K 时为  $5.63 \text{ g/cm}^3$  [3.64];

莫氏硬度:  $2 \sim 2.5$  [3.64];

以“0”透过计的透过范围:  $0.6 \sim 13 \mu\text{m}$  [3.445];

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$T/\text{K}$	参考文献	备注
0.593	0.89	77	3.446	e 光, SFG 方向
0.632 8	0.81	77	3.446	o 光, SFG 方向
	0.64	77	3.446	e 光, DFG 方向
0.678 9	0.64	77	3.446	o 光, DFG 方向
9.31	0.25	77	3.446	e 光, SFG 和 DFG 方向
0.576	36	300	3.445	e 光, $\perp c$
0.593	16.1	300	3.446	e 光, SFG 方向
0.632 8	1.83	300	3.446	o 光, SFG 方向
	1.59	300	3.446	e 光, DFG 方向
0.635 8	1.88	300	3.447	e 光, SFG 方向
0.676 4	0.95	300	3.447	o 光, SFG 方向
0.678 9	0.83	300	3.446	o 光, DFG 方向
0.694 3	0.1	300	3.448	
	0.2	300	3.449	o 光, $\parallel c$
1.06	0.1	300	3.449	o 光, $\parallel c$
1.064	0.02	300	3.448	
0.61 $\sim$ 13.3	$< 0.1$	300	3.445	e 光, $\perp c$
0.63 $\sim$ 12.5	$< 0.1$	300	3.445	o 光, $\perp c$
5.3	0.3	300	3.450	e 光, SHG 方向
	0.32	300	3.451	e 光, SHG 方向
9.2	0.29	300	3.452	o 光, SHG 方向
9.3	0.53	300	3.446	e 光, DFG 方向
10.2	1.2	300	3.445	o 光, $\perp c$
	1.3	300	3.453	o 光

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$T/\text{K}$	参考文献	备注
10.6	0.16	300	3.454	o 光
	0.38	300	3.451	o 光
	0.45	300	3.447	o 光, SFG 方向
	0.6	300	3.450	o 光, SHG 方向
	0.8	300	3.455	o 光
	1	300	3.351	o 光
11.6	0.5	300	3.453	o 光
14.5	$\approx 70$	300	3.453	o 光
15.2 ~ 20.8	< 20	300	3.456	o 光

双光子吸收系数  $\beta$  (沿  $c$  轴):

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{10}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{10}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献
0.694 3	10	3.451	1.06	3	3.451
	2	3.448	1.064	< 0.3	3.448

 $T = 293 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.445]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.587 6		2.789 6	1.530	2.772 8	2.548 5
0.632 8	3.019 0	2.739 1	1.709	2.765 4	2.542 3
0.667 8	2.980 4	2.709 4	2.50	2.747 8	2.528 2
1.014	2.826 4	2.590 1	3.56	2.737 9	2.521 3
1.129	2.806 7	2.575 6	4.62	2.731 8	2.517 8
1.367	2.783 3	2.557 0			

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.445]	[3.457]	[3.458]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	23.6 [3.459]	21.50	22.13	19.75
10.59 $\Rightarrow$ 5.295	21.5 [3.455]	21.48	22.11	19.74
9.2 $\Rightarrow$ 4.6	19.9 [3.452]	18.96	19.09	17.51
2.13 $\Rightarrow$ 1.065	29.5 [3.460]	29.78	29.44	29.83
2.128 4 $\Rightarrow$ 1.064 2	29.4 [3.461]	29.80	29.46	29.86

续表

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.445]	[3.457]	[3.458]
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
12.2 + 1.064 $\Rightarrow$ 0.978 6	17.2 [3.462]	18.51	18.64	18.44
8.9 + 1.064 $\Rightarrow$ 0.950 4	20.0 [3.462]	20.96	21.00	21.04
6.3 + 1.064 $\Rightarrow$ 0.910 3	23.5 [3.462]	24.60	24.68	24.83
10.57 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 5	25.3 [3.463]	24.15	25.31	25.08
10.6 + 0.676 4 $\Rightarrow$ 0.635 8	25.7 [3.447]	24.50	25.79	25.52
10.693 5 + 0.672 6 $\Rightarrow$ 0.632 8	25.8 [3.464]	24.47	25.79	25.51
10.588 1 + 0.673 0 $\Rightarrow$ 0.632 8	25.9 [3.464]	24.55	25.87	25.60
10.300 6 + 0.674 2 $\Rightarrow$ 0.632 8	26.1 [3.464]	24.87	26.20	25.93
10.191 8 + 0.674 7 $\Rightarrow$ 0.632 8	26.4 [3.464]	25.03	26.37	26.10
9.533 3 + 0.677 8 $\Rightarrow$ 0.632 8	27.1 [3.464]	25.81	27.18	26.93
9.268 8 + 0.679 2 $\Rightarrow$ 0.632 8	27.4 [3.464]	26.17	27.56	27.30
6.355 2 + 0.702 8 $\Rightarrow$ 0.632 8	32.9 [3.465]	31.26	32.91	32.69
6.257 1 + 0.704 0 $\Rightarrow$ 0.632 8	33.2 [3.465]	31.47	33.14	32.91
6.162 9 + 0.705 2 $\Rightarrow$ 0.632 8	33.4 [3.465]	31.69	33.37	33.14
5.907 9 + 0.708 7 $\Rightarrow$ 0.632 8	34.1 [3.465]	32.34	34.05	33.83
5.737 5 + 0.711 2 $\Rightarrow$ 0.632 8	34.5 [3.465]	32.77	34.50	34.28
5.539 3 + 0.714 4 $\Rightarrow$ 0.632 8	35.1 [3.465]	33.35	35.11	34.90
5.257 8 + 0.719 4 $\Rightarrow$ 0.632 8	36.0 [3.465]	34.23	36.03	35.82
SFG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
10.59 + 1.064 $\Rightarrow$ 0.967	20.0 [3.466]	20.27	20.14	20.26
10.59 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 6	27.7 [3.467]	24.69	25.85	25.62
9.31 + 0.678 9 $\Rightarrow$ 0.632 8	29.0 [3.446]	26.71	28.11	27.87
SFG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{e}$				
7.8 + 2.47 $\Rightarrow$ 1.875 9	33 [3.468]	33.44	32.57	32.33

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 293 \text{ K}$ )<sup>[3.457]</sup>:

$$n_{\text{o}}^2 = 9.220 + \frac{0.4454}{\lambda^2 - 0.1264} + \frac{1733}{\lambda^2 - 1000}$$

$$n_{\text{e}}^2 = 7.007 + \frac{0.3230}{\lambda^2 - 0.1192} + \frac{600}{\lambda^2 - 1000}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	22.13			3.42

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	19.90			3.17
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	14.71			2.50
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	15.01			2.56
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	21.02			3.45
2.128 4 $\Rightarrow$ 1.064 2	29.46			4.44
SFG, o + o $\Rightarrow$ e				
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	19.57			3.39
10.6 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 62	25.28			4.52
SHG, e + o $\Rightarrow$ e				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	30.28	3.84		4.19
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	27.27	3.70		3.97
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	29.45	4.21		4.32
2.128 4 $\Rightarrow$ 1.064 2	42.46	4.77		4.96
SFG, e + o $\Rightarrow$ e				
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	19.78	2.87		3.19
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	18.70	2.81		3.06
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	20.29	2.93		3.49
10.6 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 62	25.83	3.49		4.59
SFG, o + e $\Rightarrow$ e				
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	28.65		4.06	4.13
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	26.89		3.93	3.99

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, o + o $\Rightarrow$ e		
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	0.098	3.450
9.2 $\Rightarrow$ 4.6	0.082	3.452
SFG, e + o $\Rightarrow$ e		
10.6 + 0.694 3 $\Rightarrow$ 0.651 6	0.031	3.467

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{oe}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数<sup>[3.455,37]</sup>:

$$|d_{22}(10.6 \mu\text{m})| = (0.2 \pm 0.03) \times |d_{36}(\text{GaAs})| = (16.6 \pm 2.5) \text{ pm/V},$$



$|d_{31}(10.6\text{ }\mu\text{m})| = (1.6 \pm 0.1)^{-1} \times |d_{22}(\text{Ag}_3\text{AsS}_3)| = (10.4 \pm 2.2)\text{ pm/V}$   
 激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.694 3	$10^6$	0.000 06	3.469
	14	0.03	3.365
1.064 2	cw	0.000 001	3.469
	18	$> 0.12$	3.365
2.098	200	$> 0.1$	3.365
10.6	190	$> 0.46$	3.365
	150	0.53	3.450

### 3.2.8 GaSe, 硒化镓

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $62\text{m}$ ;

密度:  $5.03\text{ g/cm}^3$ <sup>[3.338]</sup>;

莫氏硬度:  $\approx 0$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.62 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[3.388]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.65 ~ 18	$< 1$	3.470	1.9	0.1	3.472
0.7	$< 0.3$	3.471	2	$< 0.1$	3.474
1.06	0.45	3.472	9.3 ~ 10.6	$< 0.05$	3.384
	$< 0.25$	3.473	10	$< 0.1$	3.474
	$< 0.1$	3.474	10.6	0.081	3.454

折射率的实验值<sup>[3.470]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.623 8	2.97	2.74	3.391 3	2.81	2.46
1.152 3	2.90	2.54			

相位匹配角的实验值( $T = 293\text{ K}$ )及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.470]	[3.473]	[3.475]
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
2.36 $\Rightarrow$ 1.18	18.7[3.470]	18.48	19.22	18.92
5.30 $\Rightarrow$ 2.65	10.2[3.470]	9.83	9.77	10.70
9.30 $\Rightarrow$ 4.65	12.8[3.384]	11.14	10.75	13.25
9.60 $\Rightarrow$ 4.80	13.2[3.384]	11.46	11.04	13.61
10.3 $\Rightarrow$ 5.15	14.0[3.384]	12.28	11.81	14.49
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	12.7[3.470]	12.67	12.16	14.89
	14.4[3.384]			
SFG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
17.4 + 3.532 7 $\Rightarrow$ 2.936 5	13[3.388]	12.41	12.03	13.02
	13[3.370]			
11.6 + 3.931 8 $\Rightarrow$ 2.936 5	10[3.388]	10.16	9.94	11.36
	10[3.370]			
10.8 + 2.361 1 $\Rightarrow$ 1.937 5	10.7[3.472]	10.46	10.46	11.18
7.4 + 2.485 9 $\Rightarrow$ 1.860 8	11.2[3.472]	11.14	11.23	11.70
5 + 2.703 9 $\Rightarrow$ 1.754 9	12.4[3.472]	12.43	12.60	12.81
10.1 + 1.189 5 $\Rightarrow$ 1.064 2	13.3[3.476]	12.68	13.21	13.51
7.15 + 1.250 3 $\Rightarrow$ 1.064 2	15[3.476]	14.41	15.06	15.20
19.1 + 1.114 4 $\Rightarrow$ 1.053	11.5[3.367]	11.51	11.86	11.88
12 + 1.154 3 $\Rightarrow$ 1.053	12[3.367]	12.10	12.60	12.89
5.8 + 1.286 6 $\Rightarrow$ 1.053	15.7[3.367]	15.70	16.44	16.48
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	13.6[3.473]	12.94	13.59	13.88
4.9 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.874 3	18.8[3.473]	18.48	19.63	19.81
17.17 + 0.723 5 $\Rightarrow$ 0.694 3	15.2[3.471]	12.99	13.63	15.19
9.99 + 0.746 2 $\Rightarrow$ 0.694 3	18.3[3.471]	15.68	16.56	18.73
SFG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
15.5 + 1.142 7 $\Rightarrow$ 1.064 2	12.4[3.476]	11.87	12.32	12.45
12.0 + 1.167 8 $\Rightarrow$ 1.064 2	13.3[3.476]	12.58	13.14	13.32
9.4 + 1.200 1 $\Rightarrow$ 1.064 2	14.4[3.476]	13.75	14.42	14.52
7.4 + 1.243 0 $\Rightarrow$ 1.064 2	16.4[3.476]	15.27	16.07	16.01
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 11	14.4[3.473]	13.51	14.25	14.42
18.28 + 0.721 7 $\Rightarrow$ 0.694 3	15.2[3.471]	13.22	13.89	15.15
11.10 + 0.740 6 $\Rightarrow$ 0.694 3	18.6[3.471]	15.49	16.44	18.46

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位) <sup>[3.475]</sup>

$$n_o^2 = 7.443 + \frac{0.405\ 0}{\lambda^2} + \frac{0.018\ 6}{\lambda^4} + \frac{0.006\ 1}{\lambda^6} + \frac{3.148\ 5\lambda^2}{\lambda^2 - 2\ 194}$$

$$n_e^2 = 5.76 + \frac{0.3879}{\lambda^2} - \frac{0.2288}{\lambda^4} + \frac{0.1223}{\lambda^6} + \frac{1.8550\lambda^2}{\lambda^2 - 1780}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, o + o $\Rightarrow$ e				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	14.89			4.059
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	13.61			3.750
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	10.70			3.007
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	10.99			3.081
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	15.39			4.208
SFG, o + o $\Rightarrow$ e				
10.6 + 2.65 $\Rightarrow$ 2.12	11.07			3.102
9.6 + 2.4 $\Rightarrow$ 1.92	11.26			3.156
10.6 + 1.0642 $\Rightarrow$ 0.96711	13.88			3.978
9.6 + 1.0642 $\Rightarrow$ 0.95800	14.44			4.121
SHG, e + o $\Rightarrow$ e				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	20.47	5.252		5.264
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	18.65	4.891		4.898
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	14.60	3.991		3.984
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	15.00	4.084		4.078
SFG, e + o $\Rightarrow$ e				
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.53333	13.92	3.817		3.823
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	13.28	3.664		3.666
10.6 + 1.0642 $\Rightarrow$ 0.96711	14.42	3.938		4.114
9.6 + 1.0642 $\Rightarrow$ 0.95800	15.06	4.092		4.274
SFG, o + e $\Rightarrow$ e				
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.53333	19.51		5.074	5.070
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	18.57		4.881	4.876

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, o + o $\Rightarrow$ e		
10.3 $\Rightarrow$ 5.15	0.146	3.384
SFG, o + o $\Rightarrow$ e		
7 + 2.51 $\Rightarrow$ 1.8475	0.086	3.472
12.5 + 0.7351 $\Rightarrow$ 0.6943	0.021	3.471

相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3,100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数:

$$|d_{22}(10.6 \mu\text{m})| = 3 \times |d_{31}(\text{CdSe})| \pm 20\% = (54 \pm 10.8) \text{ pm/V}^{[3, 470, 37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.694 3	30	0.2	3.471	
1.053	0.002	> 10	3.367	1 Hz
1.064	10	0.3	3.473	
2.36	40	> 0.05	3.470	
2.94	0.11	300	3.388	1 Hz
	0.11	300	3.370	1 Hz
10.6	125	0.3	3.384	2 ~ 20 Hz

### 3.2.9 AgGaSe<sub>2</sub>, 硒镓银

负单轴晶:  $n_o > n_e$  (在  $\lambda < 0.804 \mu\text{m}$  时  $n_e > n_o$ );

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度:  $5.71 \text{ g/cm}^3^{[3, 338]}$ ;

莫氏硬度: 3 ~ 3.5;

以“0”透过计的透过范围:  $0.71 \sim 19 \mu\text{m}^{[3, 477, 478]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
1	< 0.02	3.479	
1.3	0.002	3.480	o 光, OPO 方向
	0.002	3.480	e 光, OPO 方向
2.0	0.012	3.481	o 光, OPO 方向
	0.030	3.481	e 光, OPO 方向
	0.004	3.482	
2.05	< 0.01	3.483	
	0.015 ~ 0.058	3.484	
2.1	0.06 ~ 0.07	3.478	
	0.012 ~ 0.072	3.485	
2.2	0.002 ~ 0.004	3.480	o 光, OPO 方向
	0.02 ~ 0.05	3.480	e 光, OPO 方向
5 ~ 11	< 0.02	3.479	

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
10.6	0.089	3.454	
	0.01 ~ 0.06	3.486	
	0.002	3.477	

折射率的实验值<sup>[3.487]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.725	2.845 2	2.893 2	3.800	2.620 3	2.587 6
0.750	2.819 1	2.841 5	4.000	2.618 9	2.586 3
0.800	2.784 9	2.786 6	4.500	2.616 6	2.584 0
0.850	2.759 8	2.752 2	5.000	2.614 4	2.581 9
0.900	2.740 6	2.727 5	5.500	2.612 8	2.580 0
0.950	2.725 2	2.708 5	6.000	2.611 3	2.578 4
1.000	2.713 2	2.693 4	6.500	2.609 4	2.576 5
1.100	2.694 2	2.671 2	7.000	2.607 0	2.574 3
1.200	2.680 6	2.655 4	7.500	2.604 9	2.572 3
1.300	2.670 5	2.643 8	8.000	2.603 2	2.570 4
1.400	2.662 4	2.634 7	8.500	2.600 9	2.568 1
1.600	2.651 6	2.622 4	9.000	2.598 8	2.565 9
1.800	2.643 2	2.613 1	9.500	2.596 4	2.563 5
2.000	2.637 6	2.607 1	10.00	2.593 9	2.560 8
2.200	2.633 6	2.602 7	10.50	2.591 7	2.558 5
2.400	2.630 4	2.599 2	11.00	2.589 0	2.555 5
2.600	2.628 6	2.596 8	11.50	2.586 8	2.553 6
2.800	2.626 1	2.594 3	12.00	2.583 7	5.550 5
3.000	2.624 5	2.592 5	12.50	2.580 5	5.547 3
3.200	2.623 1	2.591 2	13.00	2.577 1	5.543 9
3.400	2.622 1	2.589 9	13.50	2.573 1	2.540 4
3.600	2.621 3	2.588 9			

旋光性<sup>[3.345]</sup>:在各向同性点  $\rho = 7(^{\circ})/\text{mm}$  ( $n_o = n_e$ ,  $\lambda = 0.804 \mu\text{m}$ )。在  $\lambda = 3.3913 \mu\text{m}$  处折射率的温度微商 ( $T = 35^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.478]</sup>:

$$\frac{dn_o}{dT} = 4.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\frac{dn_e}{dT} = 7.6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.488]	[3.362]	[3.479]
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
10.63 $\Rightarrow$ 5.315	55.9 [3.488]	55.2	57.3	58.0
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	57.5 [3.477]	55.0	57.1	57.7
10.55 $\Rightarrow$ 5.275	55.3 [3.488]	54.7	56.7	57.4
10.3 $\Rightarrow$ 5.15	53.7 [3.488]	53.1	54.9	55.7
10.21 $\Rightarrow$ 5.105*	53.1 [3.488]	52.5	54.3	55.1
6 $\Rightarrow$ 3	42.2 [3.488]	39.5	39.4	40.1
5.2 $\Rightarrow$ 2.6	40.3 [3.488]	41.5	40.8	41.3
4.1 $\Rightarrow$ 2.05	49.7 [3.483]	50.6	48.3	48.6
SFG, $o + o \Rightarrow e$				
12.15 + 10.63 $\Rightarrow$ 5.67	61 [3.488]	60.7	63.5	63.6
10.63 + 5.33 $\Rightarrow$ 3.55	42.7 [3.488]	42.1	42.7	43.3
5.515 + 3.391 $\Rightarrow$ 2.1	$\approx$ 48 [3.478]	48.1	46.2	46.5
4.84 + 3.55 $\Rightarrow$ 2.047 9	49.2 [3.483]	50.1	48.0	48.2
5.13 + 2.685 $\Rightarrow$ 1.763	61.3 [3.474]	57.1	53.3	53.5
6.00 + 2.586 $\Rightarrow$ 1.807	56 [3.474]	54.9	51.7	51.9
7.43 + 2.484 $\Rightarrow$ 1.862	49.5 [3.474]	49.0	46.6	46.9
9.93 + 2.384 $\Rightarrow$ 1.923	45.8 [3.474]	44.6	42.9	43.1
6.95 + 1.66 $\Rightarrow$ 1.34	$\approx$ 78 [3.483]	83.1	68.6	69.2
7.4 + 1.604 $\Rightarrow$ 1.318	80 [3.477]	无相位匹配	69.8	70.4
8.8 + 1.550 $\Rightarrow$ 1.318	70 [3.477]	69.0	61.2	61.7
12.3 + 1.476 $\Rightarrow$ 1.318	60 [3.477]	58.2	53.1	53.4

最佳 Sellmeier 方程组 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 293 \text{ K}$ )<sup>[3.488]</sup>:

$$n_o^2 = 3.9362 + \frac{2.9113\lambda^2}{\lambda^2 - (0.38821)^2} + \frac{1.7954\lambda^2}{\lambda^2 - 1.600}$$

$$n_e^2 = 3.3132 + \frac{3.3616\lambda^2}{\lambda^2 - (0.38201)^2} + \frac{1.7677\lambda^2}{\lambda^2 - 1.600}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	55.02		0.68
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	49.00		0.71
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	41.10		0.69
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	43.63		0.68

\* 译者注: 原书为“10.21  $\Rightarrow$  5.15”, 应为“10.21  $\Rightarrow$  5.105”。

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
10.6 + 2.65 $\Rightarrow$ 2.12	43.71		0.67
9.6 + 2.4 $\Rightarrow$ 1.92	46.36		0.66
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	72.03	0.42	0.40
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	55.60	0.68	0.66
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	55.36	0.70	0.67

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
10.25 $\Rightarrow$ 5.125	0.84	3.486
SFG, $o + o \Rightarrow e$		
5.515 + 3.391 $\Rightarrow$ 2.1	0.54	3.478

