

XZ 平面, $\theta < V_z$

$$d_{\text{geo}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

XZ 平面, $\theta > V_z$

$$d_{\text{geo}} = d_{\text{oe}} = d_{21} \cos^2 \theta + d_{23} \sin^2 \theta - d_{25} \sin 2\theta$$

非线性系数^[3.636]:

$$d_{21}(1.34 \mu\text{m}) = (56.5 \pm 5) \text{ pm/V}$$

$$d_{22}(1.34 \mu\text{m}) = (18.7 \pm 2) \text{ pm/V}$$

激光诱导的表面损伤阈值^[3.619]:

$\lambda/\mu\text{m}$	τ_p/ns	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
0.62	0.000 1	100

3.4.22 3-甲基-4-甲氧基-4'-硝基芪(MMONS)

正双轴晶: 在 $\lambda = 0.543 \mu\text{m}$ 时 $2V_z = 70.2^\circ$ ^[3.639];

点群: mm2;

介电轴和晶体学轴的变换: $X, Y, Z \Rightarrow a, b, c$ ^[3.639];

计算的密度: 1.282 g/cm^3 ^[3.639];

透过范围: $0.51 \sim 2.1 \mu\text{m}$ ^[3.639];

折射率的实验值^[3.639]:

$\lambda/\mu\text{m}$	n_x	n_y	n_z
0.543	1.597	1.756	2.312
0.632 8	1.569	1.693	2.129
1.064 2	1.530	1.630	1.961
1.318 8	1.525	1.622	1.940

Sellmeier 方程(λ 以 μm 计, $T = 20^\circ\text{C}$)^[3.639]:

$$n_x^2 = 1.987 + \frac{0.314\lambda^2}{\lambda^2 - (0.363)^2}$$

$$n_y^2 = 2.184 + \frac{0.405\lambda^2}{\lambda^2 - (0.403)^2}$$

$$n_z^2 = 2.507 + \frac{1.130\lambda^2}{\lambda^2 - (0.421)^2}$$

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/ μm	$\theta_{\text{实验}}/(^{\circ})$	$\theta_{\text{理论}}/(^{\circ})$	$\rho_1/(^{\circ})$
		[3.639]	
SHG, $e + o \Rightarrow o$			
1.047 \Rightarrow 0.532 5	77.6 [3.639]	77.57	7.50
1.064 2 \Rightarrow 0.532 1	73.2 [3.639]	73.18	9.58

内角带宽和温度带宽的实验值^[3.639]：

XZ 平面, $\phi = 0^{\circ}$

相互作用的波长/ μm	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\Delta\phi^{\text{int}}/(^{\circ})$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$
SHG, $e + o \Rightarrow o$			
1.047 \Rightarrow 0.532 5	77.6	0.047	
1.064 2 \Rightarrow 0.532 1	73.2	0.035	0.17

在 MMONS 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

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

YZ 平面

$$d_{\text{eco}} = d_{\text{eoo}} = d_{31} \sin \theta$$

XZ 平面, $\theta < V_z$

$$d_{\text{ooe}} = d_{32} \sin \theta$$

XZ 平面, $\theta > V_z$

$$d_{\text{eco}} = d_{\text{eoo}} = d_{32} \sin \theta$$

在[3.36]中给出了 MMONS 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^[3.639,37]：

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (25 \pm 5)\text{pm/V}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = (111 \pm 22)\text{pm/V}$$

3.5 结晶石英的性质 ($\alpha - \text{SiO}_2$)

正单轴晶: $n_o > n_e$;

点群: 32;

密度: $2.649\ \text{g/cm}^3$ ^[3.59];

莫氏硬度: 7^[3.64];

对于 10 mm 长的晶体, 以 0.5 透过计的透过范围 (沿 c 轴): $0.193 \sim 3.6 \mu\text{m}$ ^[3.640,641];

线性吸收系数 α (沿 c 轴) ^[3.59]:

$\lambda/\mu\text{m}$	α/cm^{-1}	$\lambda/\mu\text{m}$	α/cm^{-1}
2.9	1	3.5	0.2
3.0	0.5	3.8	0.87
3.3	0.06		

双光子吸收系数 β (沿 c 轴):

$\lambda/\mu\text{m}$	$\beta \times 10^{13}/(\text{m} \cdot \text{W}^{-1})$	参考文献
0.216	40 ± 7	3.399
0.266	4.5	3.71
0.270	< 1.5	3.399

折射率的实验值 ($T=291 \text{ K}$) ^[3.642]:

$\lambda/\mu\text{m}$	n_o	n_e	$\lambda/\mu\text{m}$	n_o	n_e
0.185 467	1.675 78	1.689 97	0.396 848	1.558 13	1.567 72
0.193 583	1.659 99	1.673 43	0.404 656	1.557 156	1.56 671
0.200 06	1.649 27	1.662 27	0.410 174	1.556 502	1.566 031
0.202 55	1.645 57	1.658 42	0.434 047	1.553 963	1.563 405
0.204 448	1.642 88	1.655 62	0.435 834	1.553 790	1.563 225
0.211 07	1.634 32	1.646 71	0.467 815	1.551 027	1.560 368
0.214 439	1.630 39	1.642 62	0.479 991	1.550 118	1.559 428
0.219 462	1.624 97	1.636 98	0.486 133	1.549 683	1.558 979
0.226 503	1.618 18	1.629 92	0.508 582	1.548 229	1.557 475
0.231 288	1.614 01	1.625 59	0.518 362	1.547 651	1.556 887
0.242 796	1.605 25	1.616 50	0.533 85	1.546 799	1.555 996
0.250 329	1.600 32	1.611 39	0.546 072	1.546 174	1.555 350
0.257 304	1.596 22	1.607 14	0.579 066	1.544 667	1.553 791
0.263 155	1.593 09	1.603 89	0.587 563	1.544 316	1.553 428
0.274 867	1.587 52	1.598 13	0.589 29	1.544 246	1.553 355
0.291 358	1.580 98	1.591 36	0.627 82	1.542 819	1.551 880
0.303 412	1.576 955	1.58 720	0.643 847	1.542 288	1.551 332
0.312 279	1.574 33	1.584 485	0.656 278	1.541 899	1.550 929
0.325 253	1.570 915	1.580 95	0.667 815	1.541 553	1.550 573
0.340 365	1.567 47	1.577 385	0.670 786	1.541 466	1.550 483
0.358 68	1.563 915	1.573 705	0.706 520	1.540 488	1.549 472

续表

$\lambda/\mu\text{m}$	n_o	n_e	$\lambda/\mu\text{m}$	n_o	n_e
0.728 135	1.539 948	1.548 913	1.300 00	1.531 02	1.539 62
0.766 494	1.539 071	1.548 005	1.400 00	1.529 72	1.538 26
0.794 763	1.538 478	1.547 392	1.529 61	1.528 00	1.536 46
0.844 67	1.537 525	1.546 40	1.600 00	1.527 03	1.535 45
1.000 00	1.535 03	1.543 81	1.800 00	1.524 13	1.532 42
1.014 06	1.534 83	1.543 60	2.058 20	1.519 98	1.528 14
1.083 03	1.533 87	1.542 60	2.500 00	1.511 56	1.519 50
1.200 00	1.532 32	1.540 98	3.000 00	1.499 62	1.507 00

 $T = 300 \text{ K}$ 时的旋光性^[3, 194]:

$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$	$\lambda/\mu\text{m}$	$\rho/[(^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}]$
0.180 0	410.5	0.322 579	82.13	0.481 054	33.52
0.182 5	391.5	0.327 100	79.49	0.508 582	29.73
0.185 0	374.0	0.338 399	73.43	0.510 554	29.49
0.185 398	370.9	0.340 365	72.46	0.515 325	28.90
0.185 735	368.6	0.349 058	68.36	0.520 908	28.25
0.186 209	365.6	0.369 4	60.06	0.535 065	26.67
0.187 5	357.5	0.372 762	58.84	0.546 074	25.54
0.190 0	342.5	0.386 553	54.21	0.546 549	25.49
0.192 5	328.5	0.390 648	52.95	0.547 155	25.43
0.193 03	325.31	0.393 582	52.07	0.570 025	23.31
0.193 518	322.76	0.397 775	50.85	0.576 96	22.72
0.195 0	315.5	0.402 187	49.62	0.578 216	22.62
0.198 979	295.65	0.407 664	48.14	0.579 066	22.55
0.214 702	226.91	0.411 855	47.07	0.588 997	21.75
0.221 003	216.50	0.413 469	46.66	0.589 593	21.70
0.226 334	202.27	0.414 768	46.34	0.636 235	18.48
0.226 909	200.90	0.419 144	45.28	0.643 847	18.02
0.232 749	187.25	0.423 362	44.29	0.670 785	16.54
0.235 923	180.43	0.428 241	43.19	0.761	12.59
0.241 331	169.98	0.431 509	42.47	0.940	8.14
0.247 482	158.66	0.435 274	41.66	1.1	5.836
0.262 83	135.66	0.435 834	41.55	1.342	3.89
0.273 955	122.12	0.467 816	35.61	1.6	2.656
0.281 329	114.29	0.468 014	35.57	2.1	1.46
0.291 216	104.97	0.472 216	34.89	2.6	0.922
0.307 573	91.97	0.479 991	33.68	3.1	0.584

折射率的温度微商^[3.643]：

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_e/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$	$dn_o/dT \times 10^5/\text{K}^{-1}$
0.441	-0.475	-0.593
0.467	-0.485	-0.681
0.480	-0.499	-0.600
0.508	-0.514	-0.616
0.589	-0.529	-0.642
0.643	-0.549	-0.653

非线性系数^[3.37]：

$$d_{11}(1.064 \mu\text{m}) = 0.30 \text{ pm/V}$$

激光诱导的破碎阈值(沿 c 轴)^[3.644]：

$\lambda/\mu\text{m}$	τ_p/ns	$I_{\text{thr}} \times 10^{-12}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1.06	31	4 000 ~ 6 000

热导率：

T/K	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \parallel c$	$\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \perp c$	参考文献
273	11.42	6.82	3.645
293	11.7	6.5	3.58

3.6 新进展

在本书的出版期间，出现了许多提供非线性晶体性质的新工作。为了更新本章提供的材料，在下面简单讨论了一些最重要的进展。

CLBO

首先，应该提到的是从硼酸盐系列中发现的新非线性晶体，即硼酸锂铯($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ 或 CLBO)^[3.646,647]。它是负单轴晶，点群为 $\bar{4}2\text{m}$ ，透过区为 $0.18 \sim 2.75 \mu\text{m}$ 。CLBO 晶体在室温下的 Sellmeier 方程(λ 以 μm 计)如下^[3.646]：

$$n_o^2 = 2.208964 + \frac{0.010493}{\lambda^2 - 0.012865} - 0.011306\lambda^2$$

$$n_e^2 = 2.058791 + \frac{0.008711}{\lambda^2 - 0.011393} - 0.006069\lambda^2$$

在[3.646]中测量了 CLBO 晶体的非线性系数为 $d_{36}(1.064 \mu\text{m}) = 2.2 \times d_{36}(\text{KDP}) = 0.86 \text{ pm/V}$ 。对于 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 时，1.1 ns 脉冲的激光诱导损伤阈值

为 25 GW/cm^2 [3.647]。

BBO

最近在 [3.650] 中提出的色散关系的“改进”比上面 [3.145] 所列的方程组要差得多。

LBO

Kato 报告了修正的 LBO 色散关系的方程组 (以 μm 为单位, $T = 293 \text{ K}$) [3.648]:

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

$$n_y^2 = 2.5390 + \frac{0.01277}{\lambda^2 - 0.01189} - 0.01849\lambda^2 + 4.3025 \times 10^{-5}\lambda^4 - 2.9131 \times 10^{-5}\lambda^6$$

$$n_z^2 = 2.5865 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.01223} - 0.01862\lambda^2 + 4.5778 \times 10^{-5}\lambda^4 - 3.2526 \times 10^{-5}\lambda^6$$

已经得到了一些关于 LBO 折射率的温度微商的相关信息, 例如对 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 的光谱范围, 温度范围为 $293 \sim 383 \text{ K}$ (λ 以 μm 为单位) [3.648]:

$$\text{d}n_x/\text{d}T = -(3.76\lambda - 2.3) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{d}n_y/\text{d}T = -(19.40\lambda - 6.01\lambda) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{d}n_z/\text{d}T = -(9.70 - 1.50\lambda) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

对于 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 温度范围为 $293 \sim 473 \text{ K}$ (λ 以 μm 为单位, T 以 K 为单位) [3.649]:

$$\text{d}n_x/\text{d}T = [0.20342 - (1.9697 \times 10^{-2})(T - 273) - (1.4415 \times 10^{-5})(T - 273)^2] \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{d}n_y/\text{d}T = -[10.748 + (7.1034 \times 10^{-2})(T - 273) + (5.7387 \times 10^{-5})(T - 273)^2] \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{d}n_z/\text{d}T = -[0.85998 + (1.5476 \times 10^{-1})(T - 273) - (9.4675 \times 10^{-4})(T - 273)^2] + (2.2375 \times 10^{-6})(T - 273)^3] \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

CBO

Kato 发表了 CBO 晶体修正的色散关系 (λ 以 μm 为单位, $T = 293 \text{ K}$) [3.651]:

$$n_x^2 = 2.3035 + \frac{0.01378}{\lambda^2 - 0.01498} - 0.00612\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.3704 + \frac{0.01528}{\lambda^2 - 0.01581} - 0.00939\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.4753 + \frac{0.01806}{\lambda^2 - 0.01752} - 0.01654\lambda^2$$

KTP

[3.652] 报告了 $T = 288 \sim 313$ K 熔盐法生长 KTP 晶体折射率的温度微商的新数据:

$\lambda/\mu\text{m}$	$dn_x/dT \times 10^6/\text{K}^{-1}$	$dn_y/dT \times 10^6/\text{K}^{-1}$	$dn_z/dT \times 10^6/\text{K}^{-1}$
1.064 2	6.1	8.3	14.5

KTA

[3.653] 中提出了“红外修正”的 Sellmeier 方程(λ 以 μm 为单位, $T = 293$ K):

$$n_x^2 = 1.907\ 13 + \frac{1.235\ 52\lambda^2}{\lambda^2 - (0.196\ 92)^2} - 0.010\ 25\lambda^2$$

$$n_y^2 = 2.159\ 12 + \frac{1.000\ 99\lambda^2}{\lambda^2 - (0.218\ 44)^2} - 0.010\ 96\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.147\ 86 + \frac{1.295\ 59\lambda^2}{\lambda^2 - (0.227\ 19)^2} - 0.014\ 36\lambda^2$$

这些确实和在 XZ 和 YZ 平面中以 $1.064\ 2\ \mu\text{m}$ 泵浦的 OPO 特例中的实验数据符合较好, 但是在较短波长($\lambda_3 = 0.4 \sim 0.6\ \mu\text{m}$)参与的 SHG 和 SFG 过程中, Kato^[3.434] 的方程更为适用。

RTA

另一种 KTP 的同系物磷酸钛氧铷 (RbTiOAsO_4 或 RTA) 晶体在过去三年得到广泛的发展。RTA 是 mm2 点群对称的正双轴晶, 透过范围为 $0.35 \sim 5.8\ \mu\text{m}$ ^[3.654, 655]。RTA 晶体的 Sellmeier 方程(λ 以 μm 为单位, $T = 293$ K)如下^[3.656]:

$$n_x^2 = 2.226\ 81 + \frac{0.996\ 16\lambda^2}{\lambda^2 - (0.214\ 23)^2} - 0.013\ 69\lambda^2$$

$$n_y^2 = 1.977\ 56 + \frac{1.257\ 26\lambda^2}{\lambda^2 - (0.204\ 48)^2} - 0.008\ 65\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.287\ 79 + \frac{1.206\ 29\lambda^2}{\lambda^2 - (0.234\ 84)^2} - 0.015\ 83\lambda^2$$

所报道的 RTA 的非线性系数为

$$d_{31}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 1.4\ \text{pm/V}^{[3.654, 37]}$$

$$d_{32}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 4.6\ \text{pm/V}^{[3.654, 37]}$$

$$d_{33}(1.064\ 2\ \mu\text{m}) = 12.1\ \text{pm/V}^{[3.654, 37]}$$

AgGaSe₂

Kato 提出了修正的 Sellmeier 方程组, 在 I 类 NCPM OPO 情况下与实验值

符合得较好^[3, 657] (λ 以 μm 为单位, $T = 293 \text{ K}$):

$$n_o^2 = 6.850\,70 + \frac{0.429\,70}{\lambda^2 - 0.158\,40} - 0.001\,25\lambda^2$$

$$n_e^2 = 6.679\,20 + \frac{0.459\,80}{\lambda^2 - 0.212\,20} - 0.001\,26\lambda^2$$



第4章

非线性晶体的应用

这一章致力于阐明非线性晶体在非线性光学器件中的应用。本章描述了钕离子激光辐射二次及更高次(高达六次)光学谐波的发生、其他激光(红宝石、气体、半导体等)器件的光学谐波发生和频发生(包括 IR 辐射上转换到可见范围)、差频发生、以参量光振荡作为工具产生的可调谐辐射、受激拉曼散射和皮秒连续光的发生。本章许多内容以列表的形式给出,包括可转换的激光辐射参数以及许多参考书目。

4.1 钕激光器的激光谐波发生

4.1.1 在无机晶体中钕激光辐射的二次谐波发生

钕激光器是固体激光器家族的典型代表。三价的钕离子掺入各种晶体或玻璃基质成为这一类激光器中的激活介质。绝大多数钕激光器产生的激光波长在 $1.05 \sim 1.08 \mu\text{m}$ 之间,掺钕磷酸盐玻璃激光器的波长为 $\lambda = 1.054 \mu\text{m}$,掺钕硅酸盐玻璃激光器的波长 $\lambda =$

1.060 ~ 1.064 μm (取决于玻璃的类型), 掺钕的铝酸钇激光器 ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$, $\text{Nd}:\text{YAP}$) 的波长 $\lambda = 1.079\ 6\ \mu\text{m}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{LiYF}_4$ ($\text{Nd}:\text{YLF}$) 激光器的波长 $\lambda = 1.053\ \mu\text{m}$, 还有 $\text{Nd}^{3+}:\text{CaWO}_4$ 激光器的波长 $\lambda = 1.058\ 4\ \mu\text{m}$ 。最常用的掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 或 $\text{Nd}:\text{YAG}$) 激光器发射激光的波长 $\lambda = 1.064\ 15\ \mu\text{m}$ (见附录)。

表 4.1 列举了在不同无机晶体中研究 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射 SHG 的结果; 对于每一种类型晶体及相位匹配角度, 给出了基波辐射强度 I_0 、二次谐波脉冲宽度、晶体长度以及能量或功率转换效率。

对于 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射的皮秒 (或亚纳秒, $\tau_p = 1 \sim 500\ \text{ps}$) 的 SHG 应用, 主要是采用 KDP 晶体, 或有时采用 DKDP 晶体^[4, 5], 或者用 LiIO_3 晶体^[4, 15]。KDP 晶体有高的体损伤阈值; 而且不存在双光子吸收类型的非线性过程、SRS 以及皮秒连续发生。为了达到强激光辐射的 SHG 最佳转换效率, 必须使用大口径的激光光束, 这样就需要大口径的晶体。在目前, 能够生长出高光学质量的几十厘米口径的 KDP 晶体。

Matveets 等人^[4, 3]研究了在不同长度 (3.5 ~ 40 mm) 的 KDP 晶体中 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射 ($\tau_p = 30\ \text{ps}$) 的 SHG。在基波脉冲能量 $E = 32\ \text{mJ}$, 晶体长 14 mm 时可达到最高转换效率 ($\eta = 82\%$)。考虑到菲涅耳损耗和退偏振等因素, 这相应于 92% 的能量转换效率。

表 4.1 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射的二次谐波发生 (1.064 → 0.532 μm)

晶体类型	相互作用	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$I_0/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	τ_p/ns	L/mm	转换效率/%	参考文献	备注
KDP	ooe	41	10^9	0.15	25	32 (能量)	4.1	
	ooe	41	—	0.05	25	60	4.2	
	ooe	41	8×10^9	0.03	14	82 (能量)	4.3	
	ooe	41	7×10^9	0.03	20	81 (能量)	4.3	
	ooe	41.35	—	0.1 ms	40	0.38 (能量)	4.4	$\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器冷却至 253 K, $\lambda = 946\ \text{nm}$
DKDP	oeo	53.5	10^8	18	30	50 (功率)	4.5	
	oeo	53.5	3×10^9	0.25	40	70 (功率)	4.5	
	oeo	53.5	8×10^7	20	30	50 (能量)	4.6	$P_{2\omega} = 10\ \text{W}$
	ooe	36.6	3×10^8	8	20	40 (能量)	4.7	
	oeo	53.7	3×10^8	8	20	50 (能量)	4.7	
CDA	ooe	90	2×10^8	10	17.5	57 (功率)	4.8	$T = 48\ ^{\circ}\text{C}$
	ooe	90	4×10^9	0.007*	13	25 (能量)	4.9	

晶体	相互 作用 类型	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$I_0/(W \cdot cm^{-2})$	τ_p/ns	L/mm	转换效 率/%	参考 文献	备注
DCDA	ooe	90	8×10^7	20	21	40(能量)	4.6	$T = 90 - 100^{\circ}C$
	ooe	90	3×10^8	20	16	40(能量)	4.6	$P_{2w} = 10 W$
	ooe	90	2×10^8	10	13.5	45(功率)	4.8	$T = 112^{\circ}C$
	ooe	90	9×10^7	—	29	50(功率)	4.10	
	ooe	90	—	15	20	57	4.11	$P_{2w} = 6 W$
RDA	ooe	50	—	10	—	34(功率)	4.12	$T = 25^{\circ}C$
RDP	ooe	50.8	2×10^8	10	15.3	36(功率)	4.13	
	oeo	83.1	2×10^8	10	15.3	11(功率)	4.13	
LiIO ₃	ooe	30	7×10^7	—	18	44(功率)	4.14	
	ooe	30	3×10^9	0.04	5	50	4.15	
LiNbO ₃	ooe	90	2×10^7	10	20	40	4.16	$T = 120^{\circ}C$
LFM	ooe	55.1	3.7×10^7	—	15	36	4.17	单脉冲方式
	oeo	55.1	6.2×10^3	—	15	0.08	4.17	自由运转
KTP	oeo	26 ^b	—	10	—	22	4.18	
	oeo	26 ^b	—	0.04	5	18	4.19	
	oeo	25.2 ^b	—	0.07	7.2	52	4.20	准连续脉冲串
	oeo	25 ^b	2.5×10^8	15	4	60	4.21	
	oeo	30 ^b	2×10^7	35	9	40(能量)	4.22	多模方式
	oeo	30 ^b	9×10^7	35	4	45(能量)	4.22	多模方式
	oeo	30 ^b	10^8	30	5.1	60(能量)	4.22	两次通过方式
	oeo	30 ^b	10^8	30	8	50(能量)	4.22	高斯线束
	oeo	26 ^b	—	0.2	5	55	4.23	$E_{2w} = 0.19 J$
	oeo	23 ^b	2.5×10^8	10	3	30	4.24	
铌酸 钽钠 KNbO ₃	oeo	23 ^b	3.2×10^8	8.5	4.5	55(功率)	4.25	
	oeo	—	—	8	7	80(能量)	4.26	$E_{2w} = 0.72 J, T = 55^{\circ}C$
	ooe	74	—	—	3	20	4.27	YZ 平面, $P_{2w} = 0.55 W$
	ooe	19	4.7×10^7	11	4.8	40(能量)	4.28	激光二极管泵浦 Nd:YLF 激光器 (1.047 μm)
BBO	ooe	—	1.9×10^8	14	6	47	4.29	$P_{2w} = 4.5 W$
	ooe	—	1.67×10^8	14	6	38	4.29	$P_{2w} = 8.5 W$
	ooe	—	2.53×10^8	14	6	37	4.29	$P_{2w} = 36 W$
	ooe	21	2×10^9	1	6.8	68(能量)	4.30	

晶体	相互 作用 类型	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$I_0/(W \cdot cm^{-2})$	τ_p/ns	L/mm	转换效 率/%	参考 文献	备注
BBO	ooe	21	2.5×10^8	8	6.8	58(能量)	4.30	
	ooe	22.8	—	10	6	33(功率)	4.31	两次通过构型
	ooe	22.8	1.4×10^8	—	7	32(功率)	4.32	
	ooe	22.8	1.6×10^8	8	7.5	55~60 (能量)	4.7	
LBO	ooe	0 ^b	10^9	0.035	15	65(能量)	4.33	$T = (148.5 \pm 0.5)^{\circ}C$
	ooe	0 ^b	5×10^8	10	12.5	60(能量)	4.34	$T = 149^{\circ}C$
	ooe	0 ^b	5.2×10^8	10	11	32	4.35	$T = 151^{\circ}C$
	ooe	12 ^b	$(5 \sim 8) \times 10^8$	9	14	70(能量)	4.36	
	ooe	12 ^b	1.4×10^8	8	17	55~60 (能量)	4.7	
	ooe	0 ^b	2.54×10^8	—	4	12	4.37	16层(张)LBO($L = 16 \times 242 \mu m = 4 mm$)

a: 钕硅酸盐玻璃激光器($\lambda = 1.062 \mu m$); b: $\phi_{pm} =$

在纳秒的范围内,当重复频率相当低(几十赫兹)时,所采用的主要是由CDA和DCDA晶体制作的器件。它们有 90° 相位匹配,因此,SHG的角度带宽很大而且双折射角等于零。这样就能将基频光聚焦到晶体中去。在CDA和DCDA晶体中功率转换效率分别为57%和45%^[4,8]。用一台50 MW、脉冲宽度为12 ns的Nd:YAG激光器作为基频光源,对于共线直径为5 mm的泵浦光束(1.1 mrad发散角)实现SHG,二次谐波功率为20~30 MW,脉冲为10 ns。由于在 $\theta = 90^{\circ}$ 时角宽度很大($L\Delta\theta = 50 cm \cdot mrad$),CDA和DCDA晶体特别适合于多模脉冲钕激光的倍频。和CDA及DCDA相反, $LiIO_3$ 不需要热稳定,然而 $LiIO_3$ 有一个显著的缺点,即有一个大的双折射以及小的角度带宽。这就导致了孔径效应:由于异常光能量“走离”造成转换效率的下降(2.12节)。为了解决这一问题,设计了一个特殊的SHG构型,用了几块(两块或更多)依次排列具有相同切型的晶体^[4,38]。在这一构型中,偶数晶体对于奇数晶体在 k 矢量方向上相差 180° 。这样,在奇数晶体中的异常光的能量走离可以由偶数晶体中的能量走离进行补偿。每块晶体的长度必须小于孔径长度 L_a ,并由下式确定:

$$L_s = d/\rho \quad (4.1)$$

其中 d 是入射光束的孔径, ρ 是走离(双折射)角。

LiNbO_3 晶体也用于制作上述用途的器件, 但是它们也有一些缺点, 如光折变效应(“光损伤”或者在激光作用下折射率的改变), 它们也需要热稳定。为了很好地降低光折变效应, 采用了掺 MgO 的 LiNbO_3 (MgO 浓度 $> 4.5\%$)^[4.39~41], 或从同成分熔体中生长的 LiNbO_3 晶体^[4.42], 这能保证转换效率高达 50%。表 4.2 给出在这些晶体中以及在 LiIO_3 、DCDA、DKDP 和 KTP 晶体中对 Nd:YAG 激光辐射($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $E = 100 \text{ mJ}$, $\tau_p = 14 \text{ ns}$, $f = 20 \text{ Hz}$, $I_0 = 35 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$) SHG 的数据。应提及的是将 LiNbO_3 晶体加热超过 170°C 可能消除光折变效应。

在 Nd:YAG 激光辐射的倍频晶体中, 磷酸钛氧钾(KTiOPO_4 或 KTP)是有特殊意义的。它具有很大的非线性($d_{31} = 6.5 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $d_{32} = 5 \times 10^{-12} \text{ m/V}$), 对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的 SHG, 这种晶体具有大的角度带宽($\Delta\theta_L = 15 \sim 68 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$)和温度带宽($\Delta T_L = 20 \sim 25^\circ\text{C} \cdot \text{cm}$)。这超过了 KDP 和 DKDP 的类似参数, 并比其他晶体差不多要大一个数量级。此外, 这种晶体不潮解, 并有相当高的表面损伤阈值。

KDP 晶体在 $\phi = 23^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的方向具有最高的 d_{eff} 值, 因为其角度带宽达极大值而双折射角则最小, 这个方向比其他方向更为优越。实验数据是用 $\Delta\phi = 32' \pm 5'$ 和 $T = 20^\circ\text{C}$ 对长度为 1 cm 的晶体时获得的^[4.24]。表 4.1 列出了 KTP 晶体对 Nd:YAG 激光倍频的结果。在所有实例中采用的都是在 XY 平面的 eoe 类型相互作用。在由 Moody 等人^[4.23]用 Nd:YAG 激光器所做的产生 $(175 \pm 25) \text{ ps}$ 的脉冲序列实验中, 采用了一块 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 KTP 晶体, 激光聚焦到晶体中, 光斑点直径为 $390 \mu\text{m}$, 二次谐波的转换效率达到了 55%。Driscoll 等人^[4.22]详细研究了在单模及多模方式下运转的 Nd:YAG 激光辐射对于不同长度 KTP 晶体($4 \sim 9 \text{ mm}$)的 SHG。在 9 mm 长的晶体中, 由于二次谐波辐射回流到基频辐射, 得到的转换效率低。在两次通过构型中在较短的晶体($L = 5.1 \text{ mm}$)中实现了最高为 60% 的能量转换效率。

在铌酸钡钠晶体 $1.064 \mu\text{m}$ 辐射的倍频中, 对于在 YZ 平面($\phi = 90^\circ$, d_{31})上的相互作用, 相位匹配角 $\theta_{\text{m}} = 73^\circ 45'$, 当在 XZ 平面($\phi = 0^\circ$, $T = 25^\circ\text{C}$, d_{32})上相互作用时 $\theta_{\text{m}} = 75^\circ 26'$; 在 $\theta = 90^\circ$ 以及 $\phi = 90^\circ$ 时, 相位匹配温度 $T = 101^\circ\text{C}$; 在 $\theta = 90^\circ$ 和 $\phi = 0^\circ$ 时, $T = 89^\circ\text{C}$ ^[4.43]。注意, 对于不同晶体, θ 和 T 会发生变化, 分别为对 θ , 变化范围为 $73^\circ \sim 75^\circ$ 以及 $75^\circ \sim 77^\circ$, 而对 T , 变化

• 译者注: 原文为“ 170° ”, 应为“ 170°C ”。

范围为 90 ~ 110 °C 以及 80 ~ 100 °C。由于这一晶体有很大的非线性系数，常用于 cw 腔内 SHG 构型。

由于 BBO 和 LBO 晶体具有大的透过范围、高的抗光伤阈值和非线性，它们对于 Nd:YAG 激光器的谐波发生是非常有用的。对于 LBO 晶体，还有大的接收角、小的走离角，并可能在非临界相位匹配条件下使用等优点^[4.36,44a,b]。两种晶体都不潮解，机械强度高。将这两种晶体用于调 Q 和锁模 Nd:YAG 激光器，其二次谐波转换效率可达到 60% ~ 70% (表 4.1)。在 BBO 晶体中 Nd:YAG 激光的非共线 SHG 和 THG 的研究工作由 Bhar 等人^[4.45,46]进行。

表 4.2 不同晶体中 Nd:YAG 激光辐射的二次谐波发生

非线性晶体	L/mm	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$E(0.53\text{ }\mu\text{m})/\text{mJ}$	$P(0.53\text{ }\mu\text{m})/\text{W}$	$\eta/\%$
LiNbO ₃ 同成分熔体生长	9	90	53	1.07	50.9
	30	90	52	1.04	49.5
LiIO ₃	19	29	29	0.58	27.6
DCDA	37	90	48	0.96	47.6
DKDP	50	53	19	0.39	19.5
KTP	5	24(ϕ_{pm})	9.6	0.19	42.6
LiNbO ₃ :MgO	4	90	23	0.46	23.0
LiNbO ₃ :MgO	9	90	31	0.63	35.2

4.1.2 在有机晶体中 1.064 μm 辐射的二次谐波发生

有机晶体具有与被广泛应用的 KDP 类、铌酸盐和甲酸盐等晶体相比的参数。它们的制备成本低，非线性极化率高，其双折射足以在频率转换器件中使用。有的晶体损伤阈值相当高，例如尿素在纳秒泵浦下有几个 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的阈值，这超过了 LiNbO₃ 和 LiIO₃ 的破坏阈值。然而有机单晶有限制其在非线性光学中应用的缺点：它们具有吸湿性，并且极软，因此其表面必须要镀保护膜。

对于 1.064 μm 辐射的 SHG 效率的测量是利用多晶粉末样品进行的^[4.47-49]。具旋光性的氨基酸(色氨酸、天门冬酰胺和其他)^[4.49]、糖(蔗糖、麦芽糖、果糖、半乳糖、乳糖)^[4.48]和其他有机物都已被人们研究过。到现在为止，已经在下列有机单晶中实现了 Nd:YAG 激光辐射的 SHG：蔗糖($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$)，3-甲基-4-硝基吡啶-1-氧化物(POM)，甲基-(2,4-二硝基苯)-氨基-2-丙酮(MAP)，间硝基苯胺(mNA)^①，2-甲基-4硝基苯胺(MNA^{*})，间-双硝基苯(MDNB)，2-环氨基-5-硝基吡啶(COANP)，氰化左旋磷

① 译者注：此处 M 为间位(meta)之意，按规定应为小写。

酸精氨酸 (DLAP), 2-(N,N-二甲氨基)-3-乙酰胺硝基苯 (DAN)^①, N-(4-硝基苯)-甲基氨丙酮腈 (NPAN), 4-二水合硝基酚钠盐 (NPNa), 氟化-4-二水合硝基酚钠 (DNPNa)^②, L-N-(5-硝基-2-吡啶基)亮氨酸 (NPLO) 和 3-甲氧基-4-羟基-苯甲醛 (MHBA)。在 L-PCA (L-吡咯烷酮-2-羧酸) 晶体中, 对二次谐波倍频获得 Nd:YAG 四次谐波 (表 4.3)。由于这些晶体的非线性很大, 所以都获得了高的转换效率。例如, 对于仅仅 1 mm 长的 MAP 晶体就获得了 30% 的转换效率^[4.53]。对于 mNA 晶体, 共线转换效率为 15%; 而对于 XY 面非共线的 SHG (NCSHG), 转换效率达到 85%^[4.54,55]。在第二种情况下, 有效非线性 ($d_{\text{eff}} = d_{31}$) 和角度带宽都达到了极大值。注意除尿素已经成功地用于染料激光器辐射的 SHG 以及光学参量振荡以外, mNA 晶体在非线性光学中也有广泛的应用。利用这些晶体在 0.5 ~ 1.5 μm 波段范围中可能实现 SFG 和 DFG。

表 4.3 有机晶体中 Nd:YAG 激光辐射的二次谐波发生

晶体	相互作用类型	d_{eff}/d_{36} (KDP)	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	转换效率/%	参考文献	备注
蔗糖	oeo	0.2*	90	60.5	—	4.50	
	ooo	0.2*	90	33.7	—	4.50	
	oeo	0.2*	15.8	0	—	4.50	
POM	eeo	21.8	35.7	90	—	4.51	
	oeo	9.9	12.8	0	—	4.51	
	eeo	13.6	18.1 (1.32 μm)	90	50	4.52	$L = 7 \text{ mm}$, $\tau_p = 160 \text{ ps}$
	eeo	13.1	17.4 (1.34 μm)	90	—	4.52	
	oeo	38.3	2.2	0	30	4.53	$L = 1 \text{ mm}$
MAP	oeo	37.7	11	90	40	4.53	$L = 1.7 \text{ mm}$
	ooo	37.7	90	55	15	4.54	$L = 2.5 \text{ mm}$, $\Delta\theta = 2.9 \text{ mrad}$
mNA	eeo	24.1	44	90	—	4.54	
	ooo	11.5	90	14.5	10	4.54	NCSHG 在 XY 平面, $L = 1 \text{ mm}$
	ooo	6.8	90	8.5	85	4.55	NCSHG 在 XY 平面, $L = 3 \text{ mm}$
	ooo	6.8	90	8.5	85	4.55	NCSHG 在 XY 平面, $L = 3 \text{ mm}$

① 译者注: 此处为 2-(N,N-dimethylamino)-5-ninoacetanilide, 而本书条目 3.4.17 将其记为 4-(N,N-dimethylamino)-5-acetamidonitrobenzen, 两者为同一化合物, 按化学命名法, 以 2-(N,N-二甲氨基)-3-乙酰胺硝基苯更为适当。

② 译者注: 原文为: “其氟化同系物”, 此处译为正式化合物名称。

晶体	相互作用类型	d_{eff}/d_{36} (KDP)	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$\phi_{\text{pm}}/(^{\circ})$	转换效率/%	参考文献	备注
MNA [*]	—	65.7	—	—	—	4.56	
MDNB	ooe	3.6	35.3	0	0.1~0.5	4.57	$L = 2 \sim 4 \text{ mm}$, $I_s = 50 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$
COANP	oeo	30.9	26.4	0	3.6	4.58	$L = 0.9 \text{ mm}$, $I_s = 1.3 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\tau_p = 250 \text{ ns}$
DLAP	ooe	0.95	90	22	—	4.59	
	Ⅱ类	—	76	42	—	4.59	
DAN	—	—	40	0	20	4.60	$L = 2 \text{ mm}$
NPAN	eeo	129	90	8.5	9	4.61	$L = 3 \text{ mm}$, cw 方式
NPNa	Ⅰ类	11.5	—	—	5	4.62	$L = 1 \text{ mm}$, 激光二极管泵浦 Nd:YVO ₄ 激光器
DNPNa	—	—	—	—	50	4.62	$L = 1.5 \text{ mm}$, 激光二极管泵浦 Nd:YVO ₄ 激光器
NPLO	eeo	85	51.7	0	—	4.63	
	oeo	6.9	33.0	—	—	4.63	
MHBA	—	30	—	—	59	4.64	$L = 3 \text{ mm}$
L-PCA Ⅱ类	0.64	90	42	0.6	4.65	SHG 532 → 266 nm, $L = 6.9 \text{ mm}$, $E = 14.4 \mu\text{J}$	

a: $d_{\text{eff}}/d_{\text{eff}}(\text{ADP})$ 的值已给出。

4.1.3 腔内 SHG

cw 泵浦的激光器(包括 cw 激光器)是以输出镜的低透过系数(百分之几)为特征的。其结果是输出的功率比在腔内的辐射功率要低得多。因为二次谐波的转换效率与基频光的功率强烈相关,因此将非线性晶体放入腔内是非常合理的(腔内二次谐波发生,即 ICSHG)。在这里,输出镜必须对于基频波有很高的反射率,而对二次谐波率的光有很高的透射率。为了提高转换效率,基波辐射可以聚焦到非线性光学晶体中去。

为了获得最高的 ICSHG 转换效率,必须实现最优化 ICSHG 方式或 100% 转换方式。最优化 ICSHG 方式表现出以下特点:一台激光器的腔镜对于基频辐射完全不透过,其二次谐波频率的输出功率等于基波的功率,此时基波的功率是指:腔内的非线性晶体是失配的,并且其激光器输出镜对于基频有最优化的透射率^[4.38]。注意:100% 转换方式并非指基频波 100% 转换为倍频波。在

实践中,对于脉冲激光器来说,ICSHG 效率不超过 20%~30%,而对于连续激光器不超过 5%~10%^[4.38]。

对于 Nd:YAG 激光器 1.064 μm 腔内 SHG, LiIO_3 和 LiNbO_3 晶体通常用于调 Q 和锁模方式,而铌酸钡钠用于连续方式。最近, KTP 晶体成功地用于这一目的。表 4.4 给出了有腔内二次谐波发生的 Nd:YAG 激光器的特点。以 cw 和调 Q 两种形式都实现了 100% 转换。输出激光的功率达到 28 W^[4.77]。根据 Lavrovskaya 等人^[4.24]的实验,当 KTP 晶体放置在激光器腔内的另一个腔中时,在 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 处的平均功率达到 7.1 W。由于 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 辐射吸收,导致晶体被加热到很高的温度(高达 100 $^{\circ}\text{C}$);然而,经过几小时的辐照并没有观察到损伤。采用 KTP 晶体,对于以 cw 和锁模两种方式运转的激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器,所获得的输出功率可高达 3 W^[4.79]。

对于声光调 Q 关($f = 5 \text{ kHz}$)的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ 激光辐射($\lambda = 1.0796 \mu\text{m}$) ICSHG,使用了 4.4 mm 长的 KTP 晶体^[4.83],在 $T = (153 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的温度下实现了 II 类 90 $^{\circ}$ 相位匹配;晶体表面镀了 $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$ 的减反射膜层, $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$ 的平均二次谐波功率为 15 W。

除了采用非线性晶体在激光腔内 ICSHG 之外,倍频也广泛采用外共振腔^[4.84]。这种方法的主要优点在于可以独立地优化激光振荡器和频率转换器,特别的是,这就允许我们以一个单轴的模式来产生辐射,结果可以获得单一频率的二次谐波辐射。外共振腔 SHG 特别适合于低功率二极管泵浦的钕激光器(表 4.5)和掺 Ti 蓝宝石激光器(见后面内容)。转换为二次谐波的效率可高达 85%^[4.89],输出功率可高达 6.5 W^[4.90],所用 cw 钕激光器以 KTP 和 LBO 晶体进行倍频。

表 4.4 Nd:YAG 激光辐射的腔内 SHG (1.064 \rightarrow 0.532 μm)

晶体	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	L/mm	Nd:YAG 激光器运转模式	$P_{2\omega}/\text{W}$	$\eta/\%$	参考文献
LiIO_3	29	—	Q 开关	0.3	100	4.66
	29	20	cw	4	40(0.12 $^{\circ}$)	4.67
	29	—	连续泵浦,锁模, $\tau = 800 \text{ ps}$	5	40(0.13 $^{\circ}$)	4.68
	29	15	$\tau = 180 \mu\text{s}$, $f = 50 \text{ Hz}$	100(峰值)	0.06 $^{\circ}$	4.69
LiNbO_3	90	—	连续泵浦, Q 开关	0.31	100	4.70
	90	1	$\tau = 60 \text{ ns}$, $f = 400 \text{ Hz}$	100(峰值)	—	4.71
铌酸钡钠	90	3	cw	1.1	100	4.72
	90	3	cw	0.3	—	4.73
	90	—	连续泵浦, Q 开关	0.016	100	4.74
	90	5	—	0.3~0.5	—	4.75
KTP	26	3.5	Q 开关	5.6	—	4.76
	23	3	声光调制, $f = 9 \text{ kHz}$	7.1	—	4.24
	—	4.6	声光调制, $f = 4 \sim 25 \text{ kHz}$	28	54(0.6 $^{\circ}$)	4.77

续表

晶体	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	L/mm	Nd:YAG 激光器运转模式	$P_{2\omega}/\text{W}$	$\eta/\%$	参考文献
KNbO ₃	—	—	激光二极管泵浦 cw Nd:YAG 激光器	0.03 ~ 0.16 ^a		4.78
	—	15	激光二极管泵浦 cw 锁模 Nd: YAG 激光器 $\tau = 120 \text{ ps}$, $f = 160 \text{ MHz}$		56(1.3 [*])	4.79
	—	15	激光二极管泵浦 cw Nd:YAG 激光器	2.8	47(0.94 [*])	4.79
	70	5	cw	0.15	60	4.80
	90	5	cw	0.366	90	4.80
	60	3.7	激光二极管泵浦 cw Nd:YAG 激光器 $\lambda = 946 \text{ nm}$	0.003 1	0.74 [*]	4.81
	0	6.2	激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器	0.002	1 [*]	4.82

a: 转换效率是根据泵浦的闪光灯或二极管激光器的能量计算的。

表 4.5 Nd:YAG 激光辐射外共振腔的二次谐波发生 (1.064→0.53 μm)

晶体	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$T_{pm}/^{\circ}\text{C}$	L/mm	激光运转模式	$P_{2\omega}/\text{W}$	$\eta/\%$	参考文献
LiNbO ₃ :MgO	90	—	12.5	激光二极管泵浦, cw	0.03	56	4.85
	90	110	12	激光二极管泵浦, cw 单片环状频率转换器件	0.2	65	4.86
	90	107	—	激光二极管泵浦, cw 单片环状频率转换器件	0.005	50	4.87
	90	233.7	10	注入式锁模 Nd:YAG 激光器件	1.6	69	4.88
KTP	90,	63	10	cw YAlO ₃ : Nd 激光器 ($\lambda = 1.08 \mu\text{m}$)	0.6	85	4.89
LBO	90(θ), 0(ϕ)	149.5	6	注入式锁模 cw Nd:YAG 激光器件	6.5	36	4.90
	90	167	12	激光二极管泵浦锁模 Nd:YLF 激光器 ($\lambda = 1.047 \mu\text{m}$, $\tau = 12 \text{ ps}$, $f = 225 \text{ MHz}$)	0.75	54	4.91

a: 富铯 LiNbO₃。

4.1.4 三次谐波发生

Nd:YAG 激光辐射的三次谐波生成 (THG) 已通过一次和二次谐波的混频在

以下晶体中得到了实现: KDP、DKDP、RDA、RDP、LiIO₃、BBO、LBO、LiCOOH·H₂O(LFM)和NaCOOH(表4.6)。因为在倍频后基波和二次谐波的偏振矢量是正交的,具有Ⅱ类相位匹配的晶体很容易用于THG。特别是KDP类晶体满足这一条件,因此,它们在THG中得到广泛应用。在RDA和RDP晶体中,只可能是ooe类型THG。因此,还要寻求其他可以实现一次和二次谐波偏振矢量之间一致的光学元件。例如采用4.35 mm厚的晶态石英片,用于波偏振的旋转^[4.94]。LiIO₃晶体允许实现Ⅰ类相位匹配 $d_{\text{eff}} = d_{31} \sin \theta$ 和Ⅱ类相位匹配, $d_{\text{eff}} = (1/2)d_{14} \sin 2\theta$ 。然而,因为 d_{14} 小到可忽略不计,在实际上从来不用Ⅱ类相互作用的LiIO₃晶体。LiIO₃晶体用于Nd:YAG激光辐射Ⅰ类和Ⅱ类THG的三次谐波功率分别为22 kW和0.005 kW^[4.96]。还有,在RDA和RDP晶体中实现了Nd:YAG激光辐射的调Q THG^[4.12,94]。在DCDA晶体中,50 MW的1.064 μm激光(其脉冲宽度为12 ns)实现了倍频,其二次谐波($\lambda = 532$ nm)功率为18~22 MW,脉宽为10 ns。用RDA和RDP晶体得到的三次谐波功率($\lambda = 355$ nm)分别为6 MW和10.5 MW。Wu等人在调Q Nd:YAG激光器中采用LBO晶体实现了高效THG,其效率 $\eta = 60\%$ ^[4.98]。LBO晶体具有光学质量高、走离角小等优点,其有效非线性系数是KDP晶体的三倍。

表4.6 Nd:YAG激光辐射的三次谐波发生(1.064→0.355 μm)

晶体	相互 作用 类型	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	τ_p/ns	L/mm	转换效 率/%	参考 文献	备注
KDP	oeo	58	0.15	12	32(能量)	4.1	$I_0 = 1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	oeo ^a	58	25	—	6(能量)	4.92	$P = 40 \text{ MW}$
	oeo	58	0.05	—	10(能量)	4.93	
DKDP	oeo	59.5	8	20	17(能量)	4.7	$I_0 = 0.25 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
RDA	oeo	66.2	8	14.8	12(功率)	4.12	$\Delta\theta L = 1.0 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$
RDP	oeo	61.2	—	15.3	44(功率)	4.13	$I_0 = 0.2 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	oeo	61.2	8	15.3	21(功率)	4.94	
LiIO ₃	oeo	47	0.8	8	0.7(功率)	4.95	$P_{av} = 4.5 \text{ mW}$
	oeo	47.5	—	4	4(功率)	4.96	
	oeo	61.7	—	4.65	10 ⁻³ (功率)	4.96	
BBO	oeo	64	8	5.5	23(能量)	4.30	$I_0 = 0.25 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	oeo	31.3	8	7.5	20(能量)	4.7	$I_0 = 0.19 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	oeo	31.3	9	6	35(量子)	4.97	腔内THG, $P = 0.2 \text{ W}$
LBO	Ⅰ类	38.1(ϕ_{pm})	8	12.2	22(能量)	4.7	$I_0 = 0.19 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	Ⅱ类	41	8	12.6	60(能量)	4.98	
LFM	oeo	8.2(ϕ_{pm})	12	—	15	4.99	$P = 0.6 \text{ MW}$, XY平面
NaCOOH	oeo	2.2(ϕ_{pm})	8	15	46(功率)	4.100	XY平面, $P_{av} = 1.9 \text{ W}$, $P = 23 \text{ MW}$, $\Delta\phi = 8.7 \text{ mrad}$

a: 掺钕硅酸盐玻璃激光器。

在 LiIO_3 晶体中采用 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ 纳秒激光辐射 ($\lambda = 1.079 \mu\text{m}$, $\tau_p = 15 \text{ ns}$) 实现了直接 THG^[4, 101]。oee-e 类型转换的相位匹配角是 82° , 其转换效率 η 达到了 0.2%, 基波强度 $I_0 = 50 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 晶体 ($\theta_{\text{oee}} = 47.4^\circ$, $\phi = 90^\circ$, $L = 0.72 \text{ cm}$) 中实现了掺 Nd 磷酸盐玻璃激光辐射 ($\lambda = 1.054 \mu\text{m}$, $\tau_p = 5 \text{ ps}$) 中实现了直接 THG^[4, 102]。在 $I_0 = 50 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时转换效率 $\eta = 0.8\%$; $\chi_{\text{eff}}^3 = (6.4 \pm 2.8) \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 。

4.1.5 四次谐波发生

Nd:YAG 激光辐射的四次谐波发生 (FOHG) 可以在 KDP、DKDP、ADP、KB5、LFM、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 和 $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 等晶体中实现 ($\lambda = 0.266 \text{ nm}$) (表 4.7)。DKDP 和 ADP 晶体在 90° 相位匹配处运转, KDP 和 BBO 晶体最适用于这一目的。它们具有足够大的非线性系数, 在四倍频处的线性系数和双光子吸收小, 并有高的抗光伤阈值。在 4 mm 长的 ADP 晶体中, 转换为 $\lambda = 266 \text{ nm}$ 辐射的效率达到了 85%。

表 4.7 Nd:YAG 激光辐射的四次谐波发生 ($1.064 \rightarrow 0.266 \mu\text{m}$)

晶体	相互 作用 类型	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$I_0/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	τ_p/ns	L/mm	532 nm 转换效 率/%	参考 文献	备注
KDP	oee	78	—	7	—	30 ~ 35	4. 103	
DKDP	oee	90	2×10^7	—	40	40	4. 5	$T = 40.6 \text{ }^\circ\text{C}$
	oee	90	8×10^9	0.03	4	75	4. 104	
	oee	90	5×10^7	25	20	40	4. 105	$T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 2.5 \text{ MW}$
	oee	90	—	600	50	3.4	4. 106	$T = 49.8 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{av}} = 0.5 \text{ W}$
ADP	oee	90	8×10^9	0.03	4	85	4. 104	
	oee	90	—	8	30	15*	4. 107	$T = 51.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{av}} = 5 \text{ W}$
KB5	eeo	47.2 (ϕ_{pm})	—	0.03	10	6*	4. 108	$P = 60 \text{ MW}$
LFM	oee	—	10^6	—	15	6 ~ 7	4. 17	
BBO	oee	48	—	5	—	16	4. 109	$E = 80 \text{ mJ}$
	oee	48	—	8	5	18	4. 30	
	oee	48	1.6×10^8	1	5	52	4. 30	

续表

晶体	相互 作用 类型	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	$I_0/(W \cdot cm^{-2})$	τ_p/ns	L/mm	532 nm 转换效 率/%	参考 文献	备注
	ooe	57.8	—	8×10^4	6.6	0.17	4.4	Nd:YAG 激光 器, $T=253 K$, $\lambda=946 nm$
$BeSO_4 \cdot 4H_2O$	ooe	81.6	2.2×10^8	10	10	30	4.110	$P=1.7 W$

a: 1.064 μm 的转换效率。

4.1.6 五次谐波发生

Nd:YAG 和掺铈硅酸盐玻璃激光辐射的五次谐波发生(FIHG)已在 KDP 和 ADP 晶体中(通过冷却)以及在室温下采用 $\beta-BaB_2O_4$ 、KB5、尿素和 $CaCO_3$ 晶体得以实现(表 4.8)。在高频激光(120 kHz)中纳秒辐射的平均功率达到 2 ~ 3 mW^[4.112,113], 在 10 Hz 下达到 5 ~ 7 mW^[4.114,116]。在 KB5 晶体中, $\lambda = 212.8 nm$ 的辐射, 当 $\tau_p = 30 ps$ 时峰值功率为 11 MW^[4.108]。一次和四次谐波辐射在 XY 平面传播并在该面内偏振; 五次谐波辐射沿 Z 轴偏振(eeo 相互作用)。

表 4.8 Nd:YAG 和掺铈硅酸盐玻璃激光辐射的五次谐波

晶体	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	相互作用 用类型	晶体温 度/ $^{\circ}C$	输出参数	τ_p/ns	参考 文献
KDP	90	ooe ^a	-70	$10^{-4} J$	—	4.111
	90	ooe	-35	$P_{av} = 2.6 mW$ $f = 120 kHz$	30	4.112
	90	ooe	-40	$P_{av} = 2 mW$ $f = 6 kHz$	30	4.113
ADP	90	ooe	-40	$P_{av} = 5 \sim 7 mW$ $f = 10 Hz$	10	4.114
	90	ooe	-55	$E = 0.1 mJ$ $f = 10 Hz$	10	4.115
KB5	$53 \pm 1 (\phi)$	eeo	20	$E = 0.7 mJ$	6	4.116
	$53 \pm 1 (\phi)$	eeo	20	$E = 0.1 mJ$	0.02	4.117
	$52.1 (\phi)$	eeo	20	$E = 0.3 mJ$	0.03	4.108
尿素	72	eeo	20	$E = 30 mJ$	10	4.118
$CaCO_3$	51.5	oooe ^a	20	$E = 0.6 \mu J$	0.003	4.119
$\beta-BaB_2O_4$	55 ± 1	ooe	20	—	—	4.120
	51.1	ooe	20	—	10	4.121
	69.3	ooe ^b	20	—	10	4.121
	55	ooe	20	$E = 20 mJ$	5	4.30, 109
	55	ooe	20	$E = 5 mJ$	1	4.30

a: 掺铈硅酸盐玻璃激光器; b: $2\omega + 3\omega = 5\omega$ 。

不像前面的例子中那样,基频辐射是和四次谐波混频,在 CaCO_3 晶体中,为实现 FIHG,所用为 oooo 类型的四光子参量相互作用: $\omega + \omega + 3\omega = 5\omega$, 即两个 $1.06 \mu\text{m}$ 光子和一个 $0.353 \mu\text{m}$ 光子相混合^[4.119]。在这里 FIHG 是通过立方非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 实现的, $\chi^{(3)}$ 的张量分量为 $\chi_{1111}^{(3)} = 2.5 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$), $\chi_{3333}^{(3)} = 1.4 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$) 以及 $\chi_{3222}^{(3)} = 0.06 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ($\lambda = 0.69 \mu\text{m}$)。一个包含 20 个脉冲的 Nd 激光辐射串序列用作泵浦源 ($\tau = 3 \text{ ps}$)。 CaCO_3 晶体长为 0.5 cm , 其在 $\lambda = 212 \text{ nm}$ 处的线性吸收相当于 $\alpha = 3.4 \text{ cm}^{-1}$ 。

在 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 晶体中实现的 Nd:YAG 激光辐射 FIHG^[4.30,109,120,121] 是通过一次和四次谐波混频 ($\theta_{\text{ooe}} = 51^\circ \sim 55^\circ, \theta_{\text{ooo}} = 57.2^\circ$) 实现的; 通过三次和二次谐波辐射混频 ($\theta_{\text{ooo}} = 69.3^\circ$) 也可实现。在一块 6.4 mm 长的 BBO 晶体中对锁模和调 Q Nd:YAG 激光器实现五次谐波的总转换效率分别为 15% 和 4%^[4.30]。

尿素晶体也适合于调 Q Nd:YAG 激光器的 FIHG, 因为其具有高的非线性系数 [d_{36} (尿素) $= 3d_{36}$ (KDP)], 在 UV 区有高的透明度 (至 200 nm), 并有高的破坏阈值 ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 处为 $5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$)。例如, 用一块 5 mm 长的尿素晶体, 获得 $\lambda = 212.8 \text{ nm}$ 的辐射, 其能量可能达到 30 mJ ^[4.118]。

有三种不同方法可以实现 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ 激光辐射 ($\lambda = 1.08 \mu\text{m}, \tau_p = 15 \text{ ps}$) 的五次谐波发生 ($\lambda = 216 \text{ nm}$)^[4.122]。首先, 在 KB5 中的 FIHG, $2\omega + 3\omega = 5\omega$, 相互作用是 eeo 类型, $\theta = 90^\circ, \phi = 80^\circ$ 。第二种, 在 KB5 中的 FIHG, $\omega + 4\omega = 5\omega$, 相互作用是 eeo 类型, $\theta = 90^\circ$ 以及 $\phi = 50.4^\circ$ 。第三种, 在 KDP 单晶的 FIHG, $\omega + 4\omega = 5\omega$, 相互作用是 ooe 类型, $\theta = 84^\circ$ 。五次谐波能量分别相当于 40、50 和 $450 \mu\text{J}$ 。在室温下 KDP 晶体满足相位匹配条件^[4.123], 同时具有较高的非线性和较大的角度带宽, 使其在第三种情况中可能获得高的输出能量。

4.1.7 1.318 μm 辐射的谐波发生

在一些文章中, 研究了调 Q Nd:YAG 激光器基频 $\lambda = 1.318 \mu\text{m}$ 的谐波发生。采用 LiNbO_3 和 KDP 晶体较高的 (直至五次) 谐波, 实现了具有峰值功率为 $0.2 \sim 85 \text{ kW}$ 的谐波发生 (表 4.9)^[4.124]。在所有的情况下, 都采用了 ooe 相互作用。研究人员在五硼酸钾晶体中通过倍频三次谐波得到了 $\lambda = 219.3 \text{ nm}$ 的六次谐波^[4.101]。基频波是沿 XY(ab) 面传播的, 所用为 eeo 相互作用。光谱和角度带宽分别相应于 1.2 nm 和 1.5 mrad 。 LiNbO_3 是最适于倍频 $1.318 \mu\text{m}$ 的^[4.127], 例如, 在泵浦强度 $I_0 = 100 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 对于 90° 相位匹配, 二次谐波的能量效率达到 48%。如不将基频辐射聚焦到晶体中, 对一块 20 mm 长的晶体, 效率就降到 21%^[4.127]。采用 LiIO_3 晶体实现了 $1.318 \mu\text{m}$ 基波辐射的

ICSHG 的 100% 转换的方式, 输出的功率为 1 W^[4.126]。Lin 等人^[4.128]研究了用于 Nd:YAG(1.32 μm)、Nd:YLF(1.31 μm)和 Nd:YAP(1.34 μm)激光器的倍频辐射。由于有效非线性系数高, 角度带宽大, LBO 晶体被人们认为非常适于接近于 1.3 μm 辐射的 SHG。

表 4.9 Nd:YAG 激光器 $\lambda = 1.318 \text{ nm}$ 辐射的谐波发生

谐波次数	λ/nm	晶体	$\theta_{\text{inc}}/(^{\circ})$	L/mm	τ_p/ns	输出参数	能量转换效率/%	参考文献
2	659.4	LiNbO ₃	44.67	16	40	85 kW	10	4.124
3	439.4	KDP	42.05	30	40	3.4 kW	0.4	4.124
4	329.7	KDP	53.47	30	40	6 kW	0.6	4.124
5 ^a	263.8	KDP	55.33	30	30	0.2 kW	0.02	4.124
6 ^b	219.3	KB5	78(eeo)	15	45	3 kW	0.5	4.101
2	659.4	DCDA	70.38	13.5	25	1.4 MW	40	4.125
2 ^c	659.4	LiIO ₃	22	10	30	$P_{\text{av}} = 1 \text{ W}$	100	4.126
2	659.4	LiNbO ₃	90($T = 300^{\circ}\text{C}$)	19	50	60 mJ	48	4.127
2	659.4	LiNbO ₃	90	20	50	10 mJ	21	4.127
3	439.6	KDP	42.05($T = 300^{\circ}\text{C}$)	40	50	1.4 mJ	3	4.127
3	439.6	LiIO ₃	—	8	50	1.4 mJ	1.2	4.127

a: $\omega + 4\omega = 5\omega$; b: $3\omega + 3\omega = 6\omega$; c: 腔内 SHG。

4.2 高功率大口径钕玻璃激光辐射的谐波发生

近来, 在高功率钕玻璃激光辐射的谐波发生方面获得了显著的进展。特别是这样的激光器用在热核聚变的实验中时, 只能使用 KDP 类晶体制作频率转换器件。它们有以下几个优点: 对于亚纳秒和皮秒激光辐射有很高的破坏阈值 ($> 10 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$), 在 0.27、0.35、0.53 和 1.06 μm 处线性双光子吸收都很低, 对于皮秒级连续波以及 SRS 的阈值高 ($> 100 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$), 没有光学损伤, 可能生长大尺寸的单晶(几十厘米), 并具有高的光学质量。同时, 对于温度变化, 其双折射色散也很小, 因此不需要热稳定装置。到目前为止最大的转换效率是: 对于 $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ 的二次谐波可高达 90%^[4.129], 对于 $\lambda = 0.36 \mu\text{m}$ 的三次谐波达到 80%~81%^[4.129,130]; 对于 $\lambda = 0.27 \mu\text{m}$ 的四次谐波达到 51% (晶体表面镀减反射膜后 $\eta = 70\%$)^[4.131]; 对于 $\lambda = 0.264 \mu\text{m}$ 的四次谐波达 92% (以二次谐波计)^[4.132], 对于 $\lambda = 0.211 \mu\text{m}$ 的五次谐波达到 19%^[4.132] (表 4.10)。

表 4.10 高功率 Nd 玻璃激光辐射在 KDP 晶体中的谐波发生

基频波	二次谐波				三次和四次谐波				参考 文献	备注
	$\lambda/\mu\text{m}$	$I_0/(10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	τ_p/ns	$\lambda/\mu\text{m}$	相互作用 用类型	$\eta/\%$	晶体长 度/mm	E/J		
1.054 2.5	0.14	0.53		0.35	eoe	80	12	11	4.130	在 1.054 μm 偏振矢量和 o 光之间的角度 α 为 35°
1.054 3.5	0.7	0.53		0.35	eoe	80	12	30	4.130	
1.064 2.5	0.1	0.532		0.266	ooe	30	7	4	4.133	$\tau_{40} = 50 \text{ ps}$
1.064 9.5	0.7	0.532		0.355	ooe	55	10	41	4.131	
1.064 2.0	0.7	0.532		0.266	ooe	51	10	50	4.131	
1.064 1.2	0.7	0.532		0.266	ooe	51	10	50	4.134	
1.06 0.2	25	0.53		0.35	ooe	80	40	60	4.129	
1.06 2.7	0.5	0.53		0.35	ooe	90	30	10~20	4.129	
1.06 2.7	0.5	0.53		0.35	ooe	67	18	—	4.129	1.06 μm 偏振矢量和 o 光之间的夹角 α 为 35.2°
1.053 1.5	0.6	0.53		0.26	ooe	46	7	53	4.135	
1.054 5	0.5	0.53		0.264	ooe	92*	10	—	4.132	

* 0.527 μm 的转换效率。

铍玻璃激光辐射的三倍频得到了详尽的研究^[4.136,137]，并在美国 Rochester 大学的大口径激光装置上进行了实验^[4.130]。他们采用了三种三倍频的方式，在下面小节我们将描述并进行比较。

4.2.1 “角度失谐”方式

采用Ⅱ类 SHG，基频波偏振矢量和 o 光偏振矢量间夹角为 $\alpha = 45^\circ$ 。对于 THG，采用Ⅱ类相互作用，两块 KDP 晶体的参数是 $\theta = 59^\circ$ 和 $\phi = 0^\circ$ 。这一方法的缺点在于必须在两块 KDP 晶体之间放置一块特殊的晶态石英片，以使基频波与二次谐波的偏振矢量偏转 90° 角。SHG 采用Ⅰ类相位匹配，就不需要用特别的偏转旋光片。但在这种情况下，该匹配方式对角度 α 的敏感性要高 2.7 倍。

4.2.2 “偏振失配”方式

类似于第一方式，对于 SHG 和 THG 采用了Ⅱ类相互作用 ($\theta = 59^\circ, \phi = 0^\circ$)，但是波 ω 的偏振矢量对于 o 光的偏振矢量之间的旋转角 $\alpha = \arctan(1/\sqrt{2}) = 35.3^\circ$ 。我们已了解到，要在平面波近似条件下达到最高转换效率，具有频率 ω 和频率 2ω 的光子数目必须相等，结果造成能量比为 1:2。由此，在三次谐波情况下达到最大的转换效率，SHG 效率必须是 67%。在这一构型下，当 $\alpha = 35.3^\circ$ 时，两个频率为 ω 的 o 光子中有一个和频率为 ω 的 e 光子混频形成了一个频率为 2ω 的 e 光子，而第二个频率为 ω 的 o 光子则保持不变。这里就实现了二次谐波 67% 的转换效率，而且没有转换的频率为 ω 的辐射具有对随后级联的三倍频有合适的偏振状态。这一构型对于角度失谐的敏感性低，可能达到 $300 \mu\text{rad}$ ；并且不需要放置额外的石英片来旋转基波矢量的偏振角。此外，没有产生会严重影响对于 $\alpha = 45^\circ$ 的角度失谐方式参数的双折射问题。这一方式对于高功率 Nd 玻璃激光系统是理想的。

4.2.3 “偏振旁通”方式

这一方式类似于偏振失配方式。仅有的差别在于两个级联中都采用了Ⅰ类相互作用。在第一级联 (SHG) 中，通过适当选择所需长度的非线性晶体，达到了二次谐波可能的最大转换效率 ($\alpha = 35.3^\circ, \theta = 41^\circ$)。这一方式特别适用于 CDA 类型晶体的 SHG 和 THG 级联操作。通过温度调谐实现 90° 相位匹配，因为它们比 KDP 对于波偏振矢量的角度失调的敏感性小一些。

4.2.4 各种方式的比较

所有讨论的三种方式都能保证三倍频的转换效率为 80% (考虑到在 $\lambda =$

1.064 μm 处吸收, $\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$)。然而, 第二种方式是最好的, 因为基波辐射强度在一个宽的范围 ($2 \sim 5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 内都能达到转换效率 80%。

4.2.5 实验结果

对于 THG, 在实验上实现了 $\eta = 80\%$ 的“偏振失配”方式^[4.130]。激光装置参数如下: 波长 1.06 μm , 光束直径 60 mm, 脉冲宽度为 140 ps 和 700 ps, 脉冲能量分别为 25 J 和 40 J。所用 KDP 晶体 $\theta_{\text{ooe}} = 59^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 。在 $I_0 = 2 \sim 3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时实现了最高转换效率。在 Lawrence Livermore 国家实验室的大口径钕激光器 Argus 装置上研究了二次 (532 nm)、三次 (355 nm) 和四次 (266 nm) 谐波的发生^[4.131]。对于下述频率转换中的非线性转换效率机理进行了详细的分析: KDP 晶体减反射膜在强度 $> \text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的 SRS; 在 KDP 晶体 $I_0 > 1.5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$ 时的双光子吸收损耗 (双光子吸收系数 $\beta = 2.7 \times 10^{-10} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1}$); 当 $I > 1.5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 在三次谐波和四次谐波 (355 ~ 266 nm) 处由于自聚焦造成熔石英光学元件的整体破坏; 当能量密度超过 $1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时减反射膜的损伤。当采用长度为 1 cm 的 I 类 KDP 晶体 (口径为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$), $I_0 = 9.5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 转变为二次谐波的转换效率为 83% (晶体外面)。镀抗反射膜后, η 增加到 89%。对于一块长度为 2.29 cm 的 KDP 晶体 (I 类), 当 $I_0 = 2.7 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, η 为 71%, 输出能量为 65 J。在一块 1.19 cm 长的 II 类 KDP 晶体中, $I_0 = 5.7 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, η 为 74%, 在 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 处获得输出能量 $E = 121 \text{ J}$ 。对三种倍频和三倍频的方式都进行了实验研究以实现 THG: I 类/II 类, 晶体长度为 2.3/1.2 cm; I 类/II 类, 晶体长度为 1.3/1.2 cm, 以及 I 类/II 类, 晶体长度为 1.2/1.0 cm; 转换效率分别为 50%、53% 和 55%。正如已经提及的, 在 FOHG 过程中, 在 $I_0 > 1.5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时非线性损耗起着重要的作用。所以为了获得有效 FOHG, 泵浦强度应为 $1 \sim 1.2 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。采用 I 类相互作用 (ooe), 转变为 266 nm 辐射的最高转换效率为 64% ($E = 50 \text{ J}$) 和 55% ($E = 44 \text{ J}$), 所用晶体长度分别为 1 cm 和 1.5 cm。对于镀抗反射膜的晶体, η 分别上升到 70% 和 60%。这些结果^[4.131]由 Craxton^[4.138]进行了理论解释。

Ibragimov 等人^[4.134]从理论上分析了可应用于大型钕玻璃激光系统中评估极限转换效率的倍频过程。在一多级钕玻璃激光器 ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 其最后一级的口径为 45 mm) 中进行了 SHG 的实验。在脉冲宽度为 25 ns 时, 最高的二次谐波辐射的能量达到 90 J; 基频激光束能量分布相应于 $N = 5$ 的超高斯函数。采用 KDP 晶体作倍频, 口径为 20 mm 和 50 mm, 作用类型为 ooe; 在尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的 KDP 晶体中得到了转变为二次谐波 $\eta = 80\%$ 的最高

能量转换效率，其入射光的能量为 70 J，而发散角为 6×10^{-5} rad。

Gulamov 等人^[4.129]获得了高功率钽磷酸盐玻璃激光辐射的最高转换效率：二次谐波(90%)，三次谐波(81%)。对于倍频用了口径为 50 mm × 50 mm，长度为 18、30 和 40 mm 的 KDP 晶体，527 nm 转换效率分别相当于 75%、90% 和 80%；光束直径为 32 mm，发散度为 5.5×10^{-5} rad，光束的退偏度不超过 3%。极化矢量对于 o 光偏振有 35% 旋转的基频波采用极化偏振方式进行 THG。两级 KDP 晶体中都是 50 mm × 50 mm 口径，长度为 17.5 mm；作用类型为 eoe。

人们也研究了由 $\text{LiYF}_4:\text{Nd}^{3+}$ 振荡器和钽磷酸盐玻璃放大器组成的大口径钽激光器($\lambda = 1.053 \mu\text{m}$, $E = 115 \text{ J}$)的四次谐波发生^[4.135]。在 $I_0 = 1.5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 处转变到 $\lambda = 0.26 \mu\text{m}$ 的转换效率是 46.5%。Begishev 等人^[4.132]实现了 $\lambda = 0.264 \mu\text{m}$ 的高效 FOHG，从 0.527 μm 计算的转换效率 $\eta = 92\%$ 。所获得的辐射(0.264 μm)和基频辐射(1.054 μm)进一步混频，采用 ADP 晶体($\theta_{\text{mix}} = 90^\circ$, $T = -67.5^\circ\text{C}$, $L = 10 \text{ mm}$)可以让我们获得五次谐波(211 nm)，总的效率为 19%^[4.132]。

4.2.6 “正交”方式

由 Eimerl^[4.139]介绍了一种很有意思的频率转换方式，称为“正交”方式，分别在不同的转换阶段采用两块(而不是一块)晶体。我们将用于 SHG 的这一方式加以阐明(图 4.1)。SHG 的正交方式用了两块方向为 II 类作用(eoe)的晶体，两块晶体的主平面(光轴和光束传播方向均在其中)以相互正交方式放置。这种方式有两个特点：第一，在经过第一级转换后的基波偏振适于第二级转换，这样，两块晶体都能有效地参与转换过程；第二，在第一块晶体中产生的二次谐波的偏振态不适于第二个转变阶段，因此，在第二块晶体中不再转换。对于两块晶体，其总的转换效率是

$$\eta = \eta_1 + (1 - \eta_2) \eta_2 \quad (4.2)$$

其中 η_1 和 η_2 分别是在第一块和在第二块晶体中的转换效率。

转换的正交方式无疑比只用一块晶体的方式有好处：在正交模式中泵浦强度的动态范围大(100 ~ 1 000)，大大超过只用一块晶体的方式(≈ 10)。这一方式的优点可以用有三级钽磷酸

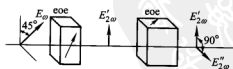


图 4.1 SHG 的正交方式

盐玻璃放大器的 Nd:YLF 激光器($\lambda = 1.053 \mu\text{m}$, $\tau = 1.2 \text{ ns}$)激光的 SHG 实验来

说明。用了长度为 12 mm 和 44 mm 的两块 DKDP 晶体, 在基频处其吸收 $\alpha = 0.006 \text{ cm}^{-1}$, 菲涅耳衍射损耗相当于 15.5%~18.5%。当泵浦功率从 0.2 变到 $9.6 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ (动力学范围 45) 时, 转换效率保持不变, 为 80%。当晶体镀减反射膜后, η 增加到 95%。在低强度下, 转换基本上发生在第二块晶体, 在高强度下发生在第一块晶体。对下列晶体 SHG 中 η 对于泵浦强度的关系也进行了计算: KTP、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ($\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$)、 CdGeAs_2 ($10.6 \text{ }\mu\text{m}$)。对于 THG、FOHG、SFG 的正交模式在^[4, 139]中也有描述。

4.3 其他激光光源的谐波发生

4.3.1 红宝石激光器

对于红宝石激光 ($\lambda = 694.3 \text{ nm}$) 的 SHG, 已经用过了 KDP、DKDP、ADP、RDA、RDP、 LiIO_3 和 KB5 晶体 (表 4.11)。在 RDA、RDP 和 LiIO_3 晶体中获得了最高的转换效率。在一块 1.45 cm 长的 RDA 晶体中, 在室温 ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{\text{ooe}} = 80^\circ$) 以及 90° 相位匹配 ($T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$) 两种情况下, 转换效率都是 58%, 输出功率为 62 MW。因为 RDA 晶体有大的角度带宽 (表 4.11), 故适用于此目的。红宝石激光的三次谐波辐射 ($\lambda_{3\omega} = 231.4 \text{ nm}$) 是通过其一次 (694.3 nm) 和二次 (347.1 nm) 谐波在 KB5 晶体中混频而获得^[4, 146]。相互作用的光波在 XY 平面沿 $\phi = 57^\circ \pm 1^\circ$ 方向向 X 轴传播。所用的是 eeo 相互作用。相对于基频辐射, 计算的效率为 0.2%, 在 $\tau_p = 6 \text{ ns}$ 时, 输出功率是 40 kW。

表 4.11 红宝石激光器 ($\lambda = 694.3 \text{ nm}$) 的二次谐波发生

晶体	相互 作用 类型	$\theta_{\text{pm}}/(\text{ }^\circ)$	$I_o/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	L/mm	功率转 换效 率/%	参考 文献	备注
KDP	ooe	50.5	—	—	—	4.140	$L\Delta\theta = 1.75 \text{ mard} \cdot \text{cm}$
DKDP	ooe	52	—	—	—	4.141	$L\Delta\theta = 1.46 \text{ mard} \cdot \text{cm}$
ADP	ooe	52	—	—	—	4.140	$L\Delta\theta = 1.63 \text{ mard} \cdot \text{cm}$
RDA	ooe	80.3(90)	1.5×10^8	1.45	58	4.142	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C} (90 \text{ }^\circ\text{C}), L\Delta\theta = 4.37 \text{ mard} \cdot \text{cm}$
RDP	ooe	67	1.8×10^8	1.0	37	4.143	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}, L\Delta\theta = 2.4 \text{ mard} \cdot \text{cm}$
LiIO_3	ooe	52	1.3×10^8	1.1	40	4.144	$L\Delta\theta = 0.2 \text{ mard} \cdot \text{cm}$
KB5	eeo	$26.5(\phi_{\text{pm}})$	—	1.0	10^{-3}	4.145	XY 平面

4.3.2 钛宝石激光器

掺钛蓝宝石 ($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$) 激光器辐射 ($\lambda = 700 \sim 900 \text{ nm}$) 的二次谐波在 LiIO_3 、 BBO 、 LBO 和 KNbO_3 晶体中实现了 (表 4.12); 两种有机晶体 3-羟基-4-羟基-苯甲醛 (MHBA) 和 8-(4'-羧基苯)-1,4-二氧杂-8-氮杂^[4.5]癸烷 (APDA) 也用于此目的。对于钛宝石激光器的连续波和 cw 泵浦运转方式, 最适合的倍频形式是在激光腔 (ICSHG) 或外置环行共振腔 (ERR) 内的倍频。注意, KNbO_3 晶体可以在非临界相位匹配条件下使用 (沿 a 轴方向传播); 将晶体的温度在 $20 \sim 180^\circ\text{C}$ 之间改变, 就可以在 $860 \sim 940 \text{ nm}$ 波长范围内进行倍频。利用 $55 \mu\text{m}$ 厚的 BBO 晶体实现了钛宝石激光器的 ICSHG, 其脉冲宽度窄到 54 fs ^[4.150]。在连续波和高重复率 ($\tau = 1.5 \text{ ps}$) 锁模方式下获得最高的二次谐波功率: $P_{2\omega} = 0.7 \text{ W}$ ^[4.147,156]。

在长度为 $6.5 \sim 12 \text{ mm}$ 的 BBO 晶体 ($\theta = 50^\circ$) 中实现锁模钛宝石激光辐射的三次谐波 (272 nm), 其输出功率 $P_{3\omega} = 150 \text{ mW}$ 和 $\tau = 1 \text{ ps}$ ^[4.147,158]。转换效率为 30%。对于四次谐波发生 (210 nm), 用了一块 8 mm 长的 BBO 晶体 ($\theta_{\text{non}} = 75^\circ, L = 7 \sim 8 \text{ mm}$), 混频方式采用基频辐射和三次谐波 $\omega + 3\omega = 4\omega$ ^[4.147,158], 最高平均输出功率为 10 mW ($\tau = 1 \text{ ps}$)。

4.3.3 半导体激光器

KNbO_3 晶体是最方便用于半导体激光辐射的 SHG (表 4.13)。除了具有非常高的非线性系数之外 [$d_{32} = 50d_{36}(\text{KDP}) = 2.1 \times 10^{-11} \text{ m/V}$], 这种晶体对于半导体二极管激光器 ($\lambda = 860 \text{ nm}$) 具有室温下的 90° 相位匹配。对于长度为 9 mm 的晶体, 光谱带度 $\Delta\lambda = 0.056 \text{ nm}$, 这使其可能实现带宽 $\Delta\lambda = 0.02 \text{ nm}$ 的 GaAlAs 激光辐射倍频。在 90° 相位匹配时角度带宽为 51 mrad , 这超过了在聚焦进入晶体时的基波辐射的发散度 (12 mrad)^[4.159]。

脉冲 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 激光辐射 (860 nm) 的二次谐波在 6 mm 长的 KNbO_3 晶体中实现, 基波光沿 a 轴传播 ($T = 31^\circ\text{C}$)^[4.160]。基波辐射的偏振方向沿 b 轴, 二次谐波沿 c 轴, 泵浦强度为 $6 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 转换效率达到 1.8×10^{-3} , 输出功率为 0.35 mW 。在采用单环共振腔的 KNbO_3 晶体中实现 856 nm 二极管激光的有效倍频, 光学转换效率为 39%, 从电能计算的转换效率大约为 10%^[4.165]。由 KNbO_3 晶体在激光二极管为种子的 GaAlAs 放大器中倍频而产生了 $P = 62 \text{ mW}$ 的 429 nm 连续波辐射^[4.168]。通过将 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $0.78 \sim 0.82 \mu\text{m}$ 的两个波长的激光二极管混频, 再由 KTP 晶体进行和频, 使我们能够产生波长为 $0.52 \sim 0.54 \mu\text{m}$, $P = 0.2 \sim 0.3 \mu\text{W}$ 的辐射^[4.169,172]。

表 4.12 钛宝石 ($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$) 激光辐射的二次谐波发生

晶体	λ_w/nm	τ_w	$\theta_{pm}/(^{\circ})$	L/mm	输出功率 P_{so}/mW	$\eta/\%$	参考文献	备注
LiIO_3	720 ~ 850	1.5 ps	43	10	700	50	4.147	$f = 82 \text{ MHz}$
LiIO_3	720 ~ 800	—	—	7	23	0.38*	4.148	外置环状共振腔 (ERR)
BBO	720 ~ 850	1.5 ps	30	8	450	27	4.147	$f = 82 \text{ MHz}$
BBO	760 ~ 865	134 fs	ooe	1	—	2.1	4.149	色散频率转换器
BBO	860	54 fs	27.5	55 μm	230	75 (5.2*)	4.150	ICSHG, $f = 72 \text{ MHz}$
BBO	766 ~ 814	—	ooe	5	170	7.4*	4.151	ICSHG
LBO	700 ~ 900	12 ~ 25 ps	90(θ), 22 ~ 40(ϕ)	5	25 mJ	30	4.152	$I_0 = 0.9 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
LBO	720 ~ 850	1.5 ps	90(θ), 32(ϕ)	8	350	20	4.147	$f = 82 \text{ MHz}$
LBO	720 ~ 800	—	—	10	10 ~ 60	1.0*	4.148	ERR
LBO	820	cw	90(θ), 31.8(ϕ)	10.7	410	21.6	4.153	ERR
LBO	740 ~ 900	—	90(θ), 37 ~ 23(ϕ)	6	—	—	4.154	$\Delta T L = 7.8 \sim 15.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}$, $\Delta \lambda L = 0.6 \sim 1.25 \text{ nm} \cdot \text{cm}$
KNbO_3	860 ~ 940	35 ns	沿 a 轴	7.9	7.8 kW (峰值)	45 (2*)	4.155	ICSHG, $T = 2 \sim 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$
KNbO_3	860	cw	—	6	650	48	4.156	ERR
MHBA	800 ~ 900	10 ns	—	5	0.03 mJ	6	4.64	
APDA	760 ~ 900	cw	I 类	3	0.8 μW	0.000 3	4.157	

a: 从泵浦源计算的总转换效率。

表 4.13 半导体激光器的二次谐波发生

晶体	λ_m/nm	相位匹配条件	L/mm	$P_{2\omega}/\text{mW}$	$\eta/\%$	参考文献	备注
KNbO ₃	860	沿 a 轴	8.97	0.000 28	0.005	4.159	
	860	沿 a 轴 $T = 31\text{ }^\circ\text{C}$	5.74	0.35	0.04	4.160	$\tau = 10\text{ ns}$
	842	$T = -23\text{ }^\circ\text{C}$	5	0.72	0.27	4.161	
	842	$T = -23\text{ }^\circ\text{C}$	5	24	14	4.162	晶体置于外共振腔
	865	沿 a 轴	5	0.215	1.7	4.163	外置环形腔 (ERR)
	842	沿 a 轴	5	6.7	0.57	4.164	ERR, cw 方式
	856	沿 a 轴 $T = 15\text{ }^\circ\text{C}$	7	41	39	4.165	外置共振腔
	972	沿 b 轴	5	1.2	4.8	4.166	Bragg 反射分布半导体激光器
	862	$T = 34\text{ }^\circ\text{C}$	14	400(峰值)	6.3	4.167	由 $5\text{ }\mu\text{s}$ 钛宝石激光器注入 GaAlAs 放大器
	858	—	12.4	62	1.1	4.168	
KTP	1 500	$\theta = 54^\circ$, $\phi = 0^\circ$, II 类	10	0.001	—	4.169	ERR
LiIO ₃	740	$\theta_{\text{cut}} = 45^\circ$	6	0.018	0.18	4.170	ERR
K ₃ Li _{1.97} Nb _{0.03} O _{15.06}	820	90°	2.4	0.36	3.1	4.171	外置共振腔

4.3.4 染料激光器

表 4.14 给出了用于倍频染料激光器辐射非线性光学晶体的一些特点：在室温下的 SHG 可以实现最短波长的非线性系数 d_{eff} 、 d_{eff}^2/n^3 比正比于转换效率、由 SHG 可实现的最短波长以及在不同波长处的“走离”角 ρ 。对于被考虑的所有晶体（除了 LFM），在单轴晶时，辐射光垂直于光轴（ $\theta = 90^\circ$ ）传播，而对双轴晶则沿 Y 轴（ $\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$ ）传播，这一波长相应于 90° 相位匹配。对于甲酸锂，截止波长 230 nm 相当于吸收带的边沿，而在相位匹配条件下可允许实现更短的波长。借助于 SHG，通过冷却晶体可以实现更短的波长；例如，在 ADP 晶体中，当 $T = 200\text{ K}$ 时， $\lambda_{2\omega, \text{min}} = 250\text{ nm}^{[4.173]}$ 。因为 90° 相位匹配有一些优点，一些在给定泵浦波长具有 90° 相位匹配的非线性光学晶体一般都用于 SHG。例如，对于 860 nm 的 SHG，KNbO₃ 晶体是最适宜使用的，而对

于 592 nm, 所用的是 DADA 晶体。

表 4.14 染料激光器激光辐射倍频晶体的参数

晶体	d_{eff}^*	d_{eff}^2/n^3 ^a	$\lambda_{2\omega, \text{min}}/\text{nm}$	在不同波长 λ_{ω} 时的走离角 $\rho/(^{\circ})$				
				500 nm	600 nm	700 nm	800 nm	900 nm
BBO	0.3	0.06	204.8	4.96	4.71	4.28	3.89	3.57
DKB5	0.1	0.01	216.2	—	—	—	—	—
KB5	0.1	0.01	217.1	1.99	1.96	1.56	1.05	0.11
LFM	1.4	2.1	230	—	7.22	6.76	6.43	6.19
KDP	1	1	258.5	—	1.51	1.69	1.69	1.65
ADP	1.2	1.5	262	—	1.57	1.81	1.82	1.79
DKDP	0.9	0.9	265.5	—	1.41	1.59	1.57	1.51
LiIO ₃	12.7	107	293.2	—	3.34	4.98	5.00	4.74
ADA	—	—	294	—	0.80	1.88	1.42	2.03
DADA	—	—	296	—	—	—	—	—
DKDA	—	—	310	—	—	—	—	—
RDP	0.9	0.9	313.5	—	—	0.87	1.06	1.10
RDA	0.9	0.8	342	—	—	0.65	1.22	1.35
KNbO ₃	30.3	390	430	—	—	—	—	0.94
DCDA	0.9	0.8	517	—	—	—	—	—
CDA	0.9	0.8	525	—	—	—	—	—

a: d_{eff} 的值及 d_{eff}^2/n^3 的值是相对于 KDP 的 d_{eff} 和 d_{eff}^2/n^3 计算的。

在 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (205 nm)、五硼酸钾 (KB5) 以及它的氘化同系物 (DKB5) (217 nm) 中获得由 SHG 过程实现的最短波长。一块 KB5 晶体用于 434 ~ 630 nm 染料激光器辐射的 SHG^[4.174-176] (表 4.15)。染料激光器的辐射沿 XY (ab) 平面传播, 偏振也在这同一平面内。二次谐波沿 Z 轴偏振 (eeo 相互作用)。上述的光谱范围是通过将相位匹配角 ϕ_{mch} 从 90° 变到 30° 来覆盖的。如果相互作用是在 YZ 面上发生 ($\phi = 90^{\circ}$), 则所覆盖的光谱范围要小得多 (217.1 ~ 240 nm), 而相位匹配角 θ_{mch} 从 90° 变为 0°^[4.175]。在 YZ 平面上, 有效非线性比在 XY 平面上要小得多, 因为对于 KB5 而言, $d_{31} \sim 10d_{32}$; 因此, 在 KB5 晶体中, 主要用的是 XY 平面的相互作用。

表 4.15 染料激光器的二次谐波发生

晶体	$\lambda_{2\omega}/\text{nm}$	输出光的参数 (能量、功率、脉冲宽度) 转换效率	参考文献	备注
KDP	267.5 ~ 310	0.1 kW, $\eta = 1\%$	4.177	
KDP	280 ~ 385	—	4.178, 179	$\theta_{\text{mch}} = 66^{\circ} \sim 45^{\circ}$

续表

晶体	$\lambda_{2\omega}/\text{nm}$	输出光的参数(能量、功率、脉冲宽度)转换效率	参考文献	备注
KDP	280 ~ 310	50 mJ	4. 180	
ADP	280 ~ 315	—	4. 181—183	$\theta_{\text{see}} = 70^\circ \sim 58^\circ$, $T = 20^\circ \text{C}$
ADP	280 ~ 310	50 mJ, $\eta = 8.4\%$	4. 180	
ADP*	290 ~ 315	最高达 1 mW, $\eta = 3 \times 10^{-4}$	4. 184	
ADP*	250 ~ 260	120 μW	4. 173	$\theta_{\text{see}} = 90^\circ$, $T = 200 \sim 280 \text{ K}$
ADP*	293	0.13 mW, $\eta = 0.08\%$, $\tau = 3 \text{ ps}$	4. 185	$L = 3 \text{ mm}$
ADP*	295	$\eta = 10^{-4}$, $\eta = 3 \sim 4 \text{ ps}$	4. 186	$L = 1 \sim 3 \text{ mm}$
RDP	313.8 ~ 318.5	3.6 MW, $\eta = 52\%$ (功率), $\tau = 8 \text{ ns}$	4. 187	$\theta_{\text{see}} = 90^\circ$, $T = 20^\circ \sim 98^\circ \text{C}$, $I_0 = 36 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $L = 25 \text{ mm}$
RDP	310 ~ 335	3.2 MW, $\eta = 36\%$, $\tau = 10 \text{ ns}$, $f = 10 \text{ Hz}$	4. 188	$\theta = 90^\circ$
ADA	292 ~ 302	30 mW	4. 189	$\theta = 90^\circ$
ADA*	285 ~ 315	400 mW (单模方式), 50 mW (多模方式)	4. 190	$\theta = 90^\circ$, 温度调谐, $L = 30 \text{ mm}$
DKDA	310 ~ 355	0.8 ~ 3.2 MW, $\eta = 9\% \sim 36\%$, $\tau = 10 \text{ ns}$, $f = 10 \text{ Hz}$	4. 188	$\theta = 90^\circ$, $L = 15 \text{ mm}$
LiIO_3^*	295	$\eta = 10^{-4}$, $\tau = 2.1 \text{ ps}$	4. 186	$L = 0.3 \text{ mm}$
LiIO_3^*	293 ~ 312	0.37 mW, cw 方式	4. 191	$L = 10 \text{ mm}$
LiIO_3	293 ~ 330	15 mW, cw 方式	4. 192	$L = 1 \text{ mm}$
LiIO_3	293	3 kW, $\eta = 30\%$	4. 177	$L = 6 \text{ mm}$
LiIO_3	293 ~ 310	4 mW, $\eta = 0.4\%$, cw 方式	4. 193	$L = 6 \text{ mm}$, $\Delta\lambda = 0.03 \text{ nm}$
LiIO_3	293 ~ 310	21 mW, $\eta = 2\%$, cw 方式	4. 193	$L = 6 \text{ mm}$, $\Delta\nu = 30 \text{ MHz}$
BBO	204.8 ~ 215	100 kW, $4\% \sim 17\%$, 8 ns	4. 121	$\theta = 70^\circ \sim 90^\circ$
BBO	205 ~ 310	50 kW, $1\% \sim 36\%$, $9 \sim 22 \text{ ns}$	4. 194	$L = 6 \text{ 和 } 8 \text{ mm}$
BBO*	315	20 mW (平均), 43 fs	4. 195	$\theta = 38^\circ$, $\phi = 90^\circ$, $L = 55 \mu\text{m}$
BBO	230 ~ 303	0.02 ~ 0.18 mJ, 17 ns	4. 196	$\theta_{\text{see}} = 40^\circ \sim 60^\circ$, $L = 7 \text{ mm}$
BBO*	243	30 mW, cw 方式	4. 197	$\theta_{\text{see}} = 55^\circ$, $L = 8 \text{ mm}$, $\Delta\nu = 200 \text{ Hz}$
KB5	217.3 ~ 234.5	0.3 kW, 1% , 7 ns	4. 174	XY 平面, eeo
KB5	217.1 ~ 240	5 ~ 6 μJ , 10% , $3 \sim 4 \text{ ns}$	4. 175	YZ 平面, $\theta_{\text{see}} = 90^\circ \sim 0^\circ$

续表

晶体	$\lambda_{2\omega}/\text{nm}$	输出光的参数(能量、功率、脉冲宽度)转换效率	参考文献	备注
KB5	217.1 ~ 315.0	5 ~ 6 μJ , 10%, 5 ns	4.175	XY 平面, $\phi_{\text{rec}} = 90^\circ \sim 31^\circ$, $L = 10 \text{ mm}$
KB5	217.0 ~ 250	0.1 ~ 5 μJ , 0.2% ~ 5%	4.176	XY 平面, $\phi_{\text{rec}} = 90^\circ \sim 65^\circ$
DKB5	216.15	2 μJ , 5%, 3 ns	4.198	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$
LFM	230 ~ 300	2%	4.199	XZ 平面, $\theta_{\text{rec}} = 35^\circ \sim 45^\circ$, $L = 10 \text{ mm}$
LFM ^a	290 ~ 315	$\eta = 10^{-4}$	4.184	XZ 平面, $\theta_{\text{rec}} = 45^\circ$ (590 nm)
LFM ^a	238 ~ 249	70 μW (244 nm), cw 方式	4.200	XZ 平面, $\theta_{\text{rec}} = 39^\circ$ (486 nm)
LFM	237.5 ~ 260	20 W, 纳秒方式, $\eta = 0.7\%$	4.177	
LFM ^a	243	1.4 mW, cw 方式	4.201	$\theta_{\text{rec}} = 36.8^\circ$, $L = 15 \text{ mm}$
LFM	285 ~ 310	4 μW , cw 方式	4.193	
KNbO ₃	425 ~ 468	400 kW, 43%	4.202	在 XY 面角度调谐, 在 YZ 面温度调谐, (20 ~ 220 $^\circ\text{C}$) 沿 a 轴
KNbO ₃	419 ~ 475	12 μW , $\eta = 6.5 \times 10^{-4}$ cw, 方式	4.159	沿 a 轴, T 从 -36 $^\circ\text{C}$ 到 +180 $^\circ\text{C}$, $L = 9 \text{ mm}$
KNbO ₃ ^a	425 ~ 435	21 mW, $\eta = 1.1\%$ cw, 方式	4.203	沿 a 轴, $T = 0 \sim 50^\circ\text{C}$, $L = 9 \text{ mm}$
尿素	238 ~ 300	—	4.204	$\theta_{\text{rec}} = 90^\circ \sim 45^\circ$, $L = 2 \text{ mm}$
尿素	298 ~ 370	—	4.204	$\theta_{\text{rec}} = 90^\circ \sim 50^\circ$, $L = 2 \text{ mm}$

a: 腔内 SHG。

Kato^[4.121]将一块 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 晶体用于染料激光器辐射的 SHG, 得到以下参数: $P = 1 \text{ MW}$, $\tau = 8 \text{ ns}$, λ 可到 204.8 nm (90° 相位匹配, ooe 类型)。基波通过一个 $F = 50 \text{ cm}$ 的透镜聚焦到晶体中, 其转换到 $\lambda = 204.8 \text{ nm}$ 的效率为 4%, 而转换到 $\lambda = 205.8 \text{ nm}$ 的效率为 17%。Miyazaki 等人^[4.194]用一块 BBO 晶体对 $I_0 = 423 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的染料激光倍频, 实现的效率为 $\eta = 36\%$ 。基频辐射由一个 $F = 50 \text{ cm}$ 的透镜聚焦到晶体中。在 BBO 晶体中的效率是 ADP 晶体中的 4 ~ 6 倍。通过飞秒染料激光器辐射的 ICSHG, 在一块长度为 55 μm 的 BBO 晶体

中得到了 $\lambda = 315 \text{ nm}$, $\tau = 43 \text{ fs}$ 的 UV 辐射^[4.195]。

ADA 晶体用于若丹明 6G 激光辐射的 SHG, 其效率 $\eta = 5 \times 10^{-3}$ ^[4.190]。

由于染料激光器辐射的 ICSHG, 在 LiIO_3 晶体中实现了 $P = 2 \sim 15 \text{ mW}$, 在 $299 \sim 330 \text{ nm}$ 范围内产生 cw UV 辐射^[4.192]。氩离子激光辐射在 $\lambda = 514.5 \text{ nm}$, $P = 2.5 \text{ W}$ 用作若丹明 6G 激光器的泵浦源。UV 辐射的带宽为 $180 \sim 500 \text{ kHz}$ 。Buesener 等人^[4.191] 通过在 LiIO_3 晶体中的 90° 相位匹配, 获得了 $\lambda_{2\omega} = 293.15 \text{ nm}$ 的波长。

借助于香豆素 102 激光辐射的 ICSHG, 在一块甲酸锂 (LFM) 晶体中实现了 $\lambda = 243 \text{ nm}$ 的 UV 辐射^[4.201]。在晶体中, 基频波是在 XZ 平面中沿 $\theta = 36.8^\circ$ 方向传播, 所采用的是 ooe 类型相互作用, 晶体长度为 15 mm ; 聚焦到晶体中的基波辐射的光斑直径为 $20 \mu\text{m}$, 转换效率为 1.5×10^{-4} 。也在 ADP 晶体中产生了 $\lambda = 243 \text{ nm}$ 的辐射^[4.205,206], 这是由氩离子和染料激光器的 ICSFG 获得。尽管 LFM 的非线性系数超过 ADP, 但是 ADP 晶体中的 ICSFG 比 LFM 晶体中的 ICSHG 更为有效, 因为通过选择适当的相互作用波长, 在 ADP 晶体中能够采用 90° 相位匹配。

在五硼酸钾 (KB5) 晶体中实现了三次谐波发生^[4.188], 获得在 $207.3 \sim 217.4 \text{ nm}$ 范围内的可调 UV 辐射, 其峰值功率为 25 kW , 而平均功率为 15 mW ; 所用相互作用类型为 eeo (在 XY 平面) 以及 ooe (在 YZ 平面)。在尿素中实现了染料激光器的三次谐波发生^[4.118], $\lambda_{3\omega} = 231 \text{ nm}$, $\theta_{\text{eeo}} = 77^\circ$ 。

图 4.2—图 4.7 说明了在 KDP、ADP、RDP、 LiIO_3 、 LiNbO_3 、 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 、KB5 (XY 和 YZ 平面)、LFM (XZ)、KTP (XY)、 KNbO_3 (XY, YZ, XZ) 和尿素晶体中 SHG 的相位匹配角对基频波波长的调谐关系。

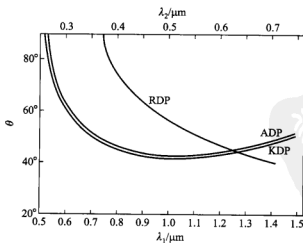


图 4.2 KDP、ADP 和 RDP 晶体的倍频调谐曲线 (ooe 相互作用)

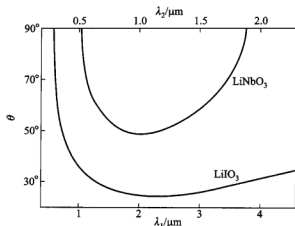


图 4.3 LiIO_3 和 LiNbO_3 晶体的倍频调谐曲线 (ooe 相互作用)

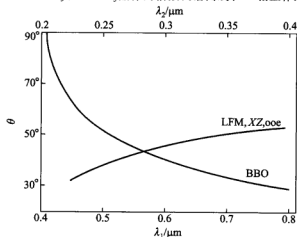


图 4.4 LFM (XZ 平面, ooe 相互作用) 和 BBO (ooe 相互作用) 晶体中的 SHG 调谐曲线

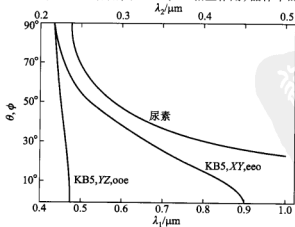


图 4.5 KB5 (XY , eeo; YZ , ooe) 和尿素 (eeo) 晶体中的 SHG 调谐曲线

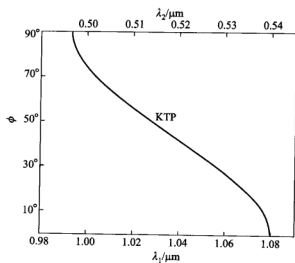


图 4.6 KTP(*XY*,*eoe*) 晶体中的 SHG 调谐曲线

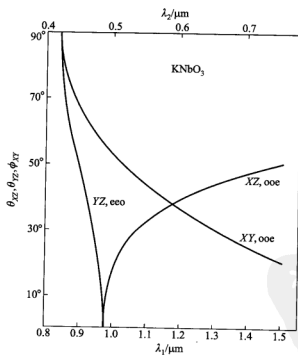


图 4.7 KNbO₃ 晶体中的 SHG 调谐曲线(*XY*,*ooe*;
YZ,*eeo*;*XZ*,*ooe*)

计算是在 $X, Y, Z \Rightarrow c, a, b (n_X < n_Y < n_Z)$ 的坐标转换下进行的

4.3.5 气体激光器

在 KDP、ADP、BBO 和 KB5 晶体中实现了氩离子激光辐射(458 ~ 515 nm)的二次谐波发生;在 LiIO_3 、 LiNbO_3 和 AgGaS_2 晶体中实现了 He - Ne 激光辐射(1.15 ~ 3.39 μm)的 SHG;在 Te 和 CdGeAs_2 晶体中实现了 NH_3 激光辐射($\lambda = 12.8 \mu\text{m}$)的倍频。表 4.16 列举了所使用的晶体、相应的相位匹配角和相位匹配温度。对于在 ADP 晶体中,氩离子激光辐射($\lambda = 514.5 \text{ nm}$)的外腔 SHG 输出功率为 80 mW;对于放置在氩离子激光器腔内的 KDP 和 ADP,倍频达到 $\eta = 50\%$ [4.220],倍频功率为 0.415 W。用 6.5 mm 长 BBO 晶体对氩离子激光的 IC-SHG,产生了连续波 257 nm 辐射,功率为 1.2 W [4.212]。在 KB5 晶体的情况下,氩离子激光 SHG 的转换效率相当于 10^{-5} 。KB5 晶体适于这一目的,因为该晶体无需温度稳定器,但是其较低的非线性 [$d_{31} = 0.1 d_{36}$ (KDP)] 使其难以获得高的转换效率。在 Te 晶体中实现了 NH_3 激光辐射($\tau_p = 1 \text{ ns}$)的 SHG 高效转换效率, $\eta = 60\%$ [4.217]。在 $\lambda_{2\omega} = 6.4 \mu\text{m}$ 处功率相当于 300 kW。在 7 mm 长的 ZnGeP_2 晶体中得到了 CO 激光辐射的二次谐波发生 [4.219],在 $\lambda = 2.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 处的平均功率为 2.45 ~ 4.0 mW (峰值功率 350 ~ 500 W),脉冲重复率 $f = 100 \text{ Hz}$,转换效率 $\eta = 3\%$ 。

表 4.16 气体激光器的二次谐波发生

激光器类型	晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
氩激光器	KDP*	0.514 5	90	-13. 7	4. 207
	ADP	0.496 5	90	-93. 2	4. 208
	ADP	0.501 7	90	-68. 4	4. 208
	ADP	0.514 5	90	-10. 2	4. 208
	ADP*	0.514 5	90	-10	4. 209
	KB5	0.457 9	67. 2 (ϕ_{pm})	20	4. 145
	KB5	0.476 5	60. 2 (ϕ_{pm})	20	4. 145
	KB5	0.488 0	56. 6 (ϕ_{pm})	20	4. 145
	KB5	0.514 5	50. 2 (ϕ_{pm})	20	4. 145
	BBO	0.514 5	49. 5	—	4. 210
	BBO	0.496 5	52. 5	—	4. 210
	BBO	0.488 0	54. 5	—	4. 210
	BBO	0.476 5	57. 0	—	4. 210
	BBO*	0.488	55	—	4. 211
He - Ne 激光器	BBO*	0.514 5	—	—	4. 212
	LiIO_3	1.152 ~ 1.198	25	20	4. 213
	LiNbO_3	1.152	90	169	4. 214

续表

激光器类型	晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$T/^{\circ}\text{C}$	参考文献
He-Ne 激光器	LiNbO ₃	1.152	90	281	4.215
	AgGaS ₂	3.39	33	20	4.216
NH ₃ 激光器	Te	12.8	—	—	4.217
	CdGeAs ₂	11.7	35.7	—	4.218
CO 激光器	ZnGeP ₂	5.2~6.3	47.5	—	4.219

a: 腔内 SHG。

4.3.6 碘离子激光器

在激光热核聚变实验中,采用了高功率碘离子激光器($\lambda = 1.315 \mu\text{m}$),其激光频率转换至其六次谐波($\lambda = 219.2 \text{ nm}$)^[4.221~224](表 4.17)。在 KDP、DKDP 和 LiIO₃ 晶体中研究了碘激光辐射的二次谐波发生。对于 KDP 的 SHG, η 相当于 16% 和 12%, 分别对应于 eoe 和 ooe 相互作用。DKDP 晶体被证明为碘离子激光辐射 SHG 的最佳材料。KDP 和 DKDP 损伤阈值数据是相同的, 而 DKDP 晶体在 $\lambda = 1.315 \mu\text{m}$ 处的吸收系数($\alpha = 0.025 \text{ cm}^{-1}$)比 KDP 的吸收系数($\alpha = 0.3 \text{ cm}^{-1}$)要小一个量级。在单脉冲运转方式中, 可以用 87%~90% 氙化度的 DKDP 晶体($\alpha = 0.06 \text{ cm}^{-1}$)^[4.223]。在多脉冲运转方式中, 尽可能高的氙化度($\approx 99\%$)是必需的。

表 4.17 碘激光辐射的谐波发生: $\lambda = 1.315 \mu\text{m}$, $E = 600 \text{ mJ}$, $\tau_p = 1 \text{ ns}$

	SHG			THG		FOHG	FIHG	SIHG
	$\omega + \omega = 2\omega$			$\omega + 2\omega = 3\omega$		$2\omega + 2\omega = 4\omega$	$2\omega + 3\omega = 5\omega$	$3\omega + 3\omega = 6\omega$
波长/nm	657.6			438.4		328.8	263.0	219.2
晶体	DKDP	KDP	KDP	DKDP	KDP	KDP	KDP	KB5
晶体长度/mm	19	20	10	20	10	40	—	10
相互作用类型	eoe	eoe	ooc	eoe	ooc	ooc	ooc	eco
$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	51.3	61.4	44.3	48	42.2	53.6	74	80.5(ϕ_{pm})
转换效率/%								
$I_0 = (1 \sim 1.5) \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$	30	16	12	30	6	15	—	—
$I_0 = 3 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$	70	—	—	50	—	30	9	3

表 4.17 给出了碘激光辐射谐波产生的实验结果。所用的光束直径为 5~8 mm, 泵浦强度为 $1 \sim 3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在直径为 4 mm 的光束中, 二次谐波的转换效率为 70%。对于 THG 采用了“偏振失配”方式^[4.130,136]。对于碘激光

辐射三次谐波的转换效率相当于 50%。对于 FOHG 和 FIHG, 使用 ooe 相互作用类型的 KDP 晶体。在 KB5 晶体中通过对于基频波的三次谐波倍频实现了碘激光辐射的 SIHG。所采用的为 eeo 相互作用, 三次谐波是在 XY 面沿 $\phi = 80.5^\circ$ 方向向 X 轴传播。由于 KB5 的非线性系数小 [$0.1d_{36}(\text{KDP})$], 转变到 $\lambda = 219.2 \text{ nm}$ 的转换效率仅为 3%。注意所有的 η 值都是相对于基频光给出的。

在一块长为 10 mm 的 LiIO_3 晶体 ($\theta_{\text{ooe}} = 23.5^\circ$) 中实现了氧碘化学激光器 ($\lambda = 1.315 \mu\text{m}$) 腔内 SHG, 效率为 1%^[4.225] 和 8%^[4.226]。在后面一种情况所达到的输出功率为 60 mW。相同激光器采用腔外 SHG, 在一块 22 mm 长的 LiIO_3 晶体中, cw 功率最高可达 700 W, 效率 $\eta = 8\%$ ^[4.227]。

4.3.7 CO_2 激光器

在硫砷银、硫镓银、 AgGeSe_2 、 ZnGeP_2 、 CdGeAs_2 、 Ti_3AsSe_3 (TAS)、GaSe、HgS、Se 和 Te 晶体中实现了脉冲和 cw 运转方式的 CO_2 激光二次谐波发生, 在 AgGeSe_2 、 ZnGeP_2 、 CdGeAs_2 和 Ti_3AsSe_3 中获得了 $\lambda = 5.3 \mu\text{m}$ 的脉冲方式 SHG 的最大效率 (表 4.18)。在 AgGaSe_2 晶体中实现了脉冲 CO_2 激光辐射 $\lambda = 10.25 \mu\text{m}$ 的二次谐波, $\theta_{\text{ooe}} = 52.7^\circ$, $\eta = 35\%$ ^[4.232]。在 77 K 时, 利用 CdGeAs_2 晶体实现了 CO_2 激光辐射的二次谐波发生, 采用脉冲运转方式 ($f = 1.5 \text{ kHz}$), 平均转换效率为 21%; 以 cw 方式运转, 效率为 0.44%^[4.241]。在 $\lambda = 5.3 \mu\text{m}$ 处的平均功率相当于 0.79 W (脉冲方式, $f = 47 \text{ kHz}$) 以及 73 mW (cw 方式)。

表 4.18 CO_2 激光辐射的二次谐波发生

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	相互 作用 类型	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$I_0/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	L/mm	η (功 率)/%	参考 文献
Ag_3AsS_3	9.2	ooe	19.9	—	10	4×10^{-44}	4.228
Ag_3AsS_3	10.6	ooe	22.5	1.1×10^7	4.4	2.2	4.229
Ag_3SbS_3	10.6	ooe	24.2 ~ 30	—	—	—	4.230
AgGaSe_2	10.6	ooe	67.5	—	—	—	4.216
AgGaSe_2	10.6	ooe	57.5	1.7×10^6	15.3	2.7	4.231
AgGaSe_2	10.25	ooe	52.7	$< 10^7$	21	35	4.232
$\text{AgGa}_{0.85}\text{In}_{0.35}\text{Se}_2$	9.66	ooe	90	—	11	—	4.233
ZnGeP_2	9.19 ~ 9.7	eeo	76	—	—	5	4.234
	10.15 ~ 10.8					0.6*	
ZnGeP_2	8.6	eeo	55.8	—	—	10.1	4.235
ZnGeP_2	10.6	eeo	76	10^9	3	49	4.236

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	相互 作用 类型	$\theta_{\text{pm}}/(\circ)$	$I_0/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	L/mm	η (功 率)/%	参考 文献
ZnGeP ₂	9.18 ~ 9.6	eeo	63 ~ 67	—	3.8	— ^a	4.237
ZnGeP ₂	9.3 ~ 9.6	eeo	—	2×10^7	4	2	4.238
ZnGeP ₂	10.26 ~ 10.61	eeo	—	4.4×10^7	7.2	11.3	4.239
CdGeAs ₂	10.6	oeo	48.4	1.4×10^7	9	15	4.240
CdGeAs ₂	10.6	eeo	32.5	—	13	21	4.241
CdGeAs ₂	10.6	eeo	32.5	—	13	0.44 ^a	4.241
Tl ₃ AsSe ₃	9.6	—	—	—	3.7	10.9	4.242
Tl ₃ AsSe ₃	9.6	oeo	19	10^7	5 ~ 6	28	4.243
Tl ₃ AsSe ₃	10.6	oeo	—	6.3×10^8	4.57	57	4.244
GaSe	9.3 ~ 10.6	oeo	12.8 ~ 14.4	2×10^7	6.5	9	4.245
HgS	10.6	eeo	20.8	—	8.5	— ^a	4.246
Se	10.6	eeo	5.5	—	8	10^{-5a}	4.247
Te	10.6	eeo	14.2	—	9	0.01	4.248
Te	10.6	eeo	15	10^6	4	0.25	4.249
Te	10.6	eeo	14.5	7×10^3	2.1	0.5	4.250
Te	10.6	oeo	20.4	—	—	—	4.251
Te	9 ~ 11	eeo	2 ~ 18	—	7	10^{-4a}	4.252

a: 连续波方式。

在 ZnGeP₂ 晶体中, 实现了 CO₂ 激光辐射高效率 SHG: 在晶体外 $\eta = 49\%$, 晶体内部 $\eta = 80\%$ ^[4.236]; $\lambda_{2\omega} = 5.3 \mu\text{m}$, $\tau_p = 2 \text{ ns}$ 的辐射能量为 $5 \sim 10 \text{ mJ}$, 然后这一辐射由另一块 ZnGeP₂ 晶体 ($\theta = 47^\circ 40'$, $\phi = 0^\circ$, $L = 10 \text{ mm}$) 再次倍频, $\eta = 14\%$ (内部效率为 22%)。

在两块 CdGeAs₂ 晶体中实现了脉冲 CO₂ 激光辐射 ($\tau = 90 \text{ ns}$) 的高效率 THG^[4.253], 转换效率为 1.5% (晶体内部 $\eta = 3\%$)。oeo 相互作用类型的相位匹配角 θ 为 45° , 晶体长度分别为 12 mm 和 4.5 mm 。

通过 ZnGeP₂ 晶体 ($\theta_{\text{eeo}} = 47.5^\circ$, $L = 5 \text{ mm}$) 对 CO₂ 激光辐射 ($\tau = 170 \text{ ns}$) 的二次谐波再次倍频, 实现了四次谐波发生, 转换效率为 2% , $E = 0.2 \text{ mJ}$ ^[4.254]。借助于 $5 \sim 6 \text{ mm}$ 长的 Tl₃AsSe₃ 晶体, 获得 CO₂ 激光器的二次谐波 ($\lambda = 4.8 \mu\text{m}$)、三次谐波 ($3.2 \mu\text{m}$)、四次谐波 ($2.4 \mu\text{m}$) 和五次谐波 ($1.9 \mu\text{m}$)^[4.243]。在所有的情况下都用了 oeo 相互作用, 相位匹配角分别为 19° 、 21° 、 27° 和 28° ; 转换到四次谐波 (从 2ω) 的效率为 27% , 转换到五次谐波 (从 4ω) 的效率 $\eta = 45\%$ 。