在相位匹配方向上有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(10.6 \mu\text{m}) = 33 \text{ pm/V}^{[3.37]}$$

$$d_{36}(9.5 \mu\text{m}) = (32 \pm 4) \text{ pm/V}^{[3.489]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
1.064	23	0.13 ~ 0.4	3.483	
	35	0.3	3.488	单脉冲
	35	0.11	3.488	1 000 个脉冲
2.0	30	0.083	3.481	5 kHz, 未镀膜晶体
	30	< 0.13	3.481	5 kHz, 镀膜晶体
	20 ~ 30	0.2 ~ 0.3	3.482	
2.05	50	0.25	3.483	
2.1	50	0.13	3.478	
	180	0.094	3.485	未镀膜晶体
	180	0.17	3.485	镀膜晶体
9.5	30	0.33	3.489	
10.25	75	0.12	3.486	10 个脉冲
10.6	150	0.1 ~ 0.2	3.368	

$T = 293 \text{ K}$  时的热导率<sup>[3.58]</sup>;

$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
1.0	1.1

### 3.2.10 CdSe, 硒化镉

正单轴晶:  $n_e > n_o$ ;

点群: 6mm;

密度:  $5.81 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.338]</sup>;

莫氏硬度: 3.25<sup>[3.59]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.75 \sim 25 \mu\text{m}$ <sup>[3.490,59]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda / \mu\text{m}$	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda / \mu\text{m}$	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	参考文献
0.75 ~ 20	< 0.1	3.490	4	0.04	3.492
1.064	0.02	3.448	10.6	0.000 5	3.493
1.32	0.01	3.448		0.016	3.492
3.39	0.01	3.491		0.032	3.494

双光子吸收系数  $\beta$ :

$\lambda / \mu\text{m}$	$\beta \times 10^{11} / (\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献	备注
1.06	140	3.495	o 光, $\perp c$ 和 $\parallel c$
	60	3.495	e 光, $\perp c$
1.064	208	3.496	o 光, $\parallel c$
	< 20	3.448	
1.32	2	3.448	

折射率的实验值:

$\lambda / \mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda / \mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
0.8	2.644 8	2.660 7	3.497	1.4	2.492 9	2.513 3	3.497
0.9	2.582 6	2.602 7	3.497	1.529 5	2.486 1	2.505 9	3.494
1.0	2.550 2	2.569 6	3.497	1.6	2.481 8	2.500 8	3.497
1.013 9	2.548 1	2.567 7	3.494	1.710 9	2.477 6	2.497 4	3.494
1.128 7	2.524 6	2.544 4	3.494	1.8	2.473 2	2.493 0	3.497
1.2	2.513 2	2.533 1	3.497	2.0	2.468 2	2.487 3	3.497
1.367 3	2.497 1	2.517 0	3.494	2.2	2.464 2	2.484 0	3.497



续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
2.325 3	2.462 7	2.482 3	3.494	4.0	2.449 1	2.468 5	3.497
2.4	2.461 2	2.479 8	3.497	5.0	2.446 4	2.465 7	3.494
2.6	2.459 0	2.478 4	3.497	6.0	2.443 4	2.462 5	3.494
2.8	2.456 2	2.475 7	3.497	7.0	2.439 8	2.458 6	3.494
3.0	2.455 3	2.474 8	3.494	8.0	2.436 7	2.455 2	3.494
3.2	2.453 2	2.472 6	3.497	9.0	2.433 3	2.451 4	3.494
3.4	2.451 8	2.471 4	3.497	10.0	2.429 4	2.447 5	3.494
3.6	2.450 9	2.470 2	3.497	11.0	2.425 2	2.443 0	3.494
3.8	2.449 8	2.469 4	3.497	12.0	2.420 4	2.437 9	3.494

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.468]	[3.362]
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
16.4 + 3.479 $\Rightarrow$ 2.87	73.7 [3.493]	71.3	72.4
15.96 + 2.28 $\Rightarrow$ 1.995	62.2 [3.498]	64.2	64.6
14.1 + 3.604 $\Rightarrow$ 2.87	70.9 [3.493]	68.9	69.7
13.7 + 2.849 2 $\Rightarrow$ 2.358 7	65 [3.499]	65.2	65.5
10.6 + 2.72 $\Rightarrow$ 2.164 6	70.5 [3.491]	70.4	70.5
10.361 + 2.227 $\Rightarrow$ 1.833	78 [3.500]	78.7	78.5
9.871 + 2.251 $\Rightarrow$ 1.833	84 [3.500]	83.9	83.5
9.776 + 2.256 $\Rightarrow$ 1.833	90 [3.500]	85.8	85.1
8.278 + 4.3 $\Rightarrow$ 2.83	84 [3.492]	81.4	81.9
8.253 + 4.4 $\Rightarrow$ 2.87	84 [3.492]	82.4	83.0
8.236 + 4.5 $\Rightarrow$ 2.91	84 [3.492]	83.6	84.5
7.88 + 3.36 $\Rightarrow$ 2.358 7	90 [3.499]	无相位匹配	无相位匹配
7.86 + 3.37 $\Rightarrow$ 2.358 7	90 [3.490]	无相位匹配	无相位匹配

最佳色散关系方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) [3.362]:

$$n_o^2 = 4.224 3 + \frac{1.768 0 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.227 0} + \frac{3.120 0 \lambda^2}{\lambda^2 - 3.380}$$

$$n_e^2 = 4.200 9 + \frac{1.887 5 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.217 1} + \frac{3.646 1 \lambda^2}{\lambda^2 - 3.629}$$

[3.390] 给出了温度为 73 K、173 K、373 K、573 K 时的色散关系。

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SFG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{o}$			15 + 3.651 3 $\Rightarrow$ 2.936 5	71.5	0.27
22 + 2.936 5 $\Rightarrow$ 2.590 7	83.2	0.11	10 + 4.157 3 $\Rightarrow$ 2.936 5	73.3	0.25
20 + 2.936 5 $\Rightarrow$ 2.560 5	74.0	0.24	20 + 3.243 7 $\Rightarrow$ 2.791	80.9	0.14
15 + 2.936 5 $\Rightarrow$ 2.455 7	66.0	0.34	15 + 3.429 0 $\Rightarrow$ 2.791	69.3	0.30
10 + 2.936 5 $\Rightarrow$ 2.269 9	71.6	0.27	10 + 3.871 5 $\Rightarrow$ 2.791	71.8	0.27
9 + 2.936 5 $\Rightarrow$ 2.214 1	77.6	0.19			

内角带宽的实验值<sup>[3.491]</sup>;

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$
SFG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{o}$	
10.6 + 2.72 $\Rightarrow$ 2.164 6	1.24

光谱带宽的实验值<sup>[3.491]</sup>;

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$
SFG, $\text{o} + \text{e} \Rightarrow \text{o}$	
10.6 + 2.72 $\Rightarrow$ 2.164 6	15

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>;

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin \theta$$

非线性系数<sup>[3.37]</sup>;

$$d_{31}(10.6 \mu\text{m}) = -18 \text{ pm/V}$$

$$d_{33}(10.6 \mu\text{m}) = 36 \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
1.833	200	0.3	3.494
1.995	20	> 0.5	3.498
2.36	35	0.5	3.490
10.6	200	0.6	3.365

$T = 293 \text{ K}$  时的热导率<sup>[3.58]</sup>;

$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
6.9	6.2

### 3.2.11 CdGeAs<sub>2</sub>, 砷锗镉

正单轴晶:  $n_e > n_o$ ;

点群:  $\bar{4}2m$ ;

密度:  $5.60 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.338]</sup>;

莫氏硬度:  $3.5 \sim 4$ ;

以“O”透过计的透过范围:  $2.4 \sim 18 \mu\text{m}$ <sup>[3.501]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$T/\text{K}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$T/\text{K}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
3.39	300	5.7	3.502	9 ~ 11	300	0.23	3.503
4 ~ 18	300	< 0.9	3.503	10.6	77	0.1	3.504
5.3	77	0.4	3.504		300	0.4	3.501
	300	1.3	3.502		300	0.5	3.502
5.85	77	0.42	3.505		300	2.4	3.454
	300	1.5	3.505	10.6 ~ 11.7	77	0.14	3.505
8.6 ~ 12	77	< 0.2	3.380		300	0.5	3.505
	300	< 0.5	3.380				

折射率的实验值<sup>[3.506]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
2.3	3.607 6		4.8	3.535 4	3.627 3
2.4	3.597 3	3.754 5	5.0	3.533 6	3.624 9
2.5	3.589 5	3.731 6	5.5	3.528 5	3.617 8
2.6	3.582 3	3.715 6	6.0	3.525 1	3.613 4
2.7	3.577 3	3.703 0	6.5	3.522 3	3.610 4
2.8	3.572 1	3.692 6	7.0	3.520 0	3.607 3
2.9	3.568 4	3.684 6	7.5	3.517 5	3.605 0
3.0	3.564 5	3.677 5	8.0	3.515 7	3.603 0
3.1	3.561 5	3.671 4	8.5	3.514 0	3.600 9
3.2	3.558 1	3.666 1	9.0	3.512 0	3.598 8
3.4	3.553 6	3.657 4	9.5	3.509 8	3.596 6
3.6	3.550 3	3.650 8	10.0	3.507 8	3.594 2
3.8	3.546 8	3.645 4	10.5	3.505 4	3.592 2
4.0	3.544 0	3.640 2	11.0	3.503 1	3.589 6
4.2	3.541 5	3.636 8	11.5	3.500 4	3.587 1
4.4	3.539 1	3.632 9	12.0	3.497 7	
4.6	3.537 2	3.629 9	12.5	3.495 0	

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.501]	[3.503]	[3.362]
SHG, $e + e \Rightarrow o$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	32[3.502]	35.6	33.5	33.6
	35[3.506]			
	33.8[3.505]			
	34[3.380]			
11.7 $\Rightarrow$ 5.85	35.7[3.505]	37.7	34.6	35.1
SHG, $o + e \Rightarrow o$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	51.6[3.506]	54.9	50.8	51.1
	52[3.501]			
	50.7[3.503]			
	48.4[3.503]			
	49[3.502]			
SFG, $o + e \Rightarrow o$				
16.4 + 9.54 $\Rightarrow$ 6.03	47[3.503]	55.4	49.8	50.4
12.9 + 9.59 $\Rightarrow$ 5.5	46.1[3.503]	51.7	47.8	48.0

注: [3.503] 中给出的色散关系有错误。方程  $n_o^2$  的第一项中的 6.414 1 应为 3.414 1。

最佳色散关系方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.362]</sup>:

$$n_o^2 = 10.1064 + \frac{2.2998\lambda^2}{\lambda^2 - 1.0872} + \frac{1.6247\lambda^2}{\lambda^2 - 1.370}$$

$$n_e^2 = 11.8018 + \frac{1.2152\lambda^2}{\lambda^2 - 2.6971} + \frac{1.6922\lambda^2}{\lambda^2 - 1.370}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	33.57	1.27	1.27
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	32.92	1.26	1.26
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	48.45	1.44	1.44
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	55.73	1.38	1.38
SFG, $e + e \Rightarrow o$			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533 3	35.41	1.31	1.36
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	37.72	1.34	1.41
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	51.06		1.37

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
9.6 $\Rightarrow$ 4.8 SFG, o + e $\Rightarrow$ o	49.87		1.38
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	44.62		1.45
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	47.73		1.47

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, e + e $\Rightarrow$ o		
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	0.84	3.380
SHG, o + e $\Rightarrow$ o		
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	0.29	3.501

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{eff}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

非线性系数:

$$|d_{36}(10.6 \mu\text{m})| = 3.4 \times |d_{36}(\text{GaAs})| \pm 20\% = (282 \pm 56) \text{ pm/V}^{[3.501,37]}$$

$$|d_{36}(10.6 \mu\text{m})| = 2.62 \times |d_{36}(\text{GaAs})| \pm 15\% = (217 \pm 33) \text{ pm/V}^{[3.506,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{ds}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
10.6	cw	>0.001 3	3.504	$T = 77 \text{ K}$
	cw	>0.000 1	3.501	
	160	>0.04	3.501	
	160	0.38	3.503	
	150	0.33 ~ 0.4	3.368	

热导率<sup>[3.338]</sup>:

$$\kappa = 4.18 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \text{ 或 } 6.69 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) (?)$$

### 3.3 其他无机非线性光学晶体

#### 3.3.1 $\text{KB}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{D}_2\text{O}$ , 氘化四水合五硼酸钾 (DKB5)

正双轴晶;

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.16 \sim 2.1 \mu\text{m}^{[3.395]}$ ;

相位匹配角的实验值 ( $T = 295 \text{ K}$ ):

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		SFG, $e + e \Rightarrow o$	
0.432 3 $\Rightarrow$ 0.216 15	90 [3.395]	0.748 06 + 0.266 04 $\Rightarrow$ 0.192 64	90 [3.395]

色散关系 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $^{[3.395]}$ :

$$n_x^2 = 1 + \frac{\lambda^2}{0.848\,57\lambda^2 - 0.007\,542\,8}$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{\lambda^2}{1.012\,30\lambda^2 - 0.009\,537\,6}$$

在 DKB5 晶体主平面三波相互作用的相位匹配方向上的有效非线性表达式  $^{[3.35,36]}$ :

XY 平面

$$d_{\text{eff}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eff}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eff}} = d_{32} \sin \theta$$

[3.36] 中给出了 DKB5 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数  $^{[3.395,397]}$ :

$$d_{31} \geq d_{31}(\text{KB5}) = 0.04 \text{ pm/V}$$

$$d_{32} \geq d_{32}(\text{KB5}) = 0.003 \text{ pm/V}$$

激光诱导的体损伤阈值  $^{[3.395,405]}$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.43	7	10

### 3.3.2 CsB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, 三硼酸铯 (CBO)

负双轴晶: 当  $\lambda = 0.532\,1 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 97.3^\circ$   $^{[3.507]}$ ;

点群: 222;

密度:  $3.357 \text{ g/cm}^3$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.167 \sim 3.0 \text{ }\mu\text{m}^{[3.507]}$ ;

折射率的实验值<sup>[3.507]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.354 7	1.549 9	1.584 9	1.614 5	0.514 5	1.534 9	1.569 0	1.597 4
0.476 5	1.537 0	1.575 8	1.603 1	0.532 1	1.532 8	1.566 2	1.593 6
0.488 0	1.536 7	1.573 6	1.600 9	0.632 8	1.529 4	1.558 8	1.586 4
0.496 5	1.536 2	1.571 6	1.599 6	1.064 2	1.519 4	1.550 5	1.578 1

色散关系( $\lambda$ 以 $\mu\text{m}$ 为单位,  $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[3.507]</sup>:

$$n_x^2 = 2.291\ 6 + \frac{0.021\ 05}{\lambda^2 + 0.065\ 25} - 3.184\ 8 \times 10^{-5} \lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.373\ 1 + \frac{0.034\ 37}{\lambda^2 + 0.116\ 00} - 7.263\ 2 \times 10^{-5} \lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.460\ 7 + \frac{0.032\ 02}{\lambda^2 + 0.089\ 61} - 5.633\ 2 \times 10^{-5} \lambda^2$$

注: [3.507]中给出的色散关系有错误, 方程  $n_y^2$  第二项的分子数值应为 0.034 37, 而不是 0.343 7。

### 3.3.3 $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 四水合硫酸铍

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度:  $1.713 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.508]</sup>;

莫氏硬度:  $>2.5$ <sup>[3.509]</sup>;

以“0”透过计的透明范围:  $0.17 \sim 1.58 \text{ }\mu\text{m}^{[3.508, 510]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.316 4	0.6	3.508	e 光, SHG 方向
0.632 8	0.17	3.508	o 光, SHG 方向
0.187 ~ 1.3	$<0.01$	3.511	

折射率的实验值<sup>[3.510]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.415 4	1.484 7	1.443 1	0.647 1	1.469 2	1.431 2
0.482 5	1.478 2	1.437 9	0.676 4	1.468 1	1.430 4
0.532 1	1.474 9	1.434 8	0.752 5	1.466 8	1.429 2
0.632 8	1.470 1	1.431 5			

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 以及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.510]	[3.511]
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 2	42 [3.508]	30.4	42.9
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	55 [3.508]	59.9	56.2
	60 [3.509]		
0.540 0 $\Rightarrow$ 0.270 0	77 [3.511]	79.0	76.7
0.534 0 $\Rightarrow$ 0.267 0	80 [3.511]	81.9	80.1
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 1	81.5 [3.510]	83.1	81.5
	81.6 [3.511]		
0.526 6 $\Rightarrow$ 0.263 3	90 [3.511]	无相位匹配*	无相位匹配*
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 2	64 [3.508]	43.7	65.3
0.760 6 $\Rightarrow$ 0.380 3	90 [3.511]	78.3	89.3
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	47.4 [3.511]	47.8	47.4
1.064 2 + 0.354 7 $\Rightarrow$ 0.266 1	62.4 [3.511]	59.4	62.5
0.907 0 + 0.354 7 $\Rightarrow$ 0.255 0	72.3 [3.511]	67.3	72.4
0.846 8 + 0.354 7 $\Rightarrow$ 0.250 0	80 [3.511]	71.8	80.0
0.820 9 + 0.354 7 $\Rightarrow$ 0.247 7	90 [3.511]	74.2	89.5

\* NCPM 相应于以  $\lambda_1 = 0.527 1 \mu\text{m}$  的 SHG;

# NCPM 相应于以  $\lambda_1 = 0.526 8 \mu\text{m}$  的 SHG.

最佳色散关系方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) [3.511]:

$$n_o^2 = 2.154 5 + \frac{0.008 35}{\lambda^2 - 0.016 06} - 0.035 73 \lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.033 5 + \frac{0.008 06}{\lambda^2 - 0.013 54} - 0.019 70 \lambda^2$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:



相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$			
1.064 $2 \Rightarrow 0.532$ 1	41.88		1.59
0.694 $3 \Rightarrow 0.347$ 15	50.32		1.60
0.578 $2 \Rightarrow 0.289$ 1	64.99		1.25
0.532 $1 \Rightarrow 0.266$ 05	81.46		0.48
SFG, $o+o \Rightarrow e$			
1.064 $2 + 0.354$ $7 \Rightarrow 0.266$ 05	62.50		1.36
0.578 $2 + 0.510$ $5 \Rightarrow 0.271$ 1	75.34		0.80
SHG, $e+o \Rightarrow e$			
1.064 $2 \Rightarrow 0.532$ 1	64.07	1.11	1.23
SFG, $e+o \Rightarrow e$			
1.064 $2 + 0.532$ $1 \Rightarrow 0.354$ 7	60.87	1.20	1.37

$T=293$  K 时内角带宽、温度带宽和光谱带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	参考文献
SHG, $o+o \Rightarrow e$					
0.532 $1 \Rightarrow 0.266$ 1	81.5	0.09			3.510
	81.6	0.11	1.45	4.9	3.511

相位匹配角的温度变化<sup>[3.511]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\theta_{\text{pm}}/dT/[^{\circ} \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $o+o \Rightarrow e$			
0.532 $1 \Rightarrow 0.266$ 1	20	81.6	0.077

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(0.532 \text{ } \mu\text{m}) = 0.62 \times d_{36}(\text{DKDP}) \pm 10\% = (0.23 \pm 0.02) \text{ pm/V}^{[3.510,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.266 1	8	1	3.510	10 Hz
0.532 1	8	> 2.2	3.511	3 Hz

### 3.3.4 MgBaF<sub>4</sub>, 氟化钡镁

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 117.5^\circ$  [3.512];

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, c, a$ ;

透明范围:  $0.17 \sim 8\ \mu\text{m}$  [3.513];

折射率的实验值 [3.512]:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.532 1	1.450 8	1.467 8	1.474 2	1.064 2	1.443 6	1.460 4	1.467 4

Sellmeier 方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20\ ^\circ\text{C}$ ) [3.512]:

$$n_x^2 = 2.077\ 0 + \frac{0.007\ 60}{\lambda^2 - 0.007\ 9}$$

$$n_y^2 = 2.123\ 8 + \frac{0.008\ 60}{\lambda^2}$$

$$n_z^2 = 2.146\ 2 + \frac{0.007\ 36}{\lambda^2 - 0.009\ 0}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(\ ^\circ)$	$\phi_{\text{理论}}/(\ ^\circ)$	$\rho_3/(\ ^\circ)$
		[3.512]	
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	9.2 [3.512]	9.65	0.223

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\ ^\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\ ^\circ)$	$\rho_1/(\ ^\circ)$	$\rho_3/(\ ^\circ)$
		[3.512]		
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	18.9 [3.512]	17.39	0.525	0.516

在 MgBaF<sub>4</sub> 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式 [3.35, 36]:

XY 平面

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \cos \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eco}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eeo}} = d_{\text{eoe}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eco}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

[3.36]中给出了  $\text{MgBaF}_4$  晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数:

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 0.057 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 23\% = (\pm 0.022 \pm 0.005) \text{ pm/V}^{[3.512, 37]}$$

$$d_{32}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 0.085 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 12\% = (\pm 0.033 \pm 0.012) \text{ pm/V}^{[3.512, 37]}$$

$$d_{33}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 0.023 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 14\% = (\pm 0.009 \pm 0.001) \text{ pm/V}^{[3.512, 37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.513]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.0642	$\approx 20$	$> 10$

### 3.3.5 $\text{NH}_4\text{D}_2\text{PO}_4$ , 氘化磷酸二氢铵 (DADP)

属单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $42\text{m}$ ;

透射光谱的 IR 吸收边(以“0”透过计):  $1.9 \mu\text{m}^{[3.78]}$ ;

线性吸收系数: 在  $0.78 \sim 1.03 \mu\text{m}$  的范围,  $\alpha < 0.013 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[3.67]</sup>;

折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
0.3472	1.5414	1.4923	3.126	0.5461	1.5194	1.4759	3.126
0.4358	1.5278	1.4831	3.126	0.6943	1.5142	1.4737	3.126
0.53	1.5198	1.4784	3.79	1.06	1.5088	1.4712	3.79

相位匹配角的实验值( $T = 293 \text{ K}$ )以及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.78]K	[3.78]E
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.528 $\Rightarrow$ 0.264	90[3.119]	82.2	无相位匹配(?)
0.6943 $\Rightarrow$ 0.34715	47[3.514]	50.3	无相位匹配(?)

注: [3.78]K $\Rightarrow$ 见[3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E $\Rightarrow$ 见[3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值<sup>[3.119]</sup>：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		0.528 $\Rightarrow$ 0.264	20
0.516 $\Rightarrow$ 0.258	-20	0.554 $\Rightarrow$ 0.277	100
0.524 $\Rightarrow$ 0.262	0		

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.78]K</sup>：

$$n_o^2 = 2.279\,481 + \frac{1.215\,879\lambda^2}{\lambda^2 - (7.614\,168)^2} + \frac{0.010\,761}{\lambda^2 - (0.115\,165)^2}$$

$$n_e^2 = 2.151\,161 + \frac{1.199\,009\lambda^2}{\lambda^2 - (11.251\,69)^2} + \frac{0.009\,652}{\lambda^2 - (0.098\,550)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	79.53		0.652
0.578 2 $\Rightarrow$ 0.289 1	65.24		1.357
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	56.61		1.611
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	53.58		1.664
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	50.31		1.700
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	36.93		1.599
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	37.18		1.569
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
0.578 2 + 0.510 5 $\Rightarrow$ 0.271 12	74.57		0.930
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	46.44		1.728
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	39.29		1.659
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	54.47	1.411	1.547
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	53.55	1.339	1.533
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	59.17	1.308	1.504
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	48.09	1.399	1.668

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>：

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ec}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数：

$$d_{36}(0.694\,3\,\mu\text{m}) = 1.10 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 15\% = (0.43 \pm 0.06) \text{ pm/V}^{[3.514,37]}$$

### 3.3.6 $\text{RbH}_2\text{PO}_4$ , 磷酸二氢铷 (RDP)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2m$ ;

密度:  $2.805 \text{ g/cm}^3$ ;

以  $\theta = 50^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$  切割长  $15.3 \text{ mm}$  晶体  $0.5$  透过时的透明范围:  $0.19 \sim 1.38 \mu\text{m}^{[3.515]}$ ;

透射光谱的 IR 吸收边 (以“0”透过计): 对 o 光为  $1.65 \mu\text{m}$ , 对 e 光为  $1.87 \mu\text{m}^{[3.78]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.25 ~ 1.25	$< 0.03$	3.113	
0.354 7	0.015	3.515	$\theta = 50^\circ$ , $\phi = 45^\circ$
0.532 1	0.01	3.515	$\theta = 50^\circ$ , $\phi = 45^\circ$
1.064 2	0.041	3.515	$\theta = 50^\circ$ , $\phi = 45^\circ$

双光子吸收系数  $\beta(\theta = 90^\circ, \phi = 45^\circ)^{[3.71]}$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{14}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	备注
0.355	5.9	e 光

折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
0.347 2	1.528 4	1.496 9	3.516	0.532 1	1.510 6	1.481 1	3.517
0.435 8	1.516 5	1.485 7	3.516	0.546 8	1.508 2	1.479 0	3.516
0.476 5	1.514 0	1.486 1	3.517	0.589 3	1.505 3	1.476 5	3.516
0.488 0	1.513 2	1.483 2	3.517	0.632 8	1.497 6	1.477 5	3.517
0.496 5	1.512 6	1.482 7	3.517	0.694 3	1.502 0	1.473 5	3.516
0.501 7	1.512 1	1.482 5	3.517	1.064 2	1.492 6	1.470 0	3.517
0.514 5	1.511 6	1.482 0	3.517				

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_e$	参考文献
0.469 9	1.514 8	3.518	0.465 8	1.485 1	3.518
0.495 0	1.512 8	3.518	0.478 0	1.484 5	3.518
0.512 0	1.511 7	3.518	0.495 0	1.483 3	3.518

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	参考文献
0.532 9	1.510 4	3.518	0.532 4	1.481 0	3.518
0.585 1	1.507 4	3.518	0.557 7	1.479 8	3.518
0.598 0	1.506 9	3.518	0.587 8	1.478 7	3.518
0.624 5	1.505 6	3.518	0.616 5	1.477 6	3.518
0.647 4	1.504 7	3.518	0.652 1	1.476 6	3.518
0.666 2	1.504 2	3.518	0.664 0	1.476 3	3.518

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.405	-3.69	-2.67
0.436	-3.86	-2.76
0.546	-3.72	-2.54
0.578	-3.72	-2.80
0.633	-3.72	-2.89

相位匹配角的实验值( $T=293\text{ K}$ )以及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$			
		[3.517]	[3.74]	[3.78] K	[3.78] E
SHG, $o+o\Rightarrow e$					
0.626 $\Rightarrow$ 0.313	90[3.74]	无相位匹配	无相位匹配	85.8	无相位匹配
0.627 $\Rightarrow$ 0.313 5	90[3.119]	无相位匹配	无相位匹配	84.9	无相位匹配
0.627 5 $\Rightarrow$ 0.313 75	90[3.519]	无相位匹配	无相位匹配	84.5	无相位匹配
0.629 4 $\Rightarrow$ 0.314 7	86.6[3.519]	无相位匹配	无相位匹配	83.1	无相位匹配
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	83.2[3.520]	无相位匹配	无相位匹配	81.3	无相位匹配
0.638 6 $\Rightarrow$ 0.319 3	78.9[3.519]	无相位匹配	无相位匹配	78.9	84.3
0.655 0 $\Rightarrow$ 0.327 5	73.9[3.519]	无相位匹配	无相位匹配	74.1	76.5
0.670 0 $\Rightarrow$ 0.335 0	70.8[3.519]	无相位匹配	81.3	70.9	72.5
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	66[3.516]	无相位匹配	72.9	67.0	67.9
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	50.8[3.521]	52.5	39.4	51.1	51.0
	50.8[3.515]				
	50.9[3.425]				
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	51[3.520]	48.4	36.0	51.7	51.3
SHG, $e+o\Rightarrow e$					
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	83.1[3.521]	无相位匹配	61.3	85.3	84.6
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	77.1[3.520]	74.6	54.4	82.0	80.0

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$			
		[3.517]	[3.74]	[3.78]K	[3.78]E
THG, $o + o \Rightarrow e$					
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	61.2 [3.515]	75.5	62.1	60.9	61.4

注: [3.78]K  $\Rightarrow$  见[3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E  $\Rightarrow$  见[3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.627 $\Rightarrow$ 0.313 5	20	[3.425, 119]
0.627 5 $\Rightarrow$ 0.313 75	20	[3.519]
0.635 $\Rightarrow$ 0.317 5	100	[3.425, 119]
0.637 $\Rightarrow$ 0.318 5	98	[3.519]

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.78]K</sup>:

$$n_o^2 = 2.249\,885 + \frac{3.688\,005\lambda^2}{\lambda^2 - (11.278\,29)^2} + \frac{0.010\,560}{\lambda^2 - (0.088\,207)^2}$$

$$n_e^2 = 2.159\,913 + \frac{0.988\,431\lambda^2}{\lambda^2 - (11.300\,13)^2} + \frac{0.009\,515}{\lambda^2 - (0.092\,076)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	81.31		0.357
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	73.05		0.664
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	66.96		0.853
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	51.08		1.093
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	55.49		0.994
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	60.86		1.008
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	52.53		1.114
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	85.26	0.141	0.182
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	62.54	0.567	0.938

$T = 293\text{ K}$  时内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.627 5 $\Rightarrow$ 0.313 75	90	1.73	3.519
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	66	0.14	3.522
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	50.8	0.10	3.521
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	50.8	0.11	3.515
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	83.1	0.40	3.523
		0.54	3.521
THG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	61.2	0.08	3.515

非临界 SHG 的温度调谐:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
$0.626 \Rightarrow 0.313$	0.12	3.74
$0.627\ 5 \Rightarrow 0.313\ 75$	0.123	3.519

非临界 SHG 过程 ( $0.627\ 5\ \mu\text{m} \Rightarrow 0.313\ 75\ \mu\text{m}, o + o \Rightarrow e$ ) 的温度带宽的实验值:

$$\Delta T = (2.5 \pm 0.3)^{\circ}\text{C}^{[3.519]}$$

非临界 SHG 过程 ( $0.627\ 5\ \mu\text{m} \Rightarrow 0.313\ 75\ \mu\text{m}, o + o \Rightarrow e$ ) 双折射的温度变化:

$$\frac{d(n_2^o - n_1^o)}{dT} = (1.1 \pm 0.1) \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1[3.519]}$$

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(0.694\ 3\ \mu\text{m}) = 1.04 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 15\% = (0.41 \pm 0.06)\text{pm/V}^{[3.514, 37]}$$

$$d_{36}(0.694\ 3\ \mu\text{m}) = 0.92 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 10\% = (0.36 \pm 0.04)\text{pm/V}^{[3.198, 37]}$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.628 1	330	5.5	3.101	
0.694 3	10	> 1.8	3.522	
1.064 2	12	> 2.6	3.521	10 ~ 20 Hz



### 3.3.7 RbD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 氙化磷酸二氢铷 (DRDP)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2m$ ;

透射光谱的 IR 吸收边(以“0”吸收计):  $1.66 \mu m^{[3.78]}$ ;

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu m$  为单位,  $T=20^\circ C$ )<sup>[3.78]K</sup>:

$$n_o^2 = 2.235\,596 + \frac{2.355\,322\lambda^2}{\lambda^2 - (11.262\,98)^2} + \frac{0.010\,929}{\lambda^2 - (0.037\,613\,6)^2}$$

$$n_e^2 = 2.152\,727 + \frac{0.691\,253\lambda^2}{\lambda^2 - (11.270\,07)^2} + \frac{0.010\,022}{\lambda^2 - (0.037\,137)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu m$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, o + o $\Rightarrow$ e			
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	81.66		0.319
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	73.26		0.610
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	66.98		0.793
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	47.19		1.054
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	47.35		1.021
SFG, o + o $\Rightarrow$ e			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	60.01		0.955
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	50.09		1.064
SHG, e + o $\Rightarrow$ e			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	75.61	0.427	0.502
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	70.09	0.502	0.648
SFG, e + o $\Rightarrow$ e			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	61.81	0.654	0.894

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{oeo} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{ooo} = d_{oeo} = d_{36} \sin \theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36} \approx 0.38 \text{ pm/V}^{[3.78]}$$

### 3.3.8 KH<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub>, 砷酸二氢钾 (KDA)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2m$ ;

计算的密度:  $2.872 \text{ g/cm}^3$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.213 \sim 1.82 \text{ }\mu\text{m}$  [3.113, 524, 78];

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.35 ~ 1.45	0.3 ~ 0.9	3.113

双光子吸收系数  $\beta(\theta = 90^\circ, \phi = 45^\circ)$  [3.71];

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	备注
0.355	4.84	e 光

折射率的实验值 [3.517];

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.486 1	1.576 2	1.525 2	0.589 3	1.567 4	1.517 9
0.546 0	1.570 7	1.520 6	0.656 3	1.563 2	1.514 6

折射率的温度微商 [3.74];

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.436	-3.64	-2.31
0.546	-4.07	-2.13
0.578	-3.98	-2.51
0.633	-4.09	-2.12

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$		
		[3.74]	[3.78] K	[3.78] E
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.596 $\Rightarrow$ 0.298	90 [3.74]	70.7	74.2	无相位匹配
0.616 $\Rightarrow$ 0.308		65.0	68.7	88.3
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	59 [3.514]	51.7	56.5	60.1
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	40.5 [3.425]	29.2	40.0	41.9

注: [3.78] K  $\Rightarrow$  见 [3.78], Kirby 等的的数据; [3.78] E  $\Rightarrow$  见 [3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值 [3.425];

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$
SHG, $o+o\Rightarrow e$	
$0.594\Rightarrow 0.297$	20
$0.601\Rightarrow 0.3005$	100

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.78]</sup>:

$$n_o^2 = 1.988\,413 - 0.058\,261\,41\lambda^2 + 0.014\,093\,68\lambda^4 + \frac{0.443\,093\,5\lambda^2}{\lambda^2 - (0.171\,092\,9)^2}$$

$$n_e^2 = 2.011\,142 - 0.031\,953\,26\lambda^2 + 0.012\,175\,16\lambda^4 + \frac{0.268\,180\,6\lambda^2}{\lambda^2 - (0.192\,506\,4)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o+o\Rightarrow e$			
$0.632\,8\Rightarrow 0.316\,4$	74.64		0.986
$0.659\,4\Rightarrow 0.329\,7$	66.48		1.423
$0.694\,3\Rightarrow 0.347\,15$	60.09		1.688
$1.064\,2\Rightarrow 0.532\,1$	41.89		1.860
$1.318\,8\Rightarrow 0.659\,4$	38.82		1.762
SFG, $o+o\Rightarrow e$			
$1.064\,2 + 0.532\,1\Rightarrow 0.354\,73$	54.29		1.859
$1.318\,8 + 0.659\,4\Rightarrow 0.439\,6$	43.32		1.926
SHG, $e+o\Rightarrow e$			
$1.064\,2\Rightarrow 0.532\,1$	61.38	1.298	1.541
$1.318\,8\Rightarrow 0.659\,4$	53.50	1.334	1.698
SFG, $e+o\Rightarrow e$			
$1.064\,2 + 0.532\,1\Rightarrow 0.354\,73$	71.12	0.939	1.182
$1.318\,8 + 0.659\,4\Rightarrow 0.439\,6$	51.93	1.356	1.855

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o+o\Rightarrow e$	
$0.596\Rightarrow 0.298$	0.077

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ec}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(0.694\ 3\ \mu\text{m}) = 0.70 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 15\% = (0.27 \pm 0.04)\text{pm/V}^{[3.514,37]}$$

$$d_{36}(1.064\ \mu\text{m}) = 1.06 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 5\% = (0.41 \pm 0.02)\text{pm/V}^{[3.525,37]}$$

激光诱导的体损伤阈值<sup>[3.101]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.6	330	0.12

### 3.3.9 $\text{KD}_2\text{AsO}_4$ ，氘化磷酸二氢钾 (DKDA)

负单轴晶： $n_o > n_e$ ；

点群： $\bar{4}2\text{m}$ ；

以“0”透过计的透过范围： $0.22 \sim 2.3\ \mu\text{m}^{[3.524]}$ ；

双光子吸收系数 $\beta(\theta = 90^\circ, \phi = 45^\circ)$ ：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	备注	参考文献
0.355	2.66	e 光	3.71

NCPM 温度的实验值<sup>[3.425]</sup>：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$
SHG, $\alpha + \alpha \Rightarrow e$	
$0.609 \Rightarrow 0.304\ 5$	20
$0.615 \Rightarrow 0.307\ 5$	100

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>：

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数：

$$d_{36} \approx d_{36}(\text{KDP}) = 0.39\ \text{pm/V}^{[3.78,37]}$$

激光诱导的体损伤阈值<sup>[3.101]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.61	330	0.24

### 3.3.10 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$ ，砷酸二氢铵 (ADA)

负单轴晶： $n_o > n_e$ ；

点群:  $42m$ ;

以“0”透计的透过范围:  $0.218 \sim 1.53 \mu\text{m}^{[3.526,78]}$ ;

双光子吸收系数  $\beta(\theta = 90^\circ, \phi = 45^\circ)^{[3.71]}$ ;

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	备注
0.355	3.53	e 光

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.436	-4.85	+1.27
0.546	-4.39	+1.31
0.578	-4.53	+1.24
0.633	-4.45	+1.19

相位匹配角的实验值( $T = 293 \text{ K}$ )及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$		
		[3.74]	[3.78]K	[3.78]E
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.58 $\Rightarrow$ 0.29	90[3.425]	76.5	无相位匹配	无相位匹配
0.582 $\Rightarrow$ 0.291	90[3.74]	75.8	无相位匹配	无相位匹配
0.584 $\Rightarrow$ 0.292	—	75.1	87.3	无相位匹配
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	41.3[3.425]	32.8	41.7	41.7

注: [3.78]K $\Rightarrow$ 见[3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E $\Rightarrow$ 见[3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.568 $\Rightarrow$ 0.284	-30	3.119
0.572 $\Rightarrow$ 0.286	-10	3.425
0.58 $\Rightarrow$ 0.29	20	3.425
0.586 $\Rightarrow$ 0.293	25	3.527
0.606 $\Rightarrow$ 0.303	80	3.101
0.611 $\Rightarrow$ 0.305 5	100	3.425
0.619 $\Rightarrow$ 0.309 5	120	3.119

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^\circ\text{C}$ )<sup>[3.78]K</sup>:

$$n_o^2 = 2.443\,449 + \frac{2.017\,752\lambda^2}{\lambda^2 - (7.604\,942)^2} + \frac{0.016\,757}{\lambda^2 - (0.135\,177)^2}$$

$$n_e^2 = 2.275\,962 + \frac{1.598\,260\lambda^2}{\lambda^2 - (11.264\,33)^2} + \frac{0.014\,296}{\lambda^2 - (0.128\,689)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$			
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	67.42		1.544
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	62.69		1.764
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	58.05		1.928
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	41.71		2.023
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	42.58		1.964
SFG, $o+o \Rightarrow e$			
1.064 2+0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	53.05		2.065
1.318 8+0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	44.31		2.087
SHG, $e+o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	62.22	1.423	1.640
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	61.26	1.315	1.627
SFG, $e+o \Rightarrow e$			
1.064 2+0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	69.20	1.139	1.402
1.318 8+0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	53.77	1.497	1.968

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3,74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$	
0.582 $\Rightarrow$ 0.291	0.359

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3,100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ec}} = d_{\text{ee}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36}(\text{ADA}) = d_{36}(\text{ADP}) = 0.45 \text{ pm/V}^{[3,414,419,37]}$$

激光诱导的体损伤阈值<sup>[3,101]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.581	330	6.1	0.606	330	4.8

### 3.3.11 $\text{NH}_4\text{D}_2\text{AsO}_4$ , 胍化磷酸二氢铵 (DADA)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.78]K	[3.78]E
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.585 $\Rightarrow$ 0.292 5	90 [3.119]	无相位匹配	86.6

注: [3.78]K  $\Rightarrow$  见 [3.78], Kirby 等的的数据; [3.78]E  $\Rightarrow$  见 [3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.585 $\Rightarrow$ 0.292 5	20	3.119
0.592 $\Rightarrow$ 0.296	25	3.101

最佳色散关系方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) [3.78]E:

$$n_o^2 = 1.598\,527\,5 - 0.022\,384\,75\lambda^2 - 0.000\,397\,106\,5\lambda^4 + \frac{0.822\,648\,9\lambda^2}{\lambda^2 - (0.140\,248\,1)^2}$$

$$n_e^2 = 0.803\,647\,5 - 0.000\,260\,839\,6\lambda^2 + 0.003\,778\,224\,0\lambda^4 + \frac{1.455\,477\,0\lambda^2}{\lambda^2 - (0.102\,523\,3)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.632 8 $\Rightarrow$ 0.316 4	68.11		1.453
0.659 4 $\Rightarrow$ 0.329 7	63.26		1.666
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	58.39		1.827
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	39.04		1.893
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	37.59		1.818
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	52.89		1.968
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	42.71		1.971
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	55.91	1.488	1.762

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	50.00	1.342	1.827
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	68.13	1.098	1.392
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	50.56	1.336	1.923

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3, 100]</sup>:

$$d_{\text{soe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{soe}} = d_{\text{oeo}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

激光诱导的体损伤阈值<sup>[3, 101]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.592	330	2.4

### 3.3.12 RbH<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub>, 砷酸氢铷 (RDA)

正单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;

密度:  $3.28 \text{ g/cm}^3$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.22 \sim 1.82 \mu\text{m}$ <sup>[3, 528]</sup>;

以  $\theta = 50^{\circ}$ ,  $\phi = 45^{\circ}$  切割的  $14.8 \text{ mm}$  长的晶体, 以 0.5 透过计的透过范围:  $0.26 \sim 46 \mu\text{m}$ <sup>[3, 529]</sup>;

透射谱的 IR 吸收边 (以“0”透过计): 对于 o 光:  $1.65 \mu\text{m}$ , 对于 e 光:  $1.87 \mu\text{m}$ <sup>[3, 78]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.3 ~ 1.4	0.1 ~ 0.2	3.113	
0.354 7	0.051	3.529	$\theta = 50^{\circ}$ , $\phi = 45^{\circ}$
0.532 1	0.031	3.529	$\theta = 50^{\circ}$ , $\phi = 45^{\circ}$
1.064 2	0.036	3.529	$\theta = 50^{\circ}$ , $\phi = 45^{\circ}$

双光子吸收系数  $\beta$  ( $\theta = 90^{\circ}$ ,  $\phi = 45^{\circ}$ )<sup>[3, 71]</sup>:



$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	备注
0.355	4.99	e 光

折射率的实验值<sup>[3.530]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.347 2	1.597 1	1.553 1	0.694 3	1.554 3	

折射率的温度微商<sup>[3.74]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.436	-3.09	-1.97
0.546	-3.62	-2.34
0.578	-3.38	-2.17
0.633	-3.37	-2.35

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.74]	[3.78]K	[3.78]E
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.684 $\Rightarrow$ 0.342	90[3.74]	79.8	83.4	13.8(?)
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	80[3.514]	76.1	79.1	13.6(?)
	80.3[3.530]			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	48.8[3.425]	40.4	49.5	10.3(?)
	50.1 * [3.529]			
THG, $o + o \Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	66.2 * [3.529]	63.8	67.4	12.8(?)