4.3.8 其他激光器

Isaev 等人^[4.225]用 ADP 晶体在 $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta = 90^{\circ}$ 时实现了铜蒸气激光辐射($\lambda = 510.6\text{ nm}$)的 SHG。获得了在 $\lambda = 271\text{ nm}$ 和 289 nm 的紫外辐射, 在 510.6 nm 和 578.2 nm 铜蒸气激光辐射的 SFG 和 SHG 的情况下, 功率分别为 600 mW 和 120 mW ^[4.256]。对于铜蒸气激光辐射, BBO 晶体是非常合适的^[4.257~259]。因此, 借助于 $7\sim 8\text{ mm}$ 长的 BBO 晶体($\theta_{\text{opt}} = 51^{\circ}$), UV 区的输出功率($255, 271, 289\text{ nm}$)高达 1.3 W , 转换效率为 $20\%\sim 30\%$ ^[4.259]。

在淡红银矿晶体中实现了 SOAP:Ho 激光辐射($2.06\text{ }\mu\text{m}$)的二次谐波发生^[4.260]以及 HF 激光辐射($2.7\sim 2.9\text{ }\mu\text{m}$)的二次谐波发生^[4.261]。 13.6 mm 长的 ZnGeP_2 晶体($\theta = 70^{\circ}$)用于 DF 激光器辐射的 SHG, $\eta = 6.2\%$ ^[4.262]。在 LiIO_3 晶体中实现了调 Q 的 cw 泵浦 $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$ 激光辐射的腔内 SHG, 获得的 $P = 7\text{ mW}$, 产生 $395\sim 435\text{ nm}$ 范围的 UV 辐射^[4.263]。Chinn^[4.264]实现了 cw $\text{Nd}^{3+}:\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 激光辐射($\lambda = 1.05\text{ }\mu\text{m}$)的 ICSHG, 用的是 1 mm 长的铈酸钡钠晶体, 效率 $\eta = 1\%$ 。基波辐射是沿晶体学 a 轴, 偏振是沿 b 轴; $T = 72.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为了研究在 KNbO_3 晶体中 $\text{Er}^{3+}:\text{YLF}$ 激光辐射 SHG 的可能性, 实现了染料激光器 $\lambda = 850.2\text{ nm}$ 激光辐射的 SHG, $\eta = 43\%$, 基频功率为 0.9 MW ^[4.202]。 KNbO_3 晶体的长度为 5 mm , 保持 $18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 基频波沿 a 轴传播。在 BBO 晶体($\theta_{\text{opt}} = 48.6^{\circ}$, $L = 7.5\text{ mm}$)中实现了金绿宝石激光辐射($\lambda_{\omega} = 730\sim 780\text{ nm}$)的三次谐波, 效率 $\eta = 24\%$, 能量 $E = 7.5\text{ mJ}$ ^[4.265]。

4.3.9 飞秒脉冲的频率转换

超短激光脉冲($\tau < 1\text{ ps}$)的频率转换, 特别是二次谐波发生对于所应用的非线性光学晶体的性质提出了一些额外的要求。具有超短脉宽的辐射具有宽的频率带宽, 由此非线性过程光谱带宽($\Delta\nu$ 或 $\Delta\lambda$), 及其由此引起的角度带宽($\Delta\theta$)应该对转换效率以及转换后辐射的脉冲宽度有很大的影响。这一现象可以用基波和二次谐波脉冲之间的群速失配来表征, 并由下式确定:

$$\Delta v_{\text{f}}^{-1} = \frac{dk_{2\omega}}{d(2\omega)} - \frac{dk_{\omega}}{d\omega} \quad (4.3)$$

其中 k_{ω} 和 $k_{2\omega}$ 分别是基频和二次谐波处波矢量相应的绝对值。另一个限制 SHG 效率的因素是寻常光和异常光之间的走离角 ρ , 非线性及由 SHG 可以实现的最短波长也应该加以考虑。Pelouch 等人^[4.266]提出了在 KDP、ADP、BBO 和 LBO 晶体中 $\lambda = 630\text{ nm}$ 时 SHG 情况下以上所述参数的值(表 4.19)。

和通常用于这些目的的晶体如 KDP 和 ADP 晶体相比, BBO 晶体有较高的非线性, 然而, 应该指出的是 BBO 晶体有一个非常大的走离角, 这是一个缺

点。从理论上考虑, BBO 晶体对于 0.1 ~ 1.0 ps 范围内的脉冲是最为有利的^[4.267]。由于 LBO 晶体有很小的群速失配以及 ρ 值, 还有大的角度带宽, 这种晶体在聚焦情况下使用是很有利的, 用较厚的晶体获得的结果可以与 KDP、ADP 和 BBO 晶体相比较。

表 4.19 KDP、ADP、BBO 和 LBO 晶体用于 SHG
($\lambda = 630 \text{ nm}$) 的光学性质以及由 SHG 可获得的最短波长

参数	KDP	ADP	BBO	LBO
$d_{\text{eff}}/d_{\text{eff}}(\text{KDP})$	1.0	1.2	3.9	1.5
$\Delta v_g^{-1}/(\text{fs} \cdot \text{mm}^{-1})$	185	205	360	235
$L\Delta\lambda/(\text{mm} \cdot \text{nm})$	3.2	2.9	1.6	2.5
$L\Delta\theta/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$	6.6	6.1	2.1	9.4
$\rho/(\circ)$	1.6	1.7	4.5	1.0
$\lambda_{\text{2w}, \text{min}}/\text{nm}$	258.5	262	204.8	277.4

在一系列工作中^[4.195, 266-271], 对 LBO、BBO 和 KDP 晶体用于飞秒辐射的 SHG 进行了实验研究。利用自动相关方法, 在 4.165 mm 长的 LBO 晶体的非共线 SHG 过程中, 可能测到短至 40 fs 的脉宽^[4.266]。Ishida 和 Yajima^[4.268] 利用 0.1 mm 和 0.45 mm 长的 KDP 晶体以及 0.9 mm 和 1.9 mm 长的 BBO 晶体进行了飞秒脉宽的测量。结果表明 BBO 晶体对于脉宽测量和飞秒脉冲向 UV 的有效转换两种情况都很有用。Cheng 等人完成了利用 2 mm 长的 BBO 晶体来测量 50 fs 脉宽的工作^[4.269]。利用 1 mm 长度的 KDP 晶体, 对碰撞锁模脉冲染料激光辐射实现 SHG, 对于 100 fs 和 180 fs 的脉宽, 转换效率分别为 15% 和 21%^[4.270]。在一块 7 mm 的 BBO 晶体中实现了 $\lambda = 496 \text{ nm}$, $\tau_p = 300 \text{ fs}$ 染料激光辐射的有效 SHG; $\eta = 15\%$ ^[4.271]。Edelstein 等人^[4.195] 报道了环形染料激光器飞秒脉冲的腔内 SHG; 采用 55 μm 厚的 BBO 晶体可以产生短至 43 fs、平均功率为 20 mW 的 UV 脉冲(315 nm)。

4.4 和频发生

和频发生大大增宽了由可调谐激光器发射的光谱范围。目前, 借助于晶体中的 SFG, 在深紫外光谱区获得了短至 185 nm 波长的辐射。染料激光器最经常用作混频的连续可调辐射源。钛宝石激光器和可调 OPO 辐射, 以及 Nd:YAG 激光辐射的谐波, 由不同有机液体和气体产生的 SRS 的 Stokes 分量也常常被用于这一目的。

和频也经常用于红外辐射向可见光范围的有效转换(上转换), 这非常便

于检测红外辐射。例如 CO_2 激光器的红外辐射 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) 上转换到可见区, 转换效率为 30%~40%, 通过和染料或 Nd:YAG 激光辐射(泵浦源)的混频来进行。

4.4.1 上转换到紫外区

KDP、ADP、BBO、LBO 和 KB5 晶体通常用于上转换到紫外和深紫外区的目的。由于 KDP 晶体在一个宽的光谱范围(上至 177 nm)中有高的透明性和很高的光损伤阈值, 这种晶体被成功地用于皮秒和纳秒 UV 脉冲的产生。借助于在 KDP 中的上转换, 得到 190~432 nm 范围中的 UV 辐射^[4.114,117,272-281]。表 4.20 列举了使用 KDP 的 SFG 实验激光器的特征、上转换效率以及输出功率和能量。几乎在所有的实验中都采用了相位匹配的角度调谐, 但是 Stickel 和 Dunning^[4.277] 通过 KDP 晶体的温度调谐 ($\theta_{\text{oe}} = 90^\circ, T = -20^\circ\text{C}, \dots, +80^\circ\text{C}$) 将红宝石激光辐射的二次谐波和红外染料激光辐射混频获得 240~242 nm 范围的输出。通过 Nd:YAG ($\tau_p = 0.7 \text{ ns}$) 和 XeCl ($\tau_p = 12 \text{ ns}$) 激光辐射混频, 结果得到从 XeCl 激光辐射能量出发测定的转换效率, η 等于 50% ($\lambda_{\text{sf}} = 239 \text{ nm}$, $\theta_{\text{oe}} = 68.3^\circ$)^[4.276]。Dudina 等人^[4.280] 将染料激光辐射 (545~680 nm) 转换到 UV 区 ($\lambda_{\text{sf}} = 360 \sim 415 \text{ nm}$, $\tau_p = 25 \sim 30 \text{ ns}$), 利用 Nd:YAG 激光辐射作泵浦源 (1.064 μm), 效率 $\eta = 60\% \sim 70\%$; 采用 eoe 相互作用, 相位匹配角从 56° 变到 58° 。将氢离子激光器波长为 458、488 和 515 nm 的辐射和染料激光器辐射混频产生最大功率为 0.2 mW, 在 257~320 nm 范围的连续波辐射^[4.278]。在 KDP 晶体中, 通过 1.415 μm (由 1.064 μm 辐射在氮气中由 SRS 产生) 和 $\lambda = 220 \sim 250 \text{ nm}$ 的辐射 (通过 OPO 辐射和由 Nd:YAG 激光辐射四次谐波分量分别在氮气和氢气中诱发的 SRS Stoke 分量 $\lambda = 283 \text{ nm}$ 和 299 nm 依次混频获得) 的混频得到最短的波长 (190 nm)^[4.272]。产生的皮秒脉冲能量在 212~190 nm 范围内相当于 20~40 μJ ($\theta_{\text{oe}} = 70^\circ \sim 90^\circ$)。

表 4.20 在 KDP 晶体中和频产生 UV 辐射

$\lambda_{\text{sf}}/\text{nm}$	相互作用辐射源	τ_p/ns	转换效率、 功率、能量	参考 文献
190~212	1.064 μm 的 SRS + 和频辐射 (220~250 nm) ^[4.273]	0.02	20~40 μJ	4.272
215~223	染料激光的 2ω + Nd:YAG 激光	10	10 kW	4.114
215~245	266 nm (Nd:YAG 激光器的 4ω) 的 SRS + OPO (0.9~1.4 μm)	0.02	100 μJ	4.273

续表

λ_{sf}/nm	相互作用辐射源	τ_p/ns	转换效率、 功率、能量	参考 文献
217 ~ 275	染料激光的 2ω + Nd:YAG 激光 (1.064 μm)	25 ~ 30	50% ~ 55%, 10 mW (平均)	4.274
217 ~ 226	OPO(1.1 ~ 1.5 μm) + Nd:YAG 激光 的 4ω (266 nm)	0.02	100 kW	4.117
218 ~ 244	(269 ~ 315 nm) ^[4.275] + Nd:YAG 激光	0.03	0.1 mJ	4.275
239	Nd:YAG 激光(1.064 μm) + XeCl 激光 (308 nm)	0.7	50%	4.276
240 ~ 242	红宝石激光的 2ω (347 nm) + 染料 激光	30	1 MW	4.277
257 ~ 320	染料激光 + 氩激光	cw 方式	0.2 mW	4.278
269 ~ 315	532 nm 的 SRS(Nd:YAG 激光的 2ω) + 532 nm	0.03	1 ~ 3 mJ	4.275
269 ~ 287	OPO(1.29 ~ 3.6 μm) + Nd:YAG 激光 的 3ω (355 nm)	0.02	100 kW	4.117
271	两台铜蒸气激光(511 nm 和 578 nm)	35	1.5%, 100 mW (平均)	4.279
288 ~ 393 ^a	OPO(0.63 ~ 1.5 μm) + Nd:YAG 激光 的 2ω (0.532 nm)	0.02	100 kW	4.117
360 ~ 415	染料激光 + Nd:YAG 激光	25 ~ 30	60% ~ 70%	4.280
362 ~ 432	染料激光 + Nd:YAG 激光	0.03	20%	4.281

a: 采用 DKDP 晶体。

有一些文章报道了利用 ADP 晶体的 SFG 实现了 UV 区输出(表 4.21)。通过染料和氩激光辐射的混频获得功率为 4 mW 短至 243 nm 的连续波辐射^[4.197,205]。对一台调 Q 红宝石激光器获得脉冲峰值为 1 MW、在 240 ~ 248 nm 范围内可调谐的激光输出^[4.277]。ADP 晶体长度为 25 mm, $\theta = 90^\circ$ 。当 Nd:YAG 激光辐射和染料激光辐射的二次谐波(246 ~ 302 nm)混频, 得到最短的波长(208 nm)^[4.114]。ADP 晶体被冷却到 $-120^\circ C$, $\theta = 90^\circ$, $\lambda = 208$ nm 的峰值功率为 500 W。

表 4.21 在 ADP 晶体中和频产生 UV 辐射

$\lambda_{3\omega}/\text{nm}$	相互作用辐射光源、 相位匹配角、晶体温度	τ_p/ns	转换效率、 功率、能量	参考 文献
208 ~ 214	2 ω 染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta = 90^\circ$, $T = -120^\circ\text{C}, \dots, 0^\circ\text{C}$	10	1.7 μJ	4.114
222 ~ 235	2 ω 染料激光器 + Nd:YAG 激光器	10	10%	4.114
240 ~ 248	染料激光器 + 红宝石激光器的 2 ω , $\theta = 90^\circ$, $T = -20^\circ\text{C}, \dots, +80^\circ\text{C}$	30	1 MW, 4%	4.277
243 ~ 247 ^a	染料激光器 + 氩激光器 (363.8 nm)	cw 方式	4 mW	4.197, 205
243 ^a	染料激光器 + 氩激光器 (351 nm), $\theta = 90^\circ$, $T = 8^\circ\text{C}$	cw 方式	0.3 mW	4.282
247.5	染料激光器 + 氩激光器 (431.1 nm), $\theta = 90^\circ$, $T = -103^\circ\text{C}$	cw 方式	—	4.283
246 ~ 259	染料激光器 + Nd:YAG 激光器的 2 ω , $\theta = 90^\circ$, $T = -120^\circ\text{C}, \dots, 0^\circ\text{C}$	10	1%, 3 μJ	4.114
252 ~ 268 ^a	染料激光器 + 氩激光器 (477, 488, 497 nm), $\theta_{\text{con}} = 90^\circ$	cw 方式	8 mW	4.284
270 ~ 307	染料激光器 + Nd:YAG 激光器的 2 ω , $\theta_{\text{con}} = 81^\circ$	ps 方式	—	4.281

a: ADP 晶体置于外共振腔。

利用 BBO 和 LBO 晶体可能分别产生短至 188.9 nm 和 187.7 nm 的 UV 辐射(表 4.22、表 4.23)。由于这些晶体在 UV 区的透明区域宽(对于 LBO 上到 160 nm), 可满足相位匹配条件, 非线性系数高^[4.44a, 44b, 302], 非常适合于 UV 区的非线性转换。通过染料激光器的 THG 在 BBO 晶体中得到了短至 197.4 nm($\tau = 17$ ns)的紫外辐射^[4.291], 晶体切割角度 $\theta_c = 90^\circ$, 长度 $L = 8.2$ mm。在 $I_0 = 19 \sim 29$ MW \cdot cm $^{-2}$ 时, η 约为 5%。通过将晶体冷却至 95 K, 转变后的辐射最短波长为 195.3 nm。 $\lambda_{3\omega}$ 对于晶体温度的依赖关系由下式给出: $\lambda_{3\omega} = 194.34 + 10.3 \times 10^{-3} T(\text{K})$ 。有报道在 8.2 mm 的 BBO 晶体中($\theta = 80^\circ$)实现了染料激光辐射的高效 THG; 在大部分调谐范围(199 ~ 203.3 nm)内, $\eta > 20\%$ ^[4.294]。通过染料激光器辐射(780 ~ 950 nm)的 SFG 过程及另一台染料激光器(497 nm)的二次谐波的混频, 在 BBO 晶体中实现了 188.9 ~ 197 nm 的调谐^[4.285]; 在纳秒(9 ns)和皮秒(30 ps)范围转换效率分别为 0.2% 和 7%。

表 4.22 在 BBO 晶体中和频产生 UV 辐射

λ_{sf}/nm	相互作用辐射光源	τ_p/ns	转换效率、功率、能量	参考文献
188.9 ~ 197	染料激光器 (780 ~ 950 nm) + 另一台染料激光器的 2ω (248.5 nm)	10	最高为 0.1 mJ	4.285
190.8 ~ 196.1	钛宝石激光器 (738 ~ 825 nm) + Ar 激光器的 2ω (257 nm)	—	几十 nW	4.286
193	染料激光器 + KrF 激光器 (248.5 nm)	9	0.2%, 2 μJ	4.285
193	染料激光器 (707 nm) + Nd:YAG 激光器的 4ω	90 ~ 250 fs	10 μJ (250 fs)	4.287
193.3	染料激光器 (724 nm, 5 ps) + Nd:YLF 激光器的 4ω (263 nm, 25 ps)	0.01	1.7%, 4 μJ (2.5 mJ)*	4.288
193.4	染料激光器辐射的 FOHG (774 nm, 300 fs), $\omega + 3\omega = 4\omega$	800 fs	0.5 μJ (1.5 mJ)*	4.289
194	钛宝石激光器 + Ar 激光器的 2ω (257 nm), 外腔三晶体构型	—	0.016 mJ	4.290
195.3	染料激光器的 THG ($T = 95\text{ K}$)	17	5%, 8 μJ	4.291
196 ~ 205	染料激光器 + 另一台染料激光器的 2ω	5	0.1 mJ	4.292
197.7 ~ 202	染料激光器的 THG	0.008	1%, 1 ~ 4 mW	4.293
198 ~ 204	染料激光器的 THG	5	20%, 1.7 mJ	4.294
271	两台铜蒸气激光器 (511 nm 和 578 nm)	35	0.9%, 64 mW	4.279
362.6 ~ 436.4	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, 非共线 SFG (NCSFG), $\alpha = 4.8^\circ \sim 21.3^\circ$	—	1%, 0.065 mJ	4.295
369	二极管激光器 (1310 nm) + Ar 激光器 (515 nm)	—	1.3 μW	4.296
370.6	染料激光器 (568.6 nm) + Nd:YAG 激光器, NCSFG, $\alpha = 6.3^\circ$	—	8% ~ 18%	4.297

a: ArF 准离子增益模式放大后。

表 4.23 在 LBO 晶体中和频产生 UV 辐射

λ_{sf}/nm	相互作用辐射光源	转换效率、功率、能量	参考文献
188 ~ 195	OPO (1.6 ~ 2.3 μm) + Nd:YAG 激光器的 5ω (212.8 nm), $\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ \sim 52^\circ$, ooe	0.2% ~ 2%, 2 ~ 40 μJ	4.298

续表

λ_{SF}/nm	相互作用辐射光源	转换效率、功率、能量	参考文献
187.7 ~ 195.2	OPO (1.591 ~ 2.394 μm) + Nd: YAG 激光器的 5 ω $\theta = 90^\circ$, $\phi = 88^\circ \sim 50^\circ$, ooe	3 kW (峰值)	4.299
191.4	在 H_2 中的 SRS (1.908 μm) + Nd: YAG 激光器的 5 ω $\theta = 90^\circ$, $\phi = 88^\circ \sim 50^\circ$, ooe	10%, 67 kW (峰值) 2 mW (平均)	4.299
218 ~ 242	OPO (1.2 ~ 2.6 μm) + Nd: YAG 激光器的 4 ω (266 nm) $\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ \sim 33^\circ$, ooe	0.2% ~ 2%, 20 ~ 400 μJ	4.298
232.5 ~ 238	Nd: YAG 激光器 + 染料激光器的 2 ω	—	4.300
240 ~ 255	Nd: YAG 激光器 + 染料激光器的 2 ω , NCSFG	8%, 0.12 mJ	4.301

$\lambda = 193$ nm 飞秒脉宽的 UV 辐射是有特殊重要性的, 因为它能够在 ArF 准分子增益模式中进一步被放大到 mJ 能量, 相应于 $GW \cdot cm^{-2}$ 的强度^[4.288,289]。193 nm 的最窄脉宽 90 fs 是经 Nd:YAG 激光器的四次谐波的皮秒脉冲和飞秒的染料激光器输出相混频而获得的^[4.287]。对于 SFG 采用了色散补偿的结构, 在一块 1 mm 厚的 BBO 晶体中获得输出带宽为 0.6 nm 的结果^[4.287]。注意, 在所有采用 BBO 晶体 SFG 的情况中(表 4.22), 采用的都是 ooe 相互作用。

在 LBO 晶体中通过 SFG 获得了 188 ~ 225 nm UV 范围的辐射(表 4.23)。在这些例子中, 普遍采用的是在 XY 平面中的 I 类(ooe)相互作用。当光束沿 Y 轴传播时, 观察到最短的波长。Liu 和 Kato^[4.303]讨论了设计的在 LBO 晶体中, 将 190 nm 辐射和 1 ~ 2.5 μm 范围的红外辐射混频, 通过 SFG 获得短至 160 nm 的紫外激光的装置。

KB5 晶体已被广泛用于 SFG, 来覆盖 185 ~ 269 nm 的光谱区(表 4.24)。采用染料激光的二次谐波辐射分别和红宝石激光器(694.3 nm)、Nd:YAG 激光器(1.064 μm)的辐射相混频^[4.188,306], 在 202 ~ 212 nm 范围内产生能量为 2 ~ 10 μJ 纳秒级辐射^[4.306]; 在 207.3 ~ 217.4 nm 范围内最大能量为 2.5 mJ^[4.188]。在 90° 相位匹配时实现了温度调谐^[4.311]; $\lambda_{SF} = 201.2 \sim 201.8$ nm, 温度从 $-20^\circ C$ 变到 $40^\circ C$ 。Nd:YAG 的四次谐波辐射(266 nm)和染料激光器混频产生 $\lambda_{SF} = 196.6$ nm 的辐射, $\tau_p = 8$ ns, 以及 $P = 40$ kW^[4.117]。当将染料激光器的二次谐波和另一台

在红外区 740 ~ 910 nm 的辐射混频, 通过 SFG 获得 λ 上至 185 nm 约为 10 μJ 的辐射($\tau_p = 30 \text{ ns}$)^[4.307]。相互作用的辐射沿 Y 轴传播, 而偏振是沿 X 轴。对于强度为 500 $\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 IR 辐射, 上转换效率为 8% ~ 12%。迄今为止, 在非线性晶体中通过频率转换达到最短的波长是 185 nm。通过染料激光器和波长分别为 351.1 nm 和 334.5 nm 的氩激光器辐射混频^[4.308, 312], 或和 Ar 激光器辐射的二次谐波相混频的 SFG 过程产生分别为 $\lambda = 211 \sim 216 \text{ nm}$ 和 194 nm 的连续波辐射, $\lambda = 194 \text{ nm}$ 辐射的功率为 2 μW 。温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 变到 45 $^{\circ}\text{C}$, 90 $^{\circ}$ 相位匹配可产生 194.1 ~ 194.3 nm 范围的调谐^[4.309]。通过锁模 Nd:YAG 激光辐射的三次(355 nm)和四次(266 nm)谐波与 OPO 辐射的混频可实现 196 ~ 269 nm 范围皮秒级 UV 辐射^[4.117, 310]。在波长为 $\lambda_{\text{SF}} = 197 \text{ nm}$, 和 225 ~ 269 nm 处所达到的功率分别为 20 kW 和 100 kW, $\tau_p = 20 \text{ ps}$, 晶体长度为 7 mm^[4.117]。相互作用类型为 eeo, 位于 XY 平面; 晶体切角 ϕ_c 是 65 $^{\circ}$ 。

表 4.24 在 KB5 中 UV 辐射的发生

$\lambda_{\text{UV}}/\text{nm}$	τ_p/ns	能量、功率	转换效率	过程	参考文献
217.3 ~ 234.5	7	0.5 μJ	2×10^{-3}	SHG	4.174
217.1 ~ 315.0	2 ~ 5	5 μJ	0.1	SHG	4.175
217.0 ~ 250.0	5	最高达 5 μJ	$(2 \sim 5) \times 10^{-2}$	SHG	4.176
231.4	6	0.2 mJ	2×10^{-3}	THG	4.146
229 ~ 347	18	最高达 20 μJ	10^{-5}	SHG	4.145
212.8	6	110 kW	2×10^{-3}	FIHG	4.116
208 ~ 217	10	1 W	2.5×10^{-4}	SFG	4.304
196.6	8	0.5 mJ	10^{-3}	SFG	4.305
207.3 ~ 217.4	3	0.8 mJ	3×10^{-3}	SFG	4.188
201 ~ 212	20	2 ~ 10 μJ	0.1	SFG	4.306
185 ~ 200	30	最高达 10 μJ	0.1	SFG	4.307
211 ~ 216	cw 方式	50 ~ 100 nW	10^{-6}	SFG	4.308
266	0.045	60 MW	0.05	FOHG	4.117
212.8	0.045	11 MW	0.01	FIHG	4.108
196.7 ~ 226	0.02	20 kW	—	SFG	4.117
212.8	0.02	5 MW	—	FIHG	4.117
219	0.75	100 MW	0.03	SIHG	4.222
194.1 ~ 194.3	cw 方式	2 μW	—	SFG	4.309
200 ~ 222	0.045	1 μJ	2×10^{-5}	SFG	4.310
220 ~ 266	0.045	1 μJ	—	SHG	4.311

注意，在 90° 相位匹配时观察到的最短波长，即在单轴晶 KDP 和 ADP 晶体中，辐射是沿垂直于光轴的方向传播，在双轴晶体 LBO 和 KB5 中是沿 $Y(b)$ 轴传播。图 4.8—图 4.12 给出了 KDP、ADP、BBO、LBO 和 KB5 晶体 I 类相互作用 SFG 的相位匹配曲线；从这些曲线我们可以得到 λ_1 和 λ_2 混频产生 λ_3 的辐射。曲线顶端相当于 SHG 的情况，并指出了通过 SHG 获得的最短波长。

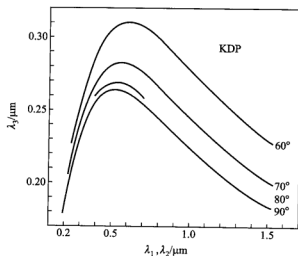


图 4.8 KDP 晶体中 $\theta = 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 和 90° 时 SFG 的调谐曲线 (ooe 相互作用)

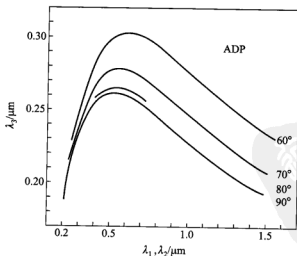


图 4.9 ADP 晶体中 $\theta = 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 和 90° 时 SFG 的调谐曲线 (ooe 相互作用)

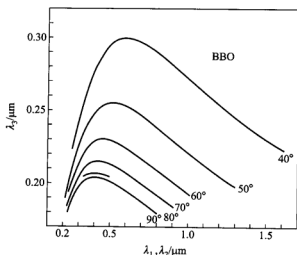


图 4.10 BBO 晶体中 $\theta = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 和 90° 时 SFG 的调谐曲线 (ooe 相互作用)

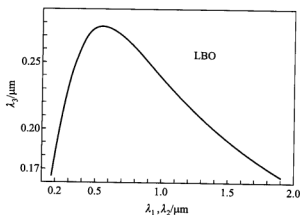


图 4.11 LBO 晶体中 $\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$ 时 SFG 的调谐曲线 (ooe 相互作用)

4.4.2 红外上转换

LiIO_3 已被用于 IR 辐射 λ 为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 到可见光的上转换^[4.313~319] (表 4.25)。Gursky^[4.313] 在一块 5 cm 长的晶体中从 $3.39 \mu\text{m}$ 波长泵浦强度为 $6.3 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的辐射中获得了 100% 的转换效率。 LiNbO_3 晶体也被用于覆盖从 $1.5 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 辐射到可见光的应用 (表 4.26)。氩激光器辐射作为泵浦源, 所用为 90° 相位匹配的 ooe 类型相互作用^[4.214, 326~327]。通过温度从 180°C 到 400°C 的变化, 从 $2.7 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 的

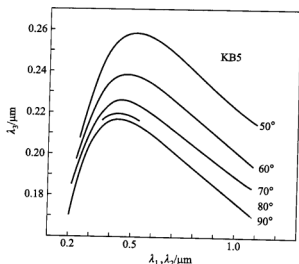


图 4.12 KB5 晶体中 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 和 90° 时 SFG 的调谐曲线(eeo 相互作用)

IR 光谱范围转变为可见光范围的激光^[4.327,328]。红宝石激光器辐射用作了泵浦源^[4.320~322,329]，在一块 2 cm 长的晶体中，当泵浦强度为 $5 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时获得了 100% 的量子效率^[4.321]。同时，He-Ne 和 Nd:YAG 激光器辐射也经常被用作泵浦源。 $\lambda = 6.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 的黑体辐射在一块 6 mm 长的淡红银矿晶体中利用 Nd:YAG 激光器($P = 1 \text{ kW}$, $f = 2 \text{ kHz}$)泵浦源被转换到近 IR 范围^[4.330]。

表 4.25 LiIO₃ 晶体中的上转换

$\lambda_{\text{IR}}/\mu\text{m}$	泵浦源	$\eta/\%$	参考文献
3.39	0.694 μm , 锁模红宝石激光器	100	4.313
3.2~5	1.064 μm , Nd:YAG 激光器	0.001	4.315
2.38	0.488 μm , 氩激光器	4×10^{-8}	4.316
1.98, 2.22, 2.67	0.694 μm , 锁模红宝石激光器	0.14~0.28	4.317
3.39	0.5145 μm , 氩激光器	2.4×10^{-2}	4.318
1~2	0.694 μm , 红宝石激光器	18	4.319

表 4.26 LiNbO₃ 晶体中的上转换

$\lambda_{\text{IR}}/\mu\text{m}$	泵浦源	$\eta/\%$	参考文献
1.69~1.71	0.694 μm , 调 Q 红宝石激光器	1	4.320
1.6~3.0	0.694 μm , 调 Q 红宝石激光器	100	4.321
1.6	0.694 μm , 红宝石激光器	10^{-5}	4.322
3.3913	0.633 μm , cw He-Ne 激光器	10^{-5}	4.323

续表

$\lambda_{\text{IR}}/\mu\text{m}$	泵浦源	$\eta/\%$	参考文献
3.392 2	0.633 μm , cw He-Ne 激光器	5×10^{-5}	4.324
2~4	1.064 μm , 调 Q Nd:YAG 激光器	—	4.325
3.39	0.515 μm , 氩激光器	—	4.326

采用上转换将天体的 IR 辐射转变为可见光谱^[4.315]。从月亮、金星、火星及其他明亮星体发出的红外辐射转变为 $\lambda = 0.76 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 的可见光辐射, η 最大为 0.01%。为了准确测量波长, 甲烷稳定的 He-Ne 激光器辐射利用 I_2 稳定的 He-Ne 激光器辐射作泵浦源在 LiNbO_3 晶体中转换到 $\lambda = 0.533 \text{ nm}$ ^[4.324], 以这种方式测得的 IR 波长为 3.392 231 40 μm 。上转换大大扩展了 OPO 调谐范围。例如, 通过红宝石激光辐射的 ($\eta = 18\%$) 混频, 在 $\lambda = 1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的 OPO 辐射在 LiIO_3 晶体中可转换为 0.42~0.51 μm 的辐射^[4.319]。相互作用为 ooe 类型, 相位匹配角从 27° 变到 37° , 输出功率相当于 10 kW。

KTP 晶体主要用于 Nd:YAG 激光辐射的上转换(表 4.27)。这样, 通过二极管激光器作泵浦源, 可以达到的最高转换效率为 50%~70%^[4.331,333]。借助于 BBO 晶体, $\lambda = 2.45 \mu\text{m}$ 和 2.69 μm 的辐射转换为可见光, $\eta = 2.3\%$; 以 $\lambda = 571 \text{ nm}$ 的染料激光器作为泵浦源^[4.336]。

表 4.27 KTP 中的上转换

$\lambda_{\text{IR}}/\mu\text{m}$	泵浦源	$\eta/\%$	参考文献
1.064	0.809 μm , 二极管激光器	68	4.331
1.54	0.78 μm , 二极管激光器	7×10^{-4}	4.172
1.064	0.824 μm , 染料激光器(腔内 SFG)	0.26	4.332
1.064	0.809 μm , 二极管激光器	55	4.333
1.064	0.805 μm , 二极管激光器	24	4.334
1.319, 1.338	0.532 μm , 调 Q Nd:YAG 激光器的 2ω	10	4.335

Nd:YAG 激光器($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $P = 2.1 \text{ W}$)的信号光与 Kr 激光器的泵浦辐射($\lambda = 676.4 \text{ nm}$, $P = 26.2 \text{ mW}$)在 KNbO_3 晶体中混频^[4.337], 辐射沿 a 轴传播, 晶体温度 $T = -4^\circ\text{C}$, 晶体长度是 8.97 mm, 在和频频率 $\lambda = 413.6 \text{ nm}$ 处辐射功率为 0.1 mW。

4.4.3 CO_2 激光辐射上转换到近 IR 和可见区

在淡红银矿($\text{Ag}_3\text{As}_3\text{S}_3$)、 Ag_3SbS_3 、硫镓银(AgGaS_2)、硫镓汞(HgGa_2S_4)、

ZnGeP₂、GaSe、CdSe 和 HgS 晶体中实现了 CO₂ 激光辐射 (10.6 μm) 非线性转换到近红外和可见区辐射。表 4.28 列出了关于泵浦源 (泵浦波长、运转方式)、相位匹配角、相互作用类型、泵浦强度、晶体长度以及量子转换效率。在一些研究工作中, 上转换是通过差频发生 (DFG)^[4.246,339,243] 和具有 ooe、eoe 和 ooe 类型相互作用^[4.360] 的 SFG 和 DFG 两者来实现的。然而, 在表 4.28 列举的所有其他情况中, 所采用的都是 SFG 过程。

淡红银矿晶体被广泛用于上转换。在一些研究工作中, 采用了红宝石激光器^[4.338,341,345,364,365], 转换到可见区的最高量子效率为 10.7%, 这相当于功率转换效率为 175%^[4.357]。在其他工作中, 也采用了 Nd:YAG^[4.340,342,344,346,347,366-368]、Kr^[4.343,369] 以及 He-Ne (0.632 8 μm)^[4.348,350,353,370] 激光器作为泵浦辐射源。在其中一项工作^[4.348] 中, 淡红银矿晶体被冷却到 77 K, 这使得在 633 nm 和 593 nm 的吸收降到 0.8 ~ 0.9 cm⁻¹。

CO₂ 激光辐射转到可见区的最高量子效率 (40%) 是由 Jantz 和 Koidl^[4.351] 实现的, 他们采用了一台纳秒染料激光器作为泵浦源 ($\lambda = 598$ nm, $\theta_{\text{ooe}} = 90^\circ$, Ag-GaS₂ 晶体长度为 5 mm)。Voronin 等人^[4.353] 通过泵浦调 Q 方式运转的 Nd:YAG 激光辐射采取二次级联操作的方式实现了红外上转换 $10.6 + 1.064 \Rightarrow 0.967$ μm^{*}, $0.967 + 1.064 \Rightarrow 0.507$ μm。在第一次转换阶段, 采用硫镓银晶体, 量子转换效率为 30%。其 $\lambda = 0.967$ μm 的转换是用同一泵浦源在 Li-IO₃ 晶体 ($\theta_{\text{ooe}} = 21.6^\circ$) 中进行的。为了获得所需的偏振, 在两块晶体之间放置了一块结晶石英片, 使泵浦源偏振矢量旋转了 90°, 将 0.967 μm 波的偏振旋转了 180°。在第二级转换中量子转换效率 η 为 80%。 10.6 μm $\Rightarrow 0.507$ μm 转换总的量子效率是 24%。利用调 Q Nd:YAG 激光器为泵浦源在 HgGa₂S₄ 晶体中实现了 10.6 μm 的辐射有效转换到近红外, 其功率转换效率高达 60%^[4.357]。

表 4.28 表明淡红银矿和硫镓银是 CO₂ 激光辐射转换到可见区最为有前途的材料: 量子转换效率在脉冲方式时为 10% ~ 40%, 在连续方式时为 4×10^{-6} 。

CO 激光辐射上转换到可见区的实验也有报道。研究人员在一块 0.8 cm 长的淡红银矿晶体中以 He-Ne 激光辐射 (0.633 μm) 作为泵浦源得到的量子转换效率为 2.8×10^{-8} , θ_{ooe} 为 $33^\circ \sim 36^\circ$ ^[4.370]。在其他工作中^[4.361], 为此采用了一块 GaSe 晶体用 Nd:YAG 激光辐射 (1.064 μm) 作为泵浦源, $\theta_{\text{ooe}} = 18.8^\circ$ 。

* 译者注: 原文有误, 应为 0.967 μm, 误为 0.976 μm。

表 4.28 CO₂ 激光辐射的上转换

晶体	泵浦源	$\lambda_{\text{ex}}/\mu\text{m}$	相互作用 用类型	$\theta_{\text{out}}/(\circ)$	$I_0/(W \cdot \text{cm}^{-2})$	L/mm	$\eta/\%$	参考文献
Ag ₃ AsS ₃	红宝石激光器, 300 μs , 20 mJ	0.694	eee	27.7	—	4.5	1.4×10^{-4}	4.338
	cw He-Ne 激光器, 0.25 mW	0.633	ooo	25.4 ~ 27.8	—	10	2×10^{-5}	4.339
	ns Nd:YAG 激光器, 740 W	1.064	eee	20	—	6	0.84	4.340
	红宝石激光器, 1 ms	0.694	—	—	10^4	10	0.14	4.341
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	eee	20	400	6	0.5	4.342
	cw Kr 激光器, 60 mW	0.647	eee	—	—	9	2×10^{-4}	4.343
	Nd:YAG 激光器	1.064	eee	20	—	14	1.5	4.344
	红宝石激光器, 25 ps	0.694	ooo	25.2	10^8	5	10.7	4.345
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	eee	20	—	—	30^b	4.346
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	eee	20	$(0.5 \sim 1.2) \times 10^8$	—	8^c	4.347
Ag ₃ SbS ₃	cw He-Ne 激光器	0.633	eee	29	—	—	4×10^{-4}	4.348
	cw Nd:YAG 激光器	1.064	ooo	27.3	86	3.5	4×10^{-6}	4.349
	Nd:YAG 激光器	1.064	eee	40	6×10^5	3	40^b	4.350
	染料激光器, 3 ns	0.598	ooo	90	—	5	40	4.351
	红宝石激光器, 30 ns	0.694	eee	55	—	3.3	9	4.352
AgGaS ₂	红宝石激光器, 自由运行	0.694	eee	55	—	3.3	0.01	4.352
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	eee	40	—	—	30	4.353
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	eee	40	$(0.5 \sim 1.2) \times 10^6$	—	14^c	4.347

续表

晶体	泵浦源	$\lambda_{\text{泵}}/\mu\text{m}$	相互作用 用类型	$\theta_{\text{pm}}/(^{\circ})$	$I_0/(W \cdot \text{cm}^{-2})$	L/mm	$\eta/\%$	参考文献
HgGa_2S_4 ZnGeP_2	染料激光器	0.598	ooe	90	9×10^4	—	0.1	4.354
	染料激光器	0.597	ooe	90	—	8	—	4.355
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	ooe	41.6	$(0.5 \sim 1.2) \times 10^6$	3.6	60(20) ^c	4.347, 356
	Nd:YAG 激光器	1.064	oeo	82~89	—	10	1.4	4.357
	ns Nd:YAG 激光器	1.064	oeo	82.9	$(0.5 \sim 1.2) \times 10^6$	—	6 ^c	4.347
GaSe	CO 激光器, 4.7 W	5	eeo	56	—	—	0.01	4.358
	Nd:YAG 激光器, 30 ns	1.064	oeo	82.5	3×10^6	3	5	4.359
	CO 激光器	5~6	ooe, eoe, ooe	10~18	—	1.5	2.5×10^{-2}	4.360
	Nd:YAG 激光器	1.064	ooe, eoe, ooe	13~15	—	2.5	1.6×10^{-3}	4.360
	Nd:YAG 激光器	1.064	ooe	13.6	10^4	3.5	2×10^{-2}	4.361
CdSe	Nd:YAG 激光器	1.833	oeo	77	2.4×10^7	10	35 ^b	4.362
	HF 激光器, 250 ns	2.72	oeo	70.5	6×10^6	30	40	4.363
HgS	cw He-Ne 激光器, 1 mW	0.633	eco	25.3	—	8	4×10^{-4} ^a	4.246

a: 起辉发生。

b: 功率转换效率。

c: 下列级联过程的功率转换效率:

10.6 + 1.064 → 0.967 μm 0.967 + 1.064 → 0.507 μm

4.5 差频发生

差频发生 (DFG) 或称“下转换”通常用于获得中远红外区以及毫米波区的波长。在一些情况下, DFG 用于可见区高功率激光的调谐。

4.5.1 在可见区的 DFG

Lyutskanov 等人^[4.276]报道了利用 Nd:YAG 激光辐射作为泵浦源 ($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $\tau_p = 0.7 \text{ ns}$) 将高功率 XeCl 激光辐射 ($\lambda = 308.0, 308.2, 308.5 \text{ nm}$, $\tau_p = 12 \text{ ns}$) 转换到 $\lambda = 434 \text{ nm}$ 。采用了一块 43 mm 长的 KDP 晶体; 相位匹配角 $\theta = 53^\circ$, 相互作用为 ooe 类型。在一块 5 cm 长的 DKDP 晶体实现了 $\lambda = 555 \sim 580 \text{ nm}$ 的若丹明 6G 激光辐射高效转换到 $\lambda = 490 \sim 510 \text{ nm}$ 的辐射^[4.371] (表 4.29)。

表 4.29 在可见区的差频发生

晶体	$\lambda_{\text{DF}}/\text{nm}$	相互作用辐射源	转换效率/%	参考文献
KDP	434	Nd:YAG 激光器 ($\tau = 0.7 \text{ ns}$) + XeCl 激光器 ($308 \text{ nm}, 12 \text{ ns}$)	25	4.276
DKDP	490 ~ 510	染料激光器 + Nd:YAG 激光器的 4ω (266 nm)	87	4.371
ADP	680 ~ 1 100	氩激光器 (337 nm) + 染料激光器 $\theta_{\text{mix}} = 49^\circ \sim 53^\circ$	—	4.372
ADP	490 ~ 510	染料激光器 + Nd:YAG 激光器的 4ω (266 nm)	80	4.371

4.5.2 在中红外区的 DFG

为了得到 $1 \sim 6 \mu\text{m}$ 区的 IR 辐射, 主要使用了 LiIO_3 ^[4.281,373-385] 和 LiNbO_3 晶体^[4.328,386-391]。在这一光谱区内, 所述晶体具有高透过性、相对高的光学破坏阈值、高的非线性系数等优点。最近, BBO 晶体在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 区域找到了应用^[4.392-395]。淡红银矿^[4.396,397]、硫镓银^[4.398-412]和 GaSe ^[4.413,410,414-416] 晶体, 同时还有 AgGaSe_2 ^[4.231,413,417,418]、 CdGeAs_2 ^[4.240,419]、 CdSe ^[4.401,420] 和 Te ^[4.421] 晶体是在 $4 \sim 23 \mu\text{m}$ 波长范围中最常用的。

表 4.30 列举了用于中红外范围 DFG 晶体的数据、相互作用辐射所用的相应光源, 以及所产生 IR 辐射的一些输出参数。在^[4.378]中给出了 $2.3 \sim 4.6 \mu\text{m}$ 范围内 cw IR 辐射的产生。借助于 LiIO_3 晶体的非共线 DFG, 对若丹明 6G 激光器 ($\lambda = 570 \sim 630 \text{ nm}$) 的辐射和氩离子激光器 ($\lambda = 514 \text{ nm}$ 或 488 nm) 的

辐射进行了混频, 一块 10 mm 长的 LiIO_3 晶体放置在染料激光器腔内; 相位匹配从 40° 变到 50° , 相互作用光束之间的夹角 α 相当于 $4^\circ \sim 5^\circ$, 转换效率改为 10^{-6} ; 所得到的 IR 辐射功率单模方式为 $0.5 \mu\text{W}$, 多模方式为 $4 \mu\text{W}$, 脉宽为 5 cm^{-1} 。

表 4.30 由 DFG 产生的红外辐射

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	相互作用辐射源, 晶体参数	转换效率, 能量 功率, τ_p	参考 文献
LiIO_3	4.1 ~ 5.2	染料激光器 + 红宝石激光器, ICDFG, $L = 12 \text{ mm}$	100 W (峰值)	4.373
	1.25 ~ 1.60	染料激光器 + 调 Q Nd:YAG 激光器	0.5 ~ 70 W (峰值), $\Delta\nu = 0.1 \text{ cm}^{-1}$, 60ns	4.374
	3.40 ~ 5.65	1.064 和 $0.532 \mu\text{m}$, ICDFG, $\theta_{\text{mix}} = 21^\circ \sim 28.5^\circ$		
	2.8 ~ 3.4	染料激光器 + 调 Q Nd:YAG 激光器, $L = 10 \text{ mm}$	80 mW (峰值)	4.375
	1.1 ~ 5.6	染料激光器 + Nd:YAG 激光器 (1.064 和 $0.532 \mu\text{m}$), $\theta_c = 23^\circ$	—	4.280
	2.3 ~ 4.6	染料激光器 + 氩激光器 (514 和 488 nm)	0.5 ~ 4 μW , cw	4.378
	4.3 ~ 5.3	染料激光器 + Nd:YAG 激光器的 2ω , $\theta_{\text{mix}} = 24.3^\circ$	—	4.379
	0.7 ~ 2.2	染料激光器 + 氮激光器, $\theta_{\text{mix}} = 51^\circ \sim 31^\circ$	3 ns	4.380
	3.8 ~ 6.0	染料激光器 + 铜蒸气激光器 (511 nm), $\theta_c = 21^\circ \sim 24^\circ$	10 ~ 100 μW , 20 ns	4.381
	3.5 ~ 5.4	染料激光器 + Nd:YAG 激光器的 2ω , $\theta_{\text{mix}} = 20^\circ$	0.8 mJ, 10 ns	4.382
	1.2 ~ 1.6	二台染料激光器, $\theta_{\text{mix}} = 29^\circ$	1.5 ~ 5 ps	4.383
	4.4 ~ 5.7	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta_{\text{mix}} = 20^\circ \sim 22^\circ$	550 kW, 8 ns	4.384
	≈ 5	二台染料激光器, $\theta_{\text{mix}} = 20^\circ$, $L = 3 \text{ mm}$	10%, 10 nJ, 400 fs	4.385
	3 ~ 4	染料激光器 + 红宝石激光器	1%, 6 kW	4.386
	2.2 ~ 4.2	染料激光器 + 氩激光器	1 μW , cw	4.328
LiNbO_3	2 ~ 4.5	染料激光器 (1.2 ps) + 氩激光器 (100 ps), $\theta = 90^\circ$, $T = 200 \sim 400^\circ\text{C}$	25 μW (平均), 1.2 ps, $f = 138 \text{ MHz}$	4.387, 388

续表

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	相互作用辐射源, 晶体参数	转换效率, 能量 功率, τ_p	参考 文献
LiNbO ₃	2~4	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta_{\text{inc}} = 46^\circ \sim 57^\circ$	60%, 1.6 MW	4.389
	2.04	二台染料激光器, $\theta_{\text{inc}} = 90^\circ$	50%, $\Delta\lambda =$ 0.03 nm	4.390
LiNbO ₃	1.7~4.0	CPM 染料激光器 + 亚皮秒连续, θ_c $= 55^\circ$, $L = 1\text{ mm}$	10 kW(峰值), 0.2 ps, $\Delta\nu =$ 100 cm^{-1}	4.391
BBO	2.5	染料激光器 (620 nm) + 皮秒连续 (825 nm), $\theta_{\text{inc}} = 20.3^\circ$, $L = 5\text{ mm}$	5%, 4 μJ , 0.5 ps	4.392
	0.9~1.5	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta_{\text{inc}} = 20.5^\circ \sim 24.5^\circ$, $L = 10\text{ mm}$	23%, 4.5 mJ, 8 ns	4.393
	2.04~3.42	二台染料激光器, NCDFF, $\theta_{\text{inc}} =$ $12^\circ \sim 17^\circ$, $L = 6\text{ mm}$	300~400 W (峰值)	4.394
	1.23~1.76	染料激光器 + 钛宝石激光器	10 μW (平均), 150 fs, $f = 80\text{ MHz}$	4.395
KTP	1.4~1.6	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta_{\text{inc}} = 76^\circ \sim 78^\circ$, $\phi = 0^\circ$	8.4 kW, $f = 76\text{ MHz}$, 94 fs	4.421
Ag ₃ AsS ₃	11~23	二台染料激光器	3 W(峰值), 30 ns	4.396
	3.7~10.2	OPO(1.60~1.67 μm) + 磷酸盐玻璃 激光器的 2ω (527 nm)	25~50 μJ , 10 ps	4.397
AgGaS ₂	5.5~18.3	二台染料激光器, $\theta = 90^\circ$	4 W, 4 ns	4.398
	5~11	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta_{\text{inc}} = 38^\circ \sim 52^\circ$	180 kW, 12 ns	4.399
	3.9~9.4	染料激光器 + Nd:YAG 激光器	1%, 8 ps	4.400
AgGaS ₂	4~11	OPO(2~4 μm) + $\lambda = 1.4 \sim 2.13\text{ }\mu\text{m}$ 的 辐射	1 kW, 8 ns	4.401
	8.7~11.6	二台染料激光器, $\theta_{\text{inc}} = 65^\circ \sim 85^\circ$	0.1 mW, 500 ns	4.402
	4.6~12	二台染料激光器, $\theta_{\text{inc}} = 45^\circ \sim 83^\circ$	300 mW, 10 ns	4.403

续表

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	相互作用辐射源, 晶体参数	转换效率, 能量 功率, τ_p	参考 文献
AgGaS ₂	7 ~ 9	染料激光器 + 钛宝石激光器, $\theta_{\text{osc}} = 90^\circ$	1 μW , cw, $\Delta\nu = 0.5 \text{ MHz}$	4.404
	4.76 ~ 6.45	二台染料激光器 + 钛宝石激光器, $\theta_{\text{osc}} = 90^\circ$, $L = 45 \text{ mm}$	20 μW , cw, $\Delta\nu = 1 \text{ MHz}$	4.405
	≈ 4.26	GaAlAs 激光器 (858 nm) + 钛宝石激 光器 (715 nm, $\theta_{\text{osc}} = 90^\circ$)	47 μW (cw), 89 μW (50 μs)	4.406
	4.73, 5.12	二极管激光器 + 钛宝石激光器, $\theta_{\text{osc}} = 90^\circ$	1 μW , cw	4.407
	5.2 ~ 6.4	Nd:YAG 激光器 + 近红外 (LiIO ₃ 中的 DFG)	35%, 23 ps	4.408
	3.4 ~ 7.0	染料激光器 + Nd:YAG 激光器, $\theta_c = 53.2^\circ$	17 μW (平均), 2.16 ps, $f = 76 \text{ MHz}$	4.409
	4 ~ 10	染料激光器 (1.1 ~ 1.4 μm) + Nd:玻璃 激光器 (1.053 μm)	2%, 10 nJ ~ 1 μJ , 1 ps	4.410
	4.5 ~ 11.5	染料激光器 (870 ~ 1000 nm) + 钛宝石激 光器 (815 nm), $\theta_c = 45^\circ$, $L = 1 \text{ mm}$	10 nJ, 400 fs, $f = 1 \text{ kHz}$	4.411
	9	双波长输出的钛宝石激光器 (50 ~ 70 fs), $\theta_c = 44^\circ$, $L = 1 \text{ mm}$	0.03 μJ , $f = 85 \text{ MHz}$	4.412
	7 ~ 15	OPO (1.5 ~ 1.7 μm) + Nd:YAG 激光器 (1.32 μm), $\theta_{\text{osc}} = 90^\circ \sim 57^\circ$	1.2%	4.231
AgGaSe ₂	12.2 ~ 13	CO 激光器 (5.67 ~ 5.85 μm) + CO ₂ 激 光器, $\theta = 61^\circ$	0.2 μW , cw	4.417
	8 ~ 18	OPO 的信号光和闲频光	0.1 mJ, 3 ~ 6 ns	4.418
Cd- GeAs ₂	11.4 ~ 16.8	CO 激光器 + CO ₂ 激光器	4 μW , cw	4.240
GaSe	9.5 ~ 18	染料激光器 + 红宝石激光器	300 W, 20 ns	4.414
	4 ~ 12	OPO 的闲频光和信号光	60 W	4.415
	7 ~ 16	Nd:YAG 激光器 + F ₂ 色心激光器, $\theta_{\text{osc}} = 13^\circ \sim 15^\circ$, $\theta_{\text{osc}} = 12^\circ \sim 16^\circ$	0.1 ~ 1 kW, 10 ns	4.416
	6 ~ 18	染料激光器 (1.1 ~ 1.4 μm) + Nd:玻 璃激光器 (1.053 μm)	10 nJ ~ 1 μJ , 1 ps	4.410

续表

晶体	$\lambda/\mu\text{m}$	相互作用辐射源, 晶体参数	转换效率, 能量 功率, τ_p	参考文献
CdSe	16	OPO 信号光(1.995 μm) + OPO 闲频光 (2.28 μm), $\theta = 62.22^\circ$	0.5 kW, 20 Hz, 10 ns	4.420
	9 ~ 22	OPO(2 ~ 4 μm) + $\lambda = 1.4 \sim 2.13$ μm 的辐射	10 ~ 100 W, 8 ns	4.401
Te	10.9 ~ 11.1	CO ₂ 激光器(10.2 μm) + cw 自旋反转	10 μW	4.421
		激光器(5.3 μm), $\theta_{\text{res}} = 14^\circ$		

在 CdGeAs₂ 晶体中, 利用 CO₂ 和 CO 激光辐射之间的 DFG 获得了 ~4 μW 功率的 11.4 ~ 16.8 μm 范围的 cw 辐射^[4.240]; 对于 II 类相互作用, 相位匹配角为 $46^\circ \sim 47^\circ$ 。有报道分别在 LiIO₃、LiNbO₃ 和 AgGaS₂ 晶体中获得了在 2 ~ 4 μm 、4.4 ~ 5.7 μm 以及 5 ~ 11 μm 范围的纳秒 IR 辐射^[4.384, 389, 399]。在所有三种情况下, 都是由染料激光器的辐射与 Nd:YAG 激光辐射混频。在一块 25 mm 长的铈酸锂晶体中 $\lambda = 2 \sim 4$ μm 的最大 IR 功率相当于 1.6 MW, 平均功率相当于 130 mW, 不同频率辐射的脉宽为 8 ns; 相位匹配角从 46° 变到 57° 。对于 4.4 ~ 5.7 μm 范围, 由一块 19 mm 长的 LiIO₃ 晶体的 DFG 所覆盖, 在 $\tau = 8$ ns 时峰值 IR 功率为 550 kW; 平均功率相当于 $\lambda = 4.9$ μm 处的 45 mW, 相位匹配角 θ_{oe} 是 $20^\circ \sim 22^\circ$ 。在 $\lambda = 4.9$ μm 处的 IR 辐射带宽估计为 0.1 cm^{-1} 。对于 5 ~ 11 μm 的范围, 由一块 10 mm 长的 AgGaS₂ 晶体的 DFG 所覆盖, 峰值功率为 180 kW, $\tau = 8$ ns, 平均功率均为 ~14 mW。相位匹配角 θ_{oe} 从 38° 变到 52° , 随染料激光器从 1.35 μm 到 1.17 μm 同时调谐, IR 辐射带宽估计为 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^{-1}$ 。

在淡红银矿中从两台染料激光器辐射之间的 DFG 覆盖了 11 ~ 23 μm 的波长^[4.396], 在 $\lambda = 16 \sim 20$ μm 的峰值 IR 功率相当于 1 ~ 3 W (脉冲宽度: 3 ns)。4 mm 长的 Ag₃AsS₃ 晶体依照对光轴 $\theta_c = 20^\circ$ 的方向切割并使用。当晶体旋转 7° 时就可以覆盖上述的光谱范围。对淡红银矿的 λ 上到 24 μm 的透过范围也进行了测量^[4.396]: 在 $\lambda = 24$ μm 处吸收系数 $\alpha \approx 70 \text{ cm}^{-1}$ 。

在 LiNbO₃、AgGaS₂ 和 CdSe 晶体中的下转换过程中覆盖了 1.4 ~ 22 μm 的光谱范围^[4.401]。在 LiNbO₃ 晶体中, Nd:YAG 激光器和染料激光器(610 ~ 710 nm)的辐射混频; DFG 的结果可以在 1.4 ~ 2.13 μm 范围(IR 1)调谐; 在另一块 LiNbO₃ 晶体中, 实现了 2.13 ~ 4 μm 光谱范围(IR 2)的 OPO。在 AgGaS₂ 和 CdSe 晶体中, 通过 IR 1 和 IR 2 的混频, 实现 DFG, 可以产生分别覆盖

4~11 μm 和 9~22 μm 的光谱范围的辐射。在 1.4~4 μm 范围中,输出功率为几 MW,在 4~10 μm 范围中,输出功率为几 kW,在 9~22 μm 范围中,输出功率为 10~100 W, $\tau=8\text{ ns}$ 以及 $f=10\text{ Hz}$ 。

有一些文章阐述了通过 DFG 实现在 $\lambda=1\sim9.4\text{ }\mu\text{m}$ 的皮秒 IR 辐射。从两台锁模染料激光器辐射在 1 mm 长的 LiIO_3 晶体中的混频产生 $\lambda=1.2\sim1.6\text{ }\mu\text{m}$ 的辐射,其峰值功率最高为 10 W,脉冲宽度为 1.5~5 ps^[4.383]。脉宽宽度是通过使用 IR 和在 1 mm 长的 LiIO_3 晶体 ($\theta_{\text{mix}}=37^\circ$) 与染料激光器之间的 SFG 相关方法来测量的。在 5 mm 长的 LiNbO_3 晶体中的差频产生覆盖了 2~4.5 μm 的 IR 光谱范围。一台声光锁模的氩激光器的辐射 ($\lambda=514.4\text{ nm}$, $\tau=10\text{ ps}$) 和由同一台激光器泵浦的若丹明 6G 激光器辐射 ($\tau=1.2\text{ ps}$) 混频,在 $\lambda=2.43\text{ }\mu\text{m}$ 的 IR 脉冲的光谱宽度是 2.6 nm; 其他特征在表 4.30 中给出。

Elsaesser 等人^[4.400]实现在 3.9~9.4 μm 区域 $\tau_p=8\text{ ps}$ 红外脉冲的 DFG,这是采用 Nd:YAG 激光器辐射 ($\lambda=1.064\text{ }\mu\text{m}$, $\tau=21\text{ ps}$) 和染料激光器辐射 ($\lambda=1.2\sim1.46\text{ }\mu\text{m}$) 在一块 15 mm 长的 AgGaS_2 晶体中实现的。相位匹配角从 36° 变到 48° ,在整个可调谐范围内 IR 辐射的带宽为 6.5 cm^{-1} 。下转换到 IR 辐射的量子效率,对于 Nd:YAG 激光脉冲能量来说达到百分之几。有报道说实现在 $\lambda=1.4\sim1.6\text{ }\mu\text{m}$, $f=3.8\text{ MHz}$ 以及 $\tau_p=94\text{ fs}$ 的 IR 辐射^[4.422]。一台声光锁模的 cw Nd:YAG 激光辐射 ($\tau=100\text{ ps}$) 在 KTP 晶体中 ($\theta_c=76^\circ$, XZ 平面, $L=3.4\text{ mm}$) 与一台由 Nd:YAG 激光器二次谐波同步泵浦的染料激光辐射相混频。IR 辐射的平均功率为 3 mW。如果采用 BBO 晶体代替 KTP 晶体,在 $\lambda=1.42\text{ }\mu\text{m}$ 处的平均功率为 50 μW 。

通过锁模 Nd 玻璃激光器的输出 (1.053 μm , 2 ps) 与染料激光器辐射 (1.1~1.4 μm) 的行波混频,在 1 cm 长的 AgGaS_2 和 GaSe 晶体中的差频发生,可以产生 4~18 μm 范围的超短 (1 ps) IR 脉冲^[4.410]。截止波长相应于相关晶体的吸收边: AgGaS_2 是 10 μm , GaSe 是 18 μm 。通过钛宝石激光器和染料激光器输出的行波,在 AgGaS_2 晶体中的混频产生 4.5~11.5 μm 范围内短到 400 fs 的 IR 脉冲^[4.411]。IR 脉冲的脉宽时间应用硅片中的泵-探技术来测量。在 Si 中由 $\lambda_{\text{ex}}=815\text{ nm}$ 的辐射诱导的热载流子生成,结果造成 IR 吸收的增加,这相当于探测波长在 $\lambda_{\text{探头}}=8.0\text{ }\mu\text{m}$ 处。

在 [4.423] 中提出了缩短 CO_2 激光脉冲宽度的二次级联方法并得到了实现。 CO_2 激光辐射 ($\lambda=10.6\text{ }\mu\text{m}$, $\tau=150\text{ ns}$) 和 Nd:YAG 激光辐射 ($\lambda=1.064\text{ }\mu\text{m}$, $\tau=20\text{ ns}$) 在第一块淡红银矿晶体中混频; $\lambda=1.2\text{ }\mu\text{m}$ 的差频辐射再次在第二块淡红银矿晶体中与 1.064 μm 混频,变为下转换的 10.6 μm 辐射 ($\tau=20\text{ ns}$)。从 1.064 μm 的辐射计算的功率转换效率为 0.05%,这使得可能获得约

10 kW · cm⁻² 的 IR 辐射强度。在非线性转换的两级中, 使用了 $\theta_{\text{mix}} = 20^\circ$, 长为 1 cm 的淡红银矿晶体。

4.5.3 在远红外区的 DFG

两束相近频率的激光器之间的差频辐射是产生远红外辐射 ($\lambda = 50 \mu\text{m} \sim 20 \text{ mm}$) 的一种方法。例如, 两台温度调谐红外激光器在 LiNbO₃ 和石英中的混频可以产生频率为 $1.2 \sim 8.1 \text{ cm}^{-1}$ 的远红外辐射^[4.424]。一台具有宽光谱的辐射也能用作泵浦源。这样在产生光谱中的频率分量相互作用, 结果产生了带宽决定的差频。这一方法被用于产生 100 cm^{-1} 固定频率的红外辐射, 它是在 LiNbO₃ 晶体中由钽硅酸盐玻璃激光器辐射来泵浦^[4.425]。

LiNbO₃ 晶体是一种主要用于 IR 范围的非线性材料, 因为晶体在这一范围内很透明。其他各向同性晶体 (GaAs、ZnTe 和 ZnSe) 具有高非线性, 也被使用 (表 4.31)。下转换到 $\nu = 20 \sim 200 \text{ cm}^{-1}$ 的量子效率达到了 0.1% ~ 0.3%^[4.433]。所用的是两台纳秒和皮秒脉宽的染料激光器。两台激光的放大器是用 Nd:YAG 激光辐射的二次谐波泵浦的, 这保证了相互作用脉冲的同步。两束相互作用的光束以小角度 α 聚焦到 4 mm 的 LiNbO₃ 晶体。远红外辐射频率的调谐通过同时将 α 从 5 ~ 50 mrad 调谐来实现, 并改变纳秒染料激光器的频率。在 10 ps 脉宽时所产生的能量为 3 nJ。

表 4.31 在远红外区中的差频发生

泵浦源	晶体	ν/cm^{-1}	$\lambda/\mu\text{m}$	功率, 能量	参考文献
Nd 玻璃激光器 (1.06 μm)	LiNbO ₃	100	100	—	4.425
红宝石激光器 (0.694 μm)	LiNbO ₃	29	330	—	4.426
二台红宝石激光器 (0.694 μm), 1 MW, 30 ns	LiNbO ₃ 石英	1.2 ~ 8.0	1 250 ~ 8 330	20 mW	4.424
Nd 玻璃激光器 (1.06 μm), 50 mJ, 10 ps	ZnTe, LiNbO ₃	8 ~ 30	330 ~ 1 250	20 mW/cm ⁻¹	4.427
Nd 玻璃激光器 (1.06 μm), 10 ps	LiIO ₃	—	—	—	4.428

续表

泵浦源	晶体	ν/cm^{-1}	$\lambda/\mu\text{m}$	功率, 能量	参考文献
染料激光器 (0.73 ~ 0.93 μm), 11 ~ 15 ns, 4 ~ 13 MW	ZnTe, ZnSe, LiNbO ₃	5 ~ 30	330 ~ 2 000	1 W (ZnTe)	4. 429
Nd 玻璃激光器 (1.064 μm), 10 ps	LiNbO ₃	0.4 ~ 2.5	4 000 ~ 25 000	60 W	4. 430
二台红宝石激光器 (0.694 μm), 20 ns	LiNbO ₃	1 ~ 3.3	3 000 ~ 10 000	0.5 W	4. 431
红宝石激光器 (0.694 μm)	LiNbO ₃	1.67 ~ 3.3	3 000 ~ 6 000	—	4. 432
二台染料激光器: $\tau_1 = 1 \sim 2$ ps, $\lambda_1 = 589$ nm, $E_1 = 0.2$ mJ; $\tau_2 = 20$ ns, $\lambda_2 = 590 \sim 596$ nm, $E_2 = 0.2$ mJ	LiNbO ₃	20 ~ 200	50 ~ 500	3 nJ	4. 433
双频率 CO ₂ 激光器	GaAs	2 ~ 100	100 ~ 5 000	—	4. 434
两台 CO ₂ 激光器	ZnGeP ₂	70 ~ 110	90 ~ 140	1.7 μW	4. 435

4.6 光参量振荡

4.6.1 在紫外、可见及近红外光谱范围的 OPO

在非线性晶体中的光学参量振荡 (OPO) 可能获得可调频率的辐射。角度和温度相位匹配调制方法被用于平滑地改变光学参量振荡器的波长。除了各种好处外, 这两种方法也有一些缺点。角度调谐相当简单并且比温度调谐更快。温度调谐一般在 90° 相位匹配时采用, 即当双折射角为 0° 时使用。这一方法主要用于相位匹配具有很强温度关联性的晶体: ADP ($\lambda_{\text{泵浦}} = 266$ nm)、LiNbO₃ ($\lambda_{\text{泵浦}} = 530$ nm)、LBO ($\lambda_{\text{泵浦}} = 266, 355$ 和 530 nm)、Ba₂NaNb₅O₁₅ ($\lambda_{\text{泵浦}} = 530$ nm)、KNbO₃ ($\lambda_{\text{泵浦}} = 532$ nm) 和 DKDP ($\lambda_{\text{泵浦}} = 266$ nm)。目前, 采用光学参量振荡可能获得从 UV (300 nm) 到中

红外范围(18 μm)的连续可调谐辐射。在近红外区最短的脉宽可短至 57 ~ 65 fs(在可见区,小于 100 fs), OPO 辐射谱宽可减至 0.02 cm^{-1} 。OPO 运转的最高效率可达到 50%, 相应于泵浦亏损为 70%~80%(见下节), 分别通过采用 KTP、LBO、BBO 和 LiNbO_3 :MgO 晶体以飞秒、皮秒、纳秒和连续波的方式来实现。

因为参量振荡的激发需要高强度的辐射($10^7 \sim 10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$), 纳秒和皮秒的泵浦源通常用于 OPO。所有的 OPO 构型可以归化为两种构型: 行波 OPO(无谐振腔)以及共振 OPO。

行波 OPO 构型(TWOP)通常包括一块或两块非线性晶体。TWOP 方法简单并能在整个晶体的透明区内实现; 然而, 该方法也有一些缺点。例如, 为了获得高的转换效率, 需要接近于晶体破坏阈值的高泵浦强度(高至 30 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$)。在 TWOP 构型中, 最高的转换效率在 KDP(67%~74%)和 ADP(60%)晶体中实现, 整个 OPO 脉冲能量最高至 2.3 J。

单共振 OPO, 或 SROPO, 仅对信号光或闲频光频率提供共振反馈。双共振 OPO, 或 DROPO, 对于信号光和闲频光都采用了共振反馈。奇特的三重共振 OPO, 在泵浦频率也用共振反馈, 参量晶体放置在激光腔内, 因此也称之为腔内 OPO。例如非常偶然使用的 CPM 染料激光器。值得一提的是还有四重共振 OPO, 采用 OPO 谐振腔内的 SHG, 以及在二次谐波处也采用共振反馈。

具有同步泵浦的皮秒和飞秒 OPO 是共振 OPO 最有希望的类型。非线性晶体置于腔内(或两个腔内), 这保证了在一个或两个频率上的正反馈, 并由一系列超短脉冲来泵浦。脉冲之间的时间周期等于谐振腔的二次通过时间(轴向周期)。谐振腔一般包括两块宽带镜片, 在 OPO 波长范围的反射率分别为 $R_1 = 99\%$ 和 $R_2 = 4\% \sim 80\%$ 。OPO 的同步泵浦的优点在于泵浦阈值很低($I < 100 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$), 空间及时间相干接近于极限。即在同步泵浦 OPO 方式中实现了最短的飞秒脉冲(60 fs)。这一方式的缺点在于需要特殊的介电镜具, 其复杂性可以和行波 OPO 方式相比拟。

外置辐射源的注入种子主要来自另一台 OPO, 或者来自窄带激光辐射源, 例如一台单频染料激光器大大加强了参量生成器的重复性和效率。以这种方式运转光学参量放大器(OPA)保证了不用选频元件也可实现窄带输出。在种子光频率被固定的情况下, OPO OPA 系统的可调性通过改变泵浦波长(染料激光器或钛宝石激光器辐射)来实现。

锁模或调 Q Nd:YAG($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$)、 Nd^{3+} 磷酸盐玻璃($\lambda = 1.054 \mu\text{m}$)和 Nd:YLF($\lambda = 1.047 \mu\text{m}$)激光器以及它们的二次、三次、四次谐波通常用作 OPO 的泵浦源。高重复频率运转的 Nd:YAG 锁模激光器具有很高的可靠性。被动锁模的 Nd:YAG 激光器的脉冲宽度约为 25 ~ 45 ps。现在, Nd:YAG 激光

器能产生 1 GW 功率的单皮秒脉冲, 重复频率大于 10 Hz。 Nd^{3+} 磷酸盐玻璃激光器能产生更短的脉冲 (1~2 ps); 然而, 它的运转稳定性稍差, 由于活动元件的热导率低, 脉冲重复率低。

作为 OPO 的泵浦源, 也常常用到 XeCl 激光器 ($\lambda = 308 \text{ nm}$)。最近, 非常有前途的钛宝石激光器 ($\lambda = 700 \sim 900 \text{ nm}$) 在 OPO 装置中找到了广泛的应用。借助于将二极管激光器泵浦的 Nd:YAG 激光器作为泵浦源, 实现了 OPO 的紧凑构型。具有高非线性性的 LiNbO_3 和 KTP 晶体被用于这些装置。

不同的 OPO 构型, 以及它们的能量、时间、光谱和空间特征在文献 [4.38, 436~438] 中作了详细的考虑和总结。在美国光学学会会志 B 的两期特刊 (1994 年第 10 卷 9 期和 11 期) 中专门讨论了光学参量振荡器, 可以在这里找到 OPO 和它们应用的许多有用信息。在本手册中, 我们仅仅列出了在实际中实现的主要 OPO 输出参数。

无机晶体 KDP、DKDP、ADP、CDA、 LiIO_3 、 LiNbO_3 、BBO、LBO、KTP、KTA、铌酸钡钠、 $\alpha\text{-HIO}_3$ 和 KNbO_3 , 以及有机晶体尿素、NPP 和 DLAP 在 0.3~5 μm 光谱范围内已被作为非线性材料用于光学参量振荡。表 4.32 列举了这些晶体在紫外、可见以及近红外光谱范围内用于光学参量实验的泵浦波长、相位匹配角、泵浦阈值 (峰值强度和/或平均功率)、调谐范围、光学参量振荡脉宽和转换效率。在“备注”一列里给出了关于光学参量振荡类型、泵浦强度、晶体长度、相位匹配强度以及光学参量振荡辐射输出特性 (能量、功率、带宽) 等数据。注意, 对于 KTP 晶体在 XY 平面 ($\theta = 90^\circ$) 发生的是 eoe 相互作用, 而在 XZ 平面 ($\phi = 0^\circ$), 则是 oeo 相互作用。对于 LBO 晶体, 在 XY 平面 ($\theta = 90^\circ$)、XZ 平面 ($\phi = 0^\circ$) 和 YZ 平面 ($\phi = 90^\circ$) 分别发生 ooe、oeo 和 eoo 相互作用。

在文献 [4.439, 444, 483] 中非常详尽地介绍了皮秒的光学参量振荡。在 KDP、 LiIO_3 、 LiNbO_3 和 $\alpha\text{-HIO}_3$ 晶体中实现了行波 OPO [4.439]。在一块 $\alpha\text{-HIO}_3$ 晶体中, 泵浦强度为 3~4 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 不加聚焦的情况下实现了光学参量振荡的高效率转换 (10%~12%)。对于 KDP 和 LiNbO_3 晶体, 圆柱状望远装置用于在实验上找到最佳条件。对于 LiNbO_3 , 人们采用了一个具 2:1 球面望远装置构型。在 $\alpha\text{-HIO}_3$ 中, 观察到了有效 SRS, 它与 OPO 相竞争并耗费了最多为 30% 的泵浦能量。SRS 的泵浦阈值很低, 相当于 0.3 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。在 LiIO_3 中, SRS 就不那么有效, 对于受激散射消耗的泵浦能量最多为 5%。关于参量脉冲形状的研究表明, 在 KDP 中参量脉冲宽度降至 17 ps, 在 LiIO_3 中降至 6 ps, 而与此相比泵浦宽度为 45 ps。

Danelyus 等人 [4.444] 由 Nd 磷酸盐玻璃激光辐射二次谐波 ($\lambda = 527 \text{ nm}$) 的序列皮秒脉冲同步泵浦实现了 OPO。一块 KDP 晶体 ($L = 4 \text{ cm}$, eoe 相互作用) 放置在光学长度为 130 cm 的腔内, 光学长度等于泵浦激光的轴周期。当能量为

表 4.32 紫外、可见和红外区中的 OPO

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
KDP	eoe	0.532	—	0.8 ~ 1.7	35 ps	6 ~ 8	4.439	TWOPO, $I_0 = 15 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $L_1 = 2.5 \text{ cm}$, $L_2 = 4 \text{ cm}$
	eoe	0.532	—	0.8 ~ 1.67	40 ps	25	4.440	TWOPO, $E = 1 \text{ mJ}$, $L_1 = L_2 = 4 \text{ cm}$
	eoe	0.532	—	0.9 ~ 1.3	30 ps	51	4.441, 442	TWOPO $\Delta\nu\Delta\tau = 0.7$, $L_1 = 4 \text{ cm}$, $L_2 = 6 \text{ cm}$, $I_0 = 15 \sim 20 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	eoe	0.527	—	0.82 ~ 1.3	0.3 ~ 2 0.5 ps	2	4.443, 444	同步泵浦 OPO, $E = 20 \mu\text{J}$
	eoe	0.532	1 000 ~ 2 000	—	—	67 ~ 74*	4.445	TWOPO, $L_1 = 4 \text{ cm}$, $L_2 = 6 \text{ cm}$, $E = 2 \text{ J}$
	eoe	0.355	—	0.45 ~ 0.64, 0.79 ~ 1.69	45 ps	15	4.446	TWOPO, $L_1 = L_2 = 4 \text{ cm}$
	eoe	0.35	1 000	0.45 ~ 0.6	0.5 ps	70*	4.447	TWOPO, $L_1 = 2 \text{ cm}$, $L_2 = 6 \text{ cm}$, $E = 0.35 \text{ J}$, $I_0 = 6 \sim 8 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	eoe	0.35	—	—	0.5 ns	67*	4.448	TWOPO, $L = 5 \text{ cm}$, 注入种子 I_0 $= 0.3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
KDP + BBO	eoe(KDP) oob(BBO)	0.527 5	—	0.75 ~ 1.77	0.6 ns	13	4.449, 450	TWOPO, L (KDP) = 4 cm, L (BBO) = 1 cm, $I_0 = 60 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
DKDP	$\theta_{\text{inc}} = 90^\circ$	0.266	—	0.47 ~ 0.61	—	—	4.451	TWOPO, $T = 40 \sim 100^\circ \text{C}$
	$\theta_{\text{rec}} = 90^\circ$	0.266	—	0.37 ~ 0.6	—	—	4.452	

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵浦}} / \mu\text{m}$	泵浦阈值 I_{th} $/(\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\lambda_{\text{OPO}} / \mu\text{m}$	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
ADP	—	0.527	1 500	0.93 ~ 1.21	—	60*	4.453	TWOPPO, $E = 2.3 \text{ J}$, $I_0 = 10 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{inc}} = 51^\circ \sim 45^\circ$	0.352	—	0.44 ~ 1.75	5 ps	0.1 ~ 1.0	4.454	TWOPPO, $L_1 = 2.5 \text{ cm}$, $L_2 = 3 \text{ cm}$
	ooc	0.266	—	0.42 ~ 0.73	2 ns	25	4.455	TWOPPO, $T = 50 \sim 105^\circ \text{C}$
	ooc	0.266	—	—	—	30	4.456	$L = 6 \text{ cm}$, $I_0 = 1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{inc}} = 90^\circ$	0.266	—	0.44 ~ 0.68	—	10	4.457	TWOPPO, $T = 50 \sim 110^\circ \text{C}$, $L = 5 \text{ cm}$
GDA	$\theta_{\text{inc}} = 90^\circ$	0.532	—	0.854 ~ 1.41	10 ps	30 ~ 60	4.458	$L = 3 \text{ cm}$, $T = 50 \sim 70^\circ \text{C}$, $I_0 = 0.3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{inc}} = 90^\circ$	0.53	1 000	0.8 ~ 1.3	10 ps	12.5	4.459	同步泵浦 OPO, $L = 4 \text{ cm}$, $I_0 = 3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
LiIO ₃	$\theta_{\text{inc}} = 21^\circ$	1.06	80	—	10 ns	2	4.460	SROPO, $I_0 = 250 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	—	1.06	50	1.4 ~ 2.7	0.01 ~ 1 ns	—	4.461	矢量相位匹配 SROPO, $P = 30 \sim 50 \text{ MW}$
	$\theta_{\text{inc}} = 24^\circ$	1.06	50	2.5 ~ 3.2	—	15	4.462	DROPO, $L = 6 \text{ cm}$, $E = 0.1 \text{ J}$
	$\theta_{\text{inc}} = 23.1^\circ \sim 22.4^\circ$	0.694	5	1.15 ~ 1.9	20 ns	50 ^b	4.319, 463	SROPO, $L = 0.85 \text{ cm}$, $P = 10 \text{ kW}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
LiIO_3	$\theta_{\text{cut}} = 21.8^\circ \sim 19.3^\circ$	0.694	—	0.95 ~ 0.84, 2.5 ~ 4.0	—	—	4.464	
	$\theta_{\text{cut}} = 25^\circ \sim 30^\circ$	0.53	10	0.68 ~ 2.4	15 ns	8	4.465	SROPO, $L = 1.6 \text{ cm}$
	$\theta_{\text{cut}} = 29.5^\circ$	0.53	10	0.61 ~ 2.7	0.01 ~ 1 ns	—	4.461	SROPO, $P = 12 \text{ MW}$
	$\theta_{\text{cut}} = 22^\circ \sim 34^\circ$ $\theta_{\text{cut}} = 26^\circ$	0.53 0.532	— —	1.4 ~ 3.8 0.63 ~ 3.4	6 ps —	— —	4.466 4.467	同步泵浦 OPO SROPO, $P = 100 \text{ kW}$, $\Delta\nu = 0.1 \text{ cm}^{-1}$
LiNbO_3	$\theta_{\text{cut}} = 23^\circ \sim 30^\circ$ ooc	0.532 0.532	10 —	0.63 ~ 3.35 0.61 ~ 4.25	30 ns 6 ps	20 4	4.468 4.439, 469	SROPO TWOPO, $L_1 = 1 \text{ cm}$, $L_2 = 2.5 \text{ cm}$, $I_0 = 2 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{cut}} = 25^\circ \sim 30^\circ$	0.53	3 000	0.68 ~ 2.4	—	5	4.470	TWOPO, $L_1 = L_2 = 4 \text{ cm}$, $I_0 = 6 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	—	0.53	10	0.74 ~ 1.85	10 ns	—	4.471	$E = 0.5 \text{ J}$
	$\theta_{\text{cut}} = 22.5^\circ$	0.532	—	4.1	50 ps	0.4	4.472	注入种子 $L = 3 \text{ cm}$, $E = 3 \mu\text{J}$
	$\theta_{\text{cut}} = 53^\circ \sim 37^\circ$	0.347	—	0.41 ~ 2.1	—	—	4.473	
	$\theta_{\text{cut}} = 90^\circ$ $\theta_{\text{cut}} = 90^\circ$	1.06 1.06	— —	2.13 1.43 ~ 4.0	100 ns 6 ps	8 3	4.474 4.475	OPOPO, $L = 3 \text{ mm}$ TWOPO, $L = 2 \text{ cm}$, $I_0 = 8 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{cut}} = 90^\circ$	1.06	—	1.1 ~ 4.45	20 ns	15	4.476	SROPO, $I_0 = 10 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵浦}}$ / μm	泵浦阈值 I_{br} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
LiNbO ₃	ooe	1.06	—	1.4~4.0	3.5 ns	10	4.477	TWOPO, $\Delta\nu = 6.5 \text{ cm}^{-1}$, $I_0 = 1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	ooc	1.06	—	—	0.5 ns	5~20	4.478	TWOPO
	—	1.064	—	1.55~3.5	20 ns	—	4.420	SROPO, $L = 5 \text{ cm}$
	45°~51°	1.064	—	1.37~4.83	40 ps	17	4.479	TWOPO
	47°	1.054	100	1.35~2.11	0.5 ps	15	4.480	同步泵浦 OPO, $L = 18 \text{ mm}$, $I_0 = 0.14 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	47°	1.064	—	2.5~4.0	10 ns	—	4.481	注入种子, $L = 5 \text{ cm}$, $E = 4 \text{ mJ}$, $\Delta\nu = 0.2 \text{ cm}^{-1}$
	47°	1.064	—	1.50~1.58, 3.27~3.65	—	—	4.482	注入种子, $L = 5 \text{ cm}$, $E = 20 \text{ mJ}$
	90°	0.53	—	0.75~0.64, 1.8~3.1	—	—	4.215	$T = 180 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$
	50°~90°	0.53	—	0.59~3.7	5 ps	—	4.483	TWOPO, $L_1 = L_2 = 15 \text{ mm}$
	84°	0.53	—	0.66~2.7	40 ps	17	4.479	TWOPO, $T = 46 \sim 360 \text{ }^\circ\text{C}$
	90°	0.532	—	0.68~0.76	20 ps	9	4.484	同步泵浦 OPO
	90°	0.532	—	0.93~1.3	20 ps	2~3	4.444	同步泵浦 OPO
	90°	0.532	—	0.63~3.6	30 ps	—	4.485	$L = 5 \text{ cm}$, $T = 50 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$
	90°	0.532	8	0.85~1.4	15 ps	17.5	4.486	SROPO, $P = 30 \text{ kW}$, $f = 10 \text{ kHz}$
	90°	0.532	<30	0.65~3.0	10 ps	7.2	4.459	同步泵浦 OPO, $L = 25 \text{ mm}$
	90°	0.532	<30	0.65~3.0	10 ps	7.2	4.459	同步泵浦 OPO, $L = 25 \text{ mm}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	λ_{pr} / μm	泵浦阈值 I_{pr} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{opo} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
LiNbO_3	90°	0.473 ~ 0.659	—	0.55 ~ 3.65	130 ~ 700 ns	46(67 ^b)	4.487	SROPO, $T = 110 \sim 430^\circ\text{C}$, $P_{\text{in}} = 105 \text{ mW}$
MgO:LiNbO_3	—	1.06	0.4 mW	1 ~ 1.14	cw	—	4.488	四重共振 OPO
	$\theta_{\text{acc}} = 90^\circ$	0.532	35 mW	1.01 ~ 1.13	cw	40(60 ^b)	4.489	DROPO, $T = 107 \sim 110^\circ\text{C}$
	90°	0.532	12 mW	1.007 ~ 1.129	cw	34(78 ^b)	4.490	DROPO, $T = 107 \sim 111^\circ\text{C}$, $P = 8.15 \text{ mW}$
	90°	0.532	13 mW	0.966 ~ 1.185	cw	38(73 ^b)	4.491	DROPO, $L = 15 \text{ mm}$, $T =$ $113 \sim 126^\circ\text{C}$, $P = 100 \text{ mW}$
	$\theta_{\text{acc}} = 60^\circ \sim 84^\circ$	0.532	—	0.7 ~ 2.2	30 ps	5.4	4.492	TWOPO, $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$ (0.7 μm) 和 1.4 nm(2 μm)
	90°	0.532	20 mW	—	cw	—	4.493	DROPO, $L = 12.5 \text{ mm}$, $T =$ 107 $^\circ\text{C}$
BBO	ooe	0.62	—	0.75 ~ 2.8	200 fs	15	4.494	TWOPO, $L_1 = 5 \text{ mm}$, $L_2 = 7$ mm, $E = 20 \mu\text{J}$
	ooe, ooe	0.6	—	0.75 ~ 3.1	—	20 ~ 25	4.450	TWOPO-OFA, $L_1 = L_2 = 8 \text{ mm}$
	ooe, ooe	0.6	—	0.75 ~ 3.1	180 ~ 250 fs	23	4.450	$I_0 = 70 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	oeo, ooe	0.6	—	0.75 ~ 3.1	200 ~ 250 fs	20 ~ 25	4.450	

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵浦}} / \mu\text{m}$	泵浦阈值 I_{th} $/(\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\lambda_{\text{OPO}} / \mu\text{m}$	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
BBO	$\theta_{\text{acc}} = 21.7^\circ \sim 21.9^\circ$	0.532	278	0.94 ~ 1.22	12 ns	10	4.496	SROPO, $L = 9 \text{ mm}$, $E = 1 \text{ mJ}$
	$\theta_{\text{acc}} = 20.7^\circ \sim 22.8^\circ$	0.532	—	0.67 ~ 2.58	18 ps	13	4.497	TWOPO, $L_1 = L_2 = 9 \text{ mm}$, $I_0 = 2.5 \sim 3.8 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = 0.1 \sim 0.5 \text{ mJ}$
	ooe	0.527	—	0.7 ~ 1.8	65 ~ 260 fs	3	4.498 ~ 500	同步泵浦 SROPO, $L = 5.8 \text{ mm}$
	ooe	0.527	—	1.04 ~ 1.07	70 fs	—	4.501	OPA 增益比为 2×10^4
	ooe	0.53	—	0.63 ~ 3.2	1.3 ps	25	4.450	TWOPO - OPA, $L_1 = L_2 = 8 \text{ mm}$
	ooe	0.36	500	0.406 ~ 3.17	20 ps	30	4.502	同步泵浦 OPO, $L = 12 \text{ mm}$, $I_0 = 2 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = 3 \text{ mJ}$, $\Delta\lambda = 0.24 \text{ nm}$
	ooe	0.355	130	0.45 ~ 1.68	8 ns	9.4	4.503	SROPO, $L = 11.5 \text{ mm}$, $E = 15 \text{ mJ}$
	$\theta_{\text{acc}} = 26^\circ \sim 33^\circ$	0.355	—	0.43 ~ 2.0	—	—	4.504	$L = 7.6 \text{ mm}$
	$\theta_{\text{acc}} = 25^\circ \sim 55^\circ$	0.355	—	0.41 ~ 2.6	—	—	4.504	$L = 6.5 \text{ mm}$, OPO 的 SHG, BBO 晶体中辐射至 205 nm
	$\theta_{\text{acc}} = 24^\circ \sim 33^\circ$	0.355	20	0.412 ~ 2.55	2.5 ns	24	4.505	SROPO, $L = 12 \text{ mm}$, $P_{\text{av}} = 140 \text{ mW}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} , /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{SRO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
BBO	o-o-e	0.355	27	0.42 ~ 2.3	8 ns	32	4.506	SROPO, $L_1 = 11.5$ mm, $L_2 = 9.5$ mm, $\Delta\lambda = 0.03$ nm
	$\theta_{\text{inc}} = 33.7^\circ \sim 44.4^\circ$	0.355	38	0.48 ~ 0.63, 0.81 ~ 1.36	8 ns	12	4.507	SROPO, $L_1 = 17$ mm, $L_2 = 10$ mm, $\Delta\lambda = 0.05 \sim 0.3$ nm
	o-o-e	0.355	39	0.59 ~ 0.89	20 ~ 30 ps	2	4.508	同步泵浦 OPO, $L = 11.8$ mm, $P = 15$ kW
	$\theta_{\text{inc}} = 26^\circ \sim 33^\circ$	0.355	—	0.4 ~ 2.0	15 ps	30	4.509	OPO - OPA, $L_1 = 12$ mm, $L_2 = 6$ mm, $L_3 = 15$ mm, $I_0 = 3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\Delta\lambda = 0.3$ nm
	o-o-e	0.355	—	0.4 ~ 2.86	24 ps	6.5	4.510	TWOPO, $L_1 = L_2 = L_3 = 8$ mm, $I_0 = 5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\Delta\lambda = 10 \text{ cm}^{-1}$
	$\theta_{\text{inc}} = 27^\circ \sim 33^\circ$	0.355	—	0.45 ~ 1.768	—	2	4.511	SROPO, $L = 10$ mm, $E = 0.2$ mJ
	$\theta_{\text{inc}} = 23^\circ \sim 33^\circ$	0.355	20 ~ 40	0.402 ~ 3.036	7 ns	40 ~ 61	4.512, 513	SROPO, $L = 15$ mm, $E = 0.1 \sim 0.2$ J
	o-o-e	0.355	300	0.407 ~ 2.78	9 ps	—	4.514	DROPO, $L = 7$ mm
	o-o-e	0.355	—	0.43 ~ 2.1	15 ps	30	4.515	注入种子, $L = 15$ mm
	$\theta_{\text{inc}} = 35.5^\circ \sim 37^\circ$	0.308	150	0.422 ~ 0.477	8 ns	10	4.516	SROPO, $L = 7$ mm, $E = 0.26$ mJ
	o-o-e	0.308	18	0.354 ~ 2.37	—	64 ^b	4.517	SROPO, $L = 20$ mm, $E = 20$ mJ

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{thr} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{opo} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
BBO	o-o-e	0.308	—	0.4 ~ 0.56	—	15	4.518	SROPO, $L = 20 \text{ mm}$, $\Delta\nu = 0.07 \text{ cm}^{-1}$ (腔内标准具)
	$\theta_{\text{inc}} = 36.5^\circ \sim 47.5^\circ$	0.266	23	0.33 ~ 1.37	9 ns	—	4.519	SROPO, $L = 20.5 \text{ mm}$, $I_0 = 23 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{inc}} = 30^\circ \sim 48^\circ$	0.266	—	0.302 ~ 2.248	7 ns	6.3	4.512	SROPO
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.78 ~ 0.81	(360 mW)	1.49 ~ 1.70	cw	40 ^b	4.520	DROPO, $L = 2 \text{ cm}$, $T = 130 \sim 185^\circ \text{C}$, $P = 30 \text{ mW}$
LBO	$\theta = 86^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.6515	—	1.2 ~ 1.4	20 ps	0.8	4.521	TWOPO, $L_1 = 8 \text{ mm}$, $L_2 = 17 \text{ mm}$, $I_0 = 0.8 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = 10 \mu\text{J}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.605	—	0.85 ~ 0.97, 1.6 ~ 2.1	200 fs	10 ~ 15	4.450, 522	TWOPO, $L_1 = L_2 = 15 \text{ mm}$, $T = 30 \sim 85^\circ \text{C}$, $I_0 = 25 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta = 81^\circ$, $\phi = 5^\circ$	0.57 ~ 0.63	—	1.2 ~ 1.5	580 fs	10	4.523	注入种子, 1.08 μm
	$\theta = 85^\circ$, $\phi = 9^\circ$	0.57 ~ 0.63	—	1.2 ~ 1.5	400 fs	25	4.524	注入种子, 1.08 μm (40 ps, $L = 9 \text{ mm}$, $I_0 = 1 \text{ TW} \cdot \text{cm}^{-2}$)
	$\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.532	220	0.95 ~ 1.006, 1.13 ~ 1.21	10 ns	0.5	4.525	SROPO, $T = 20 \sim 120^\circ \text{C}$, $I_0 = 250 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\Delta\lambda = 0.4 \text{ nm}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.532	—	0.75 ~ 1.8	—	20	4.33	从 OPO (0.72 ~ 2 μm) 注入种子, $T = 106.5 \sim 148.5^\circ \text{C}$, $I_0 = 3.1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵浦}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\lambda_{\text{信号}}$ / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
LBO	$\theta = 90^\circ$, ooe	0.53	—	0.65 ~ 2.5	—	24	4.526	OPA, 角度 ($\phi = 8.7^\circ \sim 15.9^\circ$) 和温度 ($T = 103 \sim 210^\circ\text{C}$) 调谐, $E = 0.45 \text{ mJ}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.532	1 500	0.77 ~ 1.7	100 ps	30	4.527	同步泵浦 SROPO, $L = 15 \text{ mm}$, $T = 105 \sim 137^\circ\text{C}$, $\Delta\lambda = 0.14 \text{ nm}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523 5	2 500 (10 mW)	0.652 ~ 2.65	12 ps	13	4.528 ~ 530	SROPO, $L = 12 \text{ mm}$, $T = 125 \sim 190^\circ\text{C}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523 5	1 100 (4.5 mW)	0.909 ~ 1.235	33 ps	50	4.530, 531	DROPO, $T = 167 \sim 180^\circ\text{C}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523 5	15 (30 mW)	0.65 ~ 2.65	1.7 ps	50	4.530	DROPO, $L = 12 \text{ mm}$, $P = 0.21 \text{ W}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523 5	700	0.924 ~ 1.208	12 ns	45	4.532	DROO, $L = 12 \text{ mm}$, $T = 156 \sim 166^\circ\text{C}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523	100	0.72 ~ 1.91	1 ps	34	4.533	同步泵浦 SROPO, $L = 13 \text{ mm}$, $T = 125 \sim 175^\circ\text{C}$, $P_{\text{in}} = 89 \text{ mW}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523	80 (70 mW)	0.8 ~ 1.5	1.2 ~ 1.5 ps	27 (75 ^b)	4.534	SROPO, $L = 12 \text{ mm}$, $P_{\text{in}} = 78 \text{ mW}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.514 5	(50 mW)	0.966 ~ 1.105	cw	10	4.535	TROPO, $L = 20 \text{ mm}$, $T = (183 \pm 3)^\circ\text{C}$, $P = 90 \text{ mW}$
	$\theta = 0^\circ$, $\phi = 90^\circ$	0.364	(115 mW)	0.494 ~ 0.502	cw	9.4	4.536, 537	SROPO 和 DROPO, $L = 20 \text{ mm}$, $T = 18 \sim 86^\circ\text{C}$, $P = 103 \text{ mW}$
	$\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.355	—	0.47 ~ 0.487	10 ns	9	4.538	SROPO, $L = 12 \text{ mm}$, $T = (-35 + 100)^\circ\text{C}$, $E = 4.5 \text{ mJ}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵浦}}$ / μm	泵浦阈值 I_{thr} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
LBO	$\theta = 90^\circ$,	0.355	14	0.435 ~ 1.922	10 ns	22	4.539	DROPO, $I_0 = 40 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = 2.7 \text{ mJ}$
	$\phi = 24^\circ \sim 42^\circ$							
	$\theta = 90^\circ$,	0.355	—	0.46 ~ 1.6	15 ps	30	4.540	从 OPO 注入种子, $L = 16 \text{ mm}$, $I_0 = 2.8 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = 0.3 \text{ mJ}$
	$\phi = 27^\circ \sim 43^\circ$							
	$\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.355	15	0.48 ~ 0.457, 1.355 ~ 1.59	12 ns	27	4.541	SROPO, $T = 20 \sim 200^\circ \text{C}$
	$\theta = 90^\circ$,	0.355	60	0.455 ~ 0.655 0.76 ~ 1.62	10 ns	35 ^b	4.542	SROPO, $L = 16 \text{ mm}$
	$\phi = 27^\circ \sim 42^\circ$							
	$\theta = 90^\circ$,	0.355	—	0.403 ~ 2.58	12 ps	28	4.543	TWOPO, $L_1 = L_2 = 15 \text{ mm}$, $I_0 = 5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = 0.1 \sim 1 \text{ mJ}$
	$\phi = 18^\circ \sim 42^\circ$							
	$\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.355	2 300	0.415 ~ 9 ~ 0.482 6	30 ps	37.6	4.544, 545	TWOPO, $L = 10 \text{ mm}$, $T = 21 \sim 450^\circ \text{C}$, $I_0 = 18 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\Delta\lambda = 0.15 \text{ nm}$
	$\theta = 90^\circ$,	0.355	1 000	0.452 ~ 1.65	9 ps	26	4.514	DROPO, $L = 10.5 \text{ mm}$, $E = 0.15 \text{ mJ}$
	$\phi = 30^\circ \sim 42^\circ$							
II 类在 XZ 平面和 YZ 平面, $\theta = 0^\circ \sim 9^\circ$	$\theta = 90^\circ$,	0.308	26	0.355 ~ 0.497, 0.809 ~ 2.34	—	28 ~ 40 ^b	4.517, 546	SROPO, $L = 15 \text{ mm}$
	$\phi = 26^\circ \sim 52^\circ$							
	$\theta = 90^\circ$,	0.307 8	30	0.381 ~ 0.387, 1.5 ~ 1.6	5 ns	35	4.547	$L = 16 \text{ mm}$, $I_0 = 0.1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\phi = 26^\circ \sim 52^\circ$							

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵浦}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} / $(\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2})$	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
LBO	$\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$	0.266	10	0.314 ~ 1.74	10 ns	10	4.548	SROPO, $L = 16 \text{ mm}$, $T = 20^\circ \text{C}$
KTP	$\theta = 50^\circ \sim 58^\circ$, $\phi = 0^\circ$	1.064	—	1.8 ~ 2.4	10 ns	10	4.549	DROPO, $E = 0.1 \sim 0.5 \text{ mJ}$
	$\theta = 90^\circ, \phi = 53^\circ$	1.064	80	3.2	10 ns	5	4.550	SROPO, $L = 15 \text{ mm}$, $P = 0.2 \text{ W}$
	$\theta = 82^\circ \sim 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	1.064	(0.8 W)	1.57 ~ 1.59, 3.21 ~ 3.30	2 ~ 3 ps	15	4.551	SROPO, $L = 10 \text{ mm}$, $f = 75 \text{ MHz}$, $\Delta\lambda = 1.5 \text{ nm}$
	$\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$	1.06	—	1.61	15 ns	47(66) ^b	4.552	二极管泵浦 Nd:YAG 激光器
	—	1.064	—	2.128	—	25	4.553	同步泵浦 OPO 采用 6 块 KTP (总长度 58 mm), $P = 14 \text{ W}$
	$\theta = 81^\circ \sim 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$	1.053	(5.8 W)	1.55 ~ 1.56, 3.22 ~ 3.28	12 ps	21	4.554	同步泵浦 OPO, $L = 6 \text{ mm}$, $P = 2 \text{ W}$
	$\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$	0.7 ~ 0.95	70	1.04 ~ 1.38, 2.15 ~ 3.09	10 ns	20	4.555	SROPO, $L = 15 \text{ mm}$
	$\phi = 0^\circ$	0.765 ~ 0.815	—	1.22 ~ 1.37, 1.82 ~ 2.15	57 ~ 135 fs	55 ^b	4.556	$L = 1.15 \text{ mm}$, $f = 90 \text{ MHz}$, $P = 340 \text{ mW}$ (135 fs) 和 115 mW (57 fs)
	$\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$	0.72 ~ 0.853	150	1.052 ~ 1.214, 2.286 ~ 2.871	1.2 ps	42	4.557	同步泵浦 OPO, $L = 6 \text{ mm}$, $P = 0.7 \text{ W}$
	$\theta = 54^\circ, \phi = 0^\circ$	—	—	1.38 ~ 1.67	cw	0.001	4.558	$L = 10 \text{ mm}$, $P = 2 \mu\text{W}$
	$\theta = 67^\circ, \phi = 0^\circ$	0.73 ~ 0.80,	40 000, 180 mW	1.2 ~ 1.34, 1.78 ~ 2.1	62 fs	—	4.559	同步泵浦 OPO, $L = 1.5 \text{ mm}$, $f = 76 \text{ MHz}$, $P = 175 \text{ mW}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
KTP	$\theta = 45^\circ, \phi = 0^\circ$	0.68	—	1.16 ~ 2.2, 0.58 ~ 0.657	57 fs	60 ^a	4.560	$L = 1.5 \text{ mm}, P = 0.68 \text{ W}$, BBO 中 ICSHC ($L = 47 \mu\text{m}$)
	$\phi = 0^\circ$	0.645	(110 mW)	1.2 ~ 1.34	220 fs	13	4.561	同步泵浦 OPO, $P = 30 \text{ mW}$
	$\theta = 53^\circ, \phi = 0^\circ$	0.61	—	0.755 ~ 1.04, 1.5 ~ 3.2	105 ~ 120 fs	—	4.562, 563	CPM 染料激光器 同步泵浦 OPO, $L = 1.4 \text{ mm}$ $L = 20 \text{ mm}$
	$\theta = 40^\circ \sim 70^\circ$, $\phi = 90^\circ$	0.526	—	0.6 ~ 2.0	30 ps	10	4.564	
	$\theta = 40^\circ \sim 80^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.526	—	0.6 ~ 4.3	30 ps	10	4.564	$L = 20 \text{ mm}$
	$\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$	0.532	1.4 W (SROPO) 30 mW (DROPO)	1.309, 1.09	cw	35	4.493, 565	SROPO 和 DROPO, $L = 10 \text{ mm}$, $P = 1.07 \text{ W}$
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 10^\circ \sim 35^\circ$	0.523	57 (61 mW)	1.002 ~ 1.096	2.2 ps	16 (79 ^b)	4.566	同步泵浦 OPO, $L = 5 \text{ mm}$, $P =$ 42 mW
	$\phi = 0^\circ$	0.532	80	0.7 ~ 0.9, 1.3 ~ 2.2	3.5 ns	12	4.418, 567	$L = 15 \text{ mm}, E = 3 \text{ mJ}, \Delta\nu =$ 0.02 cm^{-1}
	$\theta = 90^\circ$, $\phi = 25.3^\circ$	0.531	(40 mW)	1.067 1	cw	30	4.568	DROPO, $L = 8 \text{ mm}$
	—	0.523 5	1 000 (2 mW)	0.946 ~ 1.02, 1.075 ~ 1.172	8 ps	10 (56 ^b)	4.530, 569	同步泵浦 SROPO, $L = 5 \text{ mm}$, P $= 2 \text{ mW}$
	$\theta = 90^\circ$	0.523	60 (61 mW)	0.938 ~ 1.184	1 ~ 2	16	4.570	SROPO, $L = 5 \text{ mm}, f = 125 \text{ MHz}$, $P = 40 \text{ mW}$

续表

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{th} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	λ_{OPO} / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
KTP	$\theta = 90^\circ$,	0.526	(0.5 W)	1.01 ~ 1.1	14 ps	44	4.554	同步泵浦 OPO, $L = 6 \text{ mm}$, $P = 0.58 \text{ W}$
	$\phi = 0^\circ \sim 33^\circ$							
	$\theta = 53^\circ \sim 72^\circ$	0.523 5	—	1.2 ~ 1.9	1.5 ps	—	4.500	同步泵浦 OPO, $L = 9 \text{ mm}$, $\Delta p = 10 \text{ cm}^{-1}$
	$\theta = 69^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.523 5 0.532	4(150 mW) 7	1.02; 1.075 0.76 ~ 1.04	— 6 ns	7 30	4.530 4.571	cw 锁模 DROPO $L = 15 \text{ mm}$, BBO 中 ICSSHC $\eta = 40\%$ (380 ~ 520 nm)
KTA	$\phi = 0^\circ$, oeo	0.78	—	1.29 ~ 1.44, 1.83 ~ 1.91	85 ~ 150 fs	10 ~ 15	4.572	$L = 1.47 \text{ mm}$, $P = 75 \text{ mW}$
	$\theta = 53^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.773 ~ 0.792	—	1.45; 1.7	300 ns	0.3	4.573	DROPO, $L = 7 \text{ mm}$
	II 类	0.77	—	1.435; 1.662	—	—	4.560	$L = 1.5 \text{ mm}$
	钽酸锂钠 $\theta_{\text{泵}} = 90^\circ$	0.532	—	0.75 ~ 1.82	10 ns	5	4.574	SROPO, $T = 80 \sim 220^\circ \text{C}$
α -HfO ₃	$\theta_{\text{泵}} = 90^\circ$	0.532	5	0.8 ~ 1.6	10 ps	25	4.575	同步泵浦 OPO
	$\theta_{\text{泵}} = 90^\circ$	0.53	50	0.65 ~ 3	10 ps	5.3	4.459	同步泵浦 OPO, $I_0 = 250 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{泵}} = 90^\circ$	0.532	7 ~ 9	0.672 ~ 2.56	15 ~ 45 ps	8.1	4.576, 577	同步泵浦 SROPO, $L = 10 \text{ mm}$, $f = 139 \text{ MHz}$, $T = 75 \sim 350^\circ \text{C}$
	eoee	0.532	—	1 ~ 1.1	—	57	4.578	$L = 23 \text{ mm}$, $I_0 = 20 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$

晶体	相位匹配角, 相互作用类型	$\lambda_{\text{泵}}$ / μm	泵浦阈值 I_{thr} /($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\lambda_{\text{信号}}$ / μm	τ_p	转换效率 /%	参考文献	备注
$\alpha - \text{HfO}_3$	eoe	0.532	—	0.7 ~ 2.2	30 ~ 45 ps	10 ~ 12	4.439	TWOPO, $L_1 = L_2 = 2 \text{ cm}$, $I_0 = 4 \sim 5 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$
KNbO_3	eoe	0.527	60	—	5 ~ 6 ps	10	4.579	同步泵浦 OPO, $\Delta\nu\Delta\tau = 0.7$
	II 类	1.064	240	1.87; 2.47	—	—	4.580	$L = 9 \text{ mm}$
		0.532	2.2	0.86 ~ 1.4	—	5	4.581	DROPO, $L = 19 \text{ mm}$, $T = 184 \sim 220^\circ\text{C}$
尿素	沿 b 轴	0.532	3.5	0.88 ~ 1.35	10 ns	32	4.582	DROPO, $T = 180 \sim 200^\circ\text{C}$, $P = 12 \text{ MW}$
	$\theta_{\text{泵}} = 81^\circ \sim 90^\circ$	0.355	55 (45mW)	0.5 ~ 0.51, 1.17 ~ 1.22	7 ns	20	4.583	SROPO, $L = 12.7 \text{ mm}$, $I_0 = 90 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$
	$\theta_{\text{泵}} = 50^\circ \sim 90^\circ$	0.355	—	0.5 ~ 1.23	7 ns	23	4.584, 585	SROPO, $L = 23 \text{ mm}$
NPP	$\theta_{\text{泵}} = 64^\circ \sim 90^\circ$	0.308	16 ~ 20	0.537 ~ 0.72	4 ~ 6 ns	37	4.586	$L = 15 \text{ mm}$
	eoe	0.266	—	0.33 ~ 0.42	7 ns	—	4.585	
	—	0.62	—	0.8 ~ 1.6	150 ~ 290 fs	—	4.587, 588	$L = 1.5 \text{ mm}$
DLAP	$\theta = 9.5^\circ \sim 13^\circ$, $\phi = 0^\circ$	0.592	7	0.9 ~ 1.7	1 ns	5	4.589, 590	$L = 1.9 \text{ mm}$
	I 类	0.308	18	0.415 ~ 0.526, 0.743 ~ 1.194	—	5 ^b	4.591	SROPO, $L = 25 \text{ mm}$

a: 由方程(4.4)研究转换效率。b: 泵浦耗尽。

20 μJ 时, 最短的 OPO 脉冲为 0.3 ~ 0.5 ps (调谐范围从 0.8 μm 到 1.5 μm)。然后, OPO 脉冲在一台电光锁模 Nd:YAG 激光辐射的二次谐波泵浦的 $\text{F}_2\text{:LiF}$ 晶体 ($L=2\text{ cm}$) 中放大到 1 mJ。在一台二次级联 TWOP 中通过引入在泵浦和信号 (或闲频) 波之间的相应时间延迟能够显著缩短参量辐射的脉冲。为此, 例如将一块几毫米长的 CaCO_3 晶体放在 TWOP 晶体之间, 这保证了具有不同偏振性和不同折射率的信号光和泵浦光之间的时间延迟^[4.478,592]。当泵浦脉冲宽度 $\tau_{\text{泵浦}}$ 为 21 ps 时, 这一方法将 OPO 脉冲缩短到 4 ps^[4.592], 当 $\tau_{\text{泵浦}}=8\text{ ps}$ 时缩短到 0.5 ps^[4.678]。在后一种情况下时间延迟相当于 8.5 ps。

在行波 OPO 方式中 OPO 的最高效率 $\eta_{\text{eff}}=60\%\sim 70\%$, 在两块相互距离甚远 (最大至 1 m) 的 KDP 或 ADP 晶体中实现^[4.445,447,453]。 η_{eff} 效率以下式计算:

$$\eta_{\text{eff}} = E_{\text{OPO}} / (E_{\text{OPO}} + E_{\text{unc}}) \quad (4.4)$$

其中 E_{OPO} 是 OPO 辐射的总能量 (信号 + 闲频), E_{unc} 是在第二块晶体后面测量的没有转换的那部分泵浦能量。 η_{eff} 的值大于从方程 $\eta = E_{\text{OPO}}/E_{\text{泵浦}}$ 计算的通常的 η 值, 因为

$$(E_{\text{OPO}} + E_{\text{unc}}) / E_{\text{泵浦}} = 50\% \sim 80\% \quad (4.5)$$

这是因为泵浦光能量以及 OPO 辐射总是有部分在晶体中散射或被吸收而损耗了^[4.453]。转换效率也可以以泵浦亏损的术语来测定:

$$\eta = 1 - E_{\text{unc}} / E_{\text{泵浦}} \quad (4.6)$$

泵浦亏损通常比通常的 η 值要大得多。

在许多文章^[4.498-501,556,559,560,572]中报道了超短 OPO 脉冲 ($\tau < 100\text{ fs}$) 的发生。在这些装置中, 主要是采用同步泵浦 OPO 的方式。Laenen 等人^[4.499]基于 SRO-PO, 采用从一台倍频 Nd 玻璃激光器发出的脉宽为 0.8 ps 的 300 脉冲列泵浦 BBO 晶体 ($L=5.8\text{ mm}, \theta_c=23^\circ$), 接近点 ($\lambda=1.0796\text{ }\mu\text{m}$) 时, OPO 脉宽为 65 fs (FWHM)。KTP 晶体 ($L=1.5\text{ mm}, \theta_c=67^\circ, \phi=0^\circ$) 配合附加的外置脉冲压缩, 获得接近 1.3 μm 的 175 mW IR 辐射, ($\tau=62\text{ fs}, f=76\text{ MHz}$)^[4.559]。钛宝石激光器 (765 nm, 880 mW, 110 fs) 作泵浦源。借助于自相关方法采用 1 mm 厚的 LiIO_3 晶体^[4.499] 或用 0.3 mm 厚的 KDP 晶体^[4.559] 进行脉宽的测量, 迄今为止, 获得的最短 OPO 脉冲宽度短到 57 fs^[4.556,560]。在这中间钛宝石激光器 (2.5 W, 125 fs) 也用作基于 OPO 同步泵浦 KTP 晶体 (1.15 mm) 的光源。采用腔内色散补偿以求产生高重复频率 (90 MHz) 57 fs 的脉冲: 平均功率为 115 mW。在 $\tau=135\text{ fs}$ 时 OPO 的输出功率可达 1 W。当将一块 BBO 晶体 ($L=47\text{ }\mu\text{m}$) 放置在环状 OPO 腔内时, OPO 的调谐范围由 ICSHG 转到可见区: $\lambda=580\sim 657\text{ nm}, \tau < 100\text{ fs}, P=240\text{ mW}$ ^[4.560]。

特别有趣的是将相对较低平均功率 (约 10 ~ 100 mW) 的激光二极管泵浦

Nd:YAG 或 Nd:YLF 激光辐射的基波、二次或三次谐波用作 OPO 泵浦源^[4.489~491,528,531,532,541,542,552,566,569,571], 可采用 LBO、KTP 和 LiNbO₃:MgO 达到这一目的。用一块 LiNbO₃:MgO 晶体, 以这样一种 DROPO 方式获得了 100 mW 的红外参量功率^[4.491]。Marshall 和 Kaz^[4.552] 实现了绝对电效率为 2.1%, 泵浦 OPO 功率转换效率为 70%。采用 BBO 晶体放在基于 KTP 晶体的 OPO 腔中, 利用倍频 Nd:YAG 激光器作泵浦源, 可以实现在 380 ~ 520 nm 以及 760 ~ 1 040 nm 范围的频率调谐^[4.571], 插头效率分别为 0.4% 和 0.9%。