\*  $T = 298 \text{ K}$

注：[3.78]K  $\Rightarrow$  见 [3.78]，Kirby 等的的数据；[3.78]E  $\Rightarrow$  见 [3.78]，Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.679 $\Rightarrow$ 0.339 5	-10	3.425	0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	92	3.425
0.684 $\Rightarrow$ 0.342	20	3.425		92.6	3.531

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$			SHG, $o+o\Rightarrow e$		
	96.5	3.530	0.695 $\Rightarrow$ 0.347 5	100	3.119
	97.4	3.198	0.698 $\Rightarrow$ 0.349	110	3.425

最佳色散关系方程( $\lambda$ 以 $\mu\text{m}$ 为单位,  $T=293\text{ K}$ )<sup>[3,78]K</sup>:

$$n_o^2 = 2.390\,661 + \frac{3.487\,176\lambda^2}{\lambda^2 - (11.258\,99)^2} + \frac{0.015\,513}{\lambda^2 - (0.134\,582)^2}$$

$$n_e^2 = 2.275\,570 + \frac{0.720\,099\lambda^2}{\lambda^2 - (11.253\,04)^2} + \frac{0.013\,915}{\lambda^2 - (0.120\,800)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o+o\Rightarrow e$			
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	79.06		0.558
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	49.52		1.367
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	49.53		1.309
SFG, $o+o\Rightarrow e$			
1.064 2+0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	67.35		1.064
1.318 8+0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	53.38		1.372
SHG, $e+o\Rightarrow e$			
1.0642 $\Rightarrow$ 0.532 1	81.77	0.314	0.385
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	72.53	0.543	0.748
SFG, $e+o\Rightarrow e$			
1.318 8+0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	65.46	0.718	1.073

内角带宽和温度带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{mi}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o+o\Rightarrow e$					
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	20	80.3	0.126		3.530
	20	80	0.13		3.531
	92.6	90	$\approx 2$		3.531
	96.5	90	1.57	3.3	3.530
	97.4	90		3.4	3.198
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	25	50.1	0.08		3.529

续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
THG, $o + o \Rightarrow e$					
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	25	66.2	0.057		3.529

非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.74]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
0.684 $\Rightarrow$ 0.342	0.136

非临界 SHG 过程(0.694 3  $\mu\text{m} \Rightarrow$  0.347 2  $\mu\text{m}$ ,  $o + o \Rightarrow e$ )双折射的温度变化:

$$\frac{d(n_2^e - n_1^o)}{dT} = (9.3 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} [3.530]$$

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{eo}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$\begin{aligned} d_{36}(0.694 \text{ 3 } \mu\text{m}) &= 1.04 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 10\% \\ &= (0.41 \pm 0.04) \text{ pm/V} [3.198, 37] \end{aligned}$$

$$d_{36}(0.694 \text{ 3 } \mu\text{m}) = (0.39 \pm 0.04) \text{ pm/V} [3.530]$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12} \cdot /(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.684	330	1.2	3.101
0.694 3	20	3.5	3.530

### 3.3.13 RbD<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub>, 氘化砷酸二氢铷 (DRDA)

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;点群:  $\bar{4}2\text{m}$ ;以“0”透过计的透过范围: 0.22 ~ 2.3  $\mu\text{m}$ <sup>[3.528]</sup>;透过光谱的 IR 吸收边(以“0”透过计): 对 o 光为 2  $\mu\text{m}$ , 对 e 光为 2.3  $\mu\text{m}$ <sup>[3.78]</sup>;\* 译者注: 原文为 “ $I_{\text{thr}} \times 10^{-2}$ ”, 改为 “ $I_{\text{thr}} \times 10^{-12}$ ”。

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	
		[3.78] K	[3.78] E
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
0.698 $\Rightarrow$ 0.349	90 [3.425]	无相位匹配	无相位匹配
0.700 $\Rightarrow$ 0.350		86.9	无相位匹配

注: [3.78] K  $\Rightarrow$  见 [3.78], Kirby 等的的数据; [3.78] E  $\Rightarrow$  见 [3.78], Eimerl 的数据。

NCPM 温度的实验值<sup>[3.425]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
0.698 $\Rightarrow$ 0.349	20
0.714 $\Rightarrow$ 0.357	100

最佳色散关系方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.78] K</sup>:

$$n_o^2 = 2.373\,255 + \frac{1.979\,528\lambda^2}{\lambda^2 - (11.268\,84)^2} + \frac{0.015\,430}{\lambda^2 - (0.125\,845)^2}$$

$$n_e^2 = 2.270\,806 + \frac{0.275\,372\lambda^2}{\lambda^2 - (7.621\,351)^2} + \frac{0.013\,592}{\lambda^2 - (0.126\,357)^2}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	46.62		1.278
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	42.98		1.242
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	69.79		0.875
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	52.14		1.272
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	77.09	0.484	0.547
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	63.77	0.821	0.973
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	66.99	0.744	0.935

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi$$

$$d_{\text{eo}} = d_{\text{oe}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi$$

非线性系数:

$$d_{36} \approx 0.31 \text{ pm/V}^{[3.78]}$$

激光诱导的体损伤阈值<sup>[3.101]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.7	330	0.21

### 3.3.14 LiCOOH · H<sub>2</sub>O, 水合甲酸锂(LFM)

负单轴晶: 在  $\lambda = 0.5321 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 123.8^\circ$ <sup>[3.532]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

密度:  $1.46 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.532]</sup>;

以“0”透过计透过范围:  $0.23 \sim 1.56 \mu\text{m}$ <sup>[3.532, 533]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$  ( $\theta = 90^\circ, \phi = 10^\circ$ )<sup>[3.534]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.3547	0.025	1.0642	0.017
0.5321	0.012		

折射率的实验值<sup>[3.535]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.35	1.3180	1.5073	1.5540	0.60	1.3643	1.4796	1.5174
0.36	1.3791	1.5051	1.5510	0.62	1.3638	1.4787	1.5161
0.37	1.3777	1.5034	1.5484	0.64	1.3633	1.4778	1.5152
0.38	1.3767	1.5017	1.5458	0.66	1.3628	1.4768	1.5144
0.39	1.3758	1.4999	1.5432	0.68	1.3625	1.4760	1.5135
0.40	1.3748	1.4981	1.5405	0.70	1.3623	1.4751	1.5126
0.42	1.3729	1.4955	1.5367	0.80	1.3614	1.4729	1.5099
0.44	1.3714	1.4928	1.5332	0.90	1.3604	1.4711	1.5077
0.46	1.3705	1.4902	1.5301	1.00	1.3595	1.4694	1.5055
0.48	1.3696	1.4880	1.5279	1.10	1.3590	1.4675	1.5032
0.50	1.3686	1.4862	1.5257	1.20	1.3587	1.4658	1.5011
0.52	1.3677	1.4845	1.5236	1.30	1.3585	1.4644	1.4987
0.54	1.3666	1.4827	1.5219	1.40	1.3583	1.4630	1.4970
0.56	1.3657	1.4813	1.5200	1.50	1.3581	1.4617	
0.58	1.3647	1.4804	1.5187				

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.535]</sup> :

$$n_x^2 = 1.4376 + \frac{0.4045\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01692601} - 0.0005\lambda^2$$

$$n_y^2 = 1.6586 + \frac{0.5006\lambda^2}{\lambda^2 - 0.023409} - 0.0127\lambda^2$$

$$n_z^2 = 1.6714 + \frac{0.5928\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02534464} - 0.0153\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值的比较:

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$
		[3.535]
SFG, $e + o \Rightarrow e$		
1.0642 + 0.5321 $\Rightarrow$ 0.3547	8.2 [3.534]	9.5

XZ 平面,  $\phi = 0^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$
		[3.535]
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.486 $\Rightarrow$ 0.243	38.5 [3.536]	36.8
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	55.1 [3.532]	56.0
SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	82.0 [3.532]	80.4

相位匹配角和“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
0.5105 $\Rightarrow$ 0.25525	47.94	4.639		5.783
0.5321 $\Rightarrow$ 0.26605	44.15	4.689		5.712
0.5782 $\Rightarrow$ 0.2891	37.38	4.574		5.368
0.6943 $\Rightarrow$ 0.34715	24.96	3.683		4.103
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
0.5782 + 0.5105 $\Rightarrow$ 0.27112	40.23	4.637		5.641
1.0642 + 0.5321 $\Rightarrow$ 0.35473	9.49	1.545		1.786
SFG, $o + e \Rightarrow e$				
0.5782 + 0.5105 $\Rightarrow$ 0.27112	44.78		4.705	5.631
1.0642 + 0.5321 $\Rightarrow$ 0.35473	33.34		4.442	4.780

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.510 5 $\Rightarrow$ 0.255 25	39.44	7.722
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	41.38	7.603
0.578 2 $\Rightarrow$ 0.289 1	44.69	7.341
0.694 3 $\Rightarrow$ 0.347 15	50.00	6.784
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	55.98	5.937
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	56.86	5.731
SFG, $o + o \Rightarrow e$		
0.510 5 + 0.578 2 $\Rightarrow$ 0.271 12	46.42	7.721
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	51.41	6.705
1.318 8 + 0.659 4 $\Rightarrow$ 0.439 6	54.66	6.209

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $o + e \Rightarrow o$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	80.42	2.087
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	76.68	2.759

内角带宽的实验值<sup>[3.534]</sup>:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(\circ)$
SFG, $e + o \Rightarrow e$		
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	8.2	0.04

在 LFM 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{32} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ero}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

[3.36]中给出了 LFM 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数<sup>[3.37]</sup>:

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 0.13\ \text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = -0.60\ \text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 0.94\ \text{pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.475	330	1.5	3.101
0.488	cw	>0.000 01	3.532
0.490	330	1.5	3.101

### 3.3.15 NaCOOH, 甲酸钠

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.54\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 92.5^\circ$ <sup>[3.533]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \rightarrow a, b, c$ ;

以“0”透过计透过范围:  $0.23 \sim 2.2\ \mu\text{m}$ <sup>[3.533]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ (沿  $X$  轴)<sup>[3.537]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.354 7	0.013	1.064 2	0.010
0.532 1	0.003		

在[3.533]中给出了  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  与波长的关系图( $n_x < n_y < n_z$ )。

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20\ ^\circ\text{C}$ )<sup>[3.533]</sup>:

$$n_x^2 = 1.264\ 6 + \frac{0.638\ 1\lambda^2}{\lambda^2 - 0.012\ 122\ 01} - 0.001\ 1\lambda^2$$

$$n_y^2 = 1.258\ 9 + \frac{0.842\ 3\lambda^2}{\lambda^2 - 0.014\ 472\ 09} - 0.000\ 5\lambda^2$$

$$n_z^2 = 1.251\ 5 + \frac{1.072\ 9\lambda^2}{\lambda^2 - 0.017\ 265\ 96} - 0.001\ 3\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$



相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$ [3.533]	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SFG, $o+e \Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	2.2 [3.537]	4.61	0.512	0.559

内角带宽的实验值<sup>[3.537]</sup>;

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$
SFG, $o+e \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 7	2.2	0.75	1.8

在 NaCOOH 晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>;

XY 平面

$$d_{\text{coe}} = d_{\text{oeo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

[3.36] 给出了 NaCOOH 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数:

$$\begin{aligned} & |d_{32}(1.0642 \mu\text{m} + 0.5321 \mu\text{m} \Rightarrow 0.3547 \mu\text{m})| \\ & = 1.2 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 20\% = (0.47 \pm 0.09) \text{ pm/V}^{[3.537,515,37]} \end{aligned}$$

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) \approx 0.047 \text{ pm/V}^{[3.533,537,515,198,37]}$$

$$d_{32}(1.0642 \mu\text{m}) = (-0.47 \pm 0.09) \text{ pm/V}^{[3.537,515,198,37]}$$

$$d_{33}(1.0642 \mu\text{m}) \approx 0.70 \text{ pm/V}^{[3.533,537,515,198,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.537]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	备注
0.354 7	8	> 1.2	10 Hz
0.532 1	10	> 1.4	10 Hz
1.064 2	12	> 1.2	10 Hz

### 3.3.16 Ba(COOH)<sub>2</sub>, 甲酸钡

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 101.3^\circ$  [3.512];

点群: 222;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

透过范围:  $0.245 \sim 2.2\ \mu\text{m}$  [3.512];

折射率的实验值 [3.512]:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.532 1	1.640 7	1.601 9	1.577 3	1.064 2	1.621 4	1.581 9	1.558 5

Sellmeier 方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20\ ^\circ\text{C}$ ) [3.512]:

$$n_x^2 = 2.619 + \frac{0.017\ 7}{\lambda^2 - 0.039}$$

$$n_y^2 = 2.491 + \frac{0.018\ 4}{\lambda^2 - 0.035}$$

$$n_z^2 = 2.421 + \frac{0.016\ 0}{\lambda^2 - 0.042}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.512]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	33.3 [3.512]	35.26	2.153

在 Ba(COOH)<sub>2</sub> 晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式 [3.35]:

$XY$  平面

$$d_{\text{eoc}} = d_{14} \sin 2\phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eoc}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eee}} = d_{\text{eee}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14}(1.064 \mu\text{m}) = 0.27 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 15\% = (0.105 \pm 0.016) \text{ pm/V}^{[3.512,37]}$$

### 3.3.17 $\text{Sr}(\text{COOH})_2$ , 甲酸锶

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 78.8^\circ^{[3.94]}$ ;

点群: 222;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow c, a, b$ ;

密度:  $2.69 \text{ g/cm}^3$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.25 \sim 1.7 \mu\text{m}^{[3.94]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha^{[3.94]}$ ;

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.235	>15	0.250	2

折射率的实验值<sup>[3.94]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.266	1.613	1.635	1.675	0.532	1.545	1.560	1.583
0.354 7	1.569	1.587	1.612	1.064	1.528	1.543	1.563

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
$1.064 \Rightarrow 0.532$	$26[3.94]$	$18.60^\circ$	0.442

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
$1.064 \Rightarrow 0.532$	$72.5[3.94]$	$73.25^\circ$	0.730

# 从折射率的实验数据推导出<sup>[3.94]</sup>。

内角带宽的实验值<sup>[3.94]</sup>:

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.064 $\Rightarrow$ 0.532	26	0.204

在  $\text{Sr}(\text{COOH})_2$  晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14}(1.064 \mu\text{m}) = 1.25 \times d_{30}(\text{KDP}) \pm 16\% = (0.49 \pm 0.08) \text{ pm/V}^{[3.94,37]}.$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.94]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.064	$\approx 20$	$> 1.5$

### 3.3.18 $\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 二水合甲酸锶

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ ,  $2V_z = 64.6^{\circ [3.94]}$ ;

点群: 222;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

密度:  $2.25 \text{ g/cm}^3 [3.94]$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.25 \sim 1.4 \mu\text{m}^{[3.94]}$ ;

线性吸收系数  $\alpha^{[3.94]}$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.235	$> 15$	0.250	2

折射率的实验值<sup>[3.94]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.266	1.621	1.598	1.543	0.532	1.542	1.526	1.488
0.354 7	1.570	1.553	1.509	1.064	1.525	1.509	1.477

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值：

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_3/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $\Rightarrow$ 0.532	46 [3.94]	38.56*	1.203*	1.405*
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 + 0.532 $\Rightarrow$ 0.354 67	58.5 [3.94]	53.60*	1.165*	1.559*

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_3/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $\Rightarrow$ 0.532	71 [3.94]	65.07*	1.372*	1.525*

# 从折射率的实验数据推导出<sup>[3.94]</sup>。

内角带宽的实验值<sup>[3.94]</sup>：

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{m}}/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.064 $\Rightarrow$ 0.532	46	0.142

在  $\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>：

XY 平面

$$d_{\text{eeo}} = d_{14} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eeo}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eeo}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14}(1.064 \mu\text{m}) = 0.8 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 25\% = (0.31 \pm 0.08) \text{ pm/V}^{[3.94,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.94]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.064	$\approx 20$	$> 1.5$

### 3.3.19 LiGaO<sub>2</sub>, 镓酸锂

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 74.5^\circ$ <sup>[3.538]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和结晶学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, c, a$ <sup>[3.538]</sup>;

密度:  $4.187 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.64]</sup>;

莫氏硬度:  $7.5$ <sup>[3.64]</sup>;

透过范围:  $0.3 \sim 5 \mu\text{m}$ <sup>[3.539]</sup>;

折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	参考文献
0.41	1.770 2			3.539
0.47	1.753 4	1.783 5	1.785 2	3.538
0.50	1.747 7	1.776 8	1.779 1	3.538
0.54	1.740 7	1.768 3	1.770 8	3.538
0.58	1.735 1	1.762 6	1.765 3	3.538
0.62	1.731 1	1.758 9	1.761 7	3.538
0.66	1.728 9	1.757 8	1.760 4	3.538
0.70	1.726 8			3.539
0.80	1.721 8			3.539
0.90	1.718 5			3.539
1.00	1.716 0			3.539
1.20	1.712 2			3.539
1.40	1.709 5			3.539
1.60	1.707 0			3.539
1.80	1.704 5			3.539
2.00	1.702 5			3.539
2.20	1.700 5			3.539
2.40	1.697 8			3.539
2.60	1.695 5			3.539

在  $\text{LiGaO}_2$  晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>;

$XY$  平面

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \cos \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \cos \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{eoe}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

在[3.36]中给出了  $\text{LiGaO}_2$  晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数:

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 0.17 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 10\% = (\pm 0.066 \pm 0.007) \text{ pm/V}^{[3.539,37]}$$

$$d_{32}(1.0642 \mu\text{m}) = \mp 0.37 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 10\% = (\mp 0.144 \pm 0.014) \text{ pm/V}^{[3.539,37]}$$

$$d_{33}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm 1.45 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 10\% = (\pm 0.566 \pm 0.057) \text{ pm/V}^{[3.539,37]}$$

### 3.3.20 $\alpha\text{-HIO}_3$ , $\alpha$ -碘酸

负双轴晶:  $2V_z = 47^\circ$ <sup>[3.540]</sup>;

点群: 222;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, c, a$ ;

密度:  $4.63 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.540]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.32 \sim 1.7 \mu\text{m}(\parallel c)$ ,  $0.32 \sim 2.3 \mu\text{m}(\perp c)$ <sup>[3.540]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ : 在  $0.35 \sim 1.3 \mu\text{m}$  范围内  $< 0.3 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[3.541]</sup>;

$T = 293 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.542]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.35	2.148 5	2.126 5	1.961 2	0.46	2.037 8	2.011 9	1.875 3
0.36	2.133 0	2.107 7	1.947 4	0.48	2.029 2	2.002 6	1.868 5
0.37	2.117 1	2.091 7	1.936 0	0.50	2.019 4	1.992 6	1.862 4
0.38	2.105 3	2.078 2	1.925 7	0.52	2.012 6	1.988 3	1.856 2
0.39	2.092 9	2.066 2	1.915 4	0.54	2.006 5	1.982 9	1.852 2
0.40	2.080 8	2.054 5	1.908 6	0.56	2.001 0	1.976 3	1.847 6
0.41	2.071 5	2.046 5	1.902 0	0.58	1.996 0	1.971 2	1.843 6
0.42	2.063 7	2.039 4	1.895 2	0.60	1.991 8	1.966 5	1.840 5
0.44	2.049 4	2.024 6	1.884 7	0.62	1.988 4	1.963 2	1.838 8

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.64	1.985 4	1.958 9	1.836 8	1.0	1.954 1	1.928 6	1.815 0
0.66	1.982 1	1.956 0	1.834 8	1.10	1.948 6	1.926 0	1.811 4
0.68	1.979 1	1.952 9	1.832 8	1.20	1.943 6	1.922 9	1.808 8
0.70	1.976 3	1.950 6	1.831 1	1.30	1.939 0	1.920 6	1.806 3
0.80	1.966 8	1.940 9	1.824 8	1.40	1.934 8	1.918 0	1.803 8
0.85	1.963 4	1.937 7	1.822 2	1.50	1.931 0	1.915 7	1.801 8
0.90	1.960 2	1.934 6	1.820 2	1.60		1.913 2	1.799 8
0.95	1.956 9	1.931 4	1.818 4				

 $T = 300 \text{ K}$  时的旋光性<sup>[3.540]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$
0.436 0	74.5	0.546 1	58.7

相位匹配角的实验值( $T = 293 \text{ K}$ )及不同系列色散关系间的比较:YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$ 

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.458]	[3.542]	[3.543]
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
0.976 $\Rightarrow$ 0.488	57.9[3.544]	56.9	57.5	58.1
1.029 $\Rightarrow$ 0.514 5	52.7[3.544]	51.9	52.5	52.9
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	50.4[3.545]	49.3	49.8	49.9
1.065 $\Rightarrow$ 0.532 5	52[3.540]	49.3	49.8	49.9

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$ 

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.458]	[3.542]	[3.543]
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
0.976 $\Rightarrow$ 0.488	72.2[3.544]	71.2	71.4	72.4
1.029 $\Rightarrow$ 0.514 5	66.1[3.544]	65.0	65.4	66.3
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	64.9[3.199]	62.4	62.9	63.6
1.065 $\Rightarrow$ 0.532 5	66[3.540]	62.1	62.5	63.2