对 OPO 晶体的选择类似于上述其他非线性频率转换中晶体的选择。铌酸钡钠和铌酸钾晶体有最大的非线性, 由此, OPO 的阈值为最低(例如对于铌酸钡钠 $I_{\text{thr}} = 5 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[4.575], 对于 KNbO₃, $I_{\text{thr}} = 2.2 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[4.581])。这些晶体是非潮解的, 并可由温度调谐实现非临界(90°)相位匹配。但是, 它们在辐射下是不稳定的, 并且不能生长大尺寸的晶体。以 cw 方式在四重共振的 MgO:LiNbO₃ OPO 构型中采用单片内全反射共振腔, 腔内同时发生双共振二次谐波以及 DROPO, 实现了最低的 OPO 阈值 0.4 mW^[4.488]。KTP 晶体在近红外区(1 ~ 3 μm)的 OPO 共振方式中是有用的。LiIO₃、LiNbO₃ 和 α-LiIO₃ 晶体在可见、IR 区(至 5 μm)的 OPO 是有效的; BBO 和 LBO 晶体在 UV、可见以及近红外区的 OPO; 以及 KDP、ADP 和尿素晶体, 在 UV 和可见区, 当它们以 Nd:YAG 激光器辐射的二次、三次或四次谐波泵浦时可以采用。因为 KDP、ADP 和 LiIO₃ 晶体具有高的光学质量, 它们可用于 TWOPO 方式, 这需要高的泵浦强度(高达 10 GW · cm⁻²), 但是同时在技术上是简单的。LiNbO₃ 晶体在 cw 二极管泵浦 Nd:YAG 激光器中有优越性。优越的 KTP 和 LBO 晶体非常适用, 特别是对同步泵浦的皮秒和飞秒 OPO 方式。在这些晶体的优势参数中, 应该提及小的走离角。对于纳秒 OPO, BBO 晶体是最佳的, 晶体具有大的非线性, 高的光学损伤阈值, 以及在很宽的光谱范围内(0.23 ~ 3.2 μm)满足相位匹配条件。仅改变 BBO 晶体相位匹配角仅 2°, 就能覆盖 0.7 ~ 2.6 μm 的近红外区。然而应该提及的是, 由于 BBO 晶体的角度带宽小, 以其作 OPO 时需要采用单模衍射极限的激光作为泵浦源。关于 OPO 应用中 BBO 和 LBO 晶体的详细比较在一系列文章^[4.169,450,512,514,515]中已经给出。

4.6.2 中红外区的 OPO

对于中红外范围(5 ~ 16 μm)的 OPO, 所使用的是 Ag₃AsS₃、AgGaS₂、AgGaSe₂、ZnGeP₂、GaSe 和 CdSe 晶体。Elsaesser 等人^[4.593]报道了使用淡红银矿晶体, 以 Nd:YAG 激光辐射作为泵浦源($\lambda = 1.064 \text{ μm}$, $I_0 = 6 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\tau_p = 21 \text{ ps}$, $\Delta\nu = 2 \text{ cm}^{-1}$) 在 1.2 ~ 8 μm 范围的 OPO。能量转换效率相当于

$10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。OPO 脉冲的光谱宽度是 $10 \sim 40 \text{ cm}^{-1}$ ，OPO 脉冲宽度约为 8 ps 。当采用 Nd^{3+} ：磷酸盐玻璃激光器作为泵浦源，转换到 $\lambda = 1.4 \sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ 的 OPO 效率是 1% [4.594]。

以两块 AgGaS_2 晶体 ($L = 1.5 \text{ cm}$ 和 3 cm) 实现了 $1.2 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ 范围输出辐射的行波 OPO [4.595]。此处采用 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射 ($\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$, $\tau = 20 \text{ ps}$, $I_0 = 3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 作泵浦源。相位匹配角 (θ_{opt}) 从 35° 变到 55° 。OPO 脉冲宽度 (8 ps) 采用非共线交叉相关方法来确定的。OPO 辐射 ($5 \text{ }\mu\text{m}$) 和 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射的二次谐波 ($0.53 \text{ }\mu\text{m}$) 在一块长 0.1 cm 的 LiIO_3 晶体 ($\theta = 25^\circ$) 中混频，OPO 脉冲光谱宽度为 10 cm^{-1} ($6 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$)。

基于 LiNbO_3 晶体的 OPO ($\lambda = 1.4 \sim 4.5 \text{ }\mu\text{m}$ 及其二次谐波) [4.596] 或基于 LBO 晶体的 OPO ($1.16 \sim 2.13 \text{ }\mu\text{m}$) [4.597] 辐射作为种子注入，已在 AgGaS_2 晶体中实现了达 $13 \text{ }\mu\text{m}$ 的光学参量放大。单次皮秒脉冲 (20 ps) 的能量达到 $90 \text{ }\mu\text{J}$ [4.596]，并且其光谱宽度为 $\Delta\nu = 3 \sim 8 \text{ cm}^{-1}$ [4.597]。

有报道说在 AgGaSe_2 晶体中实现了波长范围为 $1.6 \sim 1.7 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $6.7 \sim 6.9 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.65 \sim 9.02 \text{ }\mu\text{m}$ 的有效参量辐射发生 [4.598]。此处采用了调 Q $\text{Nd}:\text{YAG}$ ($\lambda = 1.34 \text{ }\mu\text{m}$) 和 $\text{Ho}:\text{YLF}$ ($\lambda = 2.05 \text{ }\mu\text{m}$) 激光辐射作为泵浦源。晶体长度为 $18 \sim 21 \text{ mm}$ ；转换效率相当于 18% ， $P = 100 \text{ kW}$ ， $\tau = 30 \text{ ns}$ 。在 ZnGeP_2 中，由 $\lambda = 2.94 \text{ }\mu\text{m}$ ， $\tau = 80 \text{ ps}$ 的钕激光脉冲序列泵浦实现了皮秒 OPO [4.599, 600]。 $\lambda = 5.51 \sim 5.38 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $6.29 \sim 6.46 \text{ }\mu\text{m}$ 的参量辐射的转换效率为 5.3% ，其 $I_0 = 4 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，晶体长度为 42 mm ， $\theta_{\text{opt}} = 84.5^\circ \sim 79.3^\circ$ [4.599]。随 I_0 增大到 $16 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，量子转换效率为 17% ；OPO 输出功率相当于 1 MW 。用 CdSe 晶体获得高效 OPO [4.601]；转换到 $\lambda_{\text{信号}} = 2.26 \sim 2.23 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\lambda_{\text{闲频}} = 9.8 \sim 10.4 \text{ }\mu\text{m}$ ，参量辐射功率的转换效率达到 40% 。 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射 ($\lambda = 1.833 \text{ }\mu\text{m}$, $\tau = 30 \text{ ns}$ ，以及 $I_0 = 2 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 用作泵浦源。相位匹配角 θ_{opt} 从 90° 变到 78° 。采用 $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$ 激光辐射 ($\lambda = 2.36 \text{ }\mu\text{m}$, $\tau = 40 \text{ ns}$)，在 CdSe 晶体中在 $\theta_{\text{opt}} = 90^\circ \sim 65^\circ$ 时获得 $7.9 \sim 13.7 \text{ }\mu\text{m}$ 范围的 OPO [4.602, 603]。在 $I_0 = 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和晶体长 30 mm 时能量转换效率为 15% 。利用同一块晶体和 HF 激光辐射 ($\lambda = 2.87 \text{ }\mu\text{m}$) 作为泵浦源，实现了 $4.3 \sim 4.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $8.1 \sim 8.3 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $14.1 \sim 16.4 \text{ }\mu\text{m}$ 的 OPO，峰值功率最高为 800 W [4.604, 603]。

表 4.33 包括了在中红外区 OPO 的实验结果，列出了晶体、泵浦波长、OPO 调谐范围、脉冲宽度和转换效率。该表中显示了 AgGaSe_2 和 CdSe 晶体在纳秒范围内是最有前景的；淡红银矿、硫镓银和 ZnGeP_2 在皮秒范围内是最有前景的。

表 4.33 在中红外区的光学参量振荡

晶体	$\lambda_{泵浦}/\mu\text{m}$	$\lambda_{OPO}/\mu\text{m}$	τ_p	转换效率/%	参考文献
Ag_3AsS_3	1.06	2.1	100 ns	—	4.606
	1.065	1.82 ~ 2.56	26 ns	1	4.607
	1.065	1.22 ~ 8.5	25 ns	—	4.608
	1.064	1.2 ~ 8	8 ps	0.01 ~ 1	4.593
	1.055	1.4 ~ 5	10 ps	1	4.594
AgGaS_2	1.064	1.2 ~ 10	8 ps	0.1 ~ 10	4.595
	1.06	1.4 ~ 4.0	18 ns	16	4.609
	1.064	4.5 ~ 8.7	15 ~ 20 ps	5.4	4.596
	1.064	1.16 ~ 12.9	19 ps	25	4.597
AgGaSe_2	1.34	1.6 ~ 1.7, 6.7 ~ 6.9	30 ns	> 18	4.598
	2.05	2.65 ~ 9.02	30 ns	> 18	4.598
	2.06	≈ 4.1	≈ 30 ns	23	4.610
ZnGeP_2	2.94	5.51 ~ 5.38, 6.29 ~ 6.46	80 ps	5.3	4.599
	2.94	5 ~ 5.3, 5.9 ~ 6.3	150 ps	17	4.600
	2.79	5.3, 5.9	≈ 100 ps	10	4.611
	2.94	4 ~ 10	≈ 100 ps	17.6	4.612, 613
GaSe	2.94	3.5 ~ 18	≈ 100 ps	1	4.612, 613
CdSe	1.833	9.8 ~ 10.4, 2.26 ~ 2.23	300 ns	40	4.601
	2.36	7.9 ~ 13.7	40 ns	15	4.602, 603
	2.87	4.3 ~ 4.5, 8.1 ~ 8.3	140 ns	15	4.604
	2.87	14.1 ~ 16.4	—	—	4.605

4.6.3 OPO 辐射转换到紫外区

由 OPO 实现的波长范围通过谐波发生 (SHG, FOHG) 或者 OPO 和泵光的谐波辐射的和频方式将光源大大地扩展。例如, Kryukov 等人^[4.440] 采用一块 30 mm 的 LiIO_3 晶体, 切角为 $\theta_{\text{inc}} = 30^\circ$, 对 OPO 辐射进行倍频。二次谐波 ($\lambda = 420 \sim 700$ nm) 的能量为 0.1 ~ 0.4 mJ, $\eta = 5\% \sim 47\%$ 。随后, 二次谐波辐射在一块长 40 mm 的 KDP 和 ADP 晶体中倍频; 调谐范围为 0.26 ~ 0.4 μm , 输出脉冲能量为几 μJ , $\tau = 30$ ps。OPO 辐射的二次谐波辐射可达 313 nm, $\tau = 5$ ps 以及 $\Delta\nu = 12 \text{ cm}^{-1}$ ^[4.483, 592], 用的是 LiIO_3 ($L = 1.4 \text{ mm}, \theta = 52^\circ$) 和 KDP ($L = 8 \text{ mm}, \theta = 41.5^\circ$ 或 52°) 晶体。二次谐波辐射能量为 50 mJ。

在尿素中获得的单共振 OPO 辐射 ($\lambda = 0.498 \sim 1.23 \mu\text{m}, \tau = 7$ ns), 在另一块尿素晶体 ($L = 6 \text{ mm}$, eeo 相互作用) 中倍频, 其效率 $\eta = 8.3\%$, 结果覆盖了 249 ~ 320 nm 的光谱范围^[4.584]。也采用 BBO 晶体, 对 OPO 辐射作 SHG ($\lambda_{2\omega} = 205 \sim$

305 nm, $\eta = 3.5\% \sim 8.1\%$ ^[4.614]; 220 nm, $\eta = 10\%$ ^[4.515]; 205 nm ^[4.504]); 采用 LiIO₃ 晶体, 波长范围为 560 ~ 915 nm, $\eta = 10\%$ ^[4.463]; 采用 KNbO₃ 晶体, 光谱范围为 427 ~ 470 nm, $\eta = 40\%$ ^[4.615]。利用 BBO 晶体, 对基于 KTP 的 OPO 作腔内倍频, 可以实现 380 ~ 580 nm 范围的纳秒辐射, 效率 $\eta = 40\%$ ^[4.571]; 以及 580 ~ 657 nm 范围的飞秒辐射($\tau = 57$ fs), 平均功率为 680 mW ^[4.560]。在后一种情况下, 所用 BBO 晶体的厚度为 47 μm 。

文献[4.117]报告了 197 ~ 393 nm 的皮秒辐射的产生, 是由在 KB₃O₈ · 4H₂O、KTP 和 DKDP 晶体中通过 Nd:YAG 激光辐射的二次谐波、三次谐波和四次谐波($\lambda = 532$ nm、355 nm 和 266 nm)和 OPO 辐射混频。在 $\lambda = 197$ nm 和 $\lambda = 225 \sim 393$ nm 处的 UV 辐射功率分别相当于 20 kW 和 100 kW, 脉冲宽度为 20 ps。Petrosyan 等人 ^[4.310] 在 KB5 晶体中将 OPO 辐射与 266 nm 辐射混频, 覆盖了 200 ~ 222 nm 的光谱范围($E = 1$ μJ , $\tau = 45$ ps)。在[4.117, 310]这两篇文章中, 在 KB5 中的相互作用是在 XY 平面中以 eeo 类型进行的。通过在 DKDP 晶体中 OPO 和 532 nm 辐射之间的 SFM, 覆盖了 302 ~ 392 nm 的 UV 范围, 能量最大为 3 mJ, $\eta = 28\%$ ^[4.614]。在 ADP 晶体中($\theta = 90^\circ$, $L = 10$ mm)通过 TWOPO 输出和钕激光器四次谐波的 SFM, 获得波长短至 215 nm, $E = 30$ mJ 的辐射, $\eta = 20\%$ ^[4.616]。以这种方式, 通过 OPO 辐射和 Nd:YAG 激光器的四次谐波(266 nm)以及五次谐波(212.8 nm)混合, 在 LBO 晶体中获得最短的波长: 188 ~ 242 nm, $\eta = 0.2\% \sim 2\%$, $E = 2 \sim 400$ μJ ^[4.299], 188 ~ 195 nm, $E = 9$ μJ ^[4.300]。

4.7 晶体中的受激拉曼散射和皮秒连续谱发生

在 LiIO₃、LiNbO₃、 α -HIO₃ 和 Ag₃AsS₃ 晶体中, OPO 能量转换效率的限制因素是泵浦辐射能量的非线性光学损耗 ^[4.437]。在 LiIO₃ 和 α -HIO₃ 晶体中, 当以 $\lambda_{\text{泵浦}} = 530$ nm 作泵浦时, 受激拉曼散射(SRS)是非线性损耗的主要机理, 这大大降低了 OPO 的转换效率。例如, 在 LiIO₃ 晶体中, 在 $\lambda_{\text{泵浦}} = 527$ nm 和 $\tau = 5$ ps, 当 $I = 7$ GW · cm⁻² 时, η 的最大值为 2%。随着强度依次增大, η 的值下降。这里, SRS 消耗了大于 70% 的泵浦能量 ^[4.437]。

表 4.34 列出在 KDP、LiIO₃、LiNbO₃ 和 α -HIO₃ 晶体中 SRS 阈值的资料。众所周知, SRS 的阈值相应于某一泵浦强度, 在这一强度, 可以观察到 Stokes 波强度的尖锐跳跃。从表中可以看到 KDP 晶体具有最高的 SRS 阈值; 因此, 在这一晶体中, 可以获得最高的参量振荡的转换效率。Dzhotyan 等人 ^[4.468] 研究了 LiIO₃ 晶体中的 SRS, 这是由单次频率调 Q 钕玻璃激光辐射的二次谐波作泵浦源的。在 $\lambda = 530$ nm 处峰值泵浦功率为 15 MW, $\tau = 30$ ns。一块以对光轴

$\theta_c = 26^\circ$ 角切割的 3 cm 长的 LiIO_3 晶体用于 SRS。所测量的 Stokes 位移为 $(822 \pm 2) \text{ cm}^{-1}$ 。在没有 SRS 时, 参量振荡的转换效率接近 20%, 而当存在 SRS 时, OPO 辐射能量不再取决于泵浦能量, 其最大转换效率仅 3%。

表 4.34 在不同晶体中泵浦光 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 时受激拉曼散射的阈值

晶体	$I_{\text{th}} / (10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1})$	τ_r / ps	参考文献
KDP	22	30	4.617
	44	4	4.617
LiIO_3	0.015	30 000	4.468
	0.7	30	4.439
LiNbO_3	1.2	30	4.437
	5	4	4.437
$\alpha - \text{HIO}_3$	0.3	35	4.439
	1.4	30	4.437
	6	4	4.437

在 $\alpha - \text{HIO}_3$ 晶体中已经仔细地研究过了 SRS 过程以及它与参量放大之间的竞争关系^[4.439]。锁模 Nd:YAG 激光器的二次谐波辐射 ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $\tau = 35 \text{ ps}$) 被用作泵浦源, 最高的脉冲重复率为 25 Hz。在 $\alpha - \text{HIO}_3$ 中 SRS 的阈值强度甚低, 为 $0.3 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。表 4.35 给出了在 $\alpha - \text{HIO}_3$ 晶体中当用 $\lambda_{\text{泵浦}} = 532 \text{ nm}$, 泵浦功率密度 $I_0 = 1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $\tau = 35 \text{ ps}$ 泵浦时不同的 Stokes 和反 Stokes 分量的转换效率^[4.439]。晶体取向以近于简并点 ($\lambda_{\text{信号光}} = \lambda_{\text{反斯托光}}$) 的 eoe 类型的参量相互作用方向切取。SRS 阈值减半伴随着泵浦功率增加的同时, SRS 分量精细结构出现, 逐渐充满了主分量之间的光谱。

表 4.35 在 $\alpha - \text{HIO}_3$ 中的受激拉曼散射

SRS 分量	$\Delta\nu / \text{cm}^{-1}$	λ / nm	η
1 阶 Stokes	790	555.2	0.21
2 阶 Stokes	1 580	580.7	0.07
3 阶 Stokes	2 370	608.6	0.009 5
4 阶 Stokes	3 160	640.2	0.001
1 阶反 Stokes	790	510.5	0.01
2 阶反 Stokes	1 580	490.7	0.001

由此, 随着泵浦强度的增强, 参量信号被禁阻, 而 SRS 的 Stokes 分量锐升。然而, 要注意, 在晶体中的 SRS 过程本身就能成功地用于不连续的频率调谐。

随着晶体中的受激拉曼散射, 同时观察到了宽带辐射的产生 (皮秒连续

谱)。首先是在以下介质中以三阶非线性效应检测到皮秒连续谱的： D_2O 、 H_2O 、 NaCl 和其他。它被成功地用于动力学光谱术作为探针辐射。在有三次非线性的晶体中，如在 KDP 、 LiIO_3 、 LiNbO_3 、 GaAs 、 AgBr 、 ZnSe 和 CdS 晶体中都观察到了皮秒连续谱。表 4.36 列举了皮秒连续谱及其他的产生条件的一些主要特征。Bareika 等人^[4.619] 利用 Nd^{3+} 磷酸盐玻璃激光辐射的二次谐波的单脉冲 ($\lambda = 0.527 \mu\text{m}$, $\tau = 3 \sim 6 \text{ ps}$, $E = 1 \text{ mJ}$) 作为皮秒连续谱发生的泵浦源，泵浦源聚焦到按 ooe 相互作用 ($\theta = 42^\circ$, $\phi = 45^\circ$) 切割的 4 cm 长的 KDP 晶体中，在饱和条件下皮秒连续谱的转换效率是 15%，光谱转换效率相当于 $10^{-4} (\text{cm}^{-1})^{-1}$ 。皮秒连续谱光束的发散约为 5 mrad，仅为共线产生的光谱宽度为 3000 cm^{-1} 。当晶体旋转 10° 时，在连续谱中出现了两个相当于信号和闲频辐射的两个极大值。在边界连续频率之间的时间延迟不超过 0.2 ps。随后，连续辐射在另一块 3 cm 长的 KDP 晶体 (ooe 相互作用) 中被倍频，效率为 10%^[4.619]。

表 4.36 皮秒连续谱发生

晶体	$\lambda_{\text{泵浦}}/\mu\text{m}$	$I_{\text{泵浦}}/(10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\lambda_{\text{连续}}/\mu\text{m}$	转换效率/%	切角 $\theta/(^\circ)$	参考文献
KDP	1.054	50	0.3 ~ 1.1	10	49	4.618
	0.527	30 ~ 40	0.84 ~ 1.4	15	42	4.619
LiIO_3	0.355	—	0.46 ~ 1.55	—	90	4.620
	0.532	0.3	0.67 ~ 2.58	—	90	4.620
	1.064	—	1.72 ~ 3.0	—	90	4.620
LiNbO_3	1.064	—	1.92 ~ 2.38	3	44.7	4.621
GaAs	9.3	100	3 ~ 14	—	—	4.622

在 KDP 晶体中以 $\lambda_{\text{泵浦}} = 1.054 \mu\text{m}$ 和 $I = 50 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的辐射泵浦，也实现了皮秒连续谱发生^[4.618]。所获连续谱的波长从 $0.3 \mu\text{m}$ 扩展到 $1.1 \mu\text{m}$ ，观察到了蓝光分量对于红光分量的时间延迟。在 LiIO_3 中，由 Pokhsrryan^[4.620] 采用皮秒 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光辐射的一次、二次和三次谐波作为泵浦源实现了皮秒连续谱。泵浦辐射沿 X 轴在一块 3 cm 长的晶体中传播。在沿环状锥体母线处观察到了皮秒连续谱的非共线发生；锥体轴相应于 X 轴，从相位匹配条件 $k_3 = k_1 + k_2$ 求切角。在 $\lambda_{\text{泵浦}} = 1.064 \mu\text{m}$ ，所产生的皮秒连续谱覆盖了 $1.7 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的光谱区域；在 $\lambda_{\text{泵浦}} = 0.532 \mu\text{m}$ 时，光谱范围为 $0.67 \sim 2.58 \mu\text{m}$ ；在 $\lambda_{\text{泵浦}} = 0.355 \mu\text{m}$ 时，光谱范围为 $0.46 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 。

文献[4.621]给出了在一块 4.5 cm 长 LiNbO_3 晶体中皮秒连续谱的发生。所采用的为 $\theta = 44.7^\circ$ 的 I 类相互作用 (ooe)，连续谱能量相当于 0.2 mJ。用 CO_2 激光辐射 ($\lambda_{\text{泵浦}} = 9.3 \mu\text{m}$, $\tau = 2.5 \text{ ps}$ 和 8 ps) 聚焦到 GaAs 、 AgBr 、 ZnSe 和

CdS 晶体, 文献[4. 622]报告了在 $3 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围的皮秒连续谱的产生。对于不同的非线性过程 - 相位自调模, 对四光子参量过程、高阶谐波发生和 SRS (对于皮秒连续谱发生) 的贡献进行了研究。GaAs 晶体有非常高的非线性: $d_{14} = (134 \sim 189) \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。然而, 它们不能用于非线性 SHG、SFG 或 OPO 过程, 因为它们没有双折射, 因此不存在相位匹配。

所产生的皮秒连续谱可以进一步分别通过和 SFG 或 DFG 过程中的泵浦光相混频而产生频率的上转换和下转换。由此, 通过分别在激光激活介质 (Nd 玻璃) 或在 D_2O 中, 以基频和产生的皮秒连续波的混频获得了 $350 \sim 680 \text{ nm}$ [4. 623] 和 $330 \sim 700 \text{ nm}$ [4. 624] 范围, 线宽为 $10 \sim 30 \text{ cm}^{-1}$ 的连续可调皮秒辐射。一块长 3 cm 的 LiIO_3 晶体用作 SFG, 输出功率达 $1 \sim 2 \text{ MW}$ ($\tau = 10 \text{ ps}$)。将染料激光输出和在 DFG 过程中的皮秒连续波混频, 产生亚皮秒脉宽的红外辐射 ($1.7 \sim 4.0 \mu\text{m}$, 0.2 ps [4. 392] 和 $2.5 \mu\text{m}$, 0.5 ps [4. 393])。为此目的, 分别采用了 LiNbO_3 和 BBO 晶体。

在 D_2O 中由 620 nm , 100 fs 激光碰撞脉冲锁模染料产生的宽带连续谱 ($0.6 \sim 1.4 \mu\text{m}$) 辐射的二次谐波以一种非相位匹配构型的特薄 ($L = 1 \mu\text{m}$) 的有机晶体 MNA^+ 得到实现 [4. 625]。其转换效率 η 可以和在相位匹配条件下 $100 \mu\text{m}$ KDP 晶体的转换效率相比较。



参考文献

第 1 章

1. 1 T. H. Maiman: Nature 187, 493 - 494 (1960)
1. 2 L. F. Johnson, K. Nassau: Proc. IRE 49, 1704 - 1706 (1961)
1. 3 E. Snitzer: Phys. Rev. Lett. 7, 444 - 446 (1961)
1. 4 J. E. Geusic, H. M. Marcos, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 4, 182 - 184 (1964)
1. 5 A. Javan, W. R. Bennett, D. R. Herriot: Phys. Rev. Lett. 6, 106 - 110 (1961)
1. 6 E. Gordon, E. Labuda, W. Bridges: Appl. Phys. Lett. 4, 178 - 180 (1964)
1. 7 C. K. N. Patel: Phys. Rev. Lett. 13, 617 - 619 (1964)
1. 8 P. P. Sorokin, J. R. Lankard: IBM J. Res. Dev. 10, 162 - 163 (1966)
1. 9 F. P. Schafer, W. Schmidt, J. Volse: Appl. Phys. Lett. 9, 306 - 309 (1966)
1. 10 R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, R. O. Carlson: Phys. Rev. Lett. 9, 366 - 368 (1962)
1. 11 M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, G. Lasher: Appl. Phys. Lett. 1, 62 - 64 (1962)
1. 12 T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, H. E. Zeiger: Appl. Phys. Lett. 1, 91 - 93 (1962)
1. 13 P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, G. Weinreich: Phys. Rev. Lett. 7, 118 - 119 (1961)
1. 14 J. A. Giordmaine: Phys. Rev. Lett. 8, 19 - 20 (1962)
1. 15 P. D. Maker, R. W. Terhune, M. Nicenoff, C. M. Savage: Phys. Rev. Lett. 8, 21 - 22 (1962)
1. 16 R. C. Miller, A. Savage: Phys. Rev. 128, 2175 - 2179 (1962)
1. 17 A. W. Smith, N. Braslau: IBM J. Res. Dev. 6, 361 - 362 (1962)
1. 18 F. Zernike, P. R. Berman: Phys. Rev. Lett. 15, 999 - 1001 (1965)
1. 19 G. D. Boyd, A. Ashkin: Phys. Rev. 146, 187 - 198 (1966)
1. 20 J. A. Giordmaine, R. C. Miller: Phys. Rev. Lett. 14, 973 - 976 (1965)
1. 21 F. Jona, G. Shirane: *Ferroelectric Crystals* (Pergamon, Oxford, 1962)
1. 22 R. C. Miller: Appl. Phys. Lett. 5, 17 - 19 (1964)
1. 23 J. E. Geusic, H. J. Levinstein, J. J. Rubin, S. Singh, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 11, 269 - 271 (1967)
1. 24 K. F. Hulme, O. Jones, P. H. Davies, M. V. Hobden: Appl. Phys. Lett. 10, 133 - 135 (1967)

1. 25 G. Nath, S. Haussühl: Appl. Phys. Lett. 14, 154 – 156 (1969)
1. 26 F. C. Zumsteg, J. D. Bierlein, T. E. Gier: J. Appl. Phys. 47, 4980 – 4985 (1976)
1. 27 I. S. Rez: Usp. Fiz. Nauk 93, 633 – 674 (1967) [English transl.: Sov. Phys. -Usp. 10, 759 – 782 (1968)]
1. 28 D. N. Nikogosyan: Kvantovaya Elektron. 4, 5 – 26 (1977) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 7, 1 – 13 (1977)]
1. 29 C. Chen, B. Wu, A. Jiang, G. You: Scientia Sinica, Ser. B 28, 235 – 243 (1985)
1. 30 C. Chen, Y. Wu, A. Jiang, B. Wu, G. You, R. Li, S. Lin: J. Opt. Soc. Am. B 6, 616 – 621 (1989)

第 2 章

2. 1 S. A. Akhmanov, R. V. Khokhlov: *Problems of Nonlinear Optics* (VINITI, Moscow 1964) (In Russian)
2. 2 N. Bloembergen: *Nonlinear Optics* (Benjamin, New York 1965)
2. 3 F. Zernicke, J. E. Midwinter: *Applied Nonlinear Optics* (Wiley, New York 1973)
2. 4 V. G. Dmitriev, L. V. Tarasov: *Optique Non Lineaire Appliquee* (MIR, Moscow 1987) [Translated from Russian: V. G. Dmitriev, L. V. Tarasov, *Prikladnaya Nelineinaya Optika* (Radio i Svyaz, Moscow 1982)]
2. 5 Yu. V. Voroshilov, D. N. Nikogosyan: Kvantovaya Elektron. 3, 608 – 610 (1976) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 6, 326 – 327 (1976)]
2. 6 A. Yariv, P. Yeh: *Optical Waves in Crystals* (Wiley, New York 1984)
2. 7 D. N. Nikogosyan, G. G. Gurzadyan: Kvantovaya Elektron. 13, 2519 – 2520 (1986) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 16, 1663 – 1664 (1986)]
2. 8 F. Brehat, B. Wyncke: J. Phys. B 22, 1891 – 1898 (1989)
2. 9 J. P. Feve, B. Boulanger, G. Marnier: Opt. Commun. 99, 284 – 302 (1993)
2. 10 D. Yu. Stepanov, V. D. Shigorin, G. P. Shipulo: Kvantovaya Elektron. 11, 1957 – 1964 (1984) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 14, 1315 – 1320 (1984)]
2. 11 M. V. Hobden: J. Appl. Phys. 38, 4365 – 4372 (1967)
2. 12 D. N. Nikogosyan, G. G. Gurzadyan: Kvantovaya Elektron. 14, 1529 – 1541 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 970 – 977 (1987)]
2. 13 M. Kashke, C. Koch: Appl. Phys. B 49, 419 – 423 (1989)
2. 14 N. K. Sidorov: Kvantovaya Elektron. 19, 880 – 881 (1992) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 22, 818 – 819 (1992)]
2. 15 D. A. Kleinman: Phys. Rev. 126, 1977 – 1979 (1962)
2. 16 V. G. Dmitriev, I. Ya. Itskhoki: "Optical Frequency Multipliers", in *Handbook of Lasers*, Vol. 2, ed. by A. M. Prokhorov (Sovetskoe Radio, Moscow 1978) pp. 292 – 319 (In Russian)
2. 17 H. Ito, H. Inaba: IEEE J. QE-8, 612 (1972)

2. 18 H. Ito, H. Naito, H. Inaba: IEEE J. QE-10, 247 – 252(1974)
2. 19 H. Ito, H. Naito, H. Inaba: J Appl. Phys. 46, 3992 – 3998(1975)
2. 20 K. Kato: Opt. Quant. Electron. 8, 261 – 262(1976)
2. 21 O. I. Lavrovskaya, N. I. Pavlova, A. V. Tarasov: Kristallografiya 31, 1145 – 1151 (1986)
[English transl.:Sov. Phys. -Crystallogr.31,678 – 682(1978)]
2. 22 V. G. Dmitriev, D. N. Nikogosyan: Opt. Commun. 95, 173 – 182(1992)
2. 23 M. A. Dreger, J. H. Erkkila: Opt. Lett. 17, 787 – 788(1992)
2. 24 J. F. Nye: *Physical Propertites of Crystals*(Clarendon,Oxford 1957)
2. 25 J. L. Oudar, R. Hierle: J Appl. Phys. 48, 2699 – 2704(1977)
2. 26 J. -M. Halbout, C. L. Tang: IEEE J. QE-18, 410 – 415(1982)
2. 27 D. Eimerl, S. Velsko, L. Davis, F. Wang, G. Loiacono, G. Kennedy: IEEE J. QE-25, 179 – 193(1989)
2. 28 I. Ledoux, C. Lepers, A. Perigaud, J. Badan, J. Zyss: Opt. Commun. 80, 149 – 154(1990)
2. 29 D. Roberts: IEEE J. QE-28, 2057 – 2074(1992)
2. 30 A. P. Sukhorukov: *Nonlinear Wave Interactions in Optics and Radiophysics*(Nauka, Moscow 1988) (In Russian)
2. 31 E. Yanke, F. Emde, F. Lösch: *Tafeln höherer Funktionen*(Teubner,Stuttgart 1960)
2. 32 S. A. Akhmanov, V. A. Vysloukh, A. S. Chirkin: *Optics of Femtosecond Laser Pulses* (American Institute of Physics, New York 1992) [Translated from Russian: S. A. Akhmanov, V. A. Vysloukh, A. S. Chirkin, *Optics of Femtosecond Laser Pulses* (Nauka,Moscow 1988)]
2. 33 R. Danelys, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis, A. Stabinis, Ya. Yasevichyute: *Optical Parametric Oscillators and Picosecond Spectroscopy*(Mosklas,Vilnyus 1983) (In Russian)
2. 34 S. L. Shapiro (ed.): *Ultrashort Light Pulses. Picosecond Technques and Applications*, Topics in Applied Physics, Vol. 18 (Springer-Verlag,Berlin,Heidelberg,1977)
2. 35 J. Herrmann, B. Wilhelmi: *Laser für ultrakurze Lichtimpulse. Grundlagen und Anwendungen*(Akademie,Berlin 1984)
2. 36 J. D. Boyd, D. A. Kleinman: J. Appl. Phys. 39, 3597 – 3639(1968)
2. 37 V. G. Dmitriev, L. A. Kulevskii: "Optical Parametric Oscillators", in *Handbook of Lasers*, Vol. 2, ed. by A. M. Prokhorov(Sovetskoe Radio,Moscow 1978), pp.319 – 348 (In Russian)
2. 38 D. S. Chemla, J. Zyss (eds.): *Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals*, Vols. 1, 2(Academic,New York 1987)
2. 39 I. S. Rez, Yu. M. Poplavko: *Dielectrics. Main Properties and Applications in Electronics* (Radio i Sviyaz,Moscow 1989) (In Russian)

第3章

- 3.1 C. Chen, Y. Wu, A. Jiang, B. Wu, G. You, R. Li, S. Lin: J. Opt. Soc. Am. B 6, 616 – 621 (1989)
- 3.2 K. Kato: IEEE J. QE-26, 1173 – 1175 (1990)
- 3.3 S. P. Velsko, M. Webb, L. Davis, C. Huang: IEEE J. QE-27, 2182 – 2192 (1991)
- 3.4 S. Lin, Z. Sun, B. Wu, C. Chen: J. Appl. Phys. 67, 634 – 638 (1990)
- 3.5 S. Lin, B. Wu, F. Xie, C. Chen: Appl. Phys. Lett. 59, 1541 – 1543 (1991)
- 3.6 B. Wu, F. Xie, C. Chen, D. Deng, Z. Xu: Opt. Commun. 88, 451 – 454 (1992)
- 3.7 T. Ukachi, R. J. Lane, W. R. Bosenberg, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 57, 980 – 982 (1990)
- 3.8 T. Ukachi, R. J. Lane, W. R. Bosenberg, C. L. Tang: J. Opt. Soc. Am. B 9, 1128 – 1133 (1992)
- 3.9 K. Kato: IEEE J. QE-26, 2043 – 2045 (1990)
- 3.10 J. T. Lin, J. L. Montgomery, K. Kato: Opt. Commun. 80, 159 – 165 (1990)
- 3.11 D. -W. Chen, J. T. Lin: IEEE J. QE-29, 307 – 310 (1993)
- 3.12 Y. Wang, Z. Xu, D. Deng, W. Zheng, B. Wu, C. Chen: Appl. Phys. Lett. 59, 531 – 533 (1991)
- 3.13 H. -J. Krause, W. Daum: Appl. Phys. Lett. 60, 2180 – 2182 (1992)
- 3.14 J. Y. Zhang, J. Y. Huang, Y. R. Shen, C. Chen, B. Wu: Appl. Phys. Lett. 58, 213 – 215 (1991)
- 3.15 W. S. Pelouch, T. Ukachi, E. S. Wachman, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 57, 111 – 113 (1990)
- 3.16 A. Borsutzky, R. Brunger, Ch. Huang, R. Wallenstein: Appl. Phys. B 52, 55 – 62 (1991)
- 3.17 V. A. Dyakov, M. Kh. Dzhafarov, A. A. Lukashev, A. A. Podshivalov, V. I. Pryalkin: Kvantovaya Elektron. 18, 339 – 341 (1991) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 21, 307 – 308 (1991)]
- 3.18 B. Wu, N. Chen, C. Chen, D. Deng, Z. Xu: Opt. Lett. 14, 1080 – 1081 (1989)
- 3.19 F. Hanson, D. Dick: Opt. Lett. 16, 205 – 207 (1991)
- 3.20 S. Lin, J. Y. Huang, J. Ling, C. Chen, Y. R. Shen: Appl. Phys. Lett. 59, 2805 – 2807 (1991)
- 3.21 H. Mao, B. Wu, C. Chen, D. Zhang, P. Wang: Appl. Phys. Lett. 62, 1866 – 1868 (1993)
- 3.22 G. C. Bhar, P. K. Datta, A. M. Rudra: Appl. Phys. B 57, 431 – 434 (1993)
- 3.23 T. Schröder, K. -J. Boller, A. Fix, R. Wallenstein: Appl. Phys. B 58, 425 – 438 (1994)
- 3.24 J. Y. Huang, Y. R. Shen, C. Chen, B. Wu: Appl. Phys. Lett. 58, 1579 – 1581 (1991)
- 3.25 I. Gontijo: Opt. Commun. 108, 324 – 328 (1994)

- 3.26 S. T. Yang, C. C. Pohalski, E. K. Gustafson, R. L. Byer, R. S. Feigelson, R. J. Raymakers, R. K. Route: *Opt. Lett.* 16, 1493 – 1495 (1991)
- 3.27 G. J. Hall, A. I. Ferguson: *Opt. Lett.* 18, 1511 – 1513 (1993)
- 3.28 G. P. A. Malcolm, M. Ebrahimzadeh, A. I. Ferguson: *IEEE J. QE-28*, 1172 – 1178 (1992)
- 3.29 A. Robertson, A. I. Ferguson: *Opt. Lett.* 19, 117 – 119 (1994)
- 3.30 S. D. Butterworth, M. J. McCarthy, D. C. Hanna: *Opt. Lett.* 18, 1429 – 1431 (1993)
- 3.31 M. J. McCarthy, S. D. Butterworth, D. C. Hanna: *Opt. Commun.* 102, 297 – 303 (1993)
- 3.32 M. Ebrahimzadeh, G. J. Hall, A. I. Ferguson: *Appl. Phys. Lett.* 60, 1421 – 1423 (1992)
- 3.33 C. Chen: *Laser Focus World* 25, No. 11, 129 – 137 (1989)
- 3.34 G. A. Skripko, S. G. Bartoshevich, I. V. Mikhnyuk, I. G. Tarazevich: *Opt. Lett.* 16, 1726 – 1728 (1991)
- 3.35 B. V. Bokut: *Zh. Prikl. Spektrosk.* 7, 621 – 624 (1967) [English transl.: *J. Appl. Spectrosc.* 7, 425 – 429 (1967)]
- 3.36 V. G. Dmitriev, D. N. Nikogosyan: *Opt. Commun.* 95, 173 – 182 (1993)
- 3.37 D. A. Roberts: *IEEE J. QE-28*, 2057 – 2074 (1992)
- 3.38 Y. Tang, Y. Cui, M. H. Dunn: *Opt. Lett.* 17, 192 – 194 (1992)
- 3.39 G. Robertson, A. Henderson, M. H. Dunn: *Appl. Phys. Lett.* 60, 271 – 273 (1992)
- 3.40 G. Robertson, A. Henderson, M. Dunn: *Opt. Lett.* 16, 1584 – 1586 (1991)
- 3.41 M. Ebrahimzadeh, G. Robertson, M. H. Dunn: *Opt. Lett.* 16, 767 – 769 (1991)
- 3.42 I. M. Bayanov, V. M. Gordienko, M. S. Djidjoev, V. A. Dyakov, S. A. Magnitskii, V. I. Pryalkin, A. P. Tarasevitch: *Proc. SPIE* 1800, 2 – 17 (1991)
- 3.43 Y. Cui, M. H. Dunn, C. J. Norrie, W. Sibbett, B. D. Sinclair, Y. Tang, J. A. C. Terry: *Opt. Lett.* 17, 646 – 648 (1992)
- 3.44 Y. Cui, D. E. Withers, C. F. Rae, C. J. Norrie, Y. Tang, B. D. Sinclair, W. Sibbett, M. H. Dunn: *Opt. Lett.* 18, 122 – 124 (1993)
- 3.45 A. Fix, T. Schröder, R. Wallenstein: *Laser und Optoelektronik* 23, No. 3, 106 – 110 (1991)
- 3.46 F. Huang, L. Huang: *Appl. Phys. Lett.* 61, 1769 – 1771 (1992)
- 3.47 F. Huang, L. Huang, B. -I. Yin, Y. Hua: *Appl. Phys. Lett.* 62, 672 – 674 (1993)
- 3.48 H. -J. Krause, W. Daum: *Appl. Phys. B* 56, 8 – 13 (1993)
- 3.49 F. G. Colville, A. J. Henderson, M. J. Padgett, J. Zhang, M. H. Dunn: *Opt. Lett.* 18, 205 – 207 (1993)
- 3.50 M. Ebrahimzadeh, G. J. Hall, A. I. Ferguson: *Opt. Lett.* 17, 652 – 654 (1992)
- 3.51 F. Hanson, P. Poirier: *Opt. Lett.* 19, 1526 – 1528 (1994)
- 3.52 H. Zhou, J. Zhang, T. Chen, C. Chen, Y. R. Shen: *Appl. Phys. Lett.* 62, 1457 – 1459 (1993)

3. 53 G. P. Banfi, R. Danielius, A. Piskarskas, P. Di Trapani, P. Foggi, R. Righini: *Opt. Lett.* 18, 1633 – 1635 (1993)
3. 54 S. A. Akhmanov, I. M. Bayanov, V. M. Gordienko, V. A. Dyakov, S. A. Magnitskii, V. I. Pryalkin, A. P. Tarasevitch: "Parametric generation of femtosecond pulses by LBO crystal in the near IR", in *Ultrafast Processes in Spectroscopy 1991*, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 126, ed. by A. Laubereau, A. Seilmeier (IOP, Bristol, 1992) pp. 67 – 70
3. 55 V. M. Gordienko, S. A. Magnitskii, A. P. Tarasevitch: "Injection-locked femtosecond parametric oscillators on LBO crystal; towards 10^{17} W cm $^{-2}$ ", in *Frontiers in Nonlinear Optics. The Sergei Akhmanov Memorial Volume*, ed. by H. Walther, N. Koroteev, M. O. Scully (IOP, Bristol, 1993) pp. 286 – 292
3. 56 A. Nebel, R. Beigang: *Opt. Lett.* 16, 1729 – 1731 (1991)
3. 57 F. Xie, B. Wu, G. You, C. Chen: *Opt. Lett.* 16, 1237 – 1239 (1991)
3. 58 J. D. Beasley: *Appl. Opt.* 33, 1000 – 1003 (1994)
3. 59 E. M. Voronkova, B. N. Grechushnikov, G. I. Distler, I. P. Petrov: *Optical Materials for Infrared Technique* (Nauka, Moscow 1965) (In Russian)
3. 60 W. L. Smith: *Appl. Opt.* 16, 798 (1977)
3. 61 A. G. Akmanov, S. A. Akhmanov, B. V. Zhdanov, A. I. Kovrigin, N. K. Podsotskaya, R. V. Khokhlov: *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 10, 244 – 249 (1969) [English transl.]: *JETP Lett.* 10, 154 – 156 (1969)]
3. 62 M. W. Dowley, E. B. Hodges: *IEEE J. QE-4*, 552 – 558 (1968)
3. 63 E. F. Labuda, A. M. Johnson: *IEEE J. QE-3*, 164 – 167 (1967)
3. 64 A. A. Blistanov, V. S. Bondarenko, N. V. Perelomova, F. N. Strizhevskaya, V. V. Chkalova, M. P. Shaskolskaya: *Acoustic Crystals* (Nauka, Moscow 1982) (In Russian)
3. 65 P. J. Wegner, M. A. Henesian, D. R. Speck, C. Bibeau, R. B. Ehrlich, C. W. Laumann, J. K. Lawson, T. L. Weiland: *Appl. Opt.* 31, 6414 – 6426 (1992)
3. 66 A. Yokotani, T. Sasaki, K. Yoshida, S. Nakai: *Appl. Phys. Lett.* 55, 2692 – 2693 (1989)
3. 67 E. N. Volkova, V. V. Fadeev: In *Nonlinear Optics*, ed. by R. V. Khokhlov (Nauka, Novosibirsk, 1968) pp. 185 – 187 (In Russian)
3. 68 G. Dikchys, E. Zhilinskas, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis: *Kvantovaya Elektron.* 6, 1610 – 1619 (1979) [English transl.]: *Sov. J. Quantum Electron.* 9, 950 – 955 (1979)]
3. 69 E. E. Fill: *Opt. Commun.* 33, 321 – 322 (1980)
3. 70 G. G. Gurzadyan, R. K. Isiryan: *Appl. Phys. Lett.* 59, 630 – 631 (1991)
3. 71 P. Liu, W. L. Smith, H. Lotem, J. H. Bechtel, N. Bloembergen, R. S. Adhav: *Phys. Rev. B* 17, 4620 – 4632 (1978)
3. 72 G. J. Linford, B. C. Johnson, J. S. Hildum, W. E. Martin, K. Snyder, R. D. Boyd, W. L. Smith, C. L. Vercimak, D. Eimerl, J. T. Hunt: *Appl. Opt.* 21, 3633 – 3643

(1982)

3. 73 F. Zernike, Jr. : J. Opt. Soc. Am. 54, 1215 – 1220 (1964)
3. 74 N. P. Barnes, D. J. Gettemy, R. S. Adhav: J. Opt. Soc. Am. 72, 895 – 898 (1982)
3. 75 R. A. Philips: J. Opt. Soc. Am. 56, 629 – 632 (1966)
3. 76 M. Yamazaki, T. Ogawa: J. Opt. Soc. Am. 56, 1407 – 1408 (1966)
3. 77 G. C. Ghosh, G. C. Bhar: IEEE J. QE-18, 143 – 145 (1982)
3. 78 D. Eimerl: Ferroelectrics 72, 95 – 139 (1987)
3. 79 V. S. Suvorov, A. S. Sonin: Kristallografiya 11, 832 – 848 (1966) [English transl. : Sov. Phys. -Crystallogr. 11, 711 – 723 (1966)]
3. 80 F. M. Johnson, J. A. Duardo: Laser Focus 3, No. 6, 31 – 37 (1967)
3. 81 W. F. Hagen, P. C. Magnante: J. Appl. Phys. 40, 219 – 224 (1969)
3. 82 A. P. Sukhorukov, I. V. Tomov: Opt. Spektrosk. 28, 1211 – 1213 (1970) [English transl. : Opt. Spectrosc. USSR 28, 651 – 653 (1970)]
3. 83 Y. Takagi, M. Sumitani, N. Nakashima, K. Yoshihara: IEEE J. QE-21, 193 – 195 (1985)
3. 84 G. A. Massey, J. C. Johnson: IEEE J. QE-12, 721 – 727 (1976)
3. 85 M. Okada, S. Ieiri: Jpn. J. Appl. Phys. 10, 808 (1971)
3. 86 E. Fill, J. Wildenauer: Opt. Commun. 47, 412 – 413 (1983)
3. 87 V. I. Bredikhin, V. N. Genkin, S. P. Kuznetsov, M. A. Novikov: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 3, 407 – 409 (1977) [English transl. : Sov. Tech. Phys. Lett. 3, 165 – 166 (1977)]
3. 88 V. I. Bredikhin, G. L. Gaushkina, V. N. Genkin, S. P. Kuznetsov: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 5, 505 – 508 (1979) [English transl. : Sov. Tech. Phys. Lett. 5, 207 – 208 (1977)]
3. 89 M. D. Jones, G. A. Massey: IEEE J. QE-15, 204 – 206 (1979)
3. 90 G. A. Massey, M. D. Jones, J. C. Johnson: IEEE J. QE-14, 527 – 532 (1978)
3. 91 A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic: Phys. Rev. Lett. 11, 14 – 17 (1963)
3. 92 R. C. Eckardt, H. Masuda, Y. X. Fan, R. L. Byer, IEEE J. 26, 922 – 933 (1990)
3. 93 M. Webb: IEEE J. QE-30, 1934 – 1942 (1994)
3. 94 U. Deserno, S. Haussühl: IEEE J. QE-9, 598 – 601 (1973)
3. 95 R. S. Craxton, S. D. Jacobs, J. E. Rizzo, R. Boni: IEEE J. QE-17, 1782 – 1786 (1981)
3. 96 R. B. Andreev, V. D. Volosov, A. G. Kalintsev: Opt. Spektrosk. 37, 294 – 299 (1974) [English transl. : Opt. Spectrosc. USSR 37, 169 – 171 (1974)]
3. 97 R. B. Andreev, V. D. Volosov, V. N. Krylov: Zh. Tekh. Fiz. 47, 1977 – 1978 (1977) [English transl. : Sov. Phys. -Tech. Phys. 22, 1146 (1977)]
3. 98 A. Yokotani, T. Sasaki, T. Yamanaka, C. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. 25, 161 – 162 (1986)
3. 99 M. W. Dowley: Opto-electron. 1, 179 – 181 (1969)

3. 100 J. E. Midwinter, J. Warner: Brit. J. Appl. Phys. 16, 1135 - 1142 (1965)
3. 101 L. Armstrong, S. E. Neister, R. Adhav: Laser Focus 18, No. 12, 49 - 53 (1982)
3. 102 B. F. Bareika, I. A. Begishev, Sh. A. Burdulis, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, A. S. Piskarskas, V. A. Sirutkaitis, T. Usmanov: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 12, 186 - 189 (1988) [English transl. :Sov. Tech. Phys. Lett. 12, 78 - 79 (1988)]
3. 103 V. D. Volosov, V. N. Krylov, V. A. Serebryakov, D. V. Sokolov: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 19, 38 - 41 (1974) [English transl. :JETP Lett. 19, 23 - 25 (1974)]
3. 104 K. P. Burneika, M. V. Ignatavichyus, V. I. Kabelka, A. S. Piskarskas, A. Yu. Stabinis: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 16, 365 - 367 (1972) [English transl. :JETP Lett. 16, 257 - 258 (1972)]
3. 105 V. Kabelka, A. Kutka, A. Piskarskas, V. Smilgiavichyus, Ya. Yasevichyute: Kvantovaya Elektron. 6, 1735 - 1739 (1979) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 9, 1022 - 1024 (1979)]
3. 106 V. D. Volosov, Yu. E. Kamach, E. N. Kozlovsky, V. M. Ovchinnikov: Opt. Mekh. Promysl. 36, No. 10, 3 - 4 (1969) [English transl. :Sov. J. Opt. Technol. 36, 656 - 657 (1969)]
3. 107 Y. Nishida, A. Yokotani, T. Sasaki, K. Yoshida, T. Yamanaka, C. Yamanaka: Appl. Phys. Lett. 52, 420 - 421 (1988)
3. 108 W. Seka, S. D. Jacobs, J. E. Rizzo, R. Boni, R. S. Craxton: Opt. Commun. 34, 469 - 473 (1980)
3. 109 V. D. Volosov, E. V. Nilov: Opt. Spektrosk. 21, 715 - 719 (1966) [English transl. :Opt. Spectrosc. USSR 21, 392 - 394 (1966)]
3. 110 S. A. Akhmanov, I. A. Begishev, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, B. V. Zhdanov, V. I. Kuznetsov, L. N. Rashkovich, T. V. Usmanov: Kvantovaya Elektron. : 11, 1701 - 1702 (1984) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 14, 1145 - 1146 (1984)]
3. 111 J. E. Swain, S. E. Stokowski, D. Milam, G. C. Kennedy: Appl. Phys. Lett. 41, 12 - 14 (1982)
3. 112 D. Eimerl, S. Velsko, L. Davis, F. Wang, G. Loiacono, G. Kennedy: IEEE J. QE-25, 179 - 193 (1989)
3. 113 A. S. Sonin, A. S. Vasilevskaya: *Electrooptic Crystals* (Atomizdat, Moscow 1971) (In Russian)
3. 114 T. R. Sliker, S. R. Burlage: J. Appl. Phys. 34, 1837 - 1840 (1963)
3. 115 J. Reintjes, R. C. Eckardt: IEEE J. QE-13, 791 - 793 (1977)
3. 116 J. P. Machewirth, R. Webb, D. Anafi: Laser Focus: 12, No. 5, 104 - 107 (1976)
3. 117 G. Brederlow, E. Fill, K. J. Witte: *The High-Power Iodine Laser*, Springer Ser. Opt. Sci. , Vol. 34 (Springer, Berlin, Heidelberg, 1983)
3. 118 J. Reintjes, R. C. Eckardt: Appl. Phys. Lett. 30, 91 - 93 (1977)

3. 119 R. S. Adhav: *Laser Focus* 19, No. 6, 73 – 78 (1983)
3. 120 T. A. Rabson, H. J. Ruiz, P. L. Shah, F. K. Tittel: *Appl. Phys. Lett.* 20, 282 – 284 (1972)
3. 121 P. E. Perkins, T. S. Fahlen: *IEEE J. QE-21*, 1636 – 1638 (1985)
3. 122 Y. S. Liu, W. B. Jones, J. P. Chernoch: *Appl. Phys. Lett.* 29, 32 – 34 (1976)
3. 123 R. M. Kogan, T. G. Crow: *Appl. Opt.* 17, 927 – 930 (1978)
3. 124 R. S. Adhav, S. R. Adhav, J. M. Pelaprat: *Laser Focus* 23, No. 9, 88 – 100 (1987)
3. 125 H. Nakatani, W. R. Bosenberg, L. K. Cheng, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 53, 2587 – 2589 (1988)
3. 126 A. S. Vasilevskaya, E. N. Volkova, V. A. Koptsik, L. N. Rashkovich, T. A. Regul'skaya, I. S. Rez, A. S. Sonin, V. S. Suvorov: *Kristallografiya* 12, 518 – 519 (1967) [English transl.: *Sov. Phys. -Crystallogr.* 12, 446 (1967)]
3. 127 B. V. Zhdanov, V. V. Kalitin, A. I. Kovrigin, S. M. Pershin: *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 1, 847 – 851 (1975) [English transl.: *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1, 368 – 369 (1975)]
3. 128 Y. P. Kim, M. H. R. Hutchinson: *Appl. Phys. B* 49, 469 – 478 (1989)
3. 129 F. Zernike, Jr.: *J. Opt. Soc. Am.* 55, 210 – 211 (1965)
3. 130 F. Wondrazek, A. Seilmeier, W. Kaiser: *Appl. Phys. B* 32, 39 – 42 (1983)
3. 131 R. E. Stickel, Jr., F. B. Dunning: *Appl. Opt.* 17, 1313 – 1314 (1978)
3. 132 R. K. Jain, T. K. Gustafson: *IEEE J. QE-12*, 555 – 556 (1976)
3. 133 R. K. Jain, T. K. Gustafson: *IEEE J. QE-9*, 859 – 861 (1973)
3. 134 R. W. Wallace: *Opt. Commun.* 4, 316 – 318 (1971)
3. 135 G. V. Venkin, L. L. Kulyuk, D. I. Maleev: *Kvantovaya Elektron.* 2, 2475 – 2480 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 1348 – 1351 (1975)]
3. 136 B. G. Huth, Y. C. Kiang: *J. Appl. Phys.* 40, 4976 – 4977 (1969)
3. 137 D. P. Schinke: *IEEE J. QE-8*, 86 – 87 (1972)
3. 138 A. H. Kung: *Appl. Phys. Lett.* 25, 653 – 655 (1974)
3. 139 K. Kato: *Opt. Commun.* 13, 361 – 362 (1975)
3. 140 J. M. Yarborough, G. A. Massey: *Appl. Phys. Lett.* 18, 438 – 440 (1971)
3. 141 G. A. Massey: *Appl. Phys. Lett.* 24, 371 – 373 (1974)
3. 142 T. Sato: *J. Appl. Phys.* 44, 2257 – 2259 (1973)
3. 143 C. Chen, B. Wu, A. Jiang, G. You: *Scientia Sinica, Ser. B* 28, 235 – 243 (1985)
3. 144 L. J. Bromley, A. Guy, D. C. Hanna: *Opt. Commun.* 67, 316 – 320 (1988)
3. 145 K. Kato: *IEEE J. QE-22*, 1013 – 1014 (1986)
3. 146 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer, C. Chen, A. D. Jiang: *IEEE J. QE-25*, 1196 – 1199 (1989)
3. 147 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer, J. Nolting, R. Wallenstein: *Appl. Phys. Lett.* 53, 2014 – 2016 (1988)

3. 148 D. Eimerl, L. Davis, S. Velsko, E. K. Graham, A. Zalkin: J. Appl. Phys. 62, 1968 – 1983(1987)
3. 149 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee: Appl. Opt. 28, 202 – 204 (1989)
3. 150 K. Miyazaki, H. Sakai, T. Sato: Opt. Lett. 11, 797 – 799(1986)
3. 151 X. Xinan, Y. Shuzhong: Chinese Phys. -Lasers 13, 892 – 894(1986)
3. 152 L. K. Cheng, W. R. Bosenberg, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 53, 175 – 177(1988)
3. 153 W. R. Bosenberg, L. K. Cheng, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 54, 13 – 15(1989)
3. 154 C. Chen, Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer: Proc. SPIE 681, 12 – 19(1987)
3. 155 H. J. Müschenborn, W. Theiss, W. Demtröder: Appl. Phys. B 50, 365 – 369 (1990)
3. 156 M. Ebrahimzadeh, A. J. Henderson, M. H. Dunn: IEEE J. QE-26, 1241 – 1252 (1990)
3. 157 J. Y. Huang, J. Y. Zhang, Y. R. Shen, C. Chen, B. Wu: Appl. Phys. Lett. 57, 1961 – 1963(1990)
3. 158 J. Y. Zhang, J. Y. Huang, Y. R. Shen, C. Chen: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1758 – 1764(1993)
3. 159 H. Vanherzeele, C. Chen: Appl. Opt. 27, 2634 – 2636(1988)
3. 160 H. Komine: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1751 – 1757(1993)
3. 161 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee: J. Appl. Phys. 66, 5111 – 5113(1989)
3. 162 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee: Appl. Phys. Lett. 54, 1383 – 1384(1989)
3. 163 X. D. Zhu, L. Deng: Appl. Phys. Lett. 61, 1490 – 1492(1992)
3. 164 M. Watanabe, K. Hayasaka, H. Imajo, J. Umezu, S. Urabe: Appl. Phys. B 53, 11 – 13 (1991)
3. 165 I. V. Tomov, T. Anderson, P. M. Rentzepis: Appl. Phys. Lett. 61, 1157 – 1159 (1992)
3. 166 W. L. Glab, J. P. Hessler: Appl. Opt. 26, 3181 – 3182(1987)
3. 167 U. Heitmann, M. Kötteritzsch, S. Heitz, A. Hese: Appl. Phys. B 55, 419 – 423 (1992)
3. 168 D. W. Coutts, M. D. Ainsworth, J. A. Piper: IEEE J. QE-25, 1985 – 1987(1989)
3. 169 S. Lu, Y. Yuan, Y. Tang, W. Xu, C. Wu: "Mixing Frequency Generation of 271.0 – 291.5 nm in β -BaB₂O₄", in *Proceedings of the Topical Meeting on Laser Materials and Laser Spectroscopy*, ed. by Z. Wang, Z. Zhang (World Scientific, Singapore 1989) pp. 77 – 79
3. 170 M. -H. Lu, Y. -M. Liu: Opt. Commun. 84, 193 – 198(1991)
3. 171 K. Kurokawa, M. Nakazawa: Appl. Phys. Lett. 55, 7 – 9(1989)
3. 172 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee: J. Phys. D 22, 562 – 563(1989)
3. 173 H. Komine: Opt. Lett. 13, 643 – 645(1988)

3. 174 K. Kuroda, T. Omatsu, T. Shimura, M. Chihara, I. Ogura: Opt. Commun. 75, 42 – 46 (1990)
3. 175 D. W. Coutts, J. A. Piper: IEEE J. QE – 28, 1761 – 1764 (1992)
3. 176 D. W. Coutts, M. D. Ainsworth, J. A. Piper: IEEE J. QE – 26, 1555 – 1558 (1990)
3. 177 Y. Taira: Jpn. J. Appl. Phys. 31, L682-L684 (1992)
3. 178 G. G. Gurzadyan, A. S. Oganessian, A. V. Petrosyan, R. O. Sharkhatunyan: Zh. Tekh. Fiz. 61, 152 – 154 (1991) [English transl.: Sov. Phys. -Tech. Phys. 36, 341 – 342 (1991)]
3. 179 W. Joosen, H. J. Bakker, L. D. Noordam, H. G. Muller, H. B. van Linden van den Heuvell: J. Opt. Soc. Am. B 8, 2087 – 2093 (1991)
3. 180 T. R. Zhang, H. R. Choo, M. C. Downer: Appl. Opt. 29, 3927 – 3933 (1990)
3. 181 P. Qiu, A. Penzkofer: Appl. Phys. B 45, 225 – 236 (1988)
3. 182 G. D. Hager, S. A. Hanes, M. A. Dreger: IEEE J. QE – 28, 2573 – 2576 (1992)
3. 183 G. Nath, S. Haussühl: Appl. Phys. Lett. 14, 154 – 156 (1969)
3. 184 F. R. Nash, J. G. Bergman, G. D. Boyd, E. H. Turner: J. Appl. Phys. 40, 5201-5206 (1969)
3. 185 G. Nath, H. Mehmanesch, M. Gsänger: Appl. Phys. Lett. 17, 286 – 288 (1970)
3. 186 D. J. Gettemy, W. C. Harker, G. Lindholm, N. P. Barnes: IEEE J. 24, 2231 – 2237 (1988)
3. 187 J. Jerphagnon: Appl. Phys. Lett. 16, 298 – 299 (1970)
3. 188 N. M. Bityurin, V. I. Bredikhin, V. N. Genkin: Kvantovaya Elektron. 5, 2453 – 2457 (1978) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 8, 1377 – 1379 (1978)]
3. 189 K. Takizawa, M. Okada, S. Ieiri: Opt. Commun. 23, 279 – 281 (1977)
3. 190 S. Umegaki, S. I. Tanaka, T. Uchiyama, S. Yabumoto: Opt. Commun. 3, 244 – 245 (1971)
3. 191 J. M. Crettez, J. Comte, E. Coquet: Opt. Commun. 6, 26 – 29 (1972)
3. 192 M. M. Choy, R. L. Byer: Phys. Rev. B 14, 1693 – 1706 (1976)
3. 193 Z. B. Perekalina, G. F. Dobrzhansky, I. A. Spilko: Kristallografiya 15, 1252 – 1253 (1970) [English transl.: Sov. Phys. -Crystallogr. 15, 1095 (1970)]
3. 194 V. A. Kizel, V. I. Burkov: Gyrotropy of Crystals (Nauka, Moscow 1980) (In Russian)
3. 195 I. M. Beterov, V. I. Stroganov, V. I. Trunov, B. Ya. Yurshin: Kvantovaya Elektron. 2, 2440 – 2443 (1975) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 5, 1329 – 1331 (1975)]
3. 196 H. Buesener, A. Renn, M. Brieger, F. Von Moers, A. Hese: Appl. Phys. B 39, 77 – 81 (1986)
3. 197 G. Nath, S. Haussühl: Phys. Lett. 29 A, 91 – 92 (1969)
3. 198 J. E. Pearson, G. A. Evans, A. Yariv: Opt. Commun. 4, 366 – 367 (1972)
3. 199 A. I. Izrailenko, A. I. Kovrigin, P. V. Nikles: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 12, 475 – 478 (1970) [English transl.: JETP Lett. 12, 331 – 333 (1970)]

3. 200 M. Okada, S. Ieiri: Phys. Lett. 34 A, 63 – 64 (1971)
3. 201 R. B. Chesler, M. A. Karr, J. E. Geusic: J. Appl. Phys. 41, 4125 – 4127 (1970)
3. 202 K. Kato: IEEE J. QE – 21, 119 – 120 (1985)
3. 203 A. J. Campillo, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 19, 36 – 38 (1971)
3. 204 A. J. Campillo: IEEE J. QE – 8, 809 – 811 (1972)
3. 205 D. W. Meltzer, L. S. Goldberg: Opt. Commun. 5, 209 – 211 (1972)
3. 206 L. S. Goldberg: Appl. Phys. Lett. 17, 489 – 491 (1970)
3. 207 T. M. Jedju, L. Rothberg: Appl. Opt. 27, 615 – 618 (1988)
3. 208 F. Huiskens, A. Kulcke, D. Voelkel, C. Laush, J. M. Lisy: Appl. Phys. Lett. 62, 805 – 807 (1993)
3. 209 G. Nath, G. Pauli: Appl. Phys. Lett. 22, 75 – 76 (1973)
3. 210 D. Malz, J. Bergmann, J. Heise: Exp. Techn. Phys. 23, 379 – 388 (1975)
3. 211 Y. C. See, J. Falk: Appl. Phys. Lett. 36, 503 – 505 (1980)
3. 212 D. Malz, J. Bergmann, J. Heise: Exp. Techn. Phys. 23, 495 – 498 (1975)
3. 213 S. G. Karpenko, N. E. Kornienko, V. L. Strizhevskii: Kvantovaya Elektron. 1, 1768 – 1779 (1974) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 4, 979 – 985 (1974)]
3. 214 V. I. Kabelka, V. G. Kolomiets, A. S. Piskarskas, A. Yu. Stabinis: Zh. Prikl. Spektrosk. 21, 947 – 950 (1974) [English transl. : J. Appl. Spectrosc. 21, 582 – 585 (1974)]
3. 215 V. I. Kabelka, A. S. Piskarskas, A. Yu. Stabinis, R. L. Sher: Kvantovaya Elektron. 2, 434 – 436 (1975) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 5, 255 – 246 (1975)]
3. 216 B. I. Kidyarov, I. V. Nikolaev, E. V. Pestryakov, V. M. Tarasov: Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. 58, 131 – 134 (1994) [English transl. : Bull. Acad. Sci., Phys. Ser. 58, No. 2 (1994)]
3. 217 M. Webb, S. P. Velsko: IEEE J. QE – 26, 1394 – 1398 (1990)
3. 218 H. Gerlach: Opt. Commun. 12, 405 – 408 (1974)
3. 219 R. B. Andreev, V. D. Volosov, V. N. Krylov: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 4, 256 – 258 (1978) [English transl. : Sov. Tech. Phys. Lett. 4, 105 – 106 (1978)]
3. 220 E. W. Van Stryland, W. E. Williams, M. J. Soileau, A. L. Smirl: IEEE J. QE – 20, 434 – 439 (1984)
3. 221 A. Arutunyan, G. Arzumanyan, R. Danielius, V. Kabelka, R. Sharkhatunyan, Ya. Yasevichyute: Litovskii Fizicheskii Sbornik 18, 255 – 263 (1978) (In Russian)
3. 222 R. Danielius, G. Dikchys, V. Kabelka, A. Piskarskas, A. Stabinis, Ya. Yasevichyute: Kvantovaya Elektron. 4, 2379 – 2395 (1977) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 7, 1360 – 1368 (1977)]
3. 223 V. G. Dmitriev, V. N. Krasnyanskaya, M. F. Koldobskaya, I. S. Rez, E. A. Shalaev,

- E. M. Shvom: *Kvantovaya Elektron.* No. 2 (14), 64 – 66 (1973) [English transl. : *Sov. J Quantum Electron.* 3, 126 – 127 (1973)]
3. 224 A. Koeneke, A. Hirth: *Opt. Commun.* 34, 245 – 248 (1980)
 3. 225 T. Y. Fan, C. E. Huang, B. Q. Hu, R. C. Eckardt, Y. X. Fan, R. L. Byer, R. S. Feigelson: *Appl. Opt.* 26, 2390 – 2394 (1987)
 3. 226 Y. S. Liu, D. Dentz, R. Belt: *Opt. Lett.* 9, 76 – 78 (1984)
 3. 227 D. N. Dovchenko, V. A. Dyakov, V. I. Pryalkin: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* 52, 225 – 230 (1988) [English transl. : *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* 52, No. 2, 13 – 17 (1988)]
 3. 228 J. C. Jacco: *Proc. SPIE* 968, 93 – 99 (1988)
 3. 229 R. F. Belt, G. Gashurov, Y. S. Liu: *Laser Focus* 21, No. 10, 110 – 124 (1985)
 3. 230 Y. Kitaoka, T. Sasaki, S. Nakai, Y. Goto: *Appl. Phys. Lett.* 59, 19 – 21 (1991)
 3. 231 A. L. Aleksandrovskii, S. A. Akhmanov, V. A. Dyakov, N. I. Zheludev, V. I. Pryalkin: *Kvantovaya Elektron.* 12, 1333 – 1334 (1985) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 15, 885 – 886 (1985)]
 3. 232 K. Kato: *IEEE J. QE* – 27, 1137 – 1140 (1991)
 3. 233 P. F. Bordui, R. Blachman, R. G. Norwood: *Appl. Phys. Lett.* 61, 1369 – 1371 (1992)
 3. 234 P. E. Perkins, T. S. Fahlen: *J. Opt. Soc. Am. B* 4, 1066 – 1071 (1987)
 3. 235 J. D. Bierlein, H. Vanherzele: *J. Opt. Soc. Am. B* 6, 622 – 633 (1989)
 3. 236 H. Y. Shen, Y. P. Zhou, W. X. Lin, Z. D. Zeng, R. R. Zeng, G. F. Yu, C. H. Huang, A. D. Jiang, S. Q. Jia, D. Z. Shen: *IEEE J. QE* – 28, 48 – 51 (1992)
 3. 237 K. Kato: *IEEE J. QE* – 28, 1974 – 1976 (1992)
 3. 238 D. W. Anthon, C. D. Crowder: *Appl. Opt.* 27, 2650 – 2652 (1988)
 3. 239 H. Vanherzele, J. D. Bierlein, F. C. Zumsteg: *Appl. Opt.* 27, 3314 – 3316 (1988)
 3. 240 H. Vanherzele: *Appl. Opt.* 27, 3608 – 3615 (1988)
 3. 241 R. A. Stolzenberger, C. C. Hsu, N. Peyghambarian, J. J. E. Reid, R. A. Morgan: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1, 446 – 448 (1989)
 3. 242 V. A. Dyakov, V. V. Krasnikov, V. I. Pryalkin, M. S. Pshenichnikov, T. B. Razumikhina, V. S. Solomatin, A. I. Kholodnykh: *Kvantovaya Elektron.* 15, 1703 – 1704 (1988) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 18, 1059 – 1060 (1988)]
 3. 243 O. I. Lavrovskaya, N. I. Pavlova, A. V. Tarasov: *Kristallografiya* 31, 1145 – 1151 (1986) [English transl. : *Sov. Phys. -Crystallogr.* 31, 678 – 682 (1986)]
 3. 244 R. A. Stolzenberger: *Appl. Opt.* 27, 3883 – 3886 (1988)
 3. 245 L. J. Bromley, A. Guy, D. C. Hanna: *Opt. Commun.* 70, 350 – 354 (1989)
 3. 246 Yu. A. Galaichuk, V. A. Dyakov, N. I. Likholt, V. S. Ovechko, R. A. Petrenko, T. V. Rozhdestvenskaya, V. L. Strizhevskii, A. I. Khilchevskii, Yu. N. Yashkir: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* 52, 560 – 563 (1988) [English transl. : *Bull. Acad. Sci.*

USSR, Phys. Ser. 52, No. 3, 131 – 133 (1988)]

3. 247 T. Nishikawa, N. Uesugi, H. Ito: Appl. Phys. Lett. 55, 1943 – 1945 (1989)
3. 248 V. M. Garmash, G. A. Ermakov, N. I. Pavlova, A. V. Tarasov: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 12, 1222 – 1225 (1986) [English transl. : Sov. Tech. Phys. Lett. 12, 505 – 506 (1986)]
3. 249 R. Burnham, R. A. Stolzenberger, A. Pinto: IEEE. Photon. Technol. Lett. 1, 27 – 28 (1989)
3. 250 W. Wang, K. Nakagawa, Y. Toda, M. Ohtsu: Appl. Phys. Lett. 61, 1886 – 1888 (1992)
3. 251 J. T. Lin, J. L. Montgomery: Opt. Commun. 75, 315 – 320 (1990)
3. 252 W. X. Lin, H. Y. Shen, Y. P. Zhou, R. R. Zeng, G. F. Yu, C. H. Huang, Z. D. Zeng, W. J. Zhang: Opt. Commun, 82, 333 – 336 (1991)
3. 253 W. Wang, M. Ohtsu: Opt. Commun. 102, 304 – 308 (1993)
3. 254 K. Kato: IEEE J. QE – 24, 3 – 4 (1988)
3. 255 H. Liao, H. Shen, T. Lian, Y. Zhou, C. Huang, R. Zeng, G. Yu: Optics and Laser Technology 20, 103 – 104 (1988)
3. 256 W. P. Risk, R. N. Payne, W. Lenth, C. Harder, H. Meier: Appl. Phys. Lett. 55, 1179 – 1181 (1989)
3. 257 J. -C. Baumert, F. M. Schellenberg, W. Lenth, W. P. Risk, G. C. Bjorklund: Appl. Phys. Lett. 51, 2192 – 2194 (1987)
3. 258 Z. Y. Ou, S. F. Pereira, E. S. Polzik, H. J. Kimble: Opt. Lett. 17, 640 – 642 (1992)
3. 259 S. T. Yang, R. C. Eckardt, R. L. Byer: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1684 – 1695 (1993)
3. 260 S. T. Yang, R. C. Eckardt, R. L. Byer: Opt. Lett. 18, 971 – 973 (1993)
3. 261 K. Kato, M. Masutani: Opt. Lett. 17, 178 – 179 (1992)
3. 262 J. A. C. Terry, Y. Cui, Y. Yang, W. Sibbett, M. H. Dunn: J. Opt. Soc. Am. B 11, 758 – 769 (1994)
3. 263 G. I. Dyakonov, V. A. Maslov, V. A. Mikhailov, S. K. Pak, V. N. Semenenko, I. A. Shcherbakov: Kvantovaya Elektron. 16, 1601 – 1603 (1989) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 19, 1031 – 1032 (1989)]
3. 264 J. -J. Zondy, M. Abed, A. Clairon: J. Opt. Soc. Am. B 11, 2004 – 2015 (1994)
3. 265 B. Boulanger, J. P. Feve, G. Marnier, B. Menaert, X. Cabirol, P. Villeval, C. Bonnin: J. Opt. Soc. Am. B 11, 750 – 757 (1994)
3. 266 S. E. Moody, J. M. Eggleston, J. F. Seamans: IEEE J. QE – 23, 335 – 340 (1987)
3. 267 T. A. Driscoll, H. J. Hoffman, R. E. Stone, P. E. Perkins: J. Opt. Soc. Am. B 3, 683 – 686 (1986)
3. 268 F. C. Zumsteg, J. D. Bierlein, T. E. Gier: J. Appl. Phys. 47, 4980 – 4985 (1976)
3. 269 F. Ahmed: Appl. Opt. 28, 119 – 122 (1989)

3. 270 P. Yankov, D. Schumov, A. Nenov, A. Monev: Opt. Lett. 18, 1771 – 1773 (1993)
3. 271 J. C. Jacco, D. R. Rockafellow, E. A. Teppo: Opt. Lett. 16, 1307 – 1309 (1991)
3. 272 R. J. Bolt, M. van der Moeren: Opt. Commun. 100, 399 – 410 (1993)
3. 273 L. G. Van Uitert, J. J. Rubin, W. A. Bonner: IEEE J. QE – 4, 622 – 627 (1968)
3. 274 G. D. Boyd, R. C. Miller, K. Nassau, W. L. Bond, A. Savage: Appl. Phys. Lett. 5, 234 – 236 (1964)
3. 275 G. V. Ageev, R. P. Bashuk, A. S. Bechuk, N. S. Voidetskaya, D. A. Gromov, Yu. N. Solovieva, A. V. Chesnokov: In *Nonlinear Optics*, ed. by R. V. Khokhlov (Nauka, Novosibirsk 1968) pp. 211 – 217 (In Russian)
3. 276 Y. C. See, S. Guha, J. Falk: Appl. Opt. 19, 1415 – 1418 (1980)
3. 277 D. H. Jundt, M. M. Fejer, R. L. Byer, R. G. Norwood, P. F. Bordui: Opt. Lett. 16, 1856 – 1858 (1991)
3. 278 A. Seilmeier, W. Kaiser: Appl. Phys. 23, 113 – 119 (1980)
3. 279 D. von der Linde, A. M. Glass, K. F. Rodgers: Appl. Phys. Lett. 25, 155 – 157 (1974)
3. 280 D. H. Jundt, M. M. Fejer, R. L. Byer: IEEE J. QE – 26, 135 – 138 (1990)
3. 281 D. S. Smith, H. D. Riccius, R. P. Edwin: Opt. Commun. 17, 332 – 335 (1976)
3. 282 D. F. Nelson, R. M. Mikulyak: J. Appl. Phys. 45, 3688 – 3689 (1974)
3. 283 J. E. Midwinter: J. Appl. Phys. 39, 3033 – 3038 (1968)
3. 284 M. V. Hobden, J. Warner: Phys. Lett. 22, 243 – 244 (1966)
3. 285 G. J. Edwards, M. Lawrence: Opt. Quant. Electron. 16, 373 – 375 (1984)
3. 286 A. M. Prokhorov, Yu. S. Kuzminov: *Physics and Chemistry of Crystalline Lithium Niobate* (Hilger, Bristol, 1990)
3. 287 D. S. Moore, S. C. Schmidt: Opt. Lett. 12, 480 – 482 (1987)
3. 288 A. Laubereau, L. Greiter, W. Kaiser: Appl. Phys. Lett. 25, 87 – 89 (1974)
3. 289 R. L. Herbst, R. N. Fleming, R. L. Byer: Appl. Phys. Lett. 25, 520 – 522 (1974)
3. 290 Z. I. Ivanova, V. Kabelka, S. A. Magnitskii, A. Piskarskas, V. Smilgiavichyus, N. M. Rubinina, V. G. Tunkin: Kvantovaya Elektron. 4, 2469 – 2472 (1977) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 7, 1414 – 1416 (1977)]
3. 291 K. Kato: IEEE J. QE – 16, 1017 – 1018 (1980)
3. 292 P. M. Bridenbaugh, J. R. Carruthers, J. M. Dziedzic, F. R. Nash: Appl. Phys. Lett. 17, 104 – 106 (1970)
3. 293 R. C. Miller, G. D. Boyd, A. Savage: Appl. Phys. Lett. 6, 77 – 79 (1965)
3. 294 H. Fay, W. J. Alfred, H. M. Dess: Appl. Phys. Lett. 12, 89 – 92 (1968)
3. 295 N. B. Angert, O. F. Butyagin, V. P. Zorenko, A. P. Kudryavtseva, V. R. Kushnir, S. R. Rustamov: Kvantovaya Elektron. No. 5, 128 – 129 (1971) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 1, 542 – 543 (1971)]

3. 296 J. C. Bergman, A. Ashkin, A. A. Ballman, J. M. Dziedzic, H. J. Leinstein, R. G. Smith: Appl. Phys. Lett. 12, 92 – 94 (1968)
3. 297 R. L. Byer, J. F. Young, R. S. Feigelson: J. Appl. Phys. 41, 2320 – 2325 (1970)
3. 298 T. R. Volk, N. M. Rubinina, A. I. Kholodnykh: Kvantovaya Elektron. 15, 1705 – 1706 (1988) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 18, 1061 – 1062 (1988)]
3. 299 F. R. Nash, G. D. Boyd, M. Sargent III, P. M. Bridenbaugh: J. Appl. Phys. 41, 2564 – 2576 (1970)
3. 300 V. A. Dyakov, V. I. Pryalkin, A. I. Kholodnykh: Kvantovaya Elektron. 8, 715 – 721 (1981) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 11, 433 – 436 (1981)]
3. 301 J. E. Midwinter, J. Warner: J. Appl. Phys. 38, 519 – 523 (1967)
3. 302 E. N. Antonov, V. G. Koloshnikov, D. N. Nikogosyan: Opt. Spektrosk. 36, 768 – 722 (1974) [English transl.: Opt. Spectrosc. USSR 36, 446 – 448 (1974)]
3. 303 R. C. Miller, W. A. Nordland, P. M. Bridenbaugh: J. Appl. Phys. 42, 4145 – 4147 (1971)
3. 304 T. Kushida, Y. Tanaka, M. Ojima, Y. Nakazaki: Jpn. J. Appl. Phys. 14, 1097 – 1098 (1975)
3. 305 M. Berg, C. B. Harris, T. W. Kenny, P. L. Richards: Appl. Phys. Lett. 47, 206 – 208 (1985)
3. 306 J. Falk, J. E. Murray: Appl. Phys. Lett. 14, 245 – 247 (1969)
3. 307 G. M. Zverev, E. A. Levchuk, V. A. Pashkov, Yu. D. Poryadin: Kvantovaya Elektron. No. 2(8), 94 – 96 (1972) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 2, 167 – 169 (1972)]
3. 308 G. M. Zverev, S. A. Kolyadin, E. A. Levchuk, L. A. Skvortsov: Kvantovaya Elektron. 4, 1882 – 1889 (1977) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 7, 1071 – 1075 (1977)]
3. 309 S. J. Brosnan, R. L. Byer: IEEE J. QE – 15, 415 – 431 (1979)
3. 310 M. J. Soileau: Appl. Opt. 20, 1030 – 1033 (1981)
3. 311 Y. Uematsu: Jpn. J. Appl. Phys. 13, 1362 – 1368 (1974)
3. 312 B. Zysset, I. Biaggio, P. Günter: J. Opt. Soc. Am. B 9, 380 – 386 (1992)
3. 313 W. R. Bosenberg, R. H. Jarman: Appl. Phys. Lett. 18, 1323 – 1325 (1993)
3. 314 K. Kato: IEEE J. QE – 15, 410 – 411 (1979)
3. 315 J. J. E. Reid: Appl. Phys. Lett. 62, 19 – 21 (1993)
3. 316 Y. Uematsu, T. Fukuda: Jpn. J. Appl. Phys. 12, 841 – 844 (1973)
3. 317 J. -C. Baumert, J. Hoffnagle, P. Günter: Proc. SPIE 492, 374 – 385 (1984)
3. 318 W. P. Risk, R. Pon, W. Lenth: Appl. Phys. Lett. 54, 1625 – 1627 (1989)
3. 319 Y. Lu, Q. Zhao, Y. Li, H. He, Q. Zou, Z. Lu, Z. Geng: Optical Engineering 32, 713 – 716 (1993)

3. 320 Y. Uematsu, T. Fukuda: Jpn. J. Appl. Phys. 4, 507 (1971)
3. 321 E. Wiesendanger: Ferroelectrics 1, 141 – 148 (1970)
3. 322 C. Zimmermann, T. W. Hänsch, R. Byer, S. O' Brien, D. Welch: Appl. Phys. Lett. 61, 2741 – 2743 (1992)
3. 323 I. Biaggio, P. Kerkoc, L. -S. Wu, P. Günter, B. Zysset: J. Opt. Soc. Am. 9, 507 – 517 (1992)
3. 324 P. Günter: Appl. Phys. Lett. 34, 650 – 652 (1979)
3. 325 W. Seelert, P. Kortz, D. Rytz, B. Zysset, D. Ellgehausen, G. Mizell: Opt. Lett. 17, 1432 – 1434 (1992)
3. 326 K. Kato: IEEE J. QE – 18, 451 – 452 (1982)
3. 327 I. Biaggio, H. Looser, P. Günter: Ferroelectrics 94, 157 – 161 (1989)
3. 328 J. -C. Baumert, P. Günter, H. Melchior: Opt. Commun. 48, 215 – 220 (1983)
3. 329 A. Hemmerich, D. H. McIntyre, C. Zimmermann, T. W. Hänsch: Opt. Lett. 15, 372 – 374 (1990)
3. 330 M. K. Chun, L. Goldberg, J. F. Weller: Appl. Phys. Lett. 53, 1170 – 1171 (1988)
3. 331 W. J. Kozlovsky, W. Lenth, E. E. Latta, A. Moser, G. L. Bona: Appl. Phys. Lett. 56, 2291 – 2292 (1990)
3. 332 J. -C. Baumert, J. Hoffnagle, P. Günter: Appl. Opt. 24, 1299 – 1301 (1985)
3. 333 P. Günter, P. M. Asbeck, S. K. Kurtz: Appl. Phys. Lett. 35, 461 – 463 (1979)
3. 334 L. Goldberg, L. Busse, D. Mehuys: Appl. Phys. Lett. 60, 1037 – 1039 (1992)
3. 335 J. -C. Baumert, P. Günter: Appl. Phys. Lett. 50, 554 – 556 (1987)
3. 336 D. H. Jundt, P. Günter, B. Zysset: Nonlinear Opt. 4, 341 – 345 (1993)
3. 337 U. Ellenberger, R. Weber, J. E. Balmer, B. Zysset, D. Ellgehausen, G. D. Mizell: Appl. Opt. 31, 7563 – 7569 (1992)
3. 338 *Physical-Chemical Properties of Semiconductors: Handbook.* (Nauka, Moscow 1979) (In Russian)
3. 339 V. V. Badikov, O. N. Pivovarov, Yu. V. Skokov, O. V. Skrebneva, N. K. Trotsenko: Kvantovaya Elektron. 2, 618 – 621 (1975) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 5, 350 – 351 (1975)]
3. 340 E. S. Voronin, V. S. Solomatin, N. I. Cherepov, V. V. Shuvalov, V. V. Badikov, O. N. Pivovarov: Kvantovaya Elektron. 2, 1090 – 1092 (1975) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 5, 597 – 598 (1975)]
3. 341 P. Canarelli, Z. Benko, R. Curl, F. K. Tittel: J. Opt. Soc. Am. B 9, 197 – 202 (1992)
3. 342 A. H. Hielscher, C. E. Miller, D. C. Bayard, U. Simon, K. P. Smolka, R. F. Curl, F. K. Tittel: J. Opt. Soc. Am. B 9, 1962 – 1967 (1992)
3. 343 H. Matthes, R. Viehmann, N. Marschall: Appl. Phys. Lett. 26, 237 – 239 (1975)
3. 344 G. D. Boyd, H. Kasper, J. H. McFee: IEEE J. QE – 7, 563 – 573 (1971)

3. 345 V. V. Badikov, I. N. Matveev, S. M. Pshenichnikov, O. V. Skrebneva, N. K. Trotsenko, N. D. Ustinov: *Kristallografiya* 26, 537 – 539 (1981) [English transl.: *Sov. Phys. -Crystallogr.* 26, 304 – 305 (1981)]
3. 346 G. C. Bhar, D. K. Ghosh, P. S. Ghosh, D. Schmitt: *Appl. Opt.* 22, 2492 – 2494 (1983)
3. 347 P. Canarelli, Z. Benko, A. H. Hielscher, R. F. Curl, F. K. Tittel: *IEEE J. QE* – 28, 52 – 55 (1992)
3. 348 G. C. Bhar, R. C. Smith: *IEEE J. QE* – 10, 546 – 550 (1974)
3. 349 T. Itabe, J. L. Bufton: *Appl. Opt.* 23, 3044 – 3047 (1984)
3. 350 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer, R. K. Route, R. S. Feigelson: *Appl. Phys. Lett.* 45, 313 – 315 (1984)
3. 351 P. J. Kupecek, C. A. Schwartz, D. S. Chemla: *IEEE J. QE* – 10, 540 – 545 (1974)
3. 352 D. S. Chemla, P. J. Kupecek, D. S. Robertson, R. C. Smith: *Opt. Commun.* 3, 29 – 31 (1971)
3. 353 T. Elsaesser, A. Seilmeier, W. Kaiser, P. Koidl, G. Brandt: *Appl. Phys. Lett.* 44, 383 – 385 (1984)
3. 354 H. J. Bakker, J. T. M. Kennis, H. J. Kop, A. Lagendijk: *Opt. Commun.* 86, 58 – 64 (1991)
3. 355 T. Elsaesser, H. Lobentanzer, A. Seilmeier: *Opt. Commun.* 52, 355 – 359. (1985)
3. 356 A. G. Yodh, H. W. K. Tom, G. D. Aumiller, R. S. Miranda: *J. Opt. Soc. Am. B* 8, 1663 – 1667 (1991)
3. 357 D. C. Hanna, V. V. Rampal, R. C. Smith: *Opt. Commun.* 8, 151 – 153 (1973)
3. 358 D. C. Hanna, V. V. Rampal, R. C. Smith: *IEEE J. QE* – 10, 461 – 462 (1974)
3. 359 K. Kato: *IEEE J. QE* – 20, 698 – 699 (1984)
3. 360 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee, R. S. Feigelson, R. K. Route: *Appl. Phys. Lett.* 54, 1489 – 1491 (1989)
3. 361 S. A. Andreev, I. N. Matveev, I. P. Nekrasov, S. M. Pshenichnikov, N. P. Sopina: *Kvantovaya Elektron.* 4, 657 – 659 (1977) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 7, 366 – 368 (1977)]
3. 362 G. C. Bhar: *Appl. Opt.* 15, 305 – 307 (1976)
3. 363 W. Jantz, P. Koidl: *Appl. Phys. Lett.* 31, 99 – 101 (1977)
3. 364 A. P. Gorchakov, A. A. Popesku, V. S. Solomatin: *Kvantovaya Elektron.* 5, 413 – 415 (1978) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 8, 236 – 237 (1978)]
3. 365 D. C. Hanna, B. Luther-Davies, H. N. Rutt, R. C. Smith, C. R. Stanley: *IEEE J. QE* – 8, 317– 324 (1972)
3. 366 K. G. Spears, X. Zhu, X. Yang, L. Wang: *Opt. Commun.* 66, 167 – 171 (1988)
3. 367 T. Dahinten, U. Plödereder, A. Seilmeier, K. L. Vodopyanov, K. R. Allakhverdiev,

- Z. A. Ibragimov: IEEE J. QE - 29, 2245 - 2250 (1993)
3. 368 H. Kildal, G. W. Iseler: Appl. Opt. 15, 3062 - 3065 (1976)
 3. 369 G. D. Boyd, E. Buehler, F. G. Storz: Appl. Phys. Lett. 18, 301 - 304 (1971)
 3. 370 K. L. Vodopyanov: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1723 - 1729 (1993)
 3. 371 Yu. M. Andreev, S. D. Velikanov, A. S. Elutin, A. F. Zapolskii, D. V. Konkin, S. N. Mikshin, S. V. Smirnov, Yu. N. Frolov, V. V. Shechurov: Kvantovaya Elektron. 19, 1110 (1992) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 22, 1035 (1987)]
 3. 372 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, V. V. Zuev, A. S. Solodukhin, S. A. Trushin, V. V. Churakov, S. F. Shubin: Kvantovaya Elektron. 14, 2137 - 2138 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 1362 - 1363 (1987)]
 3. 373 Yu. M. Andreev, V. Yu. Baranov, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, S. V. Izyumov, S. M. Kozochkin, V. D. Pismenny, Yu. A. Satov, A. P. Streltsov: Kvantovaya Elektron. 14, 2252 - 2254 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 1435 - 1436 (1987)]
 3. 374 K. L. Vodopyanov, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, L. A. Kulevskii: Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. 49, 569 - 572 (1985) [English transl.: Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 49, No. 3, 146 - 149 (1985)]
 3. 375 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, O. Ya. Zyryanov, I. I. Ippolitov, A. N. Morozov, A. V. Sosnin, G. S. Khmel'nitskii: Kvantovaya Elektron. 11, 1511 - 1512 (1984) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 14, 1021 - 1022 (1984)]
 3. 376 K. L. Vodopyanov, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, L. A. Kulevskii: Kvantovaya Elektron. 14, 1815 - 1819 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 1159 - 1161 (1987)]
 3. 377 Yu. M. Andreev, A. D. Belykh, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, V. A. Gurashvili, S. V. Izyumov: Kvantovaya Elektron. 14, 782 - 783 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 490 - 491 (1987)]
 3. 378 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, V. P. Novikov: Kvantovaya Elektron. 14, 1177 - 1179 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 748 - 749 (1987)]
 3. 379 G. D. Boyd, W. B. Gandrud, E. Buehler: Appl. Phys. Lett. 18, 446 - 448 (1971)
 3. 380 V. E. Zuev, M. V. Kabanov, Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, V. V. Zuev: Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. 52, 1142 - 1148 (1988) [English transl.: Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 52, No. 6, 87 - 92 (1988)]
 3. 381 A. A. Barykin, S. V. Davydov, V. P. Dorokhov, V. P. Zakharov, V. V. Butuzov: Kvantovaya Elektron. 20, 794 - 800 (1993) [English transl.: Quantum Electron. 23, 688 - 693 (1993)]

3. 382 Yu. M. Andreev, A. N. Bykanov, A. I. Gribenyukov, V. V. Zuev, V. D. Karyshev, A. V. Kisletsov, I. O. Kovalev, V. I. Konov, G. P. Kuzmin, A. A. Nesterenko, A. E. Oso rgin, Yu. M. Starodumov, N. I. Chapliev: *Kvantovaya Elektron.* 17, 476 – 480 (1990) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 20, 410 – 414 (1990)]
3. 383 P. D. Mason, D. J. Jackson, E. K. Gorton: *Opt. Commun.* 110, 163 – 166 (1994)
3. 384 G. B. Abdullaev, K. R. Allakhverdiev, M. E. Karasev, V. I. Konov, L. A. Kulevskii, N. B. Mustafaev, P. P. Pashinin, A. M. Prokhorov, Yu. M. Starodumov, N. I. Chapliev: *Kvantovaya Elektron.* 16, 757 – 763 (1989) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 19, 494 – 498 (1989)]
3. 385 G. C. Bhar, L. K. Samanta, D. K. Ghosh, S. Das: *Kvantovaya Elektron.* No. 14, 1361 – 1363 (1987) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 17, 860 – 861 (1987)]
3. 386 Yu. M. Andreev, T. V. Vedernikova, A. A. Betin, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, O. Ya. Zyryanov, I. I. Ippolitov, V. I. Masyshev, O. V. Mitropolskii, V. P. Novikov, M. A. Novikov, A. V. Sosnin: *Kvantovaya Elektron.* 12, 1535 – 1537 (1985) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 15, 1014 – 1015 (1985)]
3. 387 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee, K. L. Vodopyanov: *Appl. Phys. Lett.* 54, 313 – 314 (1989)
3. 388 K. L. Vodopyanov, L. A. Kulevskii, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, K. R. Allakhverdiev, T. A. Kerimov: *Opt. Commun.* 83, 322 – 326 (1991)
3. 389 K. L. Vodopyanov, Yu. A. Andreev, G. C. Bhar: *Kvantovaya Elektron.* 20, 879 – 881 (1993) [English transl. : *Quantum Electron.* 23, 763 – 765 (1993)]
3. 390 G. C. Bhar, G. C. Ghosh: *IEEE J. QE* – 16, 838 – 843 (1980)
3. 391 G. C. Bhar, G. Ghosh: *J. Opt. Soc. Am.* 69, 730 – 733 (1979)
3. 392 N. P. Andreeva, S. A. Andreev, I. N. Matveev, S. M. Pshenichnikov, N. D. Ustinov: *Kvantovaya Elektron.* 6, 357 – 359 (1979) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 9, 208 – 210 (1979)]
3. 393 K. Kato: *Appl. Phys. Lett.* 29, 562 – 563 (1976)
3. 394 W. R. Cook, H. Jaffe: *Acta Crystallogr.* 10, 705 – 707 (1957)
3. 395 J. A. Paisner, M. L. Spaeth, D. C. Gerstenberger, I. W. Ruderman: *Appl. Phys. Lett.* 32, 476 – 478 (1978)
3. 396 K. B. Petrosyan, A. L. Pogossyan, K. M. Pokhsaryan: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* 47, 1619 – 1621 (1983) [English transl. : *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* 47, No. 8, 155 – 157 (1983)]
3. 397 K. Kato: *Opt. Commun.* 19, 332 – 333 (1976)
3. 398 K. Kato: *IEEE J. QE* – 13, 544 – 546 (1977)
3. 399 G. G. Gurzadyan, R. K. Ispiryan: *Int. J. Nonl. Opt. Phys.* 1, 533 – 540 (1992)
3. 400 H. Zacharias, A. Anders, J. B. Halpern, K. H. Welge: *Opt. Commun.* 19, 116 –

119(1976)

- 3.401 W. R. Cook, L. M. Hubby: J. Opt. Soc. Am. 66, 72 - 73(1976)
- 3.402 F. B. Dunning, R. E. Stickel, Jr.: Appl. Opt. 15, 3131 - 3134(1976)
- 3.403 H. J. Dewey: IEEE J. QE - 12, 303 - 306(1976)
- 3.404 R. E. Stickel, Jr., S. Blit, G. F. Hildenbrandt, E. D. Dahl, F. B. Dunning, F. K. Tittel: Appl. Opt. 17, 2270(1978)
- 3.405 C. F. Dewey, Jr., W. R. Cook, Jr., R. T. Hodgson, J. J. Wynne: Appl. Phys. Lett. 26, 714 - 716(1975)
- 3.406 R. E. Stickel, Jr., F. B. Dunning: Appl. Opt. 16, 2356 - 2358(1977)
- 3.407 K. Kato: Appl. Phys. Lett. 30, 583 - 584(1977)
- 3.408 H. Hemmati, J. C. Bergquist, W. M. Itano: Appl. Opt. 8, 73 - 75(1983)
- 3.409 R. E. Stickel, Jr., F. B. Dunning: Appl. Opt. 17, 981 - 982(1978)
- 3.410 A. G. Arutyunyan, V. G. Atanesyan, K. B. Petrosyan, K. M. Pokhsranyan: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 6, 277 - 280(1980) [English transl.: Sov. Tech. Phys. Lett. 6, 120 - 121(1980)]
- 3.411 K. Kato: IEEE J. QE - 16, 810 - 811(1980)
- 3.412 D. Bauerle, K. Betzler, H. Hesse, S. Kapphan, P. Loose: Phys. Status Solidi A 42, K119-K121(1977)
- 3.413 K. Betzler, H. Hesse, P. Loose: J. Mol. Struct. 47, 393 - 396(1978)
- 3.414 J.-M. Halbout, S. Blit, W. Donaldson, C. L. Tang: IEEE J. QE - 15, 1176 - 1180(1979)
- 3.415 W. R. Donaldson, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 44, 25 - 27(1984)
- 3.416 M. J. Rosker, K. Cheng, C. L. Tang: IEEE J. QE - 21, 1600 - 1606(1985)
- 3.417 M. Ebrahimzadeh, M. H. Dunn, F. Akerboom: Opt. Lett. 14, 560 - 562(1989)
- 3.418 M. Ebrahimzadeh, M. H. Dunn: Opt. Commun. 69, 161 - 165(1988)
- 3.419 M. J. Rosker, C. L. Tang: J. Opt. Soc. Am. B 2, 691 - 696(1985)
- 3.420 C. Cassidy, J. M. Halbout, W. Donaldson, C. L. Tang: Opt. Commun. 29, 243 - 246(1979)
- 3.421 M. J. Rosker: Proc. SPIE 681, 10 - 11(1986)
- 3.422 K. Kato: IEEE J. QE - 10, 616 - 618(1974)
- 3.423 V. S. Suvorov, I. S. Rez: Opt. Spektrosk. 27, 181 - 183(1969) [English transl.: Opt. Spectrosc. USSR 27, 94 - 95(1969)]
- 3.424 Yu. D. Golyaev, V. G. Dmitriev, I. Ya. Itskhoki, V. N. Krasnyanskaya, I. S. Rez, E. A. Shalaev: Kvantovaya Elektron. No. 1(13), 122 - 123(1973) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 3, 72 - 73(1973)]
- 3.425 R. S. Adhav, A. D. Vlassopoulos: Laser Focus 10, No. 5, 47 - 48(1974)
- 3.426 K. V. Vetrov, V. D. Volosov, A. G. Kalintsev: Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. 52,

301 – 303 (1988) [English transl. : Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Phys. 52, No. 2, 78 – 79 (1988)]

- 3. 427 K. Kato: Opt. Commun. 9, 249 – 251 (1973)
- 3. 428 R. S. Adhav, R. W. Wallace: IEEE J. QE – 9, 855 – 856 (1973)
- 3. 429 G. A. Massey, R. A. Elliot: IEEE J. QE – 10, 899 – 900 (1974)
- 3. 430 J. D. Bierlein, H. Vanherzeele, A. A. Ballman: Appl. Phys. Lett. 54, 783 – 785 (1989)
- 3. 431 A. H. Kung: Appl. Phys. Lett. 65, 1082 – 1084 (1994)
- 3. 432 W. R. Bosenberg, L. K. Cheng, J. D. Bierlein: Appl. Phys. Lett. 65, 2765 – 2767 (1994)
- 3. 433 L. K. Cheng, L. T. Cheng, J. D. Bierlein, F. C. Zumsteg, A. A. Ballman: Appl. Phys. Lett. 62, 346 – 348 (1993)
- 3. 434 K. Kato: IEEE J. QE – 30, 881 – 883 (1994)
- 3. 435 A. L. Aleksandrovskii, G. I. Ershova, G. Kh. Kitaeva, S. P. Kulik, I. I. Naumova, V. V. Tarasenko: Kvantovaya Elektron. 18, 254 – 256 (1991) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 21, 225 – 227 (1991)]
- 3. 436 Y. Chang, J. Wen, H. Wang, B. Li: Chinese Phys. Lett. 9, 427 – 430 (1992)
- 3. 437 J. L. Nightingale, W. J. Silva, G. E. Reade, A. Rybicki, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer: Proc. SPIE 681, 20 – 24 (1986)
- 3. 438 W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, R. L. Byer: IEEE J. QE – 24, 913 – 919 (1988)
- 3. 439 G. T. Maker, A. I. Ferguson: Opt. Lett. 15, 375 – 377 (1990)
- 3. 440 W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, R. C. Eckardt, R. L. Byer: Opt. Lett. 14, 66 – 68 (1989)
- 3. 441 C. D. Nabors, R. C. Eckardt, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer: Opt. Lett. 14, 1134 – 1136 (1989)
- 3. 442 D. C. Gerstenberger, G. E. Tye, R. W. Wallace: Opt. Lett. 16, 992 – 994 (1991)
- 3. 443 D. C. Gerstenberger, R. W. Wallace: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1681 – 1683 (1993)
- 3. 444 G. T. Maker, A. I. Ferguson: Opt. Commun. 76, 369 – 375 (1990)
- 3. 445 K. F. Hulme, O. Jones, P. H. Davies, M. V. Hobden: Appl. Phys. Lett. 10, 133 – 135 (1967)
- 3. 446 N. Ito: Opt. Lett. 7, 63 – 65 (1982)
- 3. 447 E. N. Antonov, V. R. Mironenko, D. N. Nikogosyan, M. I. Golovey: Kvantovaya Elektron. 1, 1742 – 1746 (1974) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 4, 963 – 965 (1974)]
- 3. 448 D. S. Hanna, A. J. Turner: Opt. Quant. Electron. 8, 213 – 217 (1976)
- 3. 449 V. V. Berezovskii, Yu. A. Bykovskii, S. N. Potanin, I. S. Rez: Kvantovaya Elektron. No. 2 (14), 74 – 75 (1973) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 3, 134 – 135 (1973)]

3. 450 D. N. Nikogosyan, A. P. Sukhorukov, M. I. Golovey: Kvantovaya Elektron. 2, 609 – 612 (1975) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 5,344 – 346 (1975)]
3. 451 V. V. Berezovskii, Yu. A. Bykovskii, M. I. Goncharov, I. S. Rez: Kvantovaya Elektron. No. 2(8), 105 – 107 (1972) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 2,180 – 182 (1972)]
3. 452 G. J. Ernst, W. J. Witteman: IEEE J. QE – 8, 382 – 383 (1972)
3. 453 L. O. Hocker, C. F. Dewey: Appl. Phys. 11, 137 – 140 (1976)
3. 454 N. P. Barnes, R. C. Eckardt, D. J. Gettemy, L. B. Edgett: IEEE J. QE – 15, 1074 – 1076 (1979)
3. 455 D. S. Chemla, Ph. J. Kupecek, C. A. Schwartz: Opt. Commun. 7, 225 – 228 (1973)
3. 456 D. Cotter, D. C. Hanna, B. Luther-Davies, R. C. Smith: Opt. Commun. 11, 54 – 56 (1974)
3. 457 M. V. Hobden: Opto-electron. 1, 159 (1969)
3. 458 R. A. Andrews: IEEE J. QE – 6, 68 – 80 (1970)
3. 459 Yu. A. Gorokhov, D. P. Krindach, D. N. Nikogosyan, A. P. Sukhorukov: Kvantovaya Elektron. 1, 679 – 683 (1974) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 4,382 – 384 (1974)]
3. 460 D. C. Hanna, B. Luther-Davies, H. N. Rutt, R. C. Smith: Appl. Phys. Lett. 20, 34 – 36 (1972)
3. 461 T. Elsaesser, A. Seilmeier, W. Kaiser: Opt. Commun. 44, 293 – 296 (1983)
3. 462 J. Falk, J. M. Yarborough: Appl. Phys. Lett. 19, 68 – 70 (1971)
3. 463 D. N. Nikogosyan: Kvantovaya Elektron. 2, 2524 – 2525 (1975) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 5,1378 – 1379 (1975)]
3. 464 E. K. Pfitzer, H. D. Riccius, K. J. Siemsen: Opt. Commun. 3, 277 – 278 (1971)
3. 465 H. D. Riccius, K. J. Siemsen: Phys. Lett, 45 A, 377 – 378 (1973)
3. 466 A. J. Alcock, A. C. Walker: Appl. Phys. Lett. 23, 467 – 468 (1973)
3. 467 J. Warner: Appl. Phys. Lett. 12, 222 – 224 (1968)
3. 468 G. C. Bhar, D. C. Hanna, B. Luther-Davies, R. C. Smith: Opt. Commun. 6, 323 – 326 (1972)
3. 469 A. F. Milton: Appl. Opt. 11, 2311 – 2330 (1972)
3. 470 G. B. Abdullaev, L. A. Kulevskii, A. M. Prokhorov, A. D. Saveliev, E. Yu. Salaev, V. V. Smirnov: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 16, 130 – 133 (1972) [English transl. : JETP Lett. 16,90 – 92 (1972)]
3. 471 G. B. Abdullaev, L. A. Kulevskii, P. V. Nikles, A. M. Prokhorov, A. D. Saveliev, E. Yu. Salaev, V. V. Smirnov: Kvantovaya Elektron. 3, 163 – 167 (1976) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 6,88 – 90 (1976)]
3. 472 A. Bianchi, A. Ferrario, M. Musci: Opt. Commun. 25, 256 – 258 (1978)

3. 473 G. B. Abdullaev, K. R. Allakhverdiev, L. A. Kulevskii, A. M. Prokhorov, E. Yu. Salaev, A. D. Saveliev, V. V. Smirnov: *Kvantovaya Elektron.* 2, 1228 – 1233 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 665 – 668 (1975)]
3. 474 A. Bianchi, M. Garbi: *Opt. Commun.* 30, 122 – 124 (1979)
3. 475 K. L. Vodopyanov, L. A. Kulevskii: *Opt. Commun.* 118, 375 – 378 (1995)
3. 476 Yu. A. Gusev, A. V. Kirpichnikov, S. N. Konoplin, S. I. Marennikov, P. V. Nikles, Yu. N. Polivanov, A. M. Prokhorov, A. D. Saveliev, R. Sh. Sayakhov, V. V. Smirnov, V. P. Chebotaev: *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 6, 1262 – 1265 (1980) [English transl.: *Sov. Tech. Phys. Lett.* 6, 541 – 542 (1980)]
3. 477 R. L. Byer, M. M. Choy, R. L. Herbst, D. S. Chemla, R. S. Feigelson: *Appl. Phys. Lett.* 24, 65 – 68 (1974)
3. 478 N. P. Barnes, D. J. Gettemy, J. R. Hietanen, R. A. Iannini: *Appl. Opt.* 28, 5162 – 5168 (1989)
3. 479 V. V. Badikov, V. B. Laptev, V. L. Panyutin, E. A. Ryabov, G. S. Shevyrdyaeva, O. B. Scherbina: *Kvantovaya Elektron.* 19, 782 – 784 (1992) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 22, 722 – 724 (1992)]
3. 480 G. C. Catella, L. R. Shiozawa, J. R. Hietanen, R. C. Eckardt, R. K. Route, R. S. Feigelson, D. G. Cooper, C. L. Marquardt: *Appl. Opt.* 32, 3948 – 3951 (1993)
3. 481 P. A. Budni, M. G. Knights, E. P. Chicklis, K. L. Schepler: *Opt. Lett.* 18, 1068 – 1070 (1993)
3. 482 U. Simon, Z. Benko, M. W. Sigrist, R. F. Curl, F. K. Tittel: *Appl. Opt.* 32, 6650 – 6655 (1993)
3. 483 R. C. Eckardt, Y. X. Fan, R. L. Byer, C. L. Marquardt, M. E. Storm, L. Esterowitz: *Appl. Phys. Lett.* 49, 608 – 610 (1986)
3. 484 C. L. Marquardt, D. G. Cooper, P. A. Budni, M. G. Knights, K. L. Schepler, R. DeDomenico, G. C. Catella: *Appl. Opt.* 33, 3192 – 3197 (1994)
3. 485 B. C. Ziegler, K. L. Schepler: *Appl. Opt.* 30, 5077 – 5080 (1991)
3. 486 R. C. Eckardt, Y. X. Fan, R. L. Byer, R. K. Route, R. S. Feigelson, J. van der Laan: *Appl. Phys. Lett.* 47, 786 – 788 (1985)
3. 487 G. D. Boyd, H. M. Kasper, J. H. McFee, F. G. Storz: *IEEE J. QE* – 8, 900 – 908 (1972)
3. 488 H. Kildal, J. C. Mikkelsen: *Opt. Commun.* 9, 315 – 318 (1973)
3. 489 D. A. Russell, R. Ebert: *Appl. Opt.* 32, 6638 – 6644 (1993)
3. 490 A. A. Davydov, L. A. Kulevskii, A. M. Prokhorov, A. D. Saveliev, V. V. Smirnov: *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 15, 725 – 727 (1972) [English transl.: *JETP Lett.* 15, 513 – 514 (1972)]
3. 491 A. Ferrario, M. Garbi: *Opt. Commun.* 17, 158 – 159 (1976)

3. 492 J. A. Weiss, L. S. Goldberg: Appl. Phys. Lett. 24, 389 – 391 (1974)
3. 493 R. G. Wenzel, G. P. Arnold: Appl. Opt. 15, 1322 – 1326 (1976)
3. 494 R. L. Herbst, R. L. Byer: Appl. Phys. Lett. 19, 527 – 530 (1971)
3. 495 F. Bryukner, V. S. Dneprovskii, V. U. Khattatov: Kvantovaya Elektron. 1, 1360 – 1364 (1974) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 4, 749 – 751 (1974)]
3. 496 J. M. Ralston, R. K. Chang: Opto-electron. 1, 182 – 188 (1969)
3. 497 W. L. Bond: J.-Appl. Phys. 36, 1674 – 1677 (1965)
3. 498 D. Andreou: Opt. Commun. 23, 37 – 43 (1977)
3. 499 A. A. Davydov, L. A. Kulevskii, A. M. Prokhorov, A. D. Saveliev, V. V. Smirnov, A. V. Shirkov: Opt. Commun. 9, 234 – 236 (1973)
3. 500 R. L. Herbst, R. L. Byer: Appl. Phys. Lett. 21, 189 – 191 (1972)
3. 501 R. L. Byer, H. Kildal, R. S. Feigelson: Appl. Phys. Lett. 19, 237 – 240 (1971)
3. 502 D. S. Chemla, R. F. Begley, R. L. Byer: IEEE J. QE – 10, 71 – 81 (1974)
3. 503 H. Kildal, J. C. Mikkelsen: Opt. Commun. 10, 306 – 309 (1974)
3. 504 N. Menyuk, G. W. Iseler, A. Mooradian: Appl. Phys. Lett. 29, 422 – 424 (1976)
3. 505 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, P. P. Geyko, A. I. Gribenyukov, A. P. Dyadkin, S. V. Pigulsky, A. I. Starodubtsev: Kvantovaya Elektron. 14, 784 – 786 (1987) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 17, 491 – 493 (1987)]
3. 506 G. D. Boyd, E. Buehler, F. G. Storz, J. H. Wernick: IEEE J. QE – 8, 419 – 426 (1972)
3. 507 Y. Wu, T. Sasaki, S. Nakai, A. Yokotani, H. Tang, C. Chen: Appl. Phys. Lett. 62, 2614 – 2615 (1993)
3. 508 M. P. Golovey, G. F. Dobrzhansky, G. I. Kosourov, I. N. Kalinkina, E. I. Kortukova, Yu. S. Likhacheva, V. V. Ogadzhanova: Kristallografiya 15, 757 – 761 (1970) [English transl. :Sov. Phys. -Crystallogr. 15, 651 – 654 (1970)]
3. 509 G. F. Dobrzhansky, M. P. Golovey, G. I. Kosourov: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 16, 263 – 265 (1969) [English transl. JETP Lett. 10, 167 – 168 (1969)]
3. 510 K. Kato: Appl. Phys. Lett. 33, 413 – 414 (1978)
3. 511 K. Kato: IEEE J. QE – 26, 1455 – 1456 (1990)
3. 512 P. S. Bechtold, S. Haussühl: Appl. Phys. 14, 403 – 410 (1977)
3. 513 J. C. Bergman, G. R. Crane, H. Guggenheim: J. Appl. Phys. 46, 4645 – 4646 (1975)
3. 514 V. S. Suvorov, A. S. Sonin, I. S. Rez: Zh. Exp. Teor. Fiz. 53, 49 – 55 (1967) [English transl. :Sov. Phys. -JETP 26, 33 – 37 (1968)]
3. 515 K. Kato: Appl. Phys. Lett. 25, 342 – 343 (1974)
3. 516 A. S. Vasilevskaya, M. F. Koldobskaya, L. G. Lomova, V. P. Popova, T. A. Regul'skaya, I. S. Rez, Yu. P. Sobesskii, A. S. Sonin, V. S. Suvorov: Kristallografiya 12, 447 – 450 (1967) [English transl. :Sov. Phys. -Crystallogr. 12, 383 – 385 (1967)]