最佳色散关系方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 293 \text{ K}$ )<sup>[3.543]</sup>:



$$n_x^2 = 3.739 + \frac{0.071\ 28}{\lambda^2 - 0.051\ 32}$$

$$n_y^2 = 3.654 + \frac{0.067\ 21}{\lambda^2 - 0.042\ 34}$$

$$n_z^2 = 3.239 + \frac{0.053\ 53}{\lambda^2 - 0.017\ 226}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_3/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	49.92	3.416	3.725
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	34.55	3.324	3.484

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_3/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	63.21	3.224	3.557
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	49.22	4.058	4.278

内角带宽和温度带宽的实验值<sup>[3.96]</sup>:

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	66	0.035	3.38

非临界 SFG 过程的温度调谐<sup>[3.544]</sup>:

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$d\lambda_2/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.922 6 + 0.654 $\Rightarrow$ 0.488	50	0.055

在  $\alpha\text{-HIO}_3$  晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eff}} = d_{14} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{ene}} = d_{\text{oe}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{oe}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14}(1.064 \mu\text{m}) = 20 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 25\% = (6.0 \pm 1.5) \text{ pm/V}^{[3.540,37]}$$

$$d_{14}(1.1523 \mu\text{m}) = 10.9 \times d_{36}(\text{ADP}) \pm 14\% = (5.1 \pm 0.7) \text{ pm/V}^{[3.546,37]}$$

激光诱导的体损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.488	cw	$> 0.0025$	3.540	
0.528	0.007	$> 70$	3.68	2 Hz
0.53	15	0.55	3.199	
	0.006	$> 8$	3.547	
0.532	0.03	$> 8$	3.548	25 Hz
	0.03	$> 55$	3.549	
	0.035	80 ~ 100	3.222	1 Hz
	0.035	40 ~ 50	3.222	12.5 Hz

### 3.3.21 $\text{K}_2\text{La}(\text{NO}_3)_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 二水合硝酸镧钾 (KLN)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.5461 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 111^\circ$  <sup>[3.550]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和结晶学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, c, a$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.335 \sim 1.1 \mu\text{m}$  <sup>[3.550]</sup>;

线性吸收系数: 在  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$  处  $\alpha < 0.03 \text{ cm}^{-1}$  <sup>[3.550]</sup>;

折射率的实验值 <sup>[3.550]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.365 0	1.529 7	1.582 0	1.606 3	0.750 0	1.491 5	1.534 1	1.555 6
0.400 5	1.520 1	1.570 2	1.593 6	0.850 0	1.489 1	1.530 6	1.551 8
0.487 2	1.506 2	1.553 0	1.576 0	0.950 0	1.487 2	1.528 5	1.549 6
0.546 1	1.500 8	1.545 6	1.568 2	1.050 0	1.485 7	1.526 9	1.547 5
0.647 6	1.495 0	1.538 7	1.560 1				

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.550]</sup>:

$$n_x^2 = 2.200\ 94 + \frac{0.014\ 261\ 9}{\lambda^2 - 0.031\ 342\ 0} - 0.006\ 175\ 43\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.319\ 01 + \frac{0.020\ 010\ 8}{\lambda^2 - 0.024\ 740\ 6} - 0.005\ 864\ 60\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.385\ 04 + \frac{0.020\ 852\ 5}{\lambda^2 - 0.026\ 938\ 8} - 0.008\ 730\ 84\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.550]	
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	0.8 [3.550]	4.17	0.26
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	42.6 [3.550]	41.64	1.94

YZ 平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[3.550]	
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ 0.354 73	42.1 [3.550]	41.69	0.81

XZ 平面,  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.550]		
SHG, $e + e \Rightarrow o$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	19.8 [3.550]	20.42	1.48	1.60

内角带宽和温度带宽的实验值<sup>[3.550]</sup>:

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	0.8	1.107

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	19.8	0.123

在 KLN 晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{31} \cos \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{ooo}} = d_{32} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oee}} = d_{\text{eoe}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

在[3.36]中给出了 KLN 任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数<sup>[3.550]</sup>:

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (\mp 1.13 \pm 0.15)\text{ pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (\pm 1.10 \pm 0.10)\text{ pm/V}$$

$$|d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m})| = (0.13 \pm 0.10)\text{ pm/V}$$

### 3.3.22 CsTiOAsO<sub>4</sub>, 砷酸钛氧铯 (CTA)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 52.9^\circ$ <sup>[3.551]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.35 \sim 5.3\ \mu\text{m}$ <sup>[3.551]</sup>;

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 20\ ^\circ\text{C}$ )<sup>[3.551]</sup>:

$$n_x^2 = 2.344\ 98 + \frac{1.048\ 63\lambda^2}{\lambda^2 - (0.220\ 44)^2} - 0.014\ 83\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.744\ 40 + \frac{0.707\ 033\lambda^2}{\lambda^2 - (0.260\ 33)^2} - 0.015\ 26\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.536\ 66 + \frac{1.106\ 00\lambda^2}{\lambda^2 - (0.249\ 88)^2} - 0.017\ 11\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.551]		
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	64.5 [3.551]	62.85	0.378	0.369

内角带宽的实验值<sup>[3.551]</sup>;

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	64.5	0.5

在 CTA 晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>;

XY 平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{ooo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{oro}} = d_{\text{ooo}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

在[3.36]中给出了 CTA 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数<sup>[3.551]</sup>;

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (2.1 \pm 0.4)\text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (3.4 \pm 0.7)\text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (18.1 \pm 1.8)\text{pm/V}$$

### 3.3.23 $\text{NaNO}_2$ , 亚硝酸钠

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 5\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 62.5^{\circ}$ <sup>[3.552]</sup>;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, c, b$ ;

密度:  $2.168\ \text{g/cm}^3$ ;

透过范围:  $0.35 \sim 3.4\ \mu\text{m}$ , 在  $5 \sim 8\ \mu\text{m}$  范围内有透过窗口<sup>[3.553,554]</sup>;

折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	参考文献
0.532 5	1.347 5	1.414 7	1.664 3	3.552
0.576 2	1.345 5	1.412 5	1.654 7	3.553
1.065 0	1.339 5	1.403 6	1.636 5	3.552
1.152 3	1.335 3	1.402 9	1.631 9	3.553
1.367 3		1.401 8	1.621 4	3.554
1.529 5		1.401 0	1.616 0	3.554
1.710 9		1.401 0	1.613 6	3.554
2.250 0		1.399 7	1.610 2	3.554
3.400 0		1.398 0	1.593 3	3.554
4.400 0		1.395 0	1.540 0	3.554
5.400 0		1.390 7	1.495 0	3.554
6.000 0		1.388 0	1.462 6	3.554

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=293\text{ K}$ )<sup>[3.553]</sup>:

$$n_x^2 = 1 + \frac{0.727\,454\lambda^2}{\lambda^2 - (0.108\,759)^2}$$

$$n_y^2 = 1 + \frac{0.978\,108\lambda^2}{\lambda^2 - (0.105\,970)^2}$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{1.616\,683\lambda^2}{\lambda^2 - (0.149\,021)^2}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi=0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_3/(\circ)$
[3.553]				
SHG, $e+o \Rightarrow e$				
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	27.1[3.553]	27.60 $^{\circ}$ 34.35 $^{\circ}$	8.309 $^{\circ}$	8.531 $^{\circ}$

$XZ$  平面,  $\phi=0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
[3.553]			
SHG, $e+e \Rightarrow o$			
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	34.6[3.553]	34.56 $^{\circ}$ 39.34 $^{\circ}$	9.801 $^{\circ}$

# 从折射率的实验数据推导而来; \* 从 Sellmeier 方程推导而来。

内角带宽的实验值<sup>[3.553]</sup>：

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	27.08	0.407

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	34.60	0.22

在  $\text{NaNO}_2$  晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>：

$XY$  平面

$$d_{\text{oe}} = d_{32} \cos \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eo}} = d_{\text{oo}} = d_{31} \cos \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{ee}} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eo}} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$$

在[3.36]中给出了  $\text{NaNO}_2$  晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数：

$$d_{31}(1.152\ 3\ \mu\text{m}) = 0.174 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 28\% = (0.068 \pm 0.019)\text{pm/V}^{[3.553,37]}$$

$$d_{32}(1.152\ 3\ \mu\text{m}) = -3.367 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 0.5\% = (-1.313 \pm 0.004)\text{pm/V}^{[3.553,37]}$$

$$|d_{33}(1.06\ \mu\text{m})| = 0.24 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 25\% = (0.094 \pm 0.023)\text{pm/V}^{[3.553,37]}$$

### 3.3.24 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ , 铌酸钡钠

负双轴晶:  $2V_z = 13^\circ$ <sup>[3.555]</sup>;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

密度:  $5.407\ 6\ \text{g/cm}^3$ <sup>[3.555]</sup>,  $5.42\ \text{g/cm}^3$ <sup>[3.556]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.37 \sim 5\ \mu\text{m}$ <sup>[3.555,557]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.532 1	0.04	3.556	NCSHG 方向
	0.051 ~ 0.067	3.558	沿 $a$ 轴
1.064 2	<0.002	3.556	NCSHG 方向
	0.003	3.558	沿 $a$ 轴
	0.002	3.316	沿 $b$ 轴

折射率的实验值<sup>[3.555]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.457 9	2.428 4	2.426 6	2.293 1	0.514 5	2.378 6	2.376 7	2.258 3
0.476 5	2.409 4	2.407 6	2.279 9	0.532 1	2.367 2	2.365 5	2.250 2
0.488 0	2.399 1	2.397 4	2.272 7	0.632 8	2.322 2	2.320 5	2.217 7
0.496 5	2.392 0	2.390 3	2.267 8	1.064 2	2.258 0	2.256 7	2.170 0
0.501 7	2.387 9	2.386 2	2.264 9				

$n_x$  和  $n_z$  在  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$  时的温度微商 ( $n_y$  仅与  $T$  弱相关)<sup>[3.555]</sup>:

$$\text{d}n_x/\text{d}T = -2.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{d}n_z/\text{d}T = +8.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 以及不同系列色散系间的比较:

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	
		[3.458]	[3.555]
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	73.8 [3.555]	74.1	75.0

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	
		[3.458]	[3.555]
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	75.4 [3.555]	74.6	75.3

注: PM 角的值与熔体化学计量比密切相关。

NCPM 温度和温度带宽的实验值:



沿  $a$  轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	85	0.45 ~ 0.47	3.558
	85		3.559
	86 ~ 87	0.45	3.300
	89	0.5	3.555
1.08 $\Rightarrow$ 0.54		0.42	3.560

沿  $b$  轴

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	97		3.561
	101	0.5	3.555

注: NCPM 温度值与熔体化学计量比密切相关。

最佳 Sellmeier 方程组( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 293 \text{ K}$ )<sup>[3.555]</sup>:

$$n_x^2 = 1 + \frac{3.949 \, 5 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.040 \, 388 \, 94}$$

$$n_y^2 = 1 + \frac{3.949 \, 5 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.040 \, 140 \, 12}$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{3.600 \, 8 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.032 \, 198 \, 71}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$YZ$  平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	75.03	1.384
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	53.44	2.442

$XZ$  平面,  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	75.31	1.372
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	53.63	2.450

非临界 SHG 过程双折射率的温度变化<sup>[3.555]</sup>：

沿  $b$  轴 ( $1.064\ 2\ \mu\text{m} \Rightarrow 0.532\ 1\ \mu\text{m}$ )

$$d[n_z(2\omega) - n_x(\omega)]/dT = 1.05 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$$

在  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>：

$XY$  平面

$$d_{\text{eff}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eff}} = d_{31} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}} = d_{32} \sin \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eff}} = d_{32} \sin \theta$$

在 [3.36] 中给出了  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数：

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 40 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 5\% = (12 \pm 0.6)\ \text{pm/V}^{[3.555,37]}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 40 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 10\% = (12 \pm 1.2)\ \text{pm/V}^{[3.555,37]}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 55 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 7\% = (16.5 \pm 1.2)\ \text{pm/V}^{[3.555,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献	备注
0.532 1	cw	$>0.000\ 5$	3.561	
	450	0.002	3.562	2 kHz
	0.05	0.72	3.563	1 kHz
1.046 2	450	0.04	3.562	2 kHz
	0.08	$>0.025$	3.558	500 MHz

热导率<sup>[3.556]</sup>：

$$\kappa = 3.5\ \text{W/mK}$$

### 3.3.25 $\text{K}_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 二水合硝酸铈钾 (KCN)

负双轴晶：在  $\lambda = 0.546\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 115.2^\circ$ <sup>[3.550]</sup>；

点群： $\text{mm}2$ ；

介电轴和晶体学轴的变换： $X, Y, Z \Rightarrow b, c, a$ ；

以“0”透过计的透过范围： $0.39 \sim >1.1\ \mu\text{m}$ <sup>[3.550]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ : 在  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$  处  $\alpha < 0.03 \text{ cm}^{-1}$  [3.550];  
 折射率的实验值 [3.550]:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.365 0	1.534 0	1.591 2	1.614 2	0.750 0	1.494 7	1.539 8	1.560 3
0.400 5	1.523 8	1.577 5	1.599 9	0.850 0	1.492 4	1.536 5	1.556 7
0.487 2	1.509 9	1.559 7	1.581 1	0.950 0	1.490 5	1.534 3	1.554 2
0.546 1	1.504 1	1.552 4	1.573 2	1.050 0	1.489 0	1.532 4	1.551 9
0.647 6	1.498 3	1.544 3	1.565 3				

Sellmeier 方程组 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^\circ\text{C}$ ) [3.550]:

$$n_x^2 = 2.211\,09 + \frac{0.014\,095\,0}{\lambda^2 - 0.034\,583\,0} - 0.006\,389\,4\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.338\,82 + \frac{0.019\,338\,0}{\lambda^2 - 0.033\,350\,4} - 0.007\,934\,5\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.405\,14 + \frac{0.019\,408\,4}{\lambda^2 - 0.037\,152\,0} - 0.013\,571\,6\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(\circ)$	$\phi_{\text{理论}}/(\circ)$ [3.550]	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	10.2 [3.550]	11.74		0.74

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$ [3.550]	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	21.5 [3.550]	22.58	1.63	1.78

内角带宽的实验值 [3.550]:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\phi^{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	10.2	0.152

在 KCN 晶体主平面上三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>：

XY 平面

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \cos \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{eee}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

在[3.36]中给出了 KCN 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数<sup>[3.550]</sup>：

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) = (\mp 1.13 \pm 0.15) \text{ pm/V}$$

$$d_{32}(1.0642 \mu\text{m}) = (\pm 1.10 \pm 0.10) \text{ pm/V}$$

$$|d_{33}(1.0642 \mu\text{m})| = (0.13 \pm 0.10) \text{ pm/V}$$

### 3.3.26 $\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ , 铌酸锂钾

负双轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群: 4mm;

密度:  $4.3 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.273]</sup>;

透过范围:  $0.35 \sim 5 \mu\text{m}$ <sup>[3.564,315]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ : 在  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$  处  $\alpha = 0.004 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[3.315]</sup>;

$T = 303 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.517]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.450 0	2.404 9	2.251 2	0.600 0	2.289 9	2.172 0
0.475 0	2.375 1	2.231 5	0.625 0	2.279 9	2.164 5
0.500 0	2.354 6	2.214 4	0.632 8	2.277 0	2.163 0
0.525 0	2.334 9	2.201 0	0.650 0	2.271 1	2.158 6
0.532 1	2.326 0	2.197 5	0.675 0	2.236 1	2.152 9
0.550 0	2.315 6	2.190 0	1.064 2	2.208 0	2.112 0
0.575 0	2.301 6	2.180 1			

Sellmeier 方程组( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 303 \text{ K}$ )<sup>[3.517]</sup>：

$$n_o^2 = 1 + \frac{3.708\lambda^2}{\lambda^2 - 0.04601}$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{3.349\lambda^2}{\lambda^2 - 0.03564}$$

相位匹配角的实验值和理论值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$ [3.517]
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
0.82 $\Rightarrow$ 0.41	90[3.315]	无相位匹配

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			SHG, $o + o \Rightarrow e$		
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	22.64	1.75	1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	75.45	1.54
2.098 $\Rightarrow$ 1.049	32.07	2.30	1.053 $\Rightarrow$ 0.5265	77.46	1.35
1.3188 $\Rightarrow$ 0.6594	54.03	2.73	1.047 $\Rightarrow$ 0.5235	78.69	1.23

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta$$

非线性系数:

$$d_{31}(0.8 \mu\text{m}) = 11.8 \text{ pm/V}^{[3.315]}$$

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) = 19.3 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 20\% = (5.8 \pm 1.2) \text{ pm/V}^{[3.565,37]}$$

$$d_{33}(1.0642 \mu\text{m}) = 35 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 15\% = (10.5 \pm 1.5) \text{ pm/V}^{[3.565,37]}$$

### 3.3.27 HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, 硫镓汞

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群:  $\bar{4}$ ;

密度:  $4.95 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.338]</sup>;

莫氏硬度: 3~3.5;

以“0”透过计的透过范围:  $0.55 \sim 13 \mu\text{m}$ <sup>[3.566]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.53	8	3.567	e 光, SHG 方向
	11	3.566	
0.96	0.25	3.568	e 光, SFG 方向
1.06	0.1	3.567	o 光, SHG 方向
	0.25	3.568	o 光, SFG 方向
10.6	1.2	3.568	o 光, SFG 方向

$T = 293 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.569]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.549 5	2.659 2	2.597 9	2.650 0	2.444	2.403
0.574 7	2.633 4	2.574 8	3.540 0	2.439	2.398
0.600 9	2.611 2	2.554 9	7.150 0	2.414	2.372
0.632 8	2.589 0	2.534 9	8.730 0	2.400	2.358
0.650 0	2.579 6	2.526 4	10.400	2.380	2.337
1.076 0	2.477	2.432	11.000	2.369	2.329
1.150 0	2.472	2.428			

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[3.569]</sup>:

$$n_o^2 = 6.208\,152\,21 + \frac{63.706\,298\,51}{\lambda^2 - 225} + \frac{0.236\,988\,04}{\lambda^2 - 0.095\,686\,46}$$

$$n_e^2 = 6.009\,026\,70 + \frac{63.280\,659\,20}{\lambda^2 - 225} + \frac{0.214\,896\,56}{\lambda^2 - 0.092\,146\,33}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	68.38		0.66
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	31.80		0.89
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	31.53		0.88
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	42.22		1.00
1.128 4 $\Rightarrow$ 1.064 2	64.40		0.80
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 1	41.62		1.05
SHG, $e + o \Rightarrow e$			
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	47.95	0.97	0.97
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	47.39	0.97	0.98
2.936 5 $\Rightarrow$ 1.468 25	70.02	0.62	0.64
SFG, $e + o \Rightarrow e$			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	70.21	0.63	0.61
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	54.49	0.94	0.92
10.6 + 1.064 2 $\Rightarrow$ 0.967 1	43.93	1.01	1.06

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{oeo}} = d_{36} \sin \theta \sin 2\phi + d_{31} \sin \theta \cos 2\phi$$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{oeo}} = d_{36} \sin 2\theta \cos 2\phi - d_{31} \sin 2\theta \sin 2\phi$$

非线性系数:

$$|d_{36}(1.064 \mu\text{m})| = 80 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 30\% = (24.0 \pm 7.2) \text{ pm/V}^{[3.566,37]}$$

$$|d_{36}(1.064 \mu\text{m})| = 1.08 \times d_{36}(\text{AgGaS}_2) \pm 15\% = (20.0 \pm 3.0) \text{ pm/V}^{[3.567,344,37]}$$

$$|d_{31}(1.064 \mu\text{m})| = 0.33 \times |d_{36}(\text{HgGa}_2\text{S}_4)| = (6.7 \pm 1.0) \text{ pm/V}^{[3.576,344,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.568]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.064	30	0.6	10.6	cw	>0.000 000 16

### 3.3.28 HgS, 硫化汞

正单轴晶： $n_e > n_o$ ；

点群：32；

密度：8.10 g/cm<sup>3</sup><sup>[3.64]</sup>；

莫氏硬度：2~2.5<sup>[3.64]</sup>，3<sup>[3.338]</sup>；

以“0”透过计的透过范围：0.62~13  $\mu\text{m}$ <sup>[3.570]</sup>；

线性吸收系数 $\alpha$ <sup>[3.571]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	备注	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	备注
0.632 8	1.7	o 光, DFG 方向	5.3	0.032	o 光, SHG 方向
0.672 9	1.4	e 光, DFG 方向	10.6	0.073	e 光, SHG 和 DFG 方向

折射率的实验值<sup>[3.570]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.62	2.902 8	3.256 0	2.80	2.641 4	2.905 2
0.65	2.865 5	3.206 4	3.00	2.640 1	2.903 6
0.68	2.838 4	3.170 3	3.20	2.638 7	2.901 7
0.70	2.822 4	3.148 9	3.40	2.637 5	2.900 1
0.80	2.770 4	3.074 3	3.60	2.635 8	2.898 7
0.90	2.738 3	3.034 0	3.80	2.635 3	2.897 1
1.00	2.712 0	3.005 0	4.00	2.634 8	2.896 3
1.20	2.688 4	2.968 0	5.00	2.626 7	2.886 3
1.40	2.673 0	2.947 5	6.00	2.623 3	2.879 9
1.60	2.663 3	2.934 4	7.00	2.615 6	2.874 1
1.80	2.656 7	2.925 8	8.00	2.611 2	2.867 4
2.00	2.651 8	2.919 4	9.00	2.606 6	2.860 8
2.20	2.648 3	3.914 6	10.00	2.601 8	2.852 2
2.40	2.645 5	2.910 8	11.00	2.591 4	2.843 4
2.60	2.643 3	2.907 9			

旋光性<sup>[3.194]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^{\circ}) \cdot \text{mm}^{-1}]$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^{\circ}) \cdot \text{mm}^{-1}]$
0.605 8	447	0.728 1	145
0.613 1	393.5	0.778 9	113.5
0.627 8	319	0.829 6	92.5
0.642 4	270.5	0.875 7	74.5
0.657 1	237.5	0.919 6	65.5
0.668 1	218	0.952 7	59
0.677 0	200	0.996 7	51.5

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 和不同系列色散关系间的比较：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.458]	[3.362]	[3.543]
SHG, $e + e \Rightarrow o$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	20.8[3.571]	21.2	23.0	21.3
	21.5[3.572]			
SFG, $e + e \Rightarrow o$				
10.6 + 0.672 9 $\Rightarrow$ 0.632 8	25.3[3.571]	无相位匹配	25.8	25.7

最佳色散关系方程组 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.543]</sup>：

$$n_o^2 = 7.811\,3 + \frac{0.394\,4}{\lambda^2 - 0.117\,2} + \frac{604.5}{\lambda^2 - 682.5}$$

$$n_e^2 = 9.313\,9 + \frac{0.587\,0}{\lambda^2 - 0.116\,6} + \frac{542.6}{\lambda^2 - 540.8}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	21.32	3.19	3.19
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	19.09	2.93	2.93



续表

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	14.42	2.32	2.32
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	14.82	2.38	2.38
2.65 $\Rightarrow$ 1.325	23.44	3.61	3.61
2.4 $\Rightarrow$ 1.2	26.00	3.93	3.93
SHG, o + e $\Rightarrow$ o			
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	30.68		4.22
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	27.36		3.93
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	20.54		3.19
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	21.12		3.27
2.65 $\Rightarrow$ 1.325	33.85		4.69
2.4 $\Rightarrow$ 1.2	37.78		4.98
SFG, o + e $\Rightarrow$ o			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	19.75		3.08
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	18.65		2.94
SFG, e + o $\Rightarrow$ o			
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	28.96	4.18	
9.6 + 2.4 $\Rightarrow$ 1.92	27.16	4.00	

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{eoo}} = d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{oso}} = d_{\text{eoo}} = d_{11} \cos \theta \cos 3\phi$$

非线性系数:

$$d_{11}(10.6 \mu\text{m}) = (50 \pm 16) \text{ pm/V}^{[3.365]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	17	0.4

### 3.3.29 $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ , 硫锑银

负单轴晶:  $n_o > n_e$ ;

点群: 3m;

密度:  $5.83 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.64]</sup>;

莫氏硬度: 2~2.5<sup>[3.64]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.7 \sim 14 \mu\text{m}$ <sup>[3.573]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.967	$\approx 0.7$	3.574	e 光, SFG 方向
1.064	$\approx 0.7$	3.574	o 光, SFG 方向
10.6	$\approx 0.7$	3.574	o 光, SFG 方向
	0.5	3.455	o 光, SHG 方向
	0.34	3.575	o 光, $\parallel c$
	0.08	3.575	e 光, $\perp c$
13.5	$< 1$	3.573	

在[3.573]中给出了  $n_o$  和  $n_e$  对波长的关系图。

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^\circ\text{C}$ )<sup>[3.573]</sup>:

$$n_o^2 = 1 + \frac{6.585\lambda^2}{\lambda^2 - 0.16} + \frac{0.1133\lambda^2}{\lambda^2 - 225}$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{5.845\lambda^2}{\lambda^2 - 0.16} + \frac{0.0202\lambda^2}{\lambda^2 - 225}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$ [3.573]	$\rho_3/(\circ)$ [3.573]
SHG, $o + o \Rightarrow e$			
$10.59 \Rightarrow 5.295$	30[3.455]	23.34	2.18
$10.6 \Rightarrow 5.3$	29[3.575]	23.37	2.18
	27.6[3.574]		
SFG, $o + o \Rightarrow e$			
$10.6 + 1.064 \Rightarrow 0.967$	27.3[3.574]	39.65	2.98

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>:

$$d_{\text{ose}} = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{oeo}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数:

$$d_{+} = (10.6 \mu\text{m}) = (7.5 \pm 0.3)^{-1} \times |d_{36}(\text{GaAs})| = (11.1 \pm 0.4) \text{ pm/V}^{[3.576, 37]}$$

利用比

$$|d_{22}(\text{Ag}_3\text{SbS}_3)| / |d_{31}(\text{Ag}_3\text{SbS}_3)| = 1.05 \pm 0.04^{[3.575]}$$

和值

$$\theta_{\text{pm}}(10.6 \Rightarrow 5.3 \mu\text{m}, o + o \Rightarrow e) = 29^\circ, \rho = 2.4^\circ^{[3.575]}$$

从方程

$$d_{+} = |d_{31}| \sin(\theta_{pm} + \rho) + |d_{22}| \cos(\theta_{pm} + \rho)$$

我们推得

$$|d_{22}(10.6 \mu\text{m})| = (8.2 \pm 0.8) \text{ pm/V}$$

$$|d_{31}(10.6 \mu\text{m})| = (7.8 \pm 0.5) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.365]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	17	> 0.09	10.6	200	> 0.46

### 3.3.30 Se, 硒

正单轴晶： $n_e > n_o$ ；

点群：32；

密度：4.79 g/cm<sup>3</sup><sup>[3.59]</sup>；

莫氏硬度：2<sup>[3.59]</sup>；

以“0”透过计的透过范围：0.7 ~ 21  $\mu\text{m}$ <sup>[3.577, 578]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ ：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
5.3	1.40 ± 0.05	3.579	c	14	2.8 ± 0.5	3.580	o 光, ⊥ c
10.6	1.09 ± 0.02	3.579	c	28	50 ± 5	3.580	o 光, ⊥ c

$T = 296 \text{ K}$  时折射率的实验值<sup>[3.581]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
1.064	1.790 ± 0.008	3.608 ± 0.008	3.391 3	2.650 ± 0.01	3.460 ± 0.01
1.152 3	2.737 ± 0.008	3.573 ± 0.008	10.6	2.640 ± 0.01	3.410 ± 0.01

旋光性：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	参考文献
0.70	440 ± 20	3.582	1.14	100 ± 10	3.582
0.79	300 ± 15	3.582	3.39	4.8 ± 0.5	3.579
0.91	200 ± 15	3.582	10.6	2.5 ± 0.5	3.579
1.00	150 ± 10	3.582			

相位匹配角的实验值：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		SHG, $e + e \Rightarrow o$	
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	5.5 $\pm$ 0.3 [3.579]		$\approx 10$ [3.583]
	6.5 [3.577]		

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>：

$$d_{\text{eoo}} = d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{11} \cos \theta \cos 3\phi$$

非线性系数：

$$d_{11}(10.6 \mu\text{m}) = (97 \pm 25) \text{ pm/V}^{[3.579]}$$

热导率<sup>[3.584]</sup>：

$T/\text{K}$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
273	4.81	1.37
298	4.52	1.31

### 3.3.31 $\text{Ti}_3\text{AsS}_3$ ，硫砷铊 (TAS)

负单轴晶： $n_o > n_e$ ；

点群： $3\text{m}$ ；

密度： $7.83 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.585]</sup>

莫氏硬度： $2 \sim 3$ <sup>[3.586]</sup>；

对一块长为 6 mm 的晶体以 0.5 透过计的透过范围： $1.28 \sim 17 \mu\text{m}$ <sup>[3.586]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ ：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
2 ~ 12	<0.02	3.585		10.6	0.038	3.586	
10.6	0.082	3.454	SHG 方向				

在 300 K 时折射率的实验值<sup>[3.587]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
2.056	3.419	3.227	7.854	3.345	3.162
3.059	3.380	3.190	9.016	3.340	3.158
4.060	3.364	3.177	9.917	3.336	3.155
5.035	3.357	3.171	10.961	3.331	3.152
5.856	3.354	3.168	12.028	3.327	3.147
6.945	3.349	3.164			

\* 译者注：原书为“7.83”，改为“7.83 g/cm<sup>3</sup>”。

$\lambda = 2 \sim 10.6 \mu\text{m}$  ( $T = 80 \sim 300 \text{ K}$ ) 处折射率的温度微商<sup>[3.587]</sup>:

$$\frac{dn_o}{dT} = -4.52 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\frac{dn_e}{dT} = +3.55 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

Sellmeier 方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 27^\circ\text{C}$ )<sup>[3.587]</sup>:

$$n_o^2 = 1 + \frac{10.210\lambda^2}{\lambda^2 - 0.197136} + \frac{0.522\lambda^2}{\lambda^2 - 625}$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{8.993\lambda^2}{\lambda^2 - 0.197136} + \frac{0.308\lambda^2}{\lambda^2 - 625}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	19.10			2.12
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	18.54			2.07
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	24.79			2.60
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	27.26			2.77
2.9365 $\Rightarrow$ 1.46825	48.74			3.26
SFG, $o + o \Rightarrow e$				
10.6 + 2.65 $\Rightarrow$ 2.12	25.21			2.64
9.6 + 2.4 $\Rightarrow$ 1.92	27.65			2.81
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	26.79	2.65		2.72
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	26.03	2.62		2.67
5.3 $\Rightarrow$ 2.65	35.77	3.16		3.18
4.8 $\Rightarrow$ 2.4	39.78	3.25		3.27
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	23.81	2.45		2.52
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	25.06	2.55		2.62
SFG, $o + e \Rightarrow e$				
10.6 + 5.3 $\Rightarrow$ 3.533	34.84		3.13	3.14
9.6 + 4.8 $\Rightarrow$ 3.2	36.84		3.19	3.20

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $o + o \Rightarrow e$			SHG, $o + o \Rightarrow e$		
9.6 $\Rightarrow$ 4.8	0.27	3.588	10.6 $\Rightarrow$ 5.3	0.30	3.589

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>：

$$d_{\text{oe}} = d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\phi$$

$$d_{\text{oe}} = d_{\text{oe}} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\phi$$

非线性系数：

$$d_+ (10.6 \mu\text{m}) = (3.47 \pm 1.04) \times d_+ (\text{Ag}_3\text{AsS}_3) = (67.5 \pm 31.3) \text{ pm/V}^{[3.586,455,37]}$$

$$d_+ (10.6 \mu\text{m}) = (3.3 \pm 1.0) \times d_+ (\text{Ag}_3\text{SbS}_3) = (36.5 \pm 12.5) \text{ pm/V}^{[3.586,576,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
9.6	70	$> 0.054$	3.588
10.6	150	$0.1 \sim 0.17$	3.368
10.6	200	0.16	3.586

### 3.3.32 Te, 碲

负单轴晶： $n_e > n_o$ ；

点群：32；

密度： $6.25 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.59]</sup>；

莫氏硬度： $2 \sim 2.5$ <sup>[3.59]</sup>；

以“0”透过计的透过范围： $3.5 \sim 36 \mu\text{m}$ <sup>[3.590,578,591]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ ：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
5.3	1.32	3.451	o 光, SHG 方向
10.6	0.96	3.451	e 光, SHG 方向
	$0.5 \sim 1.0$	3.576	e 光, SHG 方向
	$0.2 \sim 0.6$	3.592	e 光, SHG 方向
14	$1.1 \pm 0.4$	3.580	o 光, $\perp c$
28	$4.4 \pm 0.04$	3.580	o 光, $\perp c$

双光子吸收系数  $\beta$ <sup>[3.593]</sup>：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\beta \times 10^9/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\beta \times 10^9/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$
5.3 + 5.3	8	5.3 + 10.6	2

折射率的实验值：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	参考文献
4.0	4.929	6.372	3.578	12.0	4.785	6.240	3.590
5.0	4.864	6.316	3.578	12.8	4.781	6.235	3.590
6.0	4.838	6.286	3.578	13.7	4.776	6.231	3.590
7.0	4.821	6.257	3.578	14.0	4.775	6.230	3.590
8.0	4.809	6.253	3.578	14.7	4.772	6.227	3.590
8.5	4.801	6.260	3.590	15.9	4.767	6.222	3.590
8.8	4.799	6.258	3.590	17.2	4.761	6.216	3.590
9.3	4.798	6.255	3.590	18.9	4.753	6.210	3.590
9.7	4.795	6.252	3.590	20.8	4.744	6.203	3.590
10.2	4.793	6.249	3.590	23.4	4.734	6.196	3.590
10.6	4.792	6.247	3.590	26.3	4.722	6.188	3.590
10.8	4.791	6.246	3.590	28.0	4.716	6.183	3.590
11.4	4.789	6.243	3.590	30.3	4.706	6.180	3.590

旋光性<sup>[3.594]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$
3.94	140	5.76	37.1
4.34	93.3	7.02	23.4
5.00	55.6		

相位匹配角的实验值 ( $T = 293 \text{ K}$ ) 以及不同系列色散关系间的比较:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$		
		[3.543]	[3.362]*	[3.362]*
SHG, $e + e \Rightarrow o$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	14.17[3.595] 14.83[3.596] 14.07[3.590] 14.75[3.597]	14.28	14.22	15.28
23.4 $\Rightarrow$ 11.7	12.19[3.362]	6.12	9.14	12.49
26.6 $\Rightarrow$ 13.3	13.33[3.362]	5.36	9.56	13.53
28.0 $\Rightarrow$ 14.0	14.07[3.362]	5.09	9.82	14.07
SHG, $o + e \Rightarrow e$				
10.6 $\Rightarrow$ 5.3	20.42[3.598]	20.22	20.13	21.64

注: [3.362]\*4.0 ~ 14.0  $\mu\text{m}$  光谱范围的一组; [3.362]\*8.5 ~ 30.3  $\mu\text{m}$  光谱范围的一组。

对于  $4.0 \sim 14.0 \mu\text{m}$  光谱范围最佳色散关系方程组 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 293 \text{ K}$ )<sup>[3, 362]</sup>:

$$n_o^2 = 18.5364 + \frac{4.3289\lambda^2}{\lambda^2 - 3.9810} + \frac{3.780\lambda^2}{\lambda^2 - 11.813}$$

$$n_e^2 = 29.5222 + \frac{9.3068\lambda^2}{\lambda^2 - 2.5766} + \frac{9.235\lambda^2}{\lambda^2 - 13.521}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
$28 \Rightarrow 14$	9.82	3.98	3.98
$14 \Rightarrow 7$	10.90	4.42	4.42
$10.6 \Rightarrow 5.3$	14.22	5.72	5.72
$9.6 \Rightarrow 4.8$	15.90	6.36	6.36
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
$28 \Rightarrow 14$	13.89		5.58
$14 \Rightarrow 7$	15.43		6.19
$10.6 \Rightarrow 5.3$	20.13		7.93
$9.6 \Rightarrow 4.8$	22.52		8.77
SFG, $o + e \Rightarrow o$			
$28 + 14 \Rightarrow 9.333$	11.32		4.59
SFG, $e + o \Rightarrow o$			
$28 + 14 \Rightarrow 9.333$	16.09	6.44	

内角带宽的实验值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{mi}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
$10.6 \Rightarrow 5.3$	14.17	0.19	3.595
	$\approx 14.5$	0.20	3.451

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3, 100]</sup>:

$$d_{seo} = d_{11} \cos^2 \theta \sin 3\phi$$

$$d_{eeo} = d_{eeo} = d_{11} \cos \theta \cos 3\phi$$

非线性系数:

$$d_{11}(10.6 \mu\text{m}) = 7.2 \times d_{36}(\text{GaAs}) \pm 4\% = (598 \pm 25) \text{ pm/V}^{[3, 576, 37]}$$



$$d_{11}(10.6\text{ }\mu\text{m}) = (670 \pm 209)\text{ pm/V}^{[3.599]}$$

$$d_{11}(28\text{ }\mu\text{m}) = (570 \pm 190)\text{ pm/V}^{[3.590]}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
10.6	cw	0.000 001 5	3.599
	190	0.1 ~ 0.6	3.365
	150	0.02 ~ 0.04	3.599

热导率<sup>[3.584]</sup>:

$T/\text{K}$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$
273	3.60	2.08
298	3.38	1.97

## 3.4 其他有机非线性光学晶体

### 3.4.1 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ , 蔗糖(食糖)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.5321\text{ }\mu\text{m}$  时  $2V_z = 132.3^\circ$ <sup>[3.600]</sup>;

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $Y \parallel b$ ,  $a$  轴和  $c$  轴在  $XZ$  平面上, 两轴之间的夹角  $\beta = 103.5^\circ$ ,  $Z$  轴和  $c$  轴之间的夹角  $\alpha = 23.5^\circ$  (图 3.5)<sup>[3.600]</sup>;

莫氏硬度:  $>2.5$ <sup>[3.600]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.19 \sim 1.42\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[3.600]</sup>;

折射率的实验值<sup>[3.600]</sup>:

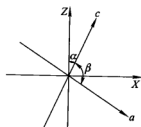


图 3.5 蔗糖晶体的介电轴 ( $X, Y, Z$ ) 和结晶学轴 ( $a, b, c$ )  
 $Y$  轴平行于  $b$  轴并垂直于图的平面

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.532 1	1.540 4	1.568 1	1.573 7
1.064 2	1.527 8	1.555 2	1.559 2

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[3.600]</sup>:

$$n_x^2 = 1.8719 + \frac{0.4660\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0214} - 0.0113\lambda^2$$

$$n_y^2 = 1.970\ 3 + \frac{0.450\ 2\lambda^2}{\lambda^2 - 0.023\ 8} - 0.010\ 1\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.052\ 6 + \frac{0.390\ 9\lambda^2}{\lambda^2 - 0.025\ 2} - 0.018\ 7\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[3.600]		
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	60.5 [3.600]	61.38	0.850	0.851

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[ 3.600 ]		
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	16.0 [ 3.600 ]	14.88	0.570	0.597

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{23} \cos \phi$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{23} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{25} \sin 2\theta$$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.600]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	10	> 5

### 3.4.2 L-水合精氨酸磷酸(LAP)

负双轴晶：在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 141.3^\circ$  [3.112]；

点群：2；

介电轴和晶体学轴的变换： $Y \parallel b$ ， $a$  轴和  $c$  轴在  $XZ$  平面上，两轴之间的夹角  $\beta = 98^\circ$ ， $Z$  轴和  $c$  轴之间的夹角  $\alpha = 35^\circ$  (图 3.6) [3.112]；

以“0”透过计的透过范围：0.23 ~ 1.25  $\mu\text{m}$  [3.112]；

折射率的实验值  $\alpha$ ：

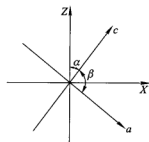


图 3.6 LAP 和 DLAP 晶体介电轴 ( $X, Y, Z$ ) 和结晶学轴 ( $a, b, c$ )  
 $Y$  轴平行于  $b$  轴并垂直于图的平面

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.230	0.1	3.601	
0.526 5	0.01	3.66	
0.532 1	< 0.01	3.112	
0.910	0.032	3.112	沿 $X$
	0.055	3.112	沿 $Y$
	0.051	3.112	沿 $Z$
	0.113	3.112	沿 $X$
1.040	0.219	3.112	沿 $Y$
	0.315	3.112	沿 $Z$
1.053	0.09	3.66	
1.064 2	0.097	3.112	沿 $X$
	0.145	3.112	沿 $Y$
	0.184	3.112	沿 $Z$

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=25\ ^\circ\text{C}$ ) [3.112]：

$$n_x^2 = 2.243\ 9 + \frac{0.011\ 7}{\lambda^2 - 0.017\ 9} - 0.011\ 1\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.440\ 0 + \frac{0.015\ 8}{\lambda^2 - 0.019\ 1} - 0.021\ 2\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.459\ 0 + \frac{0.017\ 7}{\lambda^2 - 0.022\ 6} - 0.016\ 2\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值：

$XY$  平面， $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.112]		
SHG, $o + o \Rightarrow e$				
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	60.5 [3.112]	61.65		2.498
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	25.5 [3.112]	24.02		1.919
SFG, $o + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ $\Rightarrow$ 0.354 73	35.4 [3.112]	35.73		2.618
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	40.8 [3.112]	40.00	2.290	2.485
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 +$ 0.532 $1 \Rightarrow$ $\Rightarrow$ 0.354 73	43.2 [3.112]	46.28	2.302	2.711

$XZ$  平面,  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_3/(^{\circ})$
		[3.112]		
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	40 [3.112]	40.59	2.568	2.774
SFG, $e + o \Rightarrow e$				
1.064 2 + 0.532 1 $\Rightarrow$ $\Rightarrow$ 0.354 73	34.8 [3.112]	33.86	2.381	2.891

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$\begin{aligned}d_{\text{ooc}} &= d_{23} \cos \phi \\d_{\text{eoe}} &= d_{\text{oee}} = d_{25} \sin 2\phi\end{aligned}$$

$YZ$  平面

$$\begin{aligned}d_{\text{eoo}} &= d_{25} \sin 2\theta \\d_{\text{eoo}} &= d_{\text{ooo}} = d_{21} \cos \theta\end{aligned}$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{eee}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.112,37]</sup>:

$$d_{21}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 0.40\ \text{pm/V}$$

$$d_{22}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 0.37\ \text{pm/V}$$

$$d_{23}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = -0.84\ \text{pm/V}$$

$$d_{25}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = -0.58\ \text{pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{ar}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.526 5	20	300	3.66
	0.6	600	3.66
1.053	25	130	3.66
	1	630	3.66
1.064 2	1	100 ~ 130	3.112