3. 517 S. Singh: "Nonlinear Optical Materials" in *Handbook of Lasers*, ed. by R. G. Pressley (Chemical Rubber Co., Cleveland 1971) pp. 489 - 525
3. 518 E. N. Volkova, Sh. L. Faerman: *Kvantovaya Elektron.* 3, 2508 - 2511 (1976) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 6, 1380 - 1382 (1976)]
3. 519 K. Kato: *J. Appl. Phys.* 46, 2721 - 2722 (1975)
3. 520 M. P. Golovey, I. N. Kalinkina, G. I. Kosourov: *Opt. Spektrosk.* 28, 991 - 992 (1970) [English transl.: *Opt. Spectrosc. USSR* 28, 535 - 536 (1970)]
3. 521 K. Kato, S. Nakao: *Jpn. J. Appl. Phys.* 13, 1681 - 1682 (1974)
3. 522 K. Kato, A. J. Alcock, M. C. Richardson: *Opt. Commun.* 11, 5 - 7 (1974)
3. 523 E. V. Nilov, I. L. Yachnev: *Zh. Prikl. Spektrosk.* 7, 943 - 945 (1967) [English transl.: *J. Appl. Spectrosc.* 7, 628 - 630 (1967)]
3. 524 R. S. Adhav: *J. Appl. Phys.* 39, 4095 - 4098 (1968)
3. 525 R. C. Miller: *Appl. Phys. Lett.* 5, 17 - 19 (1964)
3. 526 W. J. Dshotels: *J. Opt. Soc. Am.* 50, 865 (1960)
3. 527 S. Blit, E. G. Weaver, T. A. Rabson, F. K. Tittel: *Appl. Opt.* 17, 721 - 723 (1978)
3. 528 R. S. Adhav: *J. Phys. D* 2, 177 - 182 (1969)
3. 529 K. Kato: *Opt. Commun.* 13, 93 - 95 (1975)
3. 530 K. Kato: *IEEE J. QE* - 10, 622 - 624 (1974)
3. 531 V. S. Suvorov, A. A. Filimonov: *Fiz. Tverd. Tela* 9, 2131 - 2132 (1967) [English transl.: *Sov. Phys. -Solid State* 9, 1674 - 1675 (1968)]
3. 532 S. Singh, W. A. Bonner, J. R. Potopowicz, L. G. Van Uitert: *Appl. Phys. Lett.* 17, 292 - 294 (1970)
3. 533 H. Ito, H. Naito, H. Inaba: *IEEE J. QE* - 10, 247 - 252 (1974)
3. 534 K. Kato: *Opt. Quant. Electron.* 8, 261 - 262 (1976)
3. 535 H. Naito, H. Inaba: *Opto-electron.* 5, 256 - 259 (1973)
3. 536 S. J. Bastow, M. H. Dunn: *Opt. Commun.* 35, 259 - 263 (1980)
3. 537 K. Kato: *IEEE J. QE* - 19, 893 - 894 (1983)
3. 538 P. V. Lenzo, E. G. Spencer, J. P. Remeika: *Appl. Opt.* 4, 1036 - 1037 (1965)
3. 539 R. C. Miller, W. A. Nordland, E. D. Kolb, W. L. Bond: *J. Appl. Phys.* 41, 3008 - 3011 (1970)
3. 540 S. K. Kurtz, T. T. Perry, J. G. Bergman, Jr.: *Appl. Phys. Lett.* 12, 186 - 188 (1967)
3. 541 V. I. Bespalov, I. A. Batyрева, L. A. Dmitrenko, V. V. Korolikhin, S. P. Kuznetsov, M. A. Novikov: *Kvantovaya Elektron.* 4, 1563 - 1566 (1977) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 7, 885 - 887 (1977)]
3. 542 H. Naito, H. Inaba: *Opto-electron.* 4, 335 - 337 (1972)
3. 543 S. K. Kurtz: "Nonlinear Optical Materials" in *Laser Handbook*, Vol. 1 ed. by F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois (North-Holland, Amsterdam 1972) pp. 923 - 974

3. 544 V. A. Kiselev, V. F. Kitaeva, L. A. Kulevskii, Yu. N. Polivanov, S. N. Poluektov: Zh. Eksp. Teor. Fiz. 62, 1291 – 1301 (1972) [English transl. : Sov. Phys. -JETP 35, 687 – 691 (1972)]
3. 545 H. Ito, H. Naito, H. Inaba: J. Appl. Phys. 46, 3992 – 3998 (1975)
3. 546 J. E. Bjorkholm: IEEE J. QE – 4, 970 – 972 (1968)
3. 547 G. A. Dikchys, V. I. Kabelka, A. S. Piskarskas, A. Yu. Stabinis: Kvantovaya Elektron. 1, 2513 – 2515 (1974) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 4, 1402 – 1403 (1974)]
3. 548 G. Dikchys, R. Danielius, V. Kabelka, A. Piskarskas, T. Tomkiavichys, A. Stabinis: Kvantovaya Elektron. 3, 779 – 784 (1976) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 6, 425 – 428 (1976)]
3. 549 R. Danielius, G. Dikchys, V. Kabelka, A. Piskarskas: Zh. Tekh. Fiz. 47, 1075 – 1077 (1977) [English transl. : Sov. Phys. -Tech. Phys. 22, 642 – 643 (1977)]
3. 550 C. A. Ebberts, L. D. DeLoach, M. Webb, D. Eimerl, S. P. Velsko, D. A. Keszler: IEEE J. 29, 497 – 507 (1993)
3. 551 L. T. Cheng, L. K. Cheng, J. D. Bierlein, F. C. Zumsteg: Appl. Phys. Lett. 63, 2618 – 2620 (1993)
3. 552 B. Hofmann, H. Vogt: J. Phys. C 6, 543 – 550 (1973)
3. 553 K. Iio: J. Phys. Soc. Jpn. 34, 138 – 147 (1973)
3. 554 D. S. Chemla, E. Batifol, R. L. Byer, R. L. Herbst: Opt. Commun. 11, 57 – 61 (1974)
3. 555 S. Singh, D. A. Draeger, J. E. Geusic: Phys. Rev. B 2, 2709 – 2724 (1970)
3. 556 J. D. Barry, C. J. Kennedy: IEEE J. QE – 11, 575 – 579 (1975)
3. 557 J. E. Geusic, H. J. Levinstein, J. J. Rubin, S. Singh, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 11, 269 – 271 (1967)
3. 558 J. E. Murray, R. J. Pressley, J. H. Boyden, R. B. Webb: IEEE J. QE – 10, 263 – 267 (1974)
3. 559 J. E. Geusic, H. J. Levinstein, S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 12, 306 – 308 (1968)
3. 560 F. R. Nash, E. H. Turner, P. M. Bridenbaugh, J. M. Dziedzic: J. Appl. Phys. 43, 1 – 9 (1972)
3. 561 R. G. Smith, J. E. Geusic, H. J. Levinstein, J. J. Rubin, S. Singh, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 12, 308 – 310 (1968)
3. 562 R. B. Chesler, M. A. Karr, J. E. Geusic: Proc. IEEE 58, 1899 – 1914 (1970)
3. 563 A. Piskarskas, V. Smilgevichius, A. Umbrasas: Opt. Commun. 73, 322 – 324 (1989)
3. 564 L. G. Van Uitert, S. Singh, H. J. Levinstein, J. E. Geusic, W. A. Bonner: Appl. Phys. Lett. 11, 161 – 163 (1967)

3. 565 L. G. Van Uitert, S. Singh, H. J. Levinstein, J. E. Geusic, W. A. Bonner: Appl. Phys. Lett. 12, 224 (1968)
3. 566 B. F. Levine, C. G. Bethea, H. M. Kasper, F. A. Thiel: IEEE J. QE - 12, 367 - 368 (1976)
3. 567 V. V. Badikov, I. N. Matveev, S. M. Pshenichnikov, O. V. Rychik, N. K. Trotsenko, N. D. Ustinov, S. I. Shcherbakov: Kvantovaya Elektron. 7, 2235 - 2237 (1980) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 10, 1300 - 1301 (1980)]
3. 568 S. A. Andreev, N. P. Andreeva, V. V. Badikov, I. N. Matveev, S. M. Pshenichnikov: Kvantovaya Elektron. 7, 2003 - 2006 (1980) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 10, 1157 - 1158 (1980)]
3. 569 V. V. Badikov, I. N. Matveev, V. L. Panyutin, S. M. Pshenichnikov, T. M. Repyakova, O. V. Rychik, A. E. Rozenson, N. K. Trotsenko, N. D. Ustinov: Kvantovaya Elektron. 6, 1807 - 1810 (1979) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 9, 1068 - 1069 (1979)]
3. 570 W. L. Bond, G. D. Boyd, H. L. Carter: J. Appl. Phys. 38, 4090 - 4091 (1967)
3. 571 G. D. Boyd, T. J. Bridges, E. G. Burkhardt: IEEE J. QE - 4, 515 - 519 (1968)
3. 572 J. Jerphagnon, E. Batifol, G. Tsoucaris, M. Sourbe: C. R. Acad. Sci. 265 B, 495 - 497 (1967)
3. 573 J. D. Feichtner, R. Johannes, G. W. Roland: Appl. Opt. 9, 1716 - 1717 (1970)
3. 574 W. B. Gandrud, G. D. Boyd: Opt. Commun. 1, 187 - 190 (1969)
3. 575 W. B. Gandrud, G. D. Boyd, J. H. McFee, F. H. Wehmeier: Appl. Phys. Lett. 16, 59 - 61 (1970)
3. 576 J. H. McFee, G. D. Boyd, P. H. Schmidt: Appl. Phys. Lett. 17, 57 - 59 (1970)
3. 577 J. Jerphagnon, E. Batifol, M. Sourbe: C. R. Acad. Sci. 265 B, 400 - 402 (1967)
3. 578 S. Caldwell, H. Y. Fan: Phys. Rev. 114, 664 - 675 (1959)
3. 579 G. W. Day: Appl. Phys. Lett. 18, 347 - 349 (1971)
3. 580 G. H. Sherman, P. D. Coleman: J. Appl. Phys. 44, 238 - 241 (1973)
3. 581 L. Gampel, F. M. Johnson: J. Opt. Soc. Am. 59, 72 - 73 (1969)
3. 582 W. Henrion, F. Eckart: Z. Naturforsch. 19a, 1024 - 1025 (1964)
3. 583 C. K. N. Patel: Phys. Rev. Lett. 16, 613 - 616 (1966)
3. 584 R. C. Weast, M. J. Astle (eds.): CRC Handbook of Chemistry and Physics (CRC Press, Boca Raton, FL 1980)
3. 585 M. Gottlieb, T. J. Isaacs, J. D. Feichtner, G. W. Roland: J. Appl. Phys. 45, 5145 - 5151 (1974)
3. 586 J. D. Feichtner, G. W. Roland: Appl. Opt. 11, 993 - 998 (1972)
3. 587 M. D. Ewbank, P. R. Newman, N. L. Mota, S. M. Lee, W. L. Wolfe, A. G. DeBell, W. A. Harrison: J. Appl. Phys. 51, 3848 - 3852 (1980)

3. 588 R. C. Y. Auyeung, D. M. Zielke, B. J. Feldman: Appl. Phys. B 48, 293 – 297 (1989)
3. 589 D. R. Suhre: Appl. Phys. B 52, 367 – 370 (1991)
3. 590 G. H. Sherman, P. D. Coleman: IEEE J. QE – 9, 403 – 409 (1973)
3. 591 D. E. McCarthy: Appl. Opt. 7, 1997 – 2000 (1968)
3. 592 W. B. Gandrud, R. L. Abrams: Appl. Phys. Lett. 17, 302 – 305 (1970)
3. 593 J. -L. Oudar, C. A. Schwartz, E. M. Batifol: IEEE J. QE – 11, 623 – 629 (1975)
3. 594 K. C. Nomura: Phys. Rev. Lett. 5, 500 – 501 (1960)
3. 595 C. K. N. Patel: Phys. Rev. Lett. 15, 1027 – 1030 (1965)
3. 596 J. Jerphagnon, M. Sourbe, E. Batifol: C. R. Acad. Sci. 263 B, 1067 – 1070 (1966)
3. 597 A. Delahaigie, C. Thiebaux, P. Jouve: Appl. Phys. 24, 21 – 22 (1981)
3. 598 J. Jerphagnon, M. Bernard: IEEE J. QE – 4, 395 – 396 (1968)
3. 599 J. D. Taynai, R. Targ, W. B. Tiffany: IEEE J. QE – 7, 412 – 416 (1971)
3. 600 J. -M. Halbout, C. L. Tang: IEEE J. QE – 18, 410 – 415 (1982)
3. 601 I. M. Silvestrova, G. N. Nabakhtiani, V. B. Kozin, V. A. Kuznetsov, Yu. V. Pisarevskii: Kristallografiya 37, 1535 – 1541 (1992) [English transl. : Sov. Phys. -Crystallogr. 37, 831 – 834 (1992)]
3. 602 H. Minemoto, Y. Ozaki, N. Sonoda, T. Sasaki: Appl. Phys. Lett. 63, 3565 – 3567 (1993)
3. 603 R. B. Andreev, K. V. Vetrov, V. N. Voitsechovskii, V. D. Volosov, I. V. Nikiforuk, B. P. Nikolaeva, V. E. Yakobson: Izv. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Fiz. 54, 2491 – 2493 (1990) [English transl. : Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 54, No. 12, 187 – 189 (1990)]
3. 604 C. E. Barker, D. Eimerl, S. P. Velsko: J. Opt. Soc. Am. B 8, 2481 – 2492 (1991)
3. 605 G. Robertson, M. H. Dunn: Appl. Phys. Lett. 62, 3405 – 3407 (1993)
3. 606 M. Kitazawa, R. Higuchi, M. Takahashi, T. Wada, H. Sasabe: Appl. Phys. Lett. 64, 2477 – 2479 (1994)
3. 607 C. Medrano P., P. Günter, H. Abend: Phys. Status Solidi B 143, 749 – 754 (1987)
3. 608 M. V. Hobden: J. Appl. Phys. 38, 4365 – 4372 (1967)
3. 609 A. N. Izrailenko, R. Yu. Orlov, V. A. Koptsik: Kristallografiya 13, 171 (1968) [English transl. : Sov. Phys. -Crystallogr. 13, 136 (1968)]
3. 610 R. Yu. Orlov: Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved., Ser. Radiofiz. 12, 1351 – 1353 (1969) [English transl. : Radiophysics. Quantum Electron. 12, 1056 – 1058 (1969)]
3. 611 V. D. Shigorin: "Second Harmonic Generation in Molecular Crystals", in Proceedings of P. N. Lebedev Physical Institute, USSR Academy of Sciences, Vol. 98 (Nauka, Moscow 1977) pp. 78 – 140 [English transl. : Proc. Lebedev Phys. Inst. Acad. Sci. USSR 98, (1977)]
3. 612 N. Zhang, D. R. Yuan, X. T. Tao, D. Xu, Z. S. Shao, M. H. Jiang, M. G. Liu: Opt.

Commun. 99, 247 – 251 (1993)

3. 613 X. T. Tao, D. R. Yuan, N. Zhang, M. H. Jiang, Z. S. Shao: Appl. Phys. Lett. 60, 1415 – 1417 (1992)
3. 614 T. Konoshita, S. Horinouchi, K. Sasaki, H. Okamoto, N. Tanaka, T. Fukaya, M. Goto: J. Opt. Soc. Am. B 11, 986 – 994 (1994)
3. 615 J. Zyss, D. S. Chemla, J. F. Nicoud: J. Chem. Phys. 74, 4800 – 4811 (1981)
3. 616 J. Zyss, I. Ledoux, R. B. Hierle, R. K. Raj, J. -L. Oudar: IEEE J. QE – 21, 1286 – 1295 (1985)
3. 617 D. Josse, R. Hierle, I. Ledoux, J. Zyss: Appl. Phys. Lett. 53, 2251 – 2253 (1988)
3. 618 S. X. Dou, D. Josse, J. Zyss: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1708 – 1715 (1993)
3. 619 I. Ledoux, J. Badan, J. Zyss, A. Migus, D. Hulin, J. Etchepare, G. Grillon, A. Antonetti: J. Opt. Soc. Am. B 4, 987 – 997 (1986)
3. 620 G. Puccetti, A. Perigaud, J. Badan, I. Ledoux, J. Zyss: J. Opt. Soc. Am. B 10, 733 – 744 (1993)
3. 621 K. Sutter, Ch. Bosshard, W. S. Wang, G. Surmely, P. Günter: Appl. Phys. Lett. 53, 1779 – 1781 (1988)
3. 622 K. Sutter, Ch. Bosshard, P. Günter: Ferroelectrics 92, 395 – 401 (1989)
3. 623 C. Bosshard, K. Sutter, P. Günter: Ferroelectrics 92, 387 – 393 (1989)
3. 624 P. Günter, Ch. Bosshard, K. Sutter, H. Arend, G. Chapuis, R. J. Twieg, D. Dobrowolski: Appl. Phys. Lett. 50, 486 – 488 (1987)
3. 625 T. Ukachi, T. Shigemoto, H. Komatsu, T. Sugiyama: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1372 – 1378 (1993)
3. 626 K. Iio, Y. Kusuhara, K. Hamano, S. Sawada: Jpn. J. Appl. Phys. 13, 1299 – 1300 (1974)
3. 627 P. Kerkoc, M. Zgonik, K. Sutter, Ch. Bosshard, P. Günter: Appl. Phys. Lett. 54, 2062 – 2064 (1989)
3. 628 J. -C. Baumert, R. J. Twieg, G. D. Bjorklund, J. A. Logan, C. W. Dirk: Appl. Phys. Lett. 51, 1484 – 1486 (1987)
3. 629 P. Kerkoc, M. Zgonik, K. Sutter, Ch. Bosshard, P. Günter: J. Opt. Soc. Am. B 7, 313 – 319 (1990)
3. 630 J. L. Oudar, R. Hierle: J. Appl. Phys. 48, 2699 – 2704 (1977)
3. 631 K. Kato: IEEE J. QE – 16, 1288 – 1290 (1980)
3. 632 B. L. Davydov, L. G. Koreneva, E. A. Lavrovskii: Radiotech. Elektron. 19, 1313 – 1315 (1974) [English transl.: Radio Eng. Electron. Phys. 19, No. 6, 130 – 131 (1974)]
3. 633 P. D. Southgate, D. S. Hall: Appl. Phys. Lett. 18, 456 – 458 (1971)
3. 634 P. V. Vidakovic, M. Coquillay, F. Salin: J. Opt. Soc. Am. B 4, 998 – 1012 (1987)
3. 635 R. Morita, P. V. Vidakovic: Appl. Phys. Lett. 61, 2854 – 2856 (1992)

3. 636 I. Ledoux, C. Lepers, A. Perigaud, J. Badan, J. Zyss: Opt. Commun. 80, 149 – 154(1990)
3. 637 D. Josse, S. X. Dou, J. Zyss, P. Andreazza, A. Perigaud: Appl. Phys. Lett. 61, 121 – 123(1992)
3. 638 I. Ledoux, J. Zyss, A. Migus, J. Etchepare, G. Grillon, A. Antonetti: Appl. Phys. Lett. 48, 1564 – 1566(1986)
3. 639 J. D. Bierlein, L. K. Cheng, Y. Wang, W. Tam: Appl. Phys. Lett. 56, 423 – 425 (1990)
3. 640 J. G. Calvert, J. N. Pitts: *Photochemistry*(Wiley, New York 1966)
3. 641 R. A. Smith, F. E. Jones, R. P. Chasmar: *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*(Clarendon, Oxford 1957)
3. 642 R. B. Sosman: *The Properties of Silica*(Chemical Catalog Co., New York 1927)
3. 643 A. Smakula: *Einkristalle*(Springer, Berlin 1962)
3. 644 M. J. Soileau, M. Bass: IEEE J. QE – 16, 814(1980)
3. 645 R. S. Krishnan(ed.): *Progress in Crystal Physics*, Vol. 1(Viswanathan, Madras 1958)
3. 646 Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima, T. Sasaki, S. Nakai: Appl. Phys. Lett. 67, 1818 – 1820(1995)
3. 647 Y. Mori, S. Nakajima, A. Miyamoto, M. Inagaki, T. Sasaki, H. Yoshida, S. Nakai: Proc. SPIE, 2633, 299 – 307(1995)
3. 648 K. Kato: IEEE J. QE – 30, 2950 – 2952(1994)
3. 649 Y. Tang, Y. Cui, M. H. Dunn: J. Opt. Soc. Am. B 12, 638 – 643(1995)
3. 650 M. Oka, L. Y. Liu, W. Wiechmann, N. Eguchi, S. Kubota: IEEE J. Selected Topics Quant. Electron. 1, 859 – 866(1995)
3. 651 K. Kato: IEEE J. QE – 31, 169 – 171(1995)
3. 652 W. Wiechmann, S. Kubota, T. Fukui, H. Masuda: Opt. Lett. 18, 1208 – 1210(1993)
3. 653 D. L. Fenimore, K. L. Schepler, U. B. Ramabadran, S. R. McPherson: J. Opt. Soc. Am. B 12, 794 – 796(1995)
3. 654 J. Han, Y. Liu, M. Wang, D. Nie: J. Crystal Growth 128, 864 – 866(1993)
3. 655 D. T. Reid, M. Ebrahimzade, W. Sibbett: J. Opt. Soc. Am. B 12, 2168 – 2179(1995)
3. 656 L. K. Cheng, L. T. Cheng, J. Galperin, P. A. M. Hotsenpiller, J. D. Bierlein: J. Crystal Growth 137, 107 – 115(1994)
3. 657 H. Komine, J. M. Fukumoto, W. H. Long, Jr., E. A. Stappaerts: IEEE J. Selected Topics Quant. Electron. 1, 44 – 49(1995)

第 4 章

4. 1 D. T. Attwood, E. L. Pierce, L. W. Coleman: Opt. Commun. 15, 10 – 12(1975)
4. 2 D. T. Attwood, E. S. Bliss, E. L. Pierce, L. W. Coleman: IEEE J. QE – 12, 203 – 204 (1976)

- 4.3 Yu. A. Matveets, D. N. Nikogosyan, V. Kabelka, A. Piskarskas: *Kvantovaya Elektron.* 5, 664 – 666 (1978) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 8, 386 – 388 (1978)]
- 4.4 S. S. Dimov: *Opt. Quant. Electr.* 25, 545 – 550 (1993)
- 4.5 V. P. Machewirth, R. Webb, D. Anafi: *Laser Focus* 12, No. 5, 104 – 107 (1976)
- 4.6 R. M. Kogan, R. M. Pixton, T. G. Crow: *Opt. Eng.* 17, 120 – 124 (1978)
- 4.7 A. Borsutzky, R. Brtnger, Ch. Huang, R. Wallenstein: *Appl. Phys. B* 52, 55 – 62 (1991)
- 4.8 K. Kato: *IEEE J. QE* – 10, 616 – 618 (1974)
- 4.9 T. A. Rabson, H. J. Ruiz, P. L. Shah, F. K. Tittel: *Appl. Phys. Lett.* 20, 282 – 284 (1972)
- 4.10 E. O. Ammann, C. D. Decker, J. Falk: *IEEE J. QE* – 10, 463 – 465 (1974)
- 4.11 D. T. Hon: *IEEE J. QE* – 12, 148 – 151 (1976)
- 4.12 K. Kato: *Opt. Commun.* 13, 93 – 95 (1975)
- 4.13 K. Kato, S. Nakao: *Jpn. J. Appl. Phys.* 13, 1681 – 1682 (1974)
- 4.14 V. G. Dmitriev, V. N. Krasnyanskaya, M. F. Koldobskaya, I. S. Rez, E. A. Shalaev, E. M. Shvom: *Kvantovaya Elektron.* No. 2 (14), 64 – 66 (1973) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 3, 126 – 127 (1973)]
- 4.15 E. W. Van Stryland, W. E. Williams, M. J. Soileau, A. L. Smirl: *IEEE J. QE* – 20, 434 – 439 (1984)
- 4.16 R. L. Byer, Y. K. Park, R. S. Feigelson, W. L. Kway: *Appl. Phys. Lett.* 39, 17 – 19 (1981)
- 4.17 R. B. Andreev, V. D. Volosov, L. I. Kuznetsova: *Kvantovaya Elektron.* 2, 420 – 421 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 242 – 243 (1975)]
- 4.18 P. Hargis: *Laser Focus* 14, No. 7, 18 – 20 (1978)
- 4.19 A. M. Johnson, W. M. Simpson: *Opt. Lett.* 8, 554 – 556 (1983)
- 4.20 A. L. Aleksandrovsky, S. A. Akhmanov, V. A. Dyakov, N. I. Zheludev, V. I. Pryalkin: *Kvantovaya Elektron.* 12, 1333 – 1334 (1985) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 15, 885 – 886 (1985)]
- 4.21 R. F. Belt, G. Gashurov, Y. S. Liu: *Laser Focus* 21, No. 10, 110 – 124 (1985)
- 4.22 T. A. Driscoll, H. J. Hoffman, R. E. Stone, P. E. Perkins: *J. Opt. Soc. Am. B* 3, 683 – 686 (1986)
- 4.23 S. E. Moody, J. M. Eggleston, J. F. Seamans: *IEEE J. QE* – 23, 335 – 340 (1987)
- 4.24 O. I. Lavrovskaya, N. I. Pavlova, A. V. Tarasov: *Kristallografiya* 31, 1145 – 1151 (1986) [Engl. transl.: *Sov. Phys.-Crystallogr.* 31, 678 – 682 (1986)]
- 4.25 R. J. Bolt, M. van der Mooren: *Opt. Commun.* 100, 399 – 410 (1993)
- 4.26 A. J. W. Brown, M. S. Bowers, K. W. Kangas, C. H. Fisher: *Opt. Lett.* 17, 109 – 111 (1992)
- 4.27 J. E. Murray, R. J. Pressley, J. H. Boyden, R. B. Webb: *IEEE J. QE* – 10, 263 – 267

(1974)

4. 28 W. Seelert, P. Kortz, D. Rytz, B. Zysset, D. Ellgehausen, G. Mizell: *Opt. Lett.* 17, 1432 – 1434 (1992)
4. 29 R. S. Adhav, S. R. Adhav, J. M. Pelaprat: *Laser Focus* 23, No. 9, 88 – 100 (1987)
4. 30 C. Chen, Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer: *Proc. SPIE*, 681, 12 – 19 (1986)
4. 31 G. C. Bhar, U. Chatterjee, P. Datta: *Appl. Phys. B* 51, 317 – 319 (1990)
4. 32 G. C. Bhar, S. Das, P. K. Datta: *Phys. Stat. Sol. a*, 119, K173 – K176 (1990)
4. 33 J. Y. Huang, Y. R. Shen, C. Chen, B. Wu: *Appl. Phys. Lett.* 58, 1579 – 1581 (1991)
4. 34 J. T. Lin, J. L. Montgomery, K. Kato: *Opt. Commun.* 80, 159 – 165 (1990)
4. 35 V. A. Dyakov, M. Kh. Dzhaferov, A. A. Lukashev, A. A. Podshivalov, V. I. Pryalkin: *Kvant. Elektron.* 18, 339 – 341 (1991) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 21, 307 – 308 (1991)]
4. 36 F. Xie, B. Wu, G. You, C. Chen: *Opt. Lett.* 16, 1237 – 1239 (1991)
4. 37 H. Mao, F. Fu, B. Wu, C. Chen: *Appl. Phys. Lett.* 61, 1148 – 1150 (1992)
4. 38 V. Dmitriev, L. Tarasov: *Optique Non Lineaire Appliquee* (MIR, Moscow 1987)
4. 39 D. A. Bryan, R. Gerson, H. E. Tomaschke: *Appl. Phys. Lett.* 44, 847 – 849 (1984)
4. 40 K. L. Sweeney, L. E. Halliburton, D. A. Bryan, R. R. Rice, R. Gerson, H. E. Tomaschke: *Appl. Phys. Lett.* 45, 805 – 807 (1984)
4. 41 T. R. Volk, N. M. Rubinina, A. I. Kholodnykh: *Kvantovaya Elektron.* 15, 1705 – 1706 (1988) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 18, 1061 – 1062 (1988)]
4. 42 E. O. Ammann, S. Gush, Jr.: *Appl. Phys. Lett.* 52, 1374 – 1376 (1988)
4. 43 S. Singh, D. A. Draegert, J. E. Geusic: *Phys. Rev. B* 2, 2709 – 2724 (1970)
4. 44a D. N. Nikogosyan: *Appl. Phys. A* 52, 359 – 368 (1991)
4. 44b D. N. Nikogosyan: *Appl. Phys. A* 58, 181 – 190 (1994)
4. 45 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee: *Appl. Phys. Lett.* 54, 1383 – 1384 (1989)
4. 46 G. C. Bhar, U. Chatterjee, S. Das: *J. Appl. Phys.* 66, 5111 – 5113 (1989)
4. 47 V. D. Shigorin. "Second Harmonic Generation in Molecular Crystals", in *Proc. of P. N. Lebedev Physical Institute, USSR Academy of Sciences*, Vol. 98 [Nauka, Moscow 1977] pp. 78 – 140 [English transl.: *Proc. Lebedev Phys. Inst. Acad. Sci. USSR* 98 (1977)]
4. 48 M. J. Rosker, C. L. Tang: *IEEE J. QE* – 20, 334 – 336 (1984)
4. 49 B. L. Davydov, S. G. Kotovshchikov, V. A. Nefedov: *Kvantovaya Elektron.* 4, 214 – 220 (1977) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 7, 129 – 131 (1977)]
4. 50 M. Halbout, C. L. Tang: *IEEE J. QE* – 18, 410 – 415 (1982)
4. 51 J. Zyss, D. S. Chemla, J. F. Nicoud: *J. Chem. Phys.* 74, 4800 – 4811 (1981)
4. 52 D. Josse, R. Hierle, I. Ledoux, J. Zyss: *Appl. Phys. Lett.* 53, 2251 – 2253 (1988)
4. 53 J. L. Oudar, R. Hierle: *J. Appl. Phys.* 48, 2699 – 2704 (1977)

4. 54 B. L. Davydov, L. G. Koreneva, E. A. Lavrovsky: Radiotekh. Elektron. 19, 1313 - 1316(1974) [English transl.: Radio Eng. Electron. Phys. 19(6), 130 - 131(1974)]
4. 55 K. Kato: IEEE J. QE - 16, 1288 - 1290(1980)
4. 56 B. F. Levine, C. G. Bethea, C. D. Thurmond, R. T. Lynch, J. L. Bernstein: J. Appl. Phys. 50, 2523 - 2527(1979)
4. 57 G. S. Belikova, M. P. Golovey, V. D. Shigorin, G. P. Shipulo: Opt. Spektrosk. 38, 779 - 783(1975) [English transl.: Opt. Spectrosc. USSR 38, 441 - 443(1975)]
4. 58 P. Günter, Ch. Bosshard, K. Sutter, H. Arend, G. Chapuis, R. J. Twieg, D. Dobrowolski: Appl. Phys. Lett. 50, 486 - 488(1987)
4. 59 D. Eimerl, S. Velsko, L. Davis, F. Wang, G. Loiacono, G. Kennedy: IEEE J. QE - 25, 179 - 193(1989)
4. 60 P. A. Norman, D. Bloor, J. S. Obhi, S. A. Karaulov, M. B. Hursthouse, P. V. Kolin-sky, R. J. Jones, S. R. Hall: J. Opt. Soc. Am. B 4, 1013 - 1016(1987)
4. 61 R. Morita, P. V. Vidakovic: Appl. Phys. Lett. 61, 2854 - 2856(1992)
4. 62 H. Minemoto, Y. Ozaki, N. Sonoda, T. Sasaki: Appl. Phys. Lett. 63, 3565 - 3567 (1993)
4. 63 T. Ukachi, T. Shigemoto, H. Komatsu, T. Sugiyama: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1372 - 1378(1993)
4. 64 N. Zhang, D. R. Yuan, X. T. Tao, D. Xu, Z. S. Shao, M. H. Jiang, M. G. Liu: Opt. Comm. 99, 247 - 251(1993)
4. 65 M. Kitazawa, P. Higuchi, M. Takahashi, T. Wada, H. Sasabe: Appl. Phys. Lett. 64, 2477 - 2479(1994)
4. 66 V. Deserno, G. Nath: Phys. Lett. 30A, 483 - 484(1969)
4. 67 V. G. Dmitriev, P. G. Konvisar, I. B. Lyushnya, V. Yu. Mikhailov, S. R. Rustamov, M. F. Stelmakh: Kvantovaya Elektron. 8, 906 - 907 (1981) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 11, 545 - 546(1981)]
4. 68 Yu. D. Golyaev, S. A. Grodsky, V. G. Dmitriev, P. G. Konvisar, S. V. Lantratov, V. Yu. Mikhailov, S. R. Rustamov: Kvantovaya Elektron. 9, 2093 - 2095(1982) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 12, 1360 - 1362(1982)]
4. 69 A. Koenke, A. Hirth: Opt. Commun. 34, 245 - 248(1980)
4. 70 V. G. Dmitriev, V. R. Kushnir, S. R. Rustamov, A. A. Fomichev: Kvantovaya Elektron. No. 2(8), 111 - 112(1972) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 2, 188 - 189(1972)]
4. 71 R. G. Smith, J. E. Geusic, H. J. Levinstein, S. Singh, L. G. Van Uitert: J. Appl. Phys. 39, 4030 - 4032(1968)
4. 72 J. E. Geusic, H. J. Levinstein, S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 12, 306 - 308(1968)

4. 73 R. G. Smith, J. E. Geusic, H. J. Levinstein, J. J. Rubin, S. Singh, L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. 12, 308 – 310 (1968)
4. 74 R. B. Chesler, M. A. Karr, J. E. Geusic: Proc. IEEE 58, 1899 – 1914 (1970)
4. 75 W. Gulshaw, J. Kannelaud, J. E. Peterson: IEEE J. QE – 10, 253 – 263 (1974)
4. 76 Y. S. Liu, D. Dentz, R. Belt: Opt. Lett. 9, 76 – 78 (1984)
4. 77 P. E. Perkins, T. S. Fahlen: J. Opt. Soc. Am. B 4, 1066 – 1071 (1987)
4. 78 D. W. Anthon, D. L. Sipes, T. J. Pier, M. R. Ressler: IEEE J. QE – 28, 1148 – 1157 (1992)
4. 79 L. R. Marshall, A. D. Hays, A. Kaz, R. L. Burnham: IEEE J. QE – 28, 1158 – 1163 (1992)
4. 80 T. Fukuda, Y. Uematsu: Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. 41, 548 – 554 (1977) [English transl.: Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser. 41, No. 3, 73 – 77 (1977)]
4. 81 W. P. Risk, R. Pon, W. Lenth: Appl. Phys. Lett. 54, 1625 – 1627 (1989)
4. 82 I. Biaggio, H. Looser, P. Günter: Ferroelectr. 94, 157 – 161 (1989)
4. 83 V. M. Garmash, G. A. Ermakov, N. I. Pavlova, A. V. Tarasov: Pisma Zh. Tekh. Fiz. 12, 1222 – 1225 (1986) [English transl.: Sov. Tech. Phys. Lett. 12, 505 – 506 (1986)]
4. 84 A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic: IEEE J. QE – 2, 109 – 124 (1966)
4. 85 W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, R. L. Byer: IEEE J. QE – 24, 913 – 919 (1988)
4. 86 D. C. Gerstenberger, G. E. Tye, R. W. Wallace: Opt. Lett. 16, 992 – 994 (1991)
4. 87 K. Fiedler, S. Schiller, R. Paschotta, P. Kürz, J. Mlynek: Opt. Lett. 18, 1786 – 1788 (1993)
4. 88 D. H. Jundt, M. M. Fejer, R. L. Byer, R. G. Norwood, P. F. Bordui: Opt. Lett. 16, 1856 – 1858 (1991)
4. 89 Z. Y. Ou, S. F. Pereira, E. S. Polzik, H. J. Kimble: Opt. Lett. 17, 640 – 642 (1992)
4. 90 S. T. Yang, C. C. Pohalski, E. K. Gustafson, R. L. Byer, R. S. Feigelson, R. J. Raymakers, R. K. Route: Opt. Lett. 16, 1493 – 1495 (1991)
4. 91 G. P. A. Malcolm, M. Ebrahimzadeh, A. I. Ferguson: IEEE J. QE – 28, 1172 – 1178 (1992)
4. 92 R. B. Andreev, V. D. Volosov, V. S. Gorshkov: Opt. Spektrosk. 46, 376 – 381 (1979) [English transl.: Opt. Spectrosc. USSR 46, 207 – 210 (1979)]
4. 93 A. H. Kung, J. F. Young, G. C. Bjorklund, S. E. Harris: Phys. Rev. Lett. 29, 985 – 988 (1972)
4. 94 K. Kato: Appl. Phys. Lett. 25, 342 – 343 (1974)
4. 95 S. F. Bogdanov, P. G. Konvisar, S. R. Rustamov: Kvantovaya Elektron. 12, 2143 – 2144 (1985) [English transl.: Sov. J. Quantum. Electron. 15, 1409 (1985)]
4. 96 M. Okada, S. Ieiri: Jpn. J. Appl. Phys. 10, 808 (1971)
4. 97 R. Wu: Appl. Opt. 32, 971 – 975 (1993)

4. 98 B. Wu, N. Chen, C. Chen, D. Deng, Z. Xu: Opt. Lett. 14, 1080 – 1081 (1989)
4. 99 K. Kato: Opt. Quantum Electron. 8, 261 – 262 (1976)
4. 100 K. Kato: IEEE J. QE – 19, 893 – 894 (1983)
4. 101 A. G. Arutyunyan, G. R. Buniatyan, A. A. Melkonyan, A. V. Mesropyan, G. A. Paityan:
In *Nonlinear Optical Interactions* (Yerevan University Press, Yerevan, 1987) pp. 135 – 144
4. 102 P. Qiu, A. Penzkofer: Appl. Phys. B 45, 225 – 236 (1988)
4. 103 G. A. Abakumov, Kh. S. Bagdasarov, V. V. Vetrov, S. A. Vorobev, V. P. Zakharov,
V. F. Pikelni, A. P. Smirnov, V. V. Fadeev, E. A. Fedorov: Kvantovaya Elektron. 4,
1152 – 1153 (1977) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 7, 656 – 657 (1977)]
4. 104 J. J. Reintjes, R. C. Eckardt: Appl. Phys. Lett. 30, 91 – 93 (1977)
4. 105 Y. S. Liu, W. B. Jones, J. P. Chernoch: Appl. Phys. Lett. 29, 32 – 34 (1976)
4. 106 P. E. Perkins, T. S. Fahlen: IEEE J. QE – 21, 1636 – 1638 (1985)
4. 107 K. Kato: Opt. Commun. 13, 361 – 362 (1975)
4. 108 A. G. Arutyunyan, V. G. Atanesyan, K. B. Petrosyan, K. M. Pokhsrryan: Pisma Zh.
Tekh. Fiz. 6, 277 – 280 (1980) [English transl.: Sov. Tech. Phys. Lett. 6, 120 – 121
(1980)]
4. 109 A. Lago, R. Wallenstein, C. Chen, Y. X. Fan, R. L. Byer: Opt. Lett. 13, 221 – 223
(1988)
4. 110 K. Kato: IEEE J. QE – 26, 1455 – 1456 (1990)
4. 111 A. G. Akmanov, S. A. Akhmanov, B. V. Zhdanov, A. I. Kovrigin, N. K. Podsotskaya, R.
V. Khokhlov: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 10, 244 – 249 (1969) [English transl.: JETP
Lett. 10, 154 – 156 (1969)]
4. 112 G. A. Massey, M. D. Jones, J. C. Johnson: IEEE J. QE – 14, 527 – 532 (1978)
4. 113 M. D. Jones, G. A. Massey: IEEE J. QE – 15, 204 – 206 (1979)
4. 114 G. A. Massey, J. C. Johnson: IEEE J. QE – 12, 721 – 727 (1976)
4. 115 G. A. Massey: Appl. Phys. Lett. 24, 371 – 373 (1974)
4. 116 K. Kato: Opt. Commun. 19, 332 – 333 (1976)
4. 117 Y. Tanaka, H. Kuroda, S. Shionoya: Opt. Commun. 41, 434 – 436 (1982)
4. 118 K. Kato: IEEE J. QE – 16, 810 – 811 (1980)
4. 119 V. G. Tunkin, T. Usmanov, V. A. Shakirov: Kvantovaya Elektron. No. 5 (11), 117 – 118
(1972) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 2, 487 – 488 (1972)]
4. 120 C. Chen, B. Wu, A. Jiang, G. You: Sci. Sin. B 28, 235 – 243 (1985)
4. 121 K. Kato: IEEE J. QE – 22, 1013 – 1014 (1986)
4. 122 A. G. Arutyunyan, G. G. Gurzadyan, R. K. Ispiryan: Kvantovaya Elektron. 16, 2493 –
2495 (1989) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 19, 1602 – 1603 (1989)]
4. 123 N. P. Garayanz, K. B. Petrosyan, K. M. Pokhsrryan: Izv. Akad. Nauk Arm. SSR, Ser.
Fiz. 23, 109 – 111 (1988) [English transl.: Sov. J. Contemp. Phys. Armen. Acad. Sci. 23, No

2(1988)]

4. 124 A. G. Akmanov, A. M. Valshin, A. G. Yamaletdinov: *Kvantovaya Elektron.* 8, 408 – 410(1981) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 11, 247 – 248(1981)]
4. 125 K. Kato, R. S. Adhav: *IEEE J. QE* – 12, 443 – 444(1976)
4. 126 A. A. Kazakov, S. V. Shavkunov, E. A. Shalaev: *Kvantovaya Elektron.* 8, 2259 – 2261(1981) [English transl.: *Sov. J. Quantum. Electron.* 11, 1381 – 1383(1981)]
4. 127 A. A. Kazakov, V. A. Konovalov, S. V. Shavkunov, E. A. Shalaev: *Kvantovaya Elektron.* 10, 1603 – 1610(1983) [English transl.: *Sov. J. Quantum. Electron.* 13, 1054 – 1058(1983)]
4. 128 S. Lin, B. Wu, F. Xie, C. Chen: *Appl. Phys. Lett.* 59, 1541 – 1543(1991)
4. 129 A. A. Gulamov, E. A. Ibragimov, V. I. Redkorechev, T. Usmanov: *Kvantovaya Elektron.* 10, 1305 – 1306(1983) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 13, 844 – 845(1983)]
4. 130 W. Seka, S. D. Jakobs, J. E. Rizzo, R. Boni, R. S. Craxton: *Opt. Commun.* 34, 469 – 473(1980)
4. 131 G. J. Linford, B. C. Johnson, J. S. Hildum, W. E. Martin, K. Snyder, R. D. Boyd, W. L. Smith, C. L. Vercimak, D. Eimerl, J. T. Hunt: *Appl. Opt.* 21, 3633 – 3643 (1982)
4. 132 I. A. Begishev, R. A. Gancev, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, Sh. R. Kamalov, T. Usmanov, A. D. Khadzhaev: *Kvantovaya Elektron.* 15, 353 – 361(1988) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 18, 224 – 228(1988)]
4. 133 C. Loth, D. Bruneau, E. Fabre: *Appl. Opt.* 19, 1022 – 1023(1980)
4. 134 E. F. Ibragimov, V. I. Redkorechev, A. P. Sukhorukov, T. Usmanov: *Kvantovaya Elektron.* 9, 1131 – 1140(1982) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 12, 714 – 719(1982)]
4. 135 D. Bruneau, A. M. Tournade, E. Fabre: *Appl. Opt.* 24, 3740 – 3745(1985)
4. 136 R. S. Craxton: *Opt. Commun.* 34, 474 – 478(1980)
4. 137 R. S. Craxton: *IEEE J. QE* – 17, 1771 – 1782(1981)
4. 138 R. S. Craxton: *Appl. Opt.* 22, 2739 – 2742(1983)
4. 139 D. Eimerl: *IEEE J. QE* – 23, 1361 – 1371(1987)
4. 140 S. Sullivan, E. L. Thomas: *Opt. Commun.* 25, 125 – 128(1978)
4. 141 V. S. Suvorov, A. S. Sonin, I. S. Rez: *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 53, 49 – 55 (1967) [English transl.: *Sov. Phys. -JETP* 26, 33 – 37(1968)]
4. 142 K. Kato: *IEEE J. QE* – 10, 622 – 624(1974)
4. 143 K. Kato, A. J. Alcock, M. C. Richardson: *Opt. Commun.* 11, 5 – 7(1974)
4. 144 G. Nath, H. Mehmanesch, M. Gsänger: *Appl. Phys. Lett.* 17, 286 – 288(1970)
4. 145 T. S. Chen, W. P. White: *IEEE J. QE* – 12, 436 – 437(1976)
4. 146 K. Kato: *Appl. Phys. Lett.* 29, 562 – 563(1976)

4. 147 A. Nebel, R. Beigang: Opt. Lett. 16, 1729 – 1731 (1991)
4. 148 C. S. Adams, A. I. Ferguson: Opt. Commun. 90, 89 – 94 (1992)
4. 149 R. A. Cheville, M. T. Reiten, N. J. Halas: Opt. Lett. 17, 1343 – 1345 (1992)
4. 150 R. J. Ellingson, C. L. Tang: Opt. Lett. 17, 343 – 345 (1992)
4. 151 P. Poirier, F. Hanson: Opt. Lett. 18, 1925 – 1927 (1993)
4. 152 G. A. Skripko, S. G. Bartoshevich, I. V. Mikhnyuk, I. G. Tarazevich: Opt. Lett. 16, 1726 – 1728 (1991)
4. 153 S. Bourzeix, M. D. Plimmer, F. Nez, L. Julien, F. Biraben: Opt. Commun. 99, 89 – 94 (1993)
4. 154 D-W. Chen, J. T. Lin: IEEE J. QE – 29, 307 – 310 (1993)
4. 155 L. S. Wu, H. Looser, P. Günter: Appl. Phys. Lett. 56, 2163 – 2165 (1990)
4. 156 E. S. Polzik, H. J. Kimble: Opt. Lett. 16, 1400 – 1402 (1991)
4. 157 M. Sagawa, H. Kagawa, A. Kakuta, M. Kaji: Appl. Phys. Lett. 63, 1877 – 1879 (1993)
4. 158 A. Nebel, R. Beigang: Opt. Commun. 94, 369 – 372 (1992)
4. 159 J. C. Baumert, P. Günter, H. Melchior: Opt. Commun. 48, 215 – 220 (1983)
4. 160 P. Günter, P. M. Asbeck, S. K. Kurtz: Appl. Phys. Lett. 35, 461 – 463 (1979)
4. 161 M. K. Chun, L. Goldberg, J. F. Weller: Appl. Phys. Lett. 53, 1170 – 1171 (1988)
4. 162 L. Goldberg, M. K. Chun: Appl. Phys. Lett. 55, 218 – 220 (1989)
4. 163 G. J. Dixon, C. E. Tanner, C. E. Wieman: Opt. Lett. 14, 731 – 733 (1989)
4. 164 A. Hemmerich, D. H. McIntyre, C. Zimmermann, T. W. Hänsch: Opt. Lett. 15, 372 – 374 (1990)
4. 165 W. J. Kozlovsky, W. Lenth, E. E. Latta, A. Moser, G. L. Bona: Appl. Phys. Lett. 56, 2291 – 2292 (1990)
4. 166 C. Zimmermann, T. W. Hänsch, R. Byer, S. O' Brien, D. Welch: Appl. Phys. Lett. 61, 2741 – 2743 (1992)
4. 167 L. Goldberg, L. Busse, D. Mehuys: Appl. Phys. Lett. 60, 1037 – 1039 (1992)
4. 168 L. Goldberg, L. E. Busse, D. Mehuys: Appl. Phys. Lett. 63, 2327 – 2329 (1993)
4. 169 W. Wang, K. Nakagawa, Y. Toda, M. Ohtsu: Appl. Phys. Lett. 61, 1886 – 1888 (1992)
4. 170 Chr. Tamm: Appl. Phys. B 56, 295 – 300 (1993)
4. 171 J. J. E. Reid: Appl. Phys. Lett. 62, 19 – 21 (1993)
4. 172 W. Wang, M. Ohtsu: Opt. Commun. 102, 304 – 308 (1993)
4. 173 C. R. Webster, L. Wöste, R. N. Zare: Opt. Commun. 35, 435 – 440 (1980)
4. 174 C. F. Dewey, Jr., W. R. Cook, Jr., R. T. Hodgson, J. J. Wynne: Appl. Phys. Lett. 26, 714 – 716 (1975)
4. 175 H. J. Dewey: IEEE J. QE – 12, 303 – 306 (1976)
4. 176 H. Zacharias, A. Anders, J. B. Halpern, K. H. Welge: Opt. Commun. 19, 116 – 119

(1976)

4. 177 V. I. Stroganov, V. I. Trunov, A. A. Chernenko, A. N. Izrailenko: *Kvantovaya Elektron.* 3, 1122 – 1124 (1976) [English transl.: *Sov. J. Quantum. Electron.* 6, 601 – 602 (1976)]
4. 178 B. V. Bokut, N. S. Kazak, A. G. Maschenko, V. A. Mostovnikov, A. N. Rubinov: *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 15, 26 – 30 (1972) [English transl.: *JETP Lett.* 15, 18 – 20 (1972)]
4. 179 B. G. Huth, G. I. Farmer, L. M. Taylor, M. R. Kagan: *Spectrosc. Lett.* 1, 425 – 432 (1968)
4. 180 A. Hirth, K. Vollrath, J. V. Allain: *Opt. Commun.* 20, 347 – 349 (1977)
4. 181 D. J. Bradley, J. V. Nicholas, J. R. D. Shaw: *Appl. Phys. Lett.* 19, 172 – 173 (1971)
4. 182 D. A. Jennings, A. J. Varga: *J. Appl. Phys.* 42, 5171 – 5172 (1971)
4. 183 R. W. Wallace: *Opt. Commun.* 4, 316 – 318 (1971)
4. 184 C. Gabel, M. Hercher: *IEEE J. QE* – 8, 850 – 851 (1972)
4. 185 M. Yamashita, W. Sibbett, D. Welford, D. J. Bradley: *J. Appl. Phys.* 51, 3559 – 3562 (1980)
4. 186 D. Welford, W. Sibbett, J. R. Taylor: *Opt. Commun.* 35, 283 – 286 (1980)
4. 187 K. Kato: *J. Appl. Phys.* 46, 2721 – 2722 (1975)
4. 188 K. Kato: *IEEE J. QE* – 13, 544 – 546 (1977)
4. 189 A. I. Ferguson, M. H. Dunn: *Opt. Commun.* 23, 177 – 182 (1977)
4. 190 D. Frölich, L. Stein, H. W. Schröder, H. Welling: *Appl. Phys.* 11, 97 – 101 (1976)
4. 191 H. Buesener, A. Renn, M. Brieger, F. Von Moers, A. Hese: *Appl. Phys. B* 39, 77 – 81 (1986)
4. 192 W. A. Majewsky: *Opt. Commun.* 45, 201 – 206 (1983)
4. 193 I. M. Beterov, V. I. Stroganov, V. I. Trunov, B. Ya. Yurshin: *Kvantovaya Elektron.* 2, 2440 – 2443 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 1329 – 1331 (1975)]
4. 194 K. Miyazaki, H. Sakai, T. Sato: *Opt. Lett.* 11, 797 – 799 (1986)
4. 195 D. C. Edelstein, E. S. Wachman, L. K. Cheng, W. R. Bosenberg, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 52, 2211 – 2213 (1988)
4. 196 H. J. Müschenborn, W. Theiss, W. Demtröder: *Appl. Phys. B* 50, 365 – 369 (1990)
4. 197 R. Kallenbach, F. Schmidt-Kaler, M. Weitz, C. Zimmermann, T. W. Hänsch: *Opt. Commun.* 81, 63 – 66 (1991)
4. 198 J. A. Paisner, M. L. Spaeth, D. C. Gerstenberger, I. W. Ruderman: *Appl. Phys. Lett.* 32, 476 – 478 (1978)
4. 199 F. B. Dunning, F. K. Tittel, R. F. Stebbings: *Opt. Commun.* 7, 181 – 183 (1973)
4. 200 S. J. Bastow, M. H. Dunn: *Opt. Commun.* 35, 259 – 263 (1980)

4. 201 C. J. Foot, P. E. G. Baird, M. G. Boshier, D. N. Stacey, G. K. Woodgate: *Opt. Commun.* 50, 199 – 204 (1984)
4. 202 K. Kato: *IEEE J. QE* – 15, 410 – 411 (1979)
4. 203 J. C. Baumert, J. Hoffnagle, P. Günter: *Appl. Opt.* 24, 1299 – 1301 (1985)
4. 204 J. M. Halbout, S. Blit, W. Donaldson, C. L. Tang: *IEEE J. QE* – 15, 1176 – 1180 (1979)
4. 205 B. Couillaud, L. A. Bloomfield, T. W. Hansh: *Opt. Lett.* 8, 259 – 261 (1983)
4. 206 B. Couillaud, T. W. Hansh, S. G. Mac Lean: *Opt. Commun.* 50, 127 – 129 (1984)
4. 207 E. F. Labuda, A. M. Johnson: *IEEE J. QE* – 3, 164 – 167 (1967)
4. 208 R. K. Jain, T. K. Gustafson: *IEEE J. QE* – 9, 859 – 861 (1973)
4. 209 J. C. Bergquist, H. Hemmati, W. M. Itano: *Opt. Commun.* 43, 437 – 442 (1982)
4. 210 X. Xinan, Y. Shuzhong: *Chin. Phys. -Lasers* 13, 892 – 894 (1986)
4. 211 C. Zimmermann, R. Kallenbach, T. W. Hänsch, J. Sandberg: *Opt. Commun.* 71, 229-234 (1989)
4. 212 Y. Taira: *Jpn. J. Appl. Phys.* 31, L682 – L684 (1992)
4. 213 F. Kaczmarek, A. Jendrzczak: *Opt. Quantum Electron.* 15, 187 – 191 (1983)
4. 214 E. N. Antonov, V. G. Koloshnikov, D. N. Nikogosyan: *Opt. Spektrosk.* 36, 768 – 772 (1974) [English transl.: *Opt. Spectrosc. USSR* 36, 446 – 448 (1974)]
4. 215 T. Kushida, Y. Tanaka, M. Ojima, Y. Nakazaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* 14, 1097 – 1098 (1975)
4. 216 V. V. Badikov, O. N. Pivovarov, Yu. V. Skokov, O. V. Skrebneva, N. K. Trotsenko: *Kvantovaya Elektron.* 2, 618 – 621 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 350 – 351 (1975)]
4. 217 E. D. Shaw, C. K. N. Patel, R. J. Chichester: *Opt. Commun.* 33, 221 – 224 (1980)
4. 218 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, A. P. Dyadkin, S. V. Pigulsky, A. I. Starodubtsev: *Kvantovaya Elektron.* 14, 784 – 786 (1987) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 17, 491 – 493 (1987)]
4. 219 Yu. M. Andreev, A. D. Belykh, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, V. A. Gurashvili, S. V. Izyumov: *Kvantovaya Elektron.* 14, 782 – 783 (1987) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 17, 490 – 491 (1987)]
4. 220 M. W. Dowley: *Appl. Phys. Lett.* 13, 395 (1968)
4. 221 E. E. Fill: *Opt. Commun.* 33, 321 – 322 (1980)
4. 222 E. Fill, J. Wildenauer: *Opt. Commun.* 47, 412 – 413 (1983)
4. 223 G. Brederlow, E. Fill, K. J. Witte: *The High-Power Iodine Laser*, Springer Ser. Opt. Sci., Vol. 34 (Springer, Berlin, Heidelberg 1983)
4. 224 K. J. Witte, E. Fill, G. Brederlow, H. Baumhacker, R. Volk: *IEEE J. QE* – 17, 1809 – 1816 (1981)

4. 225 D. E. Johnson, R. H. Humphreys, Jr., P. Keating, G. D. Hager: Appl. Phys. B 48, 339 – 342 (1989)
4. 226 D. V. Ishkov, P. G. Kryukov, V. S. Pazyuk, M. P. Frolov, N. N. Yuryshv: Kvantovaya Elektron. 19, 407 – 409 (1992) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 22, 370 – 372 (1992)]
4. 227 G. D. Hager, S. A. Hanes, M. A. Dreger: IEEE J. QE – 28, 2573 – 2576 (1992)
4. 228 C. J. Ernst, W. J. Witteman: IEEE J. QE – 8, 382 – 383 (1972)
4. 229 D. N. Nikogosyan, A. P. Sukhorukov, M. I. Golovey: Kvantovaya Elektron. 2, 609 – 612 (1975) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 5, 344 – 346 (1975)]
4. 230 D. S. Chemla, P. I. Kupecek, C. A. Schwartz: Opt. Commun. 7, 225 – 228 (1973)
4. 231 R. L. Byer, M. M. Choy, R. L. Herbst, D. S. Chemla, R. S. Feigelson: Appl. Phys. Lett. 24, 65 – 68 (1974)
4. 232 R. C. Eckardt, Y. X. Fan, R. L. Byer, R. K. Route, R. S. Feigelson, J. Van der Laan: Appl. Phys. Lett. 47, 786 – 788 (1985)
4. 233 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee, P. K. Datta, Yu. M. Andreev: Appl. Phys. Lett. 63, 1316 – 1318 (1993)
4. 234 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, O. Ya. Zyryanov, I. I. Ippolitov, A. N. Morozov, A. V. Soskin, G. S. Khmel'nitsky: Kvantovaya Elektron. 11, 1511 – 1512 (1984) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 14, 1021 – 1022 (1984)]
4. 235 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, V. V. Zuev, A. S. Solodukhin, S. A. Trushin, V. V. Churakov, S. F. Shubin: Kvantovaya Elektron. 14, 2137 – 2138 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 1362 – 1363 (1987)]
4. 236 Yu. M. Andreev, V. Yu. Baranov, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, S. V. Izyumov, S. M. Kozochkin, V. D. Pismenny, Yu. A. Satov, A. P. Streltsov: Kvantovaya Elektron. 14, 2252 – 2254 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 1435 – 1436 (1987)]
4. 237 G. C. Bhar, S. Das, U. Chatterjee, K. L. Vodopyanov: Appl. Phys. Lett. 54, 313 – 314 (1989)
4. 238 Yu. M. Andreev, A. N. Bykanov, A. I. Gribenyukov, V. V. Zuev, V. D. Karyshev, A. V. Kisletsov, I. O. Kovalev, V. I. Konov, G. P. Kuzmin, A. A. Nesterenko, A. E. Osorgin, Yu. M. Starodumov, N. I. Chapliev: Kvantovaya Elektron. 17, 476 – 480 (1990) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 20, 410 – 414 (1990)]
4. 239 A. A. Barykin, S. V. Davydov, V. P. Dorokhov, V. P. Zakharov, V. V. Butuzov: Kvant. Elektron. 20, 794 – 800 (1993) [English transl.: Quantum Electron. 23, 688 – 693 (1993)]
4. 240 H. Kildal, J. C. Mikkelsen: Opt. Commun. 10, 306 – 309 (1974)
4. 241 N. Menyuk, G. W. Iseler, A. Mooradian: Appl. Phys. Lett. 29, 422 – 424 (1976)