热导率<sup>[3.602]</sup>:

$$\kappa = 0.59\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

### 3.4.3 氘化 L-水合精氨酸磷酸(DLAP)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  处  $2V_z = 142.6^\circ$ <sup>[3.112]</sup>;

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $Y \parallel b$ ,  $a$  轴和  $c$  轴在  $XZ$  平面上, 两轴之间的夹角  $\beta = 98^\circ$ ,  $Z$  轴和  $c$  轴之间的夹角  $\alpha = 35^\circ$  (图 3.6)<sup>[3.112]</sup>;

密度:  $\approx 1.5\ \text{g}/\text{cm}^3$ <sup>[3.603]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.22 \sim 1.30\ \mu\text{m}$ <sup>[3.112]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
0.266	0.074	3.112	沿 X
	0.131	3.112	沿 Y
	0.184	3.112	沿 Z
0.354 7	0.025	3.112	沿 X
	0.053	3.112	沿 Y
	0.039	3.112	沿 Z
0.526 5	0.01	3.66	
0.532 1	<0.01	3.112	
0.910	0.028	3.112	沿 X
	0.037	3.112	沿 Y
	0.044	3.112	沿 Z
1.040	0.012	3.112	沿 X
	0.014	3.112	沿 Y

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献	备注
	0.009	3.112	沿 Z
1.053	0.02	3.66	
1.064	0.012	3.112	沿 X
	0.014	3.112	沿 Y
	0.009	3.112	沿 Z
1.180	0.385	3.112	沿 X
	0.394	3.112	沿 Y
	0.557	3.112	沿 Z

折射率的温度微商<sup>[3.604]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_x/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_y/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_z/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.532 1	-3.64	-5.34	-6.69
1.064 2	-3.73	-5.30	-6.30

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[3.112]</sup>：

$$n_x^2 = 2.235\ 2 + \frac{0.011\ 8}{\lambda^2 - 0.014\ 6} - 0.006\ 83\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.431\ 3 + \frac{0.015\ 1}{\lambda^2 - 0.021\ 4} - 0.014\ 3\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.448\ 4 + \frac{0.017\ 2}{\lambda^2 - 0.022\ 9} - 0.011\ 5\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值：

XY 平面,  $\theta = 90^\circ$ 

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(\text{ }^\circ)$	$\phi_{\text{理论}}/(\text{ }^\circ)$ [3.112]	$\rho_1/(\text{ }^\circ)$	$\rho_3/(\text{ }^\circ)$
SHG, $o+o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	22.2 [3.604]	22.98		1.852
SHG, $e+o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	37.5 [3.604]	37.81	2.290	2.446

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$ 

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\text{ }^\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\text{ }^\circ)$ [3.112]	$\rho_1/(\text{ }^\circ)$	$\rho_3/(\text{ }^\circ)$
SHG, $e+o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	42.8 [3.604]	43.34	2.588	2.785

内角带宽、温度带宽和光谱带宽的实验值 ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3, 603]</sup>;

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	22.2	0.036	5.4	20.2
SHG, $\text{e} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	37.5	0.072	14.6	20.1

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3, 35]</sup>:

XY 平面

$$\begin{aligned}d_{\text{ooo}} &= d_{23} \cos \phi \\d_{\text{eoe}} &= d_{\text{oeo}} = d_{25} \sin 2\phi\end{aligned}$$

YZ 平面

$$\begin{aligned}d_{\text{ooo}} &= d_{25} \sin 2\theta \\d_{\text{oeo}} &= d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos \theta\end{aligned}$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3, 112, 37]</sup>:

$$\begin{aligned}d_{21}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) &= 0.40\ \text{pm/V} \\d_{22}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) &= 0.37\ \text{pm/V} \\d_{23}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) &= -0.84\ \text{pm/V} \\d_{25}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) &= -0.58\ \text{pm/V}\end{aligned}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.308	17	0.3	3.605
0.526 5	20	380	3.66
	0.6	670	3.66
1.053	25	330	3.66
	1	870	3.66
1.064 2	1	90 ~ 130	3.112

### 3.4.4 左旋吡咯烷酮-2-羧酸 (L-PCA)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 51.7^{\circ}$ <sup>[3, 606]</sup>;

点群: 222;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, a, c^{[3.606]}$ ;

计算的密度:  $1.44 \text{ g/cm}^3$ ;

维氏硬度:  $33^{[3.606]}$

透过范围:  $0.26 \sim 1.064 \text{ } \mu\text{m}^{[3.606]}$

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20^\circ\text{C}$ ) $^{[3.606]}$ :

$$n_x^2 = 2.1907 + \frac{0.0142}{\lambda^2 - 0.0124}$$

$$n_y^2 = 2.2629 + \frac{0.0139}{\lambda^2 - 0.0148}$$

$$n_z^2 = 2.5858 + \frac{0.0242}{\lambda^2 - 0.0217}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[3.606]		
SHG, $e + o \Rightarrow e$				
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	42 [3.606]	41.44	0.89	0.89

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.606]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
0.532 $1 \Rightarrow$ 0.266 05	37 [3.606]	36.92	3.92

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.606]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	54[3.606]	54.14	4.94
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	33.5[3.606]	33.85	4.31

内角带宽的实验值 $^{[3.606]}$ :

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$



相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{im}}/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
0.532 1 $\Rightarrow$ 0.266 05	42	0.123

在 L - PCA 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oce}} = d_{14} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oce}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14}(0.532\ 1\ \mu\text{m}) = 0.32\ \text{pm/V}^{[3.606]}$$

### 3.4.5 $\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 四水合酒石酸钙(L - CTT)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 65.8^{\circ [3.607]}$ ;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, c, b$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.28 \sim 1.4\ \mu\text{m}^{[3.607]}$ ;

折射率的实验值<sup>[3.607]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.488 0	1.530 6	1.542 8	1.564 9
0.514 5	1.527 0	1.538 8	1.561 3
0.532 1	1.526 4	1.536 4	1.561 1
1.064 2	1.512 5	1.522 0	1.547 7

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 293\ \text{K}$ )<sup>[3.607]</sup>:

$$n_x^2 = 1 + \frac{1.26\lambda^2}{\lambda^2 - 0.012\ 727\ 3}$$

$$n_y^2 = 1 + \frac{1.30\lambda^2}{\lambda^2 - 0.012\ 149\ 5}$$

$$n_z^2 = 1 + \frac{1.38\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0094521}$$

相位匹配角和“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	58.43	1.299
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	50.07	1.438

在 L-CTT 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式(对称关系不适用)<sup>[3.35,36]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{32} \cos \theta$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{ooo}} = d_{15} \cos \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{ooo}} = d_{24} \sin^2 \phi + d_{15} \cos^2 \phi$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin^2 \phi + d_{31} \cos^2 \phi$$

在[3.36]中给出了 L-CTT 晶体在任意方向上的三波相互作用有效非线性表达式。

非线性系数<sup>[3.607,37]</sup>:

$$d_{15}(1.0642 \mu\text{m}) = (1.73 \pm 0.03) \text{ pm/V}$$

$$d_{24}(1.0642 \mu\text{m}) = (0.90 \pm 0.03) \text{ pm/V}$$

$$d_{31}(1.0642 \mu\text{m}) < 0.015 \text{ pm/V}$$

$$d_{32}(1.0642 \mu\text{m}) = (0.20 \pm 0.02) \text{ pm/V}$$

$$d_{33}(1.0642 \mu\text{m}) = (0.14 \pm 0.02) \text{ pm/V}$$

### 3.4.6 $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 水合草酸铵(AO)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.5461 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 64.17^\circ$ <sup>[3.608]</sup>;

点群: 222;

透过范围:  $0.3 \sim 1.1 \mu\text{m}$ <sup>[3.609]</sup>;

折射率的实验值<sup>[3.608]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.447 1	1.611 9	1.559 9	1.446 0
0.471 3	1.608 4	1.556 1	1.444 7
0.492 2	1.605 0	1.554 4	1.443 5
0.501 6	1.603 7	1.553 6	1.442 6
0.546 1	1.599 3	1.549 3	1.440 6
0.578 0	1.596 5	1.547 0	1.439 1
0.587 6	1.595 2	1.546 9	1.438 8
0.667 8	1.589 2	1.542 6	1.436 2
0.701 6	1.587 4	1.540 8	1.435 2
1.014	1.576 3	1.531 2	1.429 5
1.129	1.572 8	1.528 4	1.427 6
1.367	1.565 2	1.522 2	1.423 5

相位匹配角的实验值:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$	
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	23.17[3.610]
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	23.6[3.608]

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$	
1.06 $\Rightarrow$ 0.53	45.75[3.610]
1.152 3 $\Rightarrow$ 0.576 15	46.5[3.608]

在 AO 晶体主平面相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3,35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{14} \sin 2\phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14}(1.06 \mu\text{m}) = 0.9 \times d_{36}(\text{KDP}) = 0.31 \text{ pm/V}^{[3.609,37]}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.609]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	$\approx 20$	8

### 3.4.7 m-双(甲基)苯(BAMB)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.532 \text{ } \mu\text{m}$  时  $2V_z = 57.25^\circ$ <sup>[3.611]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和结晶学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

密度:  $1.26 \text{ g/cm}^3$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.33 \sim 1.42 \mu\text{m}$ <sup>[3.611]</sup>;

折射率的实验值<sup>[3.611]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.436	1.863 2	1.801 9	1.643 3
0.492	1.832 0	1.777 8	1.629 6
0.532	1.818 9	1.767 6	1.622 6
0.546	1.815 0	1.764 4	1.620 5
0.577	1.807 1	1.758 3	1.616 3
0.579	1.806 9	1.757 9	1.616 1
0.589	1.804 7	1.756 4	1.615 0
0.633	1.796 7	1.749 9	1.610 8
1.064	1.764 4	1.724 0	1.593 0
1.153	1.761 8	1.722 0	1.591 6

相位匹配角的实验值:

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
$1.064 \text{ } 2 \Rightarrow 0.532 \text{ } 1$	$8[3.611]$

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$	
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	42 [3.611]

内角带宽的实验值<sup>[3.611]</sup>:

YZ 平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{m}}/(^{\circ})$
SHG, $o+o \Rightarrow e$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	8	0.098

在 BAMB 晶体主平面相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{ooe}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooe}} = d_{32} \sin \theta$$

在 [3.36] 中给出了 BAMA 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数:

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 0.95 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 20\% = (0.37 \pm 0.07)\text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 2.45 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 20\% = (0.96 \pm 0.19)\text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 1.8 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 20\% = (0.70 \pm 0.14)\text{pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.611]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	40	2

### 3.4.8 3-甲氧基-4-羟基-苯甲醛 (MHBA)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.546\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 89.5^{\circ}$ <sup>[3.612]</sup>;

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

计算的密度:  $1.34 \text{ g/cm}^3$  [3.613];

莫氏硬度:  $1.67$  [3.613];

以“0”透过计的透过范围:  $0.37 \sim 2.2 \mu\text{m}$  [3.612];

线性吸收系数  $\alpha$  [3.612];

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.415	1.42	0.830	0.53
0.532	0.95	1.064	0.53

折射率的实验值 [3.612]:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.404 7	1.633 52		
0.435 8	1.603 45		
0.447 1	1.596 44		1.893 49
0.546 1	1.558 40	1.700 18	
0.587 5	1.551 43	1.690 45	1.808 96
0.589 3	1.551 27	1.690 39	1.792 35
0.656 3		1.683 52	
0.667 8	1.539 96	1.679 63	1.771 05
0.705 7	1.536 73	1.676 68	1.768 12

[3.612]给出的 Sellmeier 方程不正确。

相位匹配角的实验值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		SHG, $e + o \Rightarrow e$	
$0.83 \Rightarrow 0.415$	$16[3.612]$	$0.83 \Rightarrow 0.415$	$58[3.612]$
$1.064 2 \Rightarrow 0.532 1$	$11[3.612]$		

$YZ$  平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
$0.83 \Rightarrow 0.415$	$49[3.612]$

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$	
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	28 [3.612]

XZ 平面,  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$	
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	68 [3.612]

内角带宽的实验值<sup>[3.612]</sup>:

XZ 平面,  $\phi = 0^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	68	0.052

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eoe}} = d_{23} \cos \phi$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{25} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{25} \sin 2\theta$$

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{ooo}} = d_{21} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.612,37]</sup>:

$$d_{21}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (3.9 \pm 0.8) \text{ pm/V}$$

$$d_{22}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (9.8 \pm 1.0) \text{ pm/V}$$

$$d_{23}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (13.0 \pm 1.3) \text{ pm/V}$$

$$d_{25}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (3.2 \pm 0.6) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.612]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.064	10	20

### 3.4.9 2-呋喃异丁烯酸酐(FMA)

正单轴晶:  $n_e > n_o$ ;

点群: 4mm;

以“0”透过计的透过范围:  $0.38 \sim 1.1 \mu\text{m}^{[3.614]}$ ;

折射率的实验值<sup>[3.614]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$	$\lambda/\mu\text{m}$	$n_o$	$n_e$
0.430 5	1.751	2.137	0.632 8	1.641	1.887
0.453 5	1.721	2.064	0.833 0	1.619	1.841
0.488 0	1.691	2.007	1.064 2	1.612	1.821
0.514 5	1.685	1.983	1.152 3	1.617	1.811
0.532 1	1.671	1.958			

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20^\circ\text{C}$ )<sup>[3.614]</sup>:

$$n_o^2 = 1.804 + \frac{0.6884\lambda^2}{\lambda^2 - 0.08301} + 0.0527\lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.097 + \frac{1.1090\lambda^2}{\lambda^2 - 0.10172} - 0.008748\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.614]	
SHG, $e+o \Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	51.2 [3.614]	50.80	6.766

NCPM 温度的实验值<sup>[3.614]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^\circ\text{C}$
SHG, $e+o \Rightarrow o$			
0.903 8 $\Rightarrow$ 0.451 9	0	0.910 8 $\Rightarrow$ 0.455 4	38
0.907 6 $\Rightarrow$ 0.453 8	19		

内角带宽的实验值<sup>[3.614]</sup>:

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{in}}/(^{\circ})$
SHG, $e+o \Rightarrow o$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	51.2	0.031



非临界 SHG 的温度调谐<sup>[3.614]</sup>：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$d\lambda_1/dT/(\text{nm} \cdot \text{K}^{-1})$
SHG, $e + o \Rightarrow e$	
0.907 6 $\Rightarrow$ 0.453 8	0.18

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.100]</sup>：

$$d_{\text{eco}} = d_{\text{ceo}} = d_{31} \sin \theta$$

非线性系数<sup>[3.614,37]</sup>：

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 12\ \text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 18\ \text{pm/V}$$

### 3.4.10 3-甲基-4-硝基吡啶-1-氧化物 (POM)

正双轴晶：在  $\lambda = 0.546\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 68.87^\circ$ <sup>[3.615]</sup>；

点群：222；

介电轴和晶体学轴的变换： $X, Y, Z \Rightarrow c, a, b$ ；

透过范围：0.4~2.3  $\mu\text{m}$ <sup>[3.615]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ ：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.532 1	1.88	3.615
	1.2	3.616
1.064 2	0.77	3.615

折射率的实验值<sup>[3.615]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.435	1.717		
0.468	1.690	1.809	2.114
0.480	1.682	1.793	2.082
0.509	1.668	1.766	2.028
0.532	1.660	1.750	1.997
0.546	1.656	1.742	1.981
0.579	1.648	1.728	1.953
0.644	1.637	1.709	1.915
1.064	1.625	1.668	1.829

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T = 20\ ^\circ\text{C}$ )<sup>[3.615]</sup>：

$$n_x^2 = 2.4529 + \frac{0.1641\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1280}$$

$$n_y^2 = 2.4315 + \frac{0.3556\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1276} - 0.0579\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.5521 + \frac{0.7962\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1289} - 0.0941\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.615]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	54.3[3.615]	54.12	6.640
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	44.2[3.617]	45.28	6.010
1.34 $\Rightarrow$ 0.67	43.8[3.617]	44.90	5.943

内角带宽的实验值:

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{mi}}/(\circ)$	参考文献
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	54.3	0.025	3.615
1.3188 $\Rightarrow$ 0.6594	44.2	0.021	3.617
1.34 $\Rightarrow$ 0.67	43.8	0.020	3.617

在 POM 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>

XY 平面

$$d_{\text{eee}} = d_{\text{ooo}} = d_{14} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eee}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eee}} = d_{\text{ooo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eee}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.615,37]</sup>:

$$d_{14}(1.064 \mu\text{m}) = 20 \times d_{11}(\text{SiO}_2) \pm 15\% = (6 \pm 0.9) \text{ pm/V}$$

$$d_{14}(1.064 \mu\text{m}) = 13.5 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 10\% = (5.3 \pm 0.5) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	参考文献
0.532 1	15	0.5	3.616
	0.02	> 1.5	3.615
	0.025	> 2.7	3.616
0.592 7	1	1	3.618
0.62	0.000 1	10 000 (?)	3.619
1.064 2	0.02	> 20	3.615

### 3.4.11 噻嗯查耳酮(T-17)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 82.6^\circ$  [3.230];

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $Y \parallel b$ ,  $a$  轴和  $c$  轴在  $XZ$  平面上, 两轴之间的夹角为  $\beta = 109.9^\circ$ ,  $Z \parallel a$  (图 3.7) [3.230];

密度:  $1.27\ \text{g/cm}^3$  [3.230];

维氏硬度:  $17$  [3.230];

以“0”透过计的透过范围:  $\approx 0.4 \sim 1.06\ \mu\text{m}$  [3.230];

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 20^\circ\text{C}$ ) [3.230]:

$$n_x^2 = 2.631\ 1 + \frac{0.059\ 014}{\lambda^2 - 0.121\ 160} + 0.255\ 53 \times 10^{-5} \lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.826\ 5 + \frac{0.037\ 232}{\lambda^2 - 0.098\ 256} - 3.020\ 20 \times 10^{-5} \lambda^2$$

$$n_z^2 = 3.046\ 8 + \frac{0.078\ 174}{\lambda^2 - 0.098\ 845} - 0.615\ 90 \times 10^{-5} \lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
		[3.230]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.604 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	61.6 [3.230]	63.87	3.532

内角带宽和温度带宽的实验值:

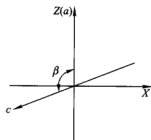


图 3.7 T-17 晶体的介电轴 ( $X, Y, Z$ ) 和结晶学轴 ( $a, b, c$ )  
 $Y$  轴平行于  $b$  轴并垂直于图平面

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
SHG, $e + e \rightarrow o$				
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	61.6	0.030	0.690	2.2

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{oe}} = d_{23} \cos \phi$$

$$d_{\text{eo}} = d_{\text{ee}} = d_{25} \sin 2\phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eo}} = d_{25} \sin 2\theta$$

$$d_{\text{oo}} = d_{\text{eo}} = d_{21} \cos \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ee}} = d_{\text{eo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.230,37]</sup>:

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$\begin{aligned} d_{\text{eo}}(1.064 \ 2 \Rightarrow 0.532 \ 1 \ \mu\text{m}) &= 0.226 \times d_{21} + 0.774 \times d_{23} - 0.837 \times d_{25} \\ &= 6.3 \text{ pm/V} \end{aligned}$$

### 3.4.12 5-硝基脲嘧啶(5NU)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.546 \ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 92.9^\circ$ <sup>[3.620]</sup>;

点群: 222;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow b, c, a$ ;

透过范围:  $0.41 \sim 2.4 \ \mu\text{m}$ <sup>[3.620]</sup>;

折射率的实验值<sup>[3.620]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.435	2.005 1	1.779 7	1.635 1
0.468	1.973 7	1.756 6	1.611 3
0.480	1.966 8	1.750 0	1.606 5
0.509	1.953 7	1.744 1	1.595 8
0.518	1.941 1	1.737 5	1.589 4

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.546	1.931 5	1.724 2	1.585 0
0.579	1.919 0	1.717 6	1.578 7
0.589	1.913 5	1.715 6	1.575 8
0.636	1.901 4	1.707 0	1.569 4
0.644	1.901 0	1.705 0	1.567 0
1.064 2	1.851 7	1.679 9	1.534 1
1.318 8	1.836 2	1.671 9	1.524 8

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  为单位,  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[3.620]</sup>:

$$n_x^2 = 2.390 + \frac{1.033\lambda^2}{\lambda^2 - 0.070\ 0} - 0.054\ 9\lambda^2$$

$$n_y^2 = 1.892 + \frac{0.870\lambda^2}{\lambda^2 - 0.059\ 9}$$

$$n_z^2 = 2.098 + \frac{0.290\lambda^2}{\lambda^2 - 0.094\ 7} - 0.048\ 5\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi=0^{\circ}$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.620]	
SHG, $e+e\Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	37.2 [3.620]	34.41	10.46
1.338 $\Rightarrow$ 0.669	40.2 [3.620]	36.79	10.58

$XZ$  平面,  $\phi=0^{\circ}$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[3.620]		
SHG, $o+e\Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	67.7 [3.620]	67.60	6.56	6.91
1.338 $\Rightarrow$ 0.669	60.0 [3.620]	59.05	8.52	8.74
1.907 $\Rightarrow$ 0.953 5	61.2 [3.620]	56.57	9.12	9.02

在  $\text{SNU}$  晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eeo}} = d_{14} \sin 2\phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{ese}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eeo}} = d_{\text{oeo}} = d_{14} \sin 2\theta$$

非线性系数:

$$d_{14} (1.064 \mu\text{m}) = (8.4 \pm 1.3) \text{ pm/V}^{[3.620]}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.620]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.532	6	10
0.593	9	10
1.064 2	10	30
1.338	0.16	68

### 3.4.13 2-(N-脯氨酸)-5-硝基吡啶(PNP)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.58 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 64.6^\circ$ <sup>[3.621]</sup>;

点群: 2;

[3.622]中给出了 PNP 晶体介电轴和晶体学轴的变换;

以“0”透过计的透过范围<sup>[3.621]</sup>: 沿 X, Y 轴  $0.49 \sim 2.08 \mu\text{m}$ ; 沿 Z 轴  $0.466 \sim 2.3 \mu\text{m}$ ;

折射率的实验值<sup>[3.621]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.488 0	2.239	1.929	1.477
0.514 5	2.164	1.873	1.474
0.580	2.040	1.813	1.468
0.600		1.801	1.468
0.632 8	1.990	1.788	1.467
1.064 2	1.880	1.732	1.456

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 20^\circ\text{C}$ )<sup>[3.621]</sup>:

$$n_x^2 = 2.3454 + \frac{1.029757\lambda^2}{\lambda^2 - (0.3830)^2}$$

$$n_y^2 = 2.5658 + \frac{0.375380\lambda^2}{\lambda^2 - (0.4006)^2}$$

$$n_z^2 = 2.0961 + \frac{0.029386\lambda^2}{\lambda^2 - (0.4016)^2}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$ [3.621]	$\rho_1/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.0642 $\Rightarrow$ 0.5321	21 [3.621]	11.92	7.349

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{25} \sin 2\phi$$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{23} \cos \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos \theta$$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{oeo}} = d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.622]</sup>:

$$d_{21}(1.064 \mu\text{m}) = (48 \pm 11) \text{ pm/V}$$

$$d_{22}(1.064 \mu\text{m}) = (17 \pm 4) \text{ pm/V}$$

### 3.4.14 2-环辛氨基-5-硝基吡啶 (COANP)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.547 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 36.13^\circ$  (在  $\lambda = 0.497 \mu\text{m}$  时 COANP 变为单轴晶)<sup>[3.623]</sup>;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow c, a, b$ ;

密度:  $1.24 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.624]</sup>;

对于  $0.9 \text{ mm}$  长的晶体以  $0.5$  透过计的透过范围:  $0.47 \sim 1.5 \mu\text{m}$  (沿  $a$  轴)<sup>[3.624]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ <sup>[3.624]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.532	3	1.35	< 1
1.064	0.8		

折射率的实验值<sup>[3.623]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.480	1.776	1.766	2.505
0.547	1.687	1.700	1.839
0.577	1.663	1.690	1.824
0.650	1.643	1.668	1.772
1.064	1.604	1.636	1.715

相位匹配角的实验值：

YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$	
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	63.6 [ 3.624 ]

在 COANP 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>：

XY 平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{32} \sin \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{31} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \cos \theta$$

在[3.36]中给出了 COANP 晶体在任意方向上的三波相互作用有效非线性表达式。

非线性系数<sup>[3.624,623,37]</sup>：

$$d_{31}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (11.3 \pm 1.5) \text{ pm/V}$$

$$d_{32}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (24 \pm 12) \text{ pm/V}$$

$$d_{33}(1.064 \text{ } 2 \text{ } \mu\text{m}) = (10.8 \pm 1.5) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.624]</sup>：



$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.064	250	>0.015

### 3.4.15 L-N-(5-硝基-2-吡啶基)亮氨酸(NPLO)

正双轴晶: 在  $\lambda=0.514 \mu\text{m}$  时  $2V_z=43^\circ$ <sup>[3.625]</sup>;

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $Y \parallel b$ ,  $a$  轴和  $c$  轴位于  $XZ$  平面上, 两轴之间的夹角  $\beta=110.4^\circ$ ,  $Z$  轴和  $c$  轴之间的夹角  $\alpha=56^\circ$  (图 3.8)<sup>[3.625]</sup>;

密度:  $1.24 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3.625]</sup>;

维氏硬度:  $18$ <sup>[3.625]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.47 \sim > 1.06 \mu\text{m}$ ;

折射率的实验值<sup>[3.625]</sup>;

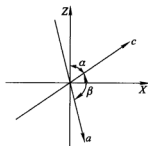


图 3.8 NPLO 晶体的介电轴 ( $X, Y, Z$ ) 和晶体学轴 ( $a, b, c$ )  
 $Y$  轴平行于  $b$  轴并垂直于图平面

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.488 0	1.470	1.712	2.218
0.514 5	1.463	1.681	2.116
0.632 8	1.457	1.631	1.933
1.064 2	1.451	1.598	1.812

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T=20^\circ\text{C}$ )<sup>[3.625]</sup>:

$$n_x^2 = 2.1240 + \frac{0.0011}{\lambda^2 - 0.2108} - 0.0174\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.5607 + \frac{0.0257}{\lambda^2 - 0.1700} - 0.0299\lambda^2$$

$$n_z^2 = 3.2123 + \frac{0.1302}{\lambda^2 - 0.1625} - 0.0559\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi=0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$ [3.625]	$\rho_1/(\circ)$	$\rho_2/(\circ)$
SHG, $e+e \Rightarrow o$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	33[3.625]	30.52	9.811	14.123

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(\circ)$	$\theta_{\text{理论}}/(\circ)$	$\rho_1/(\circ)$
		[3.625]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	51.7 [3.625]	55.30	12.496

内角带宽的实验值<sup>[3.625]</sup>:

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$
SHG, $e + o \Rightarrow e$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	33	0.12

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	51.7	0.11

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{23} \cos \phi$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{ooo}} = d_{25} \sin 2\phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{25} \sin 2\theta$$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoe}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.625,37]</sup>:

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$\begin{aligned} d_{\text{eoe}}(1.064 \ 2 \Rightarrow 0.532 \ 1 \ \mu\text{m}) &= d_{\text{eoe}}(1.064 \ 2 \Rightarrow 0.532 \ 1 \ \mu\text{m}) \\ &= 0.703 \times d_{21} + 0.297 \times d_{23} - 0.914 \times d_{25} \\ &= 2.7 \text{ pm/V} \end{aligned}$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{seo}}(1.0642 \Rightarrow 0.5321 \mu\text{m}) = 0.322 \times d_{21} + 0.678 \times d_{23} - 0.935 \times d_{25} \\ = 33.2 \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.625]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.064	8	60

### 3.4.16 $\text{C}_6\text{H}_4(\text{NO}_2)_2$ , m-双硝基苯(mDNB)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.5321 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 51.15^\circ$ <sup>[3.611]</sup>;

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ;

密度:  $1.57 \text{ g/cm}^3$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.48 \sim 1.57 \mu\text{m}$ <sup>[3.611]</sup>;

折射率的实验值<sup>[3.611]</sup>;

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.436	1.802 5	1.736 1	1.507 2
0.492	1.773 1	1.710 4	1.496 4
0.532	1.759 2	1.698 3	1.491 2
0.546	1.755 3	1.695 0	1.489 6
0.577	1.748 0	1.688 6	1.486 9
0.579	1.747 6	1.688 2	1.486 5
0.589	1.745 6	1.686 5	1.485 9
0.633	1.738 1	1.679 8	1.482 7
1.064	1.709 3	1.653 9	1.470 7
1.153	1.707 2	1.652 0	1.469 8

相位匹配角的计算值:

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$
SHG, $o + o \Rightarrow e$	
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	35[3.611]
1.152 $3 \Rightarrow$ 0.576 15	34.75[3.626]

内角带宽的实验值<sup>[3.611]</sup>;

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{mi}}/(^{\circ})$
SHG, $o + o \Rightarrow e$		
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	35	0.029

在 MDNB 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{coe}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{32} \sin \theta$$

在 [3.36] 中给出了 MDNB 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数<sup>[3.611,37]</sup>:

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 2.75 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 20\% = (1.1 \pm 0.2)\text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 5.5 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 20\% = (2.1 \pm 0.4)\text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 1.7 \times d_{36}(\text{KDP}) \pm 25\% = (0.7 \pm 0.2)\text{pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.611]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{th}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	40	2

### 3.4.17 4-(N,N-双甲基)-3-乙酰氨基苯(DAN)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 81.7^{\circ}$ <sup>[3.627]</sup>;

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $Y \parallel b$ ,  $a$  轴和  $c$  轴在 XZ 平面上, 两轴之间的夹角  $\beta = 94.4^{\circ}$ ,  $X$  轴和  $c$  轴之间的夹角  $\alpha = 50.6^{\circ}$  (图 3.9)<sup>[3.628,629]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.485 \sim 2.27\ \mu\text{m}$ <sup>[3.629]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ :

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	参考文献
0.5 ~ 2.0	< 1	3.628
1.0	1.5	3.627
	1.2	3.629

折射率的实验值<sup>[3.627]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.496 5	1.574	1.779	2.243
0.514 5	1.557	1.748	2.165
0.532 1	1.554	1.732	2.107
0.585 0	1.545	1.701	2.005
0.632 8	1.539	1.682	1.949
1.064 2	1.517	1.636	1.843

Sellmeier方程( $\lambda$ 以 $\mu\text{m}$ 计,  $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[3.629]</sup>：

$$n_x^2 = 2.139\ 0 + \frac{0.147\ 408\lambda^2}{\lambda^2 - (0.368\ 1)^2}$$

$$n_y^2 = 2.329\ 0 + \frac{0.307\ 173\lambda^2}{\lambda^2 - (0.393\ 3)^2}$$

$$n_z^2 = 2.537\ 9 + \frac{0.719\ 557\lambda^2}{\lambda^2 - (0.419\ 4)^2}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值：

$XZ$  平面,  $\phi=0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[3.629]		
SHG, $e+o \Rightarrow e$				
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20.9[3.629]	18.42	5.653	8.120
1.318 8 $\Rightarrow$ 0.659 4	27.6[3.629]	29.55	8.224	9.949

$XZ$  平面,  $\phi=0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.629]	
SHG, $e+e \Rightarrow o$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	57.3 [3.629]	58.58	10.498
1.318 $8 \Rightarrow$ 0.659 4	49.4 [3.629]	49.62	10.623

内角带宽的实验值：

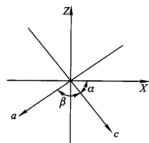


图 3.9 DAN 晶体的介电轴 ( $X, Y, Z$ ) 和晶体学轴 ( $a, b, c$ )  
 $Y$  轴平行于  $b$  轴并垂直于图平面

$XZ$  平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$\Delta\theta^{\text{ist}}/(\circ)$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	57.3	0.007 [3.629]
		0.011 [3.628]

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{23} \cos \phi$$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{oeo}} = d_{25} \sin 2\phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{25} \sin 2\theta$$

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos \theta$$

$XZ$  平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数<sup>[3.629,323,37]</sup>:

$$d_{21}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (1.1 \pm 1.5) \text{ pm/V}$$

$$d_{22}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (3.9 \pm 0.8) \text{ pm/V}$$

$$d_{23}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (37.5 \pm 11.3) \text{ pm/V}$$

$$d_{25}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (1.1 \pm 1.5) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.629]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	备注
1.064	15	0.8	30 Hz
	0.1	50	

### 3.4.18 甲基-(2,4-双硝基苯)-氨基丙酮(MAP)

正双轴晶: 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 79.9^\circ$ <sup>[3.630]</sup>;

点群: 2;

介电轴和晶体学轴的变换:  $Y \parallel b$ ,  $a$  轴和  $c$  轴在  $XZ$  平面上, 两角轴之间的夹角  $\beta = 95.6^\circ$ ,  $Z$  轴和  $a$  轴间的夹角  $\alpha = 37^\circ$  (图 3.10)<sup>[3.630]</sup>;

以“0”透过计的透过范围:  $0.5 \sim 2.2\ \mu\text{m}$ <sup>[3.630]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ : 在  $\lambda = 0.532\ 1\ \mu\text{m}$  时  $\alpha = 3.7\ \text{cm}^{-1}$  [3.630];  
 折射率的实验值:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.532 1	1.556 8	1.710 0	2.035 3
1.064 2	1.507 8	1.599 1	1.843 9

Sellmeier 方程 ( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T = 20\ ^\circ\text{C}$ ) [3.630]:

$$\begin{aligned} n_x^2 &= 2.171\ 3 + \frac{0.103\ 05\lambda^2}{\lambda^2 - 0.169\ 51} - 0.016\ 67\lambda^2 \\ n_y^2 &= 2.310\ 0 + \frac{0.225\ 80\lambda^2}{\lambda^2 - 0.179\ 88} - 0.018\ 86\lambda^2 \\ n_z^2 &= 2.752\ 3 + \frac{0.607\ 90\lambda^2}{\lambda^2 - 0.160\ 60} - 0.053\ 61\lambda^2 \end{aligned}$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角  
 的计算值:  
 YZ 平面,  $\phi = 90^\circ$

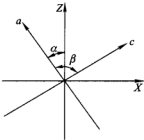


图 3.10 MAP 晶体的介电轴  
 ( $X, Y, Z$ ) 和晶体学轴 ( $a, b, c$ ) 轴  
 $Y$  轴平行于  $b$  轴并垂直于图平面

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_2/(^{\circ})$
		[3.630]	
SHG, $o + e \Rightarrow o$			
1.064 $2 \Rightarrow$ 0.532 1	11 [3.630]	10.40	2.541

XZ 平面,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta > V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.630]	
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	56 [3.630]	55.03	11.316

在相位匹配方向上的有效非线性表达式 [3.35]:

XY 平面

$$\begin{aligned} d_{\text{oe}} &= d_{23} \cos \phi \\ d_{\text{oe}} &= d_{\text{oe}} = d_{25} \sin 2\phi \end{aligned}$$

YZ 平面

$$\begin{aligned} d_{\text{eo}} &= d_{25} \sin 2\theta \\ d_{\text{eo}} &= d_{\text{eo}} = d_{21} \cos \theta \end{aligned}$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{eoc} = d_{oec} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

$XZ$  平面,  $\theta > V_z$

$$d_{eoo} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数(在晶体学坐标系  $a, b, c$  中计算)<sup>[3.630]</sup>;

$$d_{21}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm (23.9 \pm 3.0) \text{ pm/V}$$

$$d_{22}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm (26.3 \pm 3.0) \text{ pm/V}$$

$$d_{23}(1.0642 \mu\text{m}) = \pm (5.3 \pm 1.2) \text{ pm/V}$$

$$d_{25}(1.0642 \mu\text{m}) = \mp (0.8 \pm 0.6) \text{ pm/V}$$

在[3.630]中作了  $d$  张量系数在介电参考系( $X, Y, Z$ )中转换的运算。

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.630]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{th} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.532 1	7	> 1.5
1.064 2	10	30

### 3.4.19 m-硝基苯胺(mNA)

负双轴晶: 在  $\lambda = 0.5321 \mu\text{m}$  时  $2V_z = 104^\circ$ <sup>[3.631]</sup>;

点群:  $\text{mm}2$ ;

介电轴和晶体学轴的变换:  $X, Y, Z \Rightarrow c, b, a$ ;

以“0”透过计的透过范围:  $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ <sup>[3.632]</sup>;

线性吸收系数  $\alpha$ <sup>[3.632]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	备注
0.531 5	4	沿 $b$ , $E \parallel c$
	6	沿 $b$ , $E \parallel a$

折射率的实验值<sup>[3.631]</sup>:

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.532 1	1.698 2	1.753 3	1.788 7
1.064 2	1.628 3	1.681 5	1.716 8

相位匹配角的实验值:

$XY$  平面,  $\theta = 90^\circ$



相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$	
1.063 $\Rightarrow$ 0.531 5	55[3.632]
1.046 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	55[3.633]

YZ 平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$
SHG, $\text{e} + \text{e} \Rightarrow \text{o}$	
1.063 $\Rightarrow$ 0.531 5	44[3.632]

内角带宽的实验值:

XY 平面,  $\theta = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\theta^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	参考文献
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$				
1.063 $\Rightarrow$ 0.531 5	55	$\approx 2$	$\approx 0.17$	3.632

相匹配角的温度变化<sup>[3.632]</sup>:

XY 平面,  $\phi = 90^{\circ}$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\phi_{\text{pm}}/dT/[^{\circ} \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $\text{o} + \text{o} \Rightarrow \text{e}$			
1.063 $\Rightarrow$ 0.531 5	20	55	-0.006

在 MNA 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>:

XY 平面

$$d_{\text{ooc}} = d_{31} \sin \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \theta + d_{32} \cos^2 \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooc}} = d_{32} \cos \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{eoo}} = d_{\text{ooo}} = d_{32} \cos \theta$$

在[3.36]中给出了 MNA 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。

非线性系数<sup>[3.633,37]</sup>：

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 90 \times d_{36}(\text{KDP}) = 35.1\ \text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 0.8 \times d_{36}(\text{KDP}) = 0.3\ \text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 90 \times d_{36}(\text{KDP}) = 35.1\ \text{pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值<sup>[3.632]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\tau_p/\text{ns}$	$I_{th} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.063	25	> 2

### 3.4.20 N-(4-硝基苯)-N-甲基氨丙酮腈(NPAN)

双轴晶；

点群： $\text{mm}2$ ；

介电轴和晶体学轴的变换： $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ <sup>[3.634]</sup>；

计算的密度： $1.34\ \text{g/cm}^3$ <sup>[3.634]</sup>；

以“0”透过计的透过范围： $\approx 0.5 \sim \approx 2.0\ \mu\text{m}$ <sup>[3.634]</sup>；

线性吸收系数 $\alpha$ <sup>[3.635]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.532 1	3.8 ~ 5.0	1.064 2	1.8 ~ 2.3

相位匹配角的实验值：

XY平面， $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{pm}/(^{\circ})$	相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{pm}/(^{\circ})$
SHG, $e + e \Rightarrow o$		SHG, $e + e \Rightarrow o$	
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	4.9[3.635]	1.30 $\Rightarrow$ 0.65	26.5[3.635]
1.21 $\Rightarrow$ 0.605	20.6[3.635]		

内角带宽和温度带宽的实验值<sup>[3.635]</sup>：

XY平面， $\theta = 90^\circ$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\phi_{pm}/(^{\circ})$	$\Delta\phi_{int}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	4.9	0.118	3.7
1.21 $\Rightarrow$ 0.605	20.6	0.105	4.8
1.30 $\Rightarrow$ 0.65	26.5	0.185	3.8

相位匹配角的温度变化<sup>[3.635]</sup>：

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$d\phi_{\text{pm}}/dT/[(^{\circ}) \cdot \text{K}^{-1}]$
SHG, $e + e \Rightarrow o$			
1.064 2 $\Rightarrow$ 0.532 1	20	4.9	-0.040
1.21 $\Rightarrow$ 0.605	20	20.6	-0.035
1.30 $\Rightarrow$ 0.65	20	26.5	-0.038

在 NPAN 晶体主平面三波相互作用相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35,36]</sup>：

XY 平面

$$d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$$

YZ 平面

$$d_{\text{ooo}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面,  $\theta > V_z$

$$d_{\text{ooo}} = d_{32} \sin \theta$$

在[3.36]中给出了 NPAN 晶体任意方向上三波相互作用的有效非线性表达式。非线性系数<sup>[3.635]</sup>：

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) \approx 6\ \text{pm/V}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 57\ \text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 27\ \text{pm/V}$$

### 3.4.21 N-(4-硝基苯)-L-脯氨酸(NPP)

负双轴晶：在  $\lambda = 0.546\ 1\ \mu\text{m}$  时  $2V_z = 55.3^{\circ}$ <sup>[3.636]</sup>；

点群：2；

在[3.636]中给出了 NPP 晶体介电轴和晶体学轴的变换；

以“0”透计计的透过范围：0.51 ~ 2.0  $\mu\text{m}$ <sup>[3.636]</sup>；

线性吸收系数  $\alpha$ <sup>[3.618]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$
0.592 7	3.4	1.455	1.5
1.0	1.5		

折射率的实验值<sup>[3.636]</sup>：

$\lambda/\mu\text{m}$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
0.436	2.630		
0.509	2.355	2.116	1.497
0.532 1	2.277	2.024	
0.546 1	2.231	1.982	1.491
0.577	2.153	1.927	1.495
0.589	2.128	1.911	1.484
0.632 8	2.066	1.876	1.478
0.644	2.055	1.857	1.474
0.690	2.051	1.857	1.474
1.064 2	1.926	1.774	1.457
1.338	1.917	1.757	1.440

Sellmeier 方程( $\lambda$  以  $\mu\text{m}$  计,  $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[3.636]</sup>:

$$n_x^2 = 2.3532 + \frac{1.1299\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1678} + 0.0392\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.8137 + \frac{0.3655\lambda^2}{\lambda^2 - 0.2030} - 0.0816\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.1268 + \frac{0.0527\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1550} - 0.0608\lambda^2$$

相位匹配角的实验值和理论值以及“走离”角的计算值:

$XZ$  平面,  $\phi=0^\circ$ ,  $\theta < V_z$

相互作用的波长/ $\mu\text{m}$	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.636]	
SHG, $e+e\Rightarrow o$			
1.1854 $\Rightarrow$ 0.5927	9.4[3.637]	6.95	5.144
1.24 $\Rightarrow$ 0.62	14.8[3.638]	12.41	8.763

在相位匹配方向上的有效非线性表达式<sup>[3.35]</sup>:

$XY$  平面

$$d_{\text{eeo}} = d_{25} \sin 2\phi$$

$$d_{\text{oeo}} = d_{\text{eoo}} = d_{23} \cos \phi$$

$YZ$  平面

$$d_{\text{oeo}} = d_{21} \cos \theta$$

$$d_{\text{eoe}} = d_{\text{ooo}} = d_{25} \sin 2\theta$$