4. 242 R. L. Pastel: Appl. Opt. 26, 1574 – 1576 (1987)
4. 243 R. C. Y. Auyeung, D. M. Zielke, B. J. Feldman: Appl. Phys. B 48, 293 – 297 (1989)
4. 244 D. R. Suhre: Appl. Phys. B 52, 367 – 370 (1991)
4. 245 G. B. Abdullaev, K. R. Allakhverdiev, M. E. Karasev, V. I. Konov, L. A. Kulevskii, N. B. Mustafaev, P. P. Pashinin, A. M. Prokhorov, Yu. M. Starodumov, N. I. Chapliev: Kvantovaya Elektron. 16, 757 – 763 (1989) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 19, 494 – 498 (1989)]
4. 246 G. D. Boyd, T. J. Bridges, E. G. Burkhardt: IEEE J. QE – 4, 515 – 519 (1968)
4. 247 G. W. Day: Appl. Phys. Lett. 18, 347 – 349 (1971)
4. 248 C. K. N. Patel: Phys. Rev. Lett. 15, 1027 – 1030 (1965)
4. 249 J. D. Taynai, R. Targ, W. B. Tiffany: IEEE J. QE – 7, 412 – 416 (1971)
4. 250 V. V. Berezovskii, Yu. A. Bykovskii, M. I. Goncharov, I. S. Rez: Kvantovaya Elektron. No. 2 (8), 105 – 107 (1972) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 2, 180 – 182 (1972)]
4. 251 J. Jerphagnon, M. Bernard: IEEE J. QE – 4, 395 – 396 (1968)
4. 252 A. Delahaigne, C. Thiebeaux, P. Louve: Appl. Phys. 24, 21 – 22 (1981)
4. 253 N. Menyuk, G. W. Iseler: Opt. Lett. 4, 55 – 57 (1979)
4. 254 Yu. M. Andreev, T. V. Vedernikova, A. A. Betin, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, O. Ya. Zyryanov, I. I. Ippolitov, V. I. Masychev, O. V. Mitropolskii, V. P. Novikov, M. A. Novikov, A. V. Sosnin: Kvantovaya Elektron. 12, 1535 – 1537 (1985) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 15, 1014 – 1015 (1985)]
4. 255 A. A. Isaev, G. Yu. Lemmerman, G. L. Malafeeva: Kvantovaya Elektron. 7, 1700 – 1704 (1980) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 10, 983 – 985 (1980)]
4. 256 Yu. P. Polunin, V. O. Troitsky: Kvantovaya Elektron. 14, 2249 – 2251 (1987) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 17, 1433 – 1434 (1987)]
4. 257 K. Kuroda, T. Omatsu, T. Shimura, M. Chihara, I. Ogura: Opt. Commun. 75, 42 – 46 (1990)
4. 258 D. W. Coutts, M. D. Ainsworth, J. A. Piper: IEEE J. QE – 26, 1555 – 1558 (1990)
4. 259 D. W. Coutts, J. A. Piper: IEEE J. QE – 28, 1761 – 1764 (1992)
4. 260 T. Henningsen, J. D. Feichtner, N. T. Melamed: IEEE J. QE – 7, 248 – 250 (1971)
4. 261 D. P. Juyal, G. C. Thomas: Opt. Commun. 15, 26 – 28 (1975)
4. 262 Yu. M. Andreev, S. D. Velikanov, A. S. Yelutin, A. F. Zapolskii, D. V. Konkin, S. N. Mishkin, S. V. Smirnov, Yu. N. Frolov, V. V. Shchurov: Kvantovaya Elektron. 19, 1110 (1992) [English transl.: Sov. J. Quant. Electron. 22, 1035 (1992)]
4. 263 F. Balembois, P. Georges, F. Salin, G. Roger, A. Brun: Appl. Phys. Lett. 61, 2381 – 2382 (1992)
4. 264 S. R. Chinn: Appl. Phys. Lett. 29, 176 – 179 (1976)

4. 265 S. Imai, T. Yamada, Y. Fujimori, K. Ishikawa: Appl. Phys. Lett. 54, 1206 – 1208 (1989)
4. 266 W. S. Pelouch, T. Ukachi, E. S. Wachman, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 57, 111 – 113 (1990)
4. 267 T. R. Zhang, H. R. Choo, M. Downer: Appl. Opt. 29, 3927 – 3933 (1990)
4. 268 Y. Ishida, T. Yajima: Opt. Commun. 62, 197 – 200 (1987)
4. 269 K. L. Cheng, W. Bosenberg, F. W. Wise, I. A. Walmsley, C. L. Tang: Appl. Phys. Lett. 52, 519 – 521 (1988)
4. 270 D. Kühlke, U. Herpers: Opt. Commun. 69, 75 – 78 (1988)
4. 271 G. Szabo, Z. Bor: Appl. Phys. B 50, 51 – 54 (1990)
4. 272 Y. Takagi, M. Sumitani, N. Nakashima, K. Yoshihara: IEEE J. QE – 21, 193 – 195 (1985)
4. 273 Y. Takagi, M. Sumitani, N. Nakashima, D. V. O' Connor, K. Yoshihara: Appl. Phys. Lett. 42, 489 – 491 (1983)
4. 274 S. M. Kopylov, L. K. Mikhailov, O. B. Cherednichenko: Kvantovaya Elektron. 10, 625 – 627 (1983) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 13, 375 – 376 (1983)]
4. 275 D. A. Angelov, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan: Kvantovaya Elektron. 6, 2267 – 2269 (1979) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 9, 1334 – 1335 (1979)]
4. 276 V. L. Lyutskanov, S. D. Savov, S. M. Saltiel, K. V. Stamenov, I. V. Tomov: Opt. Commun. 37, 149 – 152 (1981)
4. 277 R. E. Stickel, Jr., F. B. Dunning: Appl. Opt. 17, 1313 – 1314 (1978)
4. 278 S. Blit, E. G. Weaver, F. B. Dunning, F. K. Tittel: Opt. Lett. 1, 58 – 60 (1977)
4. 279 D. W. Coutts, M. D. Ainsworth, J. A. Piper: IEEE J. QE – 25, 1985 – 1987 (1989)
4. 280 N. S. Dudina, S. M. Kopylov, L. K. Mikhailov, O. B. Cherednichenko: Kvantovaya Elektron. 6, 2478 – 2481 (1979) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 9, 1468 – 1469 (1979)]
4. 281 C. A. Moore, L. S. Goldberg: Opt. Commun. 16, 21 – 25 (1976)
4. 282 H. Hemmati, J. C. Bergquist: Opt. Commun. 47, 157 – 160 (1983)
4. 283 R. P. Mariella, Jr.: Opt. Commun. 29, 100 – 102 (1979)
4. 284 E. Liu, F. B. Dunning, F. K. Tittel: Appl. Opt. 21, 3415 – 3416 (1982)
4. 285 W. Mückenheim, P. Lokai, B. Burghardt, D. Basting: Appl. Phys. B 45, 259 – 261 (1988)
4. 286 M. Watanabe, K. Hayasaka, H. Imajo, J. Umezu, S. Urabe: Appl. Phys. B 53, 11 – 13 (1991)
4. 287 Th. Hofmann, K. Mossavi, F. K. Tittel, G. Szabo: Opt. Lett. 17, 1691 – 1693 (1992)
4. 288 I. V. Tomov, T. Anderson, P. M. Rentzepis: Appl. Phys. Lett. 61, 1157 – 1159 (1992)

4. 289 J. Ringling, O. Kittelmann, F. Noack: *Opt. Lett.* 17, 1794 – 1796 (1992)
4. 290 M. Watanabe, K. Hayasaka, H. Imajo, S. Urabe: *Opt. Lett.* 17, 46 – 48 (1992)
4. 291 P. Lokai, B. Burghardt, W. Mückenheim: *Appl. Phys. B* 45, 245 – 247 (1988)
4. 292 U. Heitmann, M. Kötteritzsch, S. Heitz, A. Hese: *Appl. Phys. B* 55, 419 – 423 (1992)
4. 293 T. L. Gustafson: *Opt. Commun.* 67, 53 – 57 (1988)
4. 294 W. L. Glab, J. P. Hessler: *Appl. Opt.* 26, 3181 – 3182 (1987)
4. 295 G. C. Bhar, U. Chatterjee, S. Das: *Jpn. J. Appl. Phys.* 29, L1127 – L1129 (1990)
4. 296 K. Sugiyama, J. Yoda, T. Sakurai: *Opt. Lett.* 16, 449 – 451 (1991)
4. 297 G. C. Bhar, P. K. Datta, U. Chatterjee: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 25, 1042 – 1047 (1992)
4. 298 A. Borsutzky, R. Brünge, R. Wallenstein: *Appl. Phys. B* 52, 380 – 384 (1991)
4. 299 B. Wu, F. Xie, C. Chen, D. Deng, Z. Xu: *Opt. Commun.* 88, 451 – 454 (1992)
4. 300 K. Kato: *IEEE J.* 26, 1173 – 1175 (1990)
4. 301 G. C. Bhar, P. K. Datta, A. M. Rudra: *Appl. Phys. B* 57, 431 – 434 (1993)
4. 302 R. C. Eckardt, H. Masuda, Y. X. Fan, R. L. Byer: *IEEE J. QE* – 26, 922 – 933 (1990)
4. 303 J. T. Lin, K. Kato: *Proc. SPIE* 1220, 58 – 63 (1990)
4. 304 F. B. Dunning, R. E. Stickel, Jr.: *Appl. Opt.* 15, 3131 – 3134 (1976)
4. 305 K. Kato: *Appl. Phys. Lett.* 30, 583 – 584 (1977)
4. 306 R. E. Stickel, F. B. Dunning: *Appl. Opt.* 16, 2356 – 2358 (1977)
4. 307 R. E. Stickel, Jr., F. B. Dunning: *Appl. Opt.* 17, 981 – 982 (1978)
4. 308 R. E. Stickel, Jr., S. Blit, G. F. Hidebrandt, E. D. Dahl, F. B. Dunning, F. K. Tittel: *Appl. Opt.* 17, 2270 (1978)
4. 309 H. Hemmati, J. C. Bergquist, W. M. Itano: *Opt. Lett.* 8, 73 – 75 (1983)
4. 310 K. B. Petrosyan, A. L. Pogosyan, K. M. Pokhsranyan: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* 47, 1619 – 1621 (1983) [English transl.: *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* 47 No. 8, 155 – 157 (1983)]
4. 311 K. B. Petrosyan, K. M. Pokhsranyan: *Izv. Akad. Nauk Arm. SSR, Ser. Fiz.* 20, 39 – 42 (1985) [English transl.: *Sov. J. Contemp. Phys. Armen. Acad. Sci.* 20 No. 1, 43 (1985)]
4. 312 F. B. Dunning: *Laser Focus* 14(5), 72 – 76 (1978)
4. 313 T. R. Gurski: *Appl. Phys. Lett.* 23, 273 – 275 (1973)
4. 314 S. N. Kosolobov, V. V. Lebedev, S. I. Marennikov, Yu. N. Popov, G. V. Krivoshchekov, P. L. Mitnitsky, B. I. Kidiyarov: *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 16, 475 – 479 (1972) [English transl.: *JETP Lett.* 16, 338 – 340 (1972)]
4. 315 T. R. Gurski, H. W. Epps, S. P. Maran: *Nature* 249, 638 – 639 (1974)
4. 316 D. Malz, J. Bergmann, J. Heise: *Exp. Tech. Phys.* 23, 495 – 498 (1975)

4. 317 D. Malz, J. Bergmann, J. Heise: *Exp. Tech. Phys.* 23, 379 – 388 (1975)
4. 318 Y. C. See, J. Falk: *Appl. Phys. Lett.* 36, 503 – 505 (1980)
4. 319 A. J. Campillo, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 19, 36 – 38 (1971)
4. 320 J. E. Midwinter, J. Warner: *J. Appl. Phys.* 38, 519 – 523 (1967)
4. 321 E. A. Arutyunyan, V. S. Mkrtchyan: *Kvantovaya Elektron.* 2, 812 – 814 (1975)
[English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 450 – 451 (1975)]
4. 322 J. E. Midwinter: *Appl. Phys. Lett.* 12, 68 – 70 (1968)
4. 323 R. C. Miller, W. A. Nordland: *IEEE J. QE* – 3, 642 – 643 (1967)
4. 324 K. M. Baird, D. S. Smith, W. E. Berger: *Opt. Commun.* 7, 107 – 109 (1973)
4. 325 J. E. Midwinter: *Appl. Phys. Lett.* 14, 29 – 32 (1969)
4. 326 Y. C. See, S. Guha, J. Falk: *Appl. Opt.* 19, 1415 – 1418 (1980)
4. 327 M. M. Abbas, T. Kostiuk, K. W. Ogilvie: *Appl. Opt.* 15, 961 – 970 (1976)
4. 328 A. S. Pine: *J. Opt. Soc. Am.* 64, 1683 – 1690 (1974)
4. 329 E. A. Arutyunyan, R. B. Kostanyan, V. S. Mkrtchyan, M. A. Mkrtchyan: *Kvantovaya Elektron.* 2, 1811 – 1813 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 985 – 987 (1975)]
4. 330 J. Falk, J. M. Yarborough: *Appl. Phys. Lett.* 19, 68 – 70 (1971)
4. 331 P. N. Kean, R. W. Standley, G. J. Dixon: *Appl. Phys. Lett.* 63, 302 – 304 (1993)
4. 332 P. K. Benicewicz, D. McGraw: *Opt. Lett.* 15, 165 – 167 (1990)
4. 333 W. P. Risk, W. J. Kozlovsky: *Opt. Lett.* 17, 707 – 709 (1992)
4. 334 P. N. Kean, G. J. Dixon: *Opt. Lett.* 17, 127 – 129 (1992)
4. 335 R. A. Stolzenberger, C. C. Hsu, N. Peyghambarian, J. J. E. Reid, R. A. Morgan: *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1, 446 – 448 (1989)
4. 336 M.-H. Lu, Y.-M. Liu: *Opt. Commun.* 84, 193 – 198 (1991)
4. 337 J. C. Baumert, P. Günter: *Appl. Phys. Lett.* 50, 554 – 556 (1987)
4. 338 J. Warner: *Appl. Phys. Lett.* 12, 222 – 224 (1968)
4. 339 E. K. Pfitzer, H. D. Riccius, K. J. Siemsen: *Opt. Commun.* 3, 277 – 278 (1971)
4. 340 D. Y. Tseng: *Appl. Phys. Lett.* 21, 382 – 384 (1972)
4. 341 R. F. Lucy: *Appl. Opt.* 11, 1329 – 1336 (1972)
4. 342 A. S. Alcock, A. C. Walker: *Appl. Phys. Lett.* 23, 467 – 468 (1973)
4. 343 G. P. Arumov, E. S. Voronin, Yu. A. Ilinsky, V. S. Solomatin, V. V. Shuvalov: *Kvantovaya Elektron.* 5 (17), 95 – 99 (1973) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 3, 421 – 423 (1973)]
4. 344 E. S. Voronin, V. S. Solomatin, V. V. Shuvalov: *Opto-electron.* 6, 189 – 190 (1974)
4. 345 D. N. Nikogosyan: *Kvantovaya Elektron.* 2, 2524 – 2525 (1975) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 1378 – 1379 (1975)]
4. 346 P. A. Jaanimagi, M. C. Richardson, N. R. Isenor: *Opt. Lett.* 4, 45 – 47 (1979)

4. 347 S. A. Andreev, N. P. Andreeva, I. N. Matveev, S. A. Pshenichnikov: *Kvantovaya Elektron.* 8, 1361 – 1363 (1981) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 11, 821 – 822 (1981)]
4. 348 N. Ito: *Opt. Lett.* 7, 63 – 65 (1983)
4. 349 W. B. Gandrud, G. D. Boyd: *Opt. Commun.* 1, 187 – 190 (1970)
4. 350 E. S. Voronin, V. S. Solomatin, N. I. Cherepov, V. V. Shuvalov, V. V. Badikov, O. N. Pivovarov: *Kvantovaya Elektron.* 2, 1090 – 1092 (1975) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 5, 597 – 598 (1975)]
4. 351 W. Jantz, P. Koidl: *Appl. Phys. Lett.* 31, 99 – 101 (1977)
4. 352 S. A. Andreev, I. N. Matveev, I. P. Nekrasov, S. M. Pshenichnikov, N. P. Sopina: *Kvantovaya Elektron.* 4, 657 – 659 (1977) [English transl. : *Sov. J. Quantum. Electron.* 7, 366 – 368 (1977)]
4. 353 E. S. Voronin, V. S. Solomatin, V. V. Shuvalov: *Kvantovaya Elektron.* 5, 2031 – 2032 (1978) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 8, 1145 – 1146 (1978)]
4. 354 T. Itabe, J. L. Bufton: *Appl. Opt.* 23, 3044 – 3047 (1984)
4. 355 G. S. Bhar, U. Chatterjee, P. K. Datta, S. Das, R. S. Feigelson, R. K. Route: *Appl. Phys. B* 53, 19 – 22 (1991)
4. 356 S. A. Andreev, N. P. Andreeva, V. V. Badikov, I. N. Matveev, S. M. Pshenichnikov: *Kvantovaya Elektron.* 7, 2003 – 2006 (1980) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 10, 1157 – 1158 (1980)]
4. 357 G. D. Boyd, W. B. Gandrud, E. Buechler: *Appl. Phys. Lett.* 18, 446 – 448 (1971)
4. 358 Yu. M. Andreev, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, V. P. Novikov: *Kvantovaya Elektron.* 14, 1177 – 1179 (1987) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 17, 748 – 749 (1987)]
4. 359 N. P. Andreeva, S. A. Andreev, I. N. Matveev, S. M. Pshenichnikov, N. D. Ustinov: *Kvantovaya Elektron.* 6, 357 – 359 (1979) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 9, 208 – 210 (1979)]
4. 360 Ph. Kupecek, E. Batifol, A. Kuhn: *Opt. Commun.* 11, 291 – 295 (1974)
4. 361 G. B. Abdullaev, K. R. Allakhverdiev, L. A. Kulevsky, A. M. Prokhorov, E. Yu. Salaev, A. D. Savelev, V. V. Smirnov: *Kvantovaya Elektron.* 2, 1228 – 1233 (1975) [English transl. : *Sov. J. Quantum. Electron.* 5, 665 – 668 (1975)]
4. 362 R. L. Herbst, R. L. Byer: *Appl. Phys. Lett.* 19, 527 – 530 (1971)
4. 363 A. Ferrario, M. Garbi: *Opt. Commun.* 17, 158 – 159 (1976)
4. 364 E. S. Voronin, M. I. Divlekeev, Yu. A. Ilinsky, V. S. Solomatin, V. V. Badikov, A. A. Godovikov: *Kvantovaya Elektron.* 1, 151 – 153 (1971) [English transl. : *Sov. J. Quantum Electron.* 1, 115 – 116 (1971)]
4. 365 P. G. Kryukov, Yu. A. Matveets, D. N. Nikogosyan: *Kvantovaya Elektron.* 2, 2269 – 2275

(1975) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 5, 1236 – 1238 (1975)]

4. 366 G. P. Arumov, E. S. Voronin, Yu. A. Ilinsky, V. E. Prokopenko, V. S. Solomatin: Kvantovaya Elektron. 2, 272 – 276 (1975) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 5, 153 – 155 (1975)]
4. 367 Y. Klinger, F. Arams: Proc. IEEE 57, 1797 – 1798 (1969)
4. 368 J. Falk, J. M. Yarborough: Appl. Phys. Lett. 19, 68 – 70 (1971)
4. 369 E. N. Antonov, V. R. Mironenko, D. N. Nikogosyan, M. I. Golovey: Kvantovaya Elektron. 1, 1742 – 1746 (1974) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 4, 963 – 965 (1974)]
4. 370 H. D. Riccius, K. J. Siemsen: Phys. Lett. 45A, 377 – 378 (1973)
4. 371 G. A. Massey, J. C. Johnson: Appl. Opt. 17, 3702 – 3703 (1978)
4. 372 C. L. Sam, M. M. Choy: Appl. Phys. Lett. 30, 199 – 201 (1977)
4. 373 D. W. Meltzer, L. S. Goldberg: Opt. Commun. 5, 209 – 211 (1972)
4. 374 L. Goldberg: Appl. Opt. 14, 653 – 656 (1975)
4. 375 H. Tashiro, T. Yajima: Opt. Commun. 12, 129 – 131 (1974)
4. 376 T. M. Jedju, L. Rothberg, A. Labrie: Opt. Lett. 13, 961 – 963 (1988)
4. 377 P. Mutin, J. P. Boquillon: Appl. Phys. B 48, 411 – 416 (1989)
4. 378 B. Wellegehausen, D. Friede, H. Vogt, S. Shahdin: Appl. Phys. 11, 363 – 370 (1976)
4. 379 G. F. Dobrzhansky, L. A. Kulevsky, Yu. N. Polivanov, R. Sh. Sayakhov, A. T. Sukhodolsky: Kvantovaya Elektron. 4, 1794 – 1796 (1977) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 7, 1019 – 1020 (1977)]
4. 380 R. Koenig, A. Rosenfeld, N. Tam, S. Mory: Opt. Commun. 24, 190 – 194 (1978)
4. 381 Sh. Atabaev, Yu. N. Polivanov, S. N. Poluektov: Kvantovaya Elektron. 9, 378 – 380 (1982) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 12, 212 – 213 (1982)]
4. 382 L. Mannik, S. K. Brown: Opt. Commun. 47, 62 – 64 (1983)
4. 383 D. Cotter, K. I. White: Opt. Commun. 49, 205 – 209 (1984)
4. 384 K. Kato: IEEE J. QE – 21, 119 – 120 (1985)
4. 385 T. Elsaesser, M. C. Nuss: Opt. Lett. 16, 411 – 413 (1991)
4. 386 C. F. Dewey, L. O. Hocker: Appl. Phys. Lett. 18, 58 – 60 (1971)
4. 387 I. S. Ruddock, R. Illingworth, L. Reekie: Opt. Quantum Electron. 16, 87 – 88 (1984)
4. 388 L. Reekie, I. S. Ruddock, R. Illingworth: Opt. Quantum Electron. 17, 169 – 173 (1985)
4. 389 K. Kato: IEEE J. QE – 16, 1017 – 1018 (1980)
4. 390 R. L. Seymour, M. M. Choy: Opt. Commun. 20, 101 – 103 (1977)
4. 391 D. S. Moore, S. C. Schmidt: Opt. Lett. 12, 480 – 482 (1987)
4. 392 P. C. M. Planken, E. Snoeks, L. D. Noordam, H. G. Muller, H. B. van Linden van den Heuvell: Opt. Commun. 85, 31 – 35 (1991)

4. 393 S. Ashworth, C. Iaconis, O. Votava, E. Riedle: *Opt. Commun.* 97, 109 – 114 (1993)
4. 394 G. C. Bhar, U. Chatterjee, S. Das: *Appl. Phys. Lett.* 58, 231 – 233 (1991)
4. 395 F. Seifert, V. Petrov: *Opt. Commun.* 99, 413 – 420 (1993)
4. 396 L. O. Hocker, C. F. Dewey, Jr.: *Appl. Phys.* 11, 137 – 140 (1976)
4. 397 B. Bareika, G. Dikchys, E. D. Isianova, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis: *Pisma Zh. Tech. Fiz.* 6, 694 – 697 (1980) [English transl.: *Sov. Tech. Phys. Lett.* 6, 301 – 302 (1980)]
4. 398 R. J. Seymour, F. Zernike: *Appl. Phys. Lett.* 29, 705 – 707 (1976)
4. 399 K. Kato: *IEEE J. QE* – 20, 698 – 699 (1984)
4. 400 T. Elsaesser, H. Lobentanzer, A. Seilmeier: *Opt. Commun.* 52, 355 – 359 (1985)
4. 401 D. S. Bethune, A. C. Luntz: *Appl. Phys. B* 40, 107 – 113 (1986)
4. 402 D. C. Hanna, V. V. Rampal, R. C. Smith: *IEEE J. QE* – 10, 461 – 462 (1974)
4. 403 D. C. Hanna, V. V. Rampal, R. C. Smith: *Opt. Commun.* 8, 151 – 153 (1973)
4. 404 P. Canarelli, Z. Benko, R. Curl, F. K. Tittel: *J. Opt. Soc. Am. B* 9, 197 – 202 (1992)
4. 405 A. H. Hielscher, C. E. Miller, D. C. Bayard, U. Simon, K. P. Smolka, R. F. Curl, F. K. Tittel: *J. Opt. Soc. Am. B* 9, 1962 – 1967 (1992)
4. 406 U. Simon, F. K. Tittel, L. Goldberg: *Opt. Lett.* 18, 1931 – 1933 (1993)
4. 407 U. Simon, C. E. Miller, C. C. Bradley, R. G. Hulet, R. F. Curl, F. K. Tittel: *Opt. Lett.* 18, 1062 – 1064 (1993)
4. 408 K. G. Spears, X. Zhu, X. Yang, L. Wang: *Opt. Commun.* 66, 167 – 171 (1988)
4. 409 A. G. Yodh, H. W. K. Tom, G. D. Aumiller, R. S. Miranda: *J. Opt. Soc. Am. B* 8, 1663 – 1667 (1991)
4. 410 T. Dahinten, U. Plödereder, A. Seilmeier, K. L. Vodopyanov, K. R. Allakhverdiev, Z. A. Ibragimov: *IEEE J. QE* – 29, 2245 – 2250 (1993)
4. 411 P. Hamm, C. Lauterwasser, W. Zinth: *Opt. Lett.* 18, 1943 – 1945 (1993)
4. 412 M. R. X. de Barros, P. C. Becker: *Opt. Lett.* 18, 631 – 633 (1993)
4. 413 A. Bianchi, M. Garbi: *Opt. Commun.* 30, 122 – 124 (1979)
4. 414 G. B. Abdullaev, L. A. Kulevskii, P. V. Nikles, A. M. Prokhorov, A. D. Savelev, E. Yu. Salaev, V. V. Smirnov: *Kvantovaya Elektron.* 3, 163 – 167 (1976) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 6, 88 – 90 (1976)]
4. 415 A. Bianchi, A. Ferrario, M. Musci: *Opt. Commun.* 25, 256 – 258 (1978)
4. 416 Yu. A. Gusev, A. V. Kirpichnikov, S. N. Konoplin, S. I. Marennikov, P. V. Nikles, Yu. N. Polivanov, A. M. Prokhorov, A. D. Savelev, R. Sh. Sayakhov, V. V. Smirnov, V. P. Chebotaev: *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 6, 1262 – 1265 (1980) [English transl.: *Sov. Tech. Phys. Lett.* 6, 541 – 542 (1980)]
4. 417 H. Kildal, J. C. Mikkelsen: *Opt. Commun.* 9, 315 – 318 (1973)
4. 418 W. R. Bosenberg, D. R. Guyer: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 1716 – 1722 (1993)

4. 419 M. S. Piltch, J. Rink, C. Tallman: Opt. Commun. 15, 112 – 114 (1975)
4. 420 D. Andreou: Opt. Commun. 23, 37 – 43 (1977)
4. 421 T. J. Bridges, V. T. Nguyen, E. G. Burkhardt, C. K. N. Patel: Appl. Phys. Lett. 27, 600 – 602 (1975)
4. 422 K. Kurokawa, M. Nakazawa: Appl. Phys. Lett. 55, 7 – 9 (1989)
4. 423 A. M. Valshin, V. M. Gordienko, E. O. Danilov, A. I. Kovrigin: Kvantovaya Elektron. 12, 437 – 439 (1985) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 15, 291 – 293 (1985)]
4. 424 D. W. Faries, K. A. Gehring, P. L. Richards, Y. R. Shen: Phys. Rev. 180, 363 – 365 (1969)
4. 425 F. Zernike, Jr., P. R. Berman: Phys. Rev. Lett. 15, 999 – 1001 (1965)
4. 426 T. Yajima, K. Inoue: Phys. Lett. 26A, 281 – 282 (1968); IEEE J. QE – 5, 140 – 146 (1969)
4. 427 T. Yajima, N. Takeuchi: Jpn. J. Appl. Phys. 10, 907 – 915 (1971)
4. 428 N. Takeuchi, N. Matsumoto, T. Yajima, S. Kishida: Jpn. J. Appl. Phys. 11, 268 – 269 (1972)
4. 429 N. Matsumoto, T. Yajima: Jpn. J. Appl. Phys. 12, 90 – 97 (1973)
4. 430 Yu. O. Avetisyan, P. S. Pogosyan: Pisma Zh. Tech. Fiz. 2, 1144 – 1146 (1976) [English transl.: Sov. Tech. Phys. Lett. 2, 450 (1976)]
4. 431 Yu. O. Avetisyan, A. O. Makaryan, K. M. Movsesyan, P. S. Pogosyan: Pisma Zh. Tech. Fiz. 5, 233 – 235 (1979) [English transl.: Sov. Tech. Phys. Lett. 5, 93 (1979)]
4. 432 A. H. Makarian, K. M. Movsessian, P. G. Pogossian: Opt. Commun. 35, 147 – 148 (1980)
4. 433 M. Berg, C. B. Harris, T. W. Kenny, P. L. Richards: Appl. Phys. Lett. 47, 206 – 208 (1985)
4. 434 S. G. Ryabov, G. N. Toropkin, I. F. Usoltsev: *Instruments of Quantum Electronics* (Radio i Svyaz, Moscow 1985) [In Russian]
4. 435 G. D. Boyd, T. J. Bridges, C. K. N. Patel, E. Buehler: Appl. Phys. Lett. 21, 553 – 555 (1972)
4. 436 V. G. Dmitriev, L. A. Kulevskii: "Parametric Generators of Light" in *Handbook of Lasers*, Vol. 2, ed. by A. M. Prokhorov (Sovetskoye Radio, Moscow 1978) pp. 319 – 348 [In Russian]
4. 437 R. Danelyus, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis, A. Stabinis, Ya. Yasevichyute: *Parametric Generators of Light and Picosecond Spectroscopy* (Mokslas, Vilnius 1983) [In Russian]
4. 438 Y. R. Shen: *The Principles of Nonlinear Optics* (Wiley, New York, 1984)
4. 439 R. Danelyus, G. Dikhyus, V. Kabelka, A. Piskarskas, A. Stabinis, Ya. Yasevichyute: Kvantovaya Elektron. 4, 2379 – 2395 (1977) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 7,

1360 – 1368 (1977)]

4. 440 P. G. Kryukov, Yu. A. Matveets, D. N. Nikogosyan, A. V. Sharkov: *Kvantovaya Elektron.* 5, 2348 – 2353 (1978) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 8,1319 – 1322 (1978)]
4. 441 R. Danelyus, V. Kabelka, A. Piskarskas, A. Smilgyavichyus: *Pisma Zh. Tech. Fiz.* 4, 765 – 769 (1978) [English transl. :Sov. Tech. Phys. Lett. 4,308 – 309 (1978)]
4. 442 V. Kabelka, A. Kutka, A. Piskarskas, V. Smilgyavichyus, Ya. Yasevichyute: *Kvantovaya Elektron.* 6, 1735 – 1739 (1979) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 9, 1022 – 1024 (1979)]
4. 443 B. Bareika, G. Dikchyus, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis, Ya. Yasevichyute: *Kvantovaya Elektron.* 10, 2318 – 2324 (1983) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 13,1507 – 1510 (1983)]
4. 444 R. Danelyus, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis: *Kvantovaya Elektron.* 9, 2491 – 2501 (1982) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 12,1626 – 1632 (1982)]
4. 445 B. F. Bareika, I. A. Begishev, Sh. A. Burdulis, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, A. S. Piskarskas, V. A. Sirutkaitis, T. Usmanov: *Pisma Zh. Tech. Fiz.* 12, 186 – 189 (1986) [English transl. :Sov. Tech. Phys. Lett. 12,78 – 79 (1986)]
4. 446 R. Danelyus, V. Kabelka, A. Piskarskas, V. Smilgyavichyus: *Kvantovaya Elektron.* 5, 679 – 682 (1978) [English transl. :Sov. J. Quantum. Electron. 8,398 – 400 (1978)]
4. 447 I. A. Begishev, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, T. Usmanov: *Pisma Zh. Tech. Fiz.* 13, 305 – 309 (1987) [English transl. : Sov. Tech. Phys. Lett. 13, 125 – 126 (1987)]
4. 448 I. A. Begishev, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, E. A. Ibragimov, Sh. R. Kamalov, T. Usmanov, A. D. Khadzhaev: *Kvantovaya Elektron.* 17, 1196 – 1199 (1990) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 20,1104 – 1106 (1990)]
4. 449 R. Danielius, A. Piskarskas, D. Podenas, P. Di Trapani, A. Varanavicius, G. P. Banfi: *Opt. Commun.* 87, 23 – 27 (1992)
4. 450 R. Danielius, A. Piskarskas, A. Stabinis, G. P. Banfi, P. Di Trapani, R. Righini: *J. Opt. Soc. Am. B10*, 2222 – 2232 (1993)
4. 451 G. A. Massey, J. C. Johnson: *IEEE J. QE* – 15, 201 – 203 (1979)
4. 452 G. C. Ghosh, G. C. Bhar: *IEEE J. QE* – 18, 143 – 145 (1982)
4. 453 S. A. Akhmanov, I. E. Begishev, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, B. V. Zhdanov, V. I. Kuznetsov, L. N. Rashkovich, T. B. Usmanov: *Kvantovaya Elektron.* 11, 1701 – 1702 (1984) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 14,1145 – 1146 (1984)]
4. 454 F. Wondrazek, A. Seilmeier, W. Kaiser: *Appl. Phys. B* 32, 39 – 42 (1983)
4. 455 J. M. Yarborough, G. A. Massey: *Appl. Phys. Lett.* 18, 438 – 440 (1971)
4. 456 B. V. Zhdanov, V. V. Kalitin, A. I. Kovrigin, S. M. Pershin: *Pisma Zh. Tech. Fiz.* 1,

- 847 – 851 (1975) [English transl. :Sov. Tech. Phys. Lett. 1,368 – 369 (1975)]
4. 457 G. A. Massey, J. C. Johnson, R. A. Elliott: IEEE J. QE – 12, 143 – 147 (1976)
 4. 458 G. A. Massey, R. A. Elliott: IEEE J. QE – 10, 899 – 900 (1974)
 4. 459 G. Ionushauskas, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis, A. Yuzapavichyus: Kvantovaya Elektron. 14, 2044 – 2045 (1987) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 17, 1303 – 1304 (1987)]
 4. 460 A. A. Babin, Yu. N. Belyaev, V. N. Petryakov, M. M. Sushchik, G. I. Freidman: Kvantovaya Elektron. 3, 1138 – 1139 (1976) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 6, 613 – 614 (1976)]
 4. 461 A. A. Babin, Yu. N. Belyaev, Yu. K. Verevkin, G. I. Freidman: Kvantovaya Elektron. 6, 1237 – 1246 (1979) [English transl. :Sov. J. Quantum. Electron. 9, 728 – 733 (1979)]
 4. 462 I. I. Ashmarin, Yu. A. Bykovsky, V. A. Ukraintsev, A. A. Chistyakov, L. V. Shishonkov: Kvantovaya Elektron. 11, 1847 – 1850 (1984) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 14, 1237 – 1239 (1984)]
 4. 463 A. J. Campillo: IEEE J. QE – 8, 809 – 811 (1972)
 4. 464 L. S. Goldberg: Appl. Phys. Lett. 17, 489 – 491 (1970)
 4. 465 A. I. Izraïlenko, A. I. Kovrigin, P. V. Nikles: Pisma Zh. Exp. Teor. Fiz. 12, 475 – 478 (1970) [English transl. :JETP Lett. 12, 331 – 333 (1970)]
 4. 466 R. B. Weisman, S. A. Rice: Opt. Commun. 19, 28 – 32 (1976)
 4. 467 S. A. Akhmanov, B. V. Zhdanov, A. I. Kovrigin, V. I. Kuznetsov, S. M. Pershin, A. I. Kholodnykh: Kvantovaya Elektron. 4, 2225 – 2233 (1977) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 7, 1271 – 1276 (1977)]
 4. 468 G. P. Dzhotyan, Yu. E. Dyakov, S. M. Pershin, A. I. Kholodnykh: Kvantovaya Elektron. 4, 1215 – 1226 (1977) [English transl. :Sov. J. Quantum Electron. 7, 685 – 691 (1977)]
 4. 469 R. Danelyus, G. Dikchyus, V. Kabelka, A. Piskarskas, A. Stabinis, Ya. Yasevichyute: Litov. Fiz. Sb. 18, 93 – 108 (1978) [English transl. :Sov. Phys. -Collect. 18, No. 1, 62 – 72 (1978)]
 4. 470 P. G. Kryukov, Yu. A. Matveets, D. N. Nikogosyan, A. V. Sharkov, E. M. Gordeev, S. D. Fanchenko: Kvantovaya Elektron. 4, 211 – 213 (1977) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 7, 127 – 128 (1977)]
 4. 471 R. B. Andreev, V. D. Volosov, V. N. Krylov: Pisma Zh. Tech. Fiz. 4, 256 – 258 (1978) [English transl. :Sov. Tech. Phys. Lett. 4, 105 (1978)]
 4. 472 A. Tokmakoff, C. D. Marshall, M. D. Fayer: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1785 – 1791 (1993)
 4. 473 G. Nath, G. Pauli: Appl. Phys. Lett. 22, 75 – 76 (1993)
 4. 474 E. O. Amman, M. K. Oshman, J. D. Foster, J. M. Yarbrough: Appl. Phys. Lett. 15, 131 – 133 (1969)

4. 475 A. Laubereau, L. Greiter, W. Kaiser: Appl. Phys. Lett. 25, 87 – 89 (1974)
4. 476 R. L. Herbst, R. N. Fleming, R. L. Byer: Appl. Phys. Lett. 25, 520 – 522 (1974)
4. 477 A. Seilmeier, K. Spanner, A. Laubereau, W. Kaiser: Opt. Commun. 24, 237 – 242 (1978)
4. 478 A. Fendt, W. Kranitzky, A. Laubereau, W. Kaiser: Opt. Commun. 28, 142 – 146 (1979)
4. 479 Z. I. Ivanova, V. Kabelka, S. A. Magnitsky, A. Piskarskas, V. Smilgyavichyus, N. M. Rubina, V. G. Tunkin: Kvantovaya Elektron. 4, 2469 – 2472 (1977) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 7, 1414 – 1416 (1977)]
4. 480 R. Laenen, G. Graener, A. Laubereau: Opt. Commun. 77, 226 – 230 (1990)
4. 481 F. Huisken, A. Kulcke, D. Voelkel, C. Laush, J. M. Lisy: Appl. Phys. Lett. 62, 805 – 807 (1993)
4. 482 M. J. T. Milton, T. J. McIlveen, D. C. Hanna, P. T. Woods: Opt. Commun. 93, 186 – 190 (1992)
4. 483 A. Seilmeier, W. Kaiser: Appl. Phys. 23, 113 – 119 (1980)
4. 484 P. L. Liu: Appl. Opt. 18, 3543 – 3545 (1979)
4. 485 Y. Tanaka, T. Koshida, S. Shionoya: Opt. Commun. 25, 273 – 276 (1978)
4. 486 A. Piskarskas, V. Smilgyavichyus, A. Umbrasas, N. Yodishyus: Kvantovaya Elektron. 13, 1281 – 1284 (1986) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 16, 841 – 843 (1986)]
4. 487 R. W. Wallace: Appl. Phys. Lett. 17, 497 – 499 (1970)
4. 488 S. Schiller, R. L. Byer: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1696 – 1707 (1993)
4. 489 W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors, R. C. Eckardt, R. L. Byer: Opt. Lett. 14, 66 – 68 (1989)
4. 490 C. D. Nabors, R. C. Eckardt, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer: Opt. Lett. 14, 1134 – 1136 (1989)
4. 491 D. C. Gerstenberger, R. W. Wallace: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1681 – 1683 (1993)
4. 492 H. He, Y. Lu, J. Dong, Q. Zhao: Proc. SPIE 1409, 18 – 23 (1991)
4. 493 S. T. Yang, R. C. Eckardt, R. L. Byer: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1684 – 1695 (1993)
4. 494 W. Joosen, H. J. Bakker, L. D. Noordam, H. G. Muller, H. B. van Linden van den Heuvell: J. Opt. Soc. Am. B 8, 2087 – 2093 (1991)
4. 495 L. J. Bromley, A. Guy, D. C. Hanna: Opt. Commun. 67, 316 – 320 (1988)
4. 496 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer, C. Chen, A. D. Jiang: IEEE J. QE – 25, 1196 – 1199 (1989)
4. 497 X. D. Zhu, L. Deng: Appl. Phys. Lett. 61, 1490 – 1492 (1992)
4. 498 R. Laenen, G. Graener, A. Laubereau: Opt. Lett. 15, 971 – 973 (1990)
4. 499 R. Laenen, G. Graener, A. Laubereau: J. Opt. Soc. Am. B 8, 1085 – 1088 (1991)

4. 500 R. Laenen, K. Wolfrum, A. Seilmeier, A. Laubereau: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 2151 – 2161 (1993)
4. 501 A. Dubietis, G. Jonusauskas, A. Piskarskas: *Opt. Commun.* 88, 437 – 440 (1992)
4. 502 S. Burdulis, R. Grigonis, A. Piskarskas, G. Sinkevicius, V. Sirutkaitis, A. Fix, J. Nolting, R. Wallenstein: *Opt. Commun.* 74, 398 – 402 (1990)
4. 503 L. K. Cheng, W. R. Bosenberg, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 53, 175 – 177 (1988)
4. 504 H. Vanherzele, C. Chen: *Appl. Opt.* 27, 2634 – 2636 (1988)
4. 505 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer, J. Nolting, R. Wallenstein: *Appl. Phys. Lett.* 53, 2014 – 2016 (1988)
4. 506 W. R. Bosenberg, W. S. Pelouch, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 55, 1952 – 1954 (1989)
4. 507 W. R. Bosenberg, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 56, 1819 – 1821 (1990)
4. 508 A. Piskarskas, V. Smilgevicius, A. Umbrasas, A. Fix, R. Wallenstein: *Opt. Commun.* 77, 335 – 338 (1990)
4. 509 J. Y. Huang, J. Y. Zhang, Y. R. Shen, C. Chen, B. Wu: *Appl. Phys. Lett.* 57, 1961 – 1963 (1990)
4. 510 U. Sukowski, A. Seilmeier: *Appl. Phys. B* 50, 541 – 545 (1990)
4. 511 H. Komine: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 1751 – 1757 (1993)
4. 512 A. Fix, T. Schröder, R. Wallenstein: *Laser und Optoelektronik* 3, 106 – 110 (1991)
4. 513 A. Fix, T. Schröder, R. Wallenstein, J. G. Haub, M. J. Johnson, B. J. Orr: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 1744 – 1750 (1993)
4. 514 A. Agnesi, G. C. Reali, V. Kubecek, S. Kumazaki, Y. Takagi, K. Yoshihara: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 2211 – 2217 (1993)
4. 515 J. Y. Zhang, J. Y. Huang, Y. R. Shen, C. Chen: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 1758 – 1764 (1993)
4. 516 H. Komine: *Opt. Lett.* 13, 643 – 645 (1988)
4. 517 G. Robertson, A. Henderson, M. H. Dunn: *Opt. Lett.* 16, 1584 – 1586 (1991)
4. 518 G. Robertson, A. Henderson, M. H. Dunn: *Appl. Phys. Lett.* 62, 123 – 125 (1993)
4. 519 W. R. Bosenberg, L. K. Cheng, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 54, 13 – 15 (1989)
4. 520 F. G. Colville, M. Ebrahimzadeh, W. Sibbett, M. H. Dunn: *Appl. Phys. Lett.* 64, 1765 – 1767 (1994)
4. 521 H. Mao, B. Wu, C. Chen, D. Zhang, P. Wang: *Appl. Phys. Lett.* 62, 1866 – 1868 (1993)
4. 522 G. P. Banfi, R. Danielius, A. Piskarskas, P. Di Trapani, P. Foggi, R. Righini: *Opt. Lett.* 18, 1633 – 1635 (1993)
4. 523 I. M. Bayanov, V. M. Gordienko, M. S. Djidjoev, V. A. Dyakov, S. A. Magnitskii, V. I. Pryalkin, A. P. Tarasevitch: *Proc. SPIE* 1800, 2 – 17 (1991)

4. 524 S. A. Akhmanov, I. M. Bayanov, V. M. Gordienko, V. A. Dyakov, S. A. Magnitskii, V. I. Pryalkin, A. P. Tarasevich: Inst. Phys. Conf. Ser. No 126: Sect. I (IOP, Bristol), p. 67 – 70 (1992)
4. 525 K. Kato: IEEE J. QE – 26, 2043 – 2045 (1990)
4. 526 S. Lin, J. Y. Huang, J. Ling, C. Chen, Y. R. Shen: Appl. Phys. Lett. 59, 2805 – 2807 (1991)
4. 527 H. Zhou, J. Zhang, T. Chen, C. Chen, Y. R. Shen: Appl. Phys. Lett. 62, 1457 – 1459 (1993)
4. 528 M. Ebrahimzadeh, G. J. Hall, A. I. Ferguson: Opt. Lett. 17, 652 – 654 (1992)
4. 529 M. Ebrahimzadeh, G. J. Hall, A. I. Ferguson: Opt. Lett. 18, 278 – 280 (1993)
4. 530 G. J. Hall, M. Ebrahimzadeh, A. Robertson, G. P. A. Malcolm, A. I. Ferguson: J. Opt. Soc. Am. B10, 2168 – 2179 (1993)
4. 531 M. Ebrahimzadeh, G. J. Hall, A. I. Ferguson: Appl. Phys. Lett. 60, 1421 – 1423 (1992)
4. 532 G. J. Hall, A. I. Ferguson: Opt. Lett. 18, 1511 – 1513 (1993)
4. 533 M. J. McCarthy, S. D. Butterworth, D. C. Hanna: Opt. Commun. 102, 297 – 303 (1993)
4. 534 S. D. Butterworth, M. J. McCarthy, D. C. Hanna: Opt. Lett. 18, 1429 – 1431 (1993)
4. 535 F. G. Colville, A. J. Henderson, M. J. Padgett, J. Zhang, M. H. Dunn: Opt. Lett. 18, 205 – 207 (1993)
4. 536 F. G. Colville, M. J. Padgett, A. J. Henderson, J. Zhang, M. H. Dunn: Opt. Lett. 18, 1065 – 1067 (1993)
4. 537 F. G. Colville, M. J. Padgett, M. H. Dunn: Appl. Phys. Lett. 64, 1490 – 1492 (1994)
4. 538 F. Hanson, D. Dick: Opt. Lett. 16, 205 – 207 (1991)
4. 539 Y. Wang, Z. Xu, D. Deng, W. Zheng, B. Wu, C. Chen: Appl. Phys. Lett. 59, 531 – 533 (1991)
4. 540 J. Y. Zhang, J. Y. Huang, Y. R. Shen, C. Chen, B. Wu: Appl. Phys. Lett. 58, 213 – 215 (1991)
4. 541 Y. Cui, M. H. Dunn, C. J. Norrie, W. Sibbett, B. D. Sinclair, Y. Tang, J. A. C. Terry: Opt. Lett. 17, 646 – 648 (1992)
4. 542 Y. Cui, D. E. Withers, C. F. Rae, C. J. Norrie, Y. Tang, B. D. Sinclair, W. Sibbett, M. H. Dunn: Opt. Lett. 18, 122 – 124 (1993)
4. 543 H.-J. Krause, W. Daum: Appl. Phys. Lett. 60, 2180 – 2182 (1992)
4. 544 F. Huang, L. Huang: Appl. Phys. Lett. 61, 1769 – 1771 (1992)
4. 545 F. Huang, L. Huang, B.-I. Yin, Y.-N. Hua: Appl. Phys. Lett. 62, 672 – 674 (1993)
4. 546 G. Robertson, A. Henderson, M. H. Dunn: Appl. Phys. Lett. 60, 271 – 273 (1992)
4. 547 M. Ebrahimzadeh, G. Robertson, M. H. Dunn: Opt. Lett. 16, 767 – 769 (1991)

4. 548 Y. Tang, Y. Cui, M. H. Dunn: Opt. Lett. 17, 192 – 194(1992)
4. 549 J. T. Lin, J. L. Montgomery: Opt. Commun. 75, 315 – 320(1990)
4. 550 K. Kato: IEEE J. QE – 27, 1137 – 1140(1991)
4. 551 J. Chung, A. E. Siegman: J. Opt. Soc. Am. B 10, 2201 – 2210(1993)
4. 552 L. R. Marshall, A. Kaz: J. Opt. Soc. Am. B10, 1730 – 1736(1993)
4. 553 W. T. Lotshaw, J. R. Unternahrer, M. J. Kukla, C. I. Miyake, F. D. Braun: J. Opt. Soc. Am. B10, 2191 – 2194(1993)
4. 554 Ch. Gräser, D. Wang, R. Beigang, R. Wallenstein: J. Opt. Soc. Am. B 10, 2218 – 2221(1993)
4. 555 K. Kato, M. Masutani: Opt. Lett. 17, 178 – 179(1992)
4. 556 W. S. Pelouch, P. E. Powers, C. L. Tang: Opt. Lett. 17, 1070 – 1072(1992)
4. 557 A. Nebel, C. Fallnich, R. Beigang, R. Wallenstein: J. Opt. Soc. Am. B 10, 2195 – 2200(1993)
4. 558 W. Wang, M. Ohtsu: Opt. Lett. 18, 876 – 878(1993)
4. 559 Q. Fu, G. Mak, H. M. van Driel: Opt. Lett. 17, 1006 – 1008(1992)
4. 560 P. E. Powers, R. J. Ellingson, W. S. Pelouch, C. L. Tang: J. Opt. Soc. Am. B 10, 2162 – 2167(1993)
4. 561 G. Mak, Q. Fu, H. M. van Driel: Appl. Phys. Lett. 60, 542 – 544(1992)
4. 562 E. S. Wachman, D. C. Edelstein, C. L. Tang: Opt. Lett. 15, 136 – 138(1990)
4. 563 E. S. Wachman, W. S. Pelouch, C. L. Tang: J. Appl. Phys. 70, 1893 – 1895(1991)
4. 564 H. Vanherzele, J. D. Bierlein, F. C. Zumsteg: Appl. Opt. 27, 3314 – 3316(1988)
4. 565 S. T. Yang, R. C. Eckardt, R. L. Byer: Opt. Lett. 18, 971 – 973(1993)
4. 566 M. J. McCarthy, D. C. Hanna: Opt. Lett. 17, 402 – 404(1992)
4. 567 W. R. Bosenberg, D. R. Guyer: Appl. Phys. Lett. 61, 387 – 389(1992)
4. 568 D. Lee, N. C. Wong: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1659 – 1667(1993)
4. 569 M. Ebrahimzadeh, G. J. Hall, A. I. Ferguson: Opt. Lett. 16, 1744 – 1746(1991)
4. 570 M. J. McCarthy, D. C. Hanna: J. Opt. Soc. Am. B 10, 2180 – 2190(1993)
4. 571 L. R. Marshall, A. Kaz, O. Aytur: Opt. Lett. 18, 817 – 819(1993)
4. 572 P. E. Powers, S. Ramakrishna, C. L. Tang, L. K. Cheng: Opt. Lett. 18, 1171 – 1173(1993)
4. 573 M. G. Jani, J. T. Murray, R. R. Petrin, R. C. Powell, D. N. Loiacono, G. M. Loiacono: Appl. Phys. Lett. 60, 2327 – 2329(1992)
4. 574 S. A. Baryshev, V. I. Pryalkin, A. I. Kholodnykh: Pisma Zh. Tech. Fiz. 6, 964 – 967(1980) [English transl.: Sov. Tech. Phys. Lett. 6, 415 – 416(1980)]
4. 575 G. I. Onischukov, A. A. Fomichev, A. I. Kholodnykh: Kvantovaya Elektron. 10, 1525 – 1526(1983) [English transl.: Sov. J. Quantum Electron. 13, 1001 – 1002(1983)]

4. 576 A. Piskarskas, V. Smilgevičius, A. Umbrasas: *Opt. Commun.* 73, 322 – 324 (1989)
4. 577 A. Piskarskas, V. Smil¹ gyavichyus, A. Umbrasas: *Kvantovaya Elektron.* 17, 777 – 778 (1990) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 20, 701 – 702 (1990)]
4. 578 A. I. Kovrigin, P. V. Nikles: *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 13, 440 – 443 (1971) [English transl.: *JETP Lett.* 13, 313 – 315 (1971)]
4. 579 B. Bareika, G. Dikchyus, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis: *Kvantovaya Elektron.* 7, 2204 – 2206 (1980) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 10, 1277 – 1279 (1980)]
4. 580 W. R. Bosenberg, R. H. Jarman: *Opt. Lett.* 18, 1323 – 1325 (1993)
4. 581 V. A. Dyakov, V. I. Pryalkin, A. I. Kholodnykh: *Kvantovaya Elektron.* 8, 715 – 721 (1981) [English transl.: *Sov. J. Quantum Electron.* 11, 433 – 436 (1981)]
4. 582 K. Kato: *IEEE J. QE* – 18, 451 – 452 (1982)
4. 583 W. R. Donaldson, C. L. Tang: *Appl. Phys. Lett.* 44, 25 – 27 (1984)
4. 584 M. J. Rosker, C. L. Tang: *J. Opt. Soc. Am. B* 2, 691 – 696 (1985)
4. 585 M. J. Rosker, K. Cheng, C. L. Tang: *IEEE J. QE* – 21, 1600 – 1606 (1985)
4. 586 M. Ebrahimzadeh, M. H. Dunn, F. Akerboom: *Opt. Lett.* 14, 560 – 562 (1989)
4. 587 I. Ledoux, J. Zyss, A. Migus, J. Etchepare, G. Grillon, A. Antonetti: *Appl. Phys. Lett.* 48, 1564 – 1566 (1986)
4. 588 I. Ledoux, J. Badan, J. Zyss, A. Migus, D. Hulin, J. Etchepare, G. Grillon, A. Antonetti: *J. Opt. Soc. Am. B* 4, 987 – 997 (1987)
4. 589 D. Josse, S. X. Dou, J. Zyss, P. Andreazza, A. Perigaud: *Appl. Phys. Lett.* 61, 121 – 123 (1992)
4. 590 S. X. Dou, D. Josse, J. Zyss: *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 1708 – 1715 (1993)
4. 591 G. Robertson, M. H. Dunn: *Appl. Phys. Lett.* 62, 3405 – 3407 (1993)
4. 592 W. Kranitzky, K. Ding, A. Selmeier, W. Kaiser: *Opt. Commun.* 34, 483 – 487 (1980)
4. 593 T. Elsaesser, A. Seilmeier, W. Kaiser: *Opt. Commun.* 44, 293 – 296 (1983)
4. 594 B. Bareika, G. Dikchyus, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis: In *Proc. of 2nd Intl. Symp. on Ultrafast Phenomena in Spectroscopy*, Vol. 1, ed. by B. Wilhelmi (Physikalische Gesellschaft der DDR, Jena, GDR 1980) pp. 14 – 19
4. 595 T. Elsaesser, A. Seilmeier, W. Kaiser, P. Koidl, G. Brandt: *Appl. Phys. Lett.* 44, 383 – 385 (1984)
4. 596 H. J. Bakker, J. T. M. Kennis, H. J. Kop, A. Lagendijk: *Opt. Commun.* 86, 58 – 64 (1991)
4. 597 H.-J. Krause, W. Daum: *Appl. Phys. B* 56, 8 – 13 (1993)
4. 598 R. C. Eckardt, Y. X. Fan, R. L. Byer, C. L. Marquardt, M. E. Storm, L. Esterowitz: *Appl. Phys. Lett.* 49, 608 – 610 (1986)
4. 599 K. L. Vodopyanov, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, L. A. Kulevskii: *Izy. Akad.*

- Nauk SSSR, Ser. Fiz. 49, 569 – 572 (1985) [English transl. : Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser. 49 No. 3, 146 – 149 (1985)]
4. 600 K. L. Vodopyanov, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, L. A. Kulevskii: Kvantovaya Elektron. 14, 1815 – 1819 (1987) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 17, 1159 – 1161 (1987)]
 4. 601 R. L. Herbst, R. L. Byer: Appl. Phys. Lett. 21, 189 – 191 (1972)
 4. 602 A. A. Davydov, L. A. Kulevskii, A. M. Prokhorov, A. D. Savelev, V. V. Smirnov: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 15, 725 – 727 (1972) [English transl. : JETP Lett. 15, 513 – 514 (1972)]
 4. 603 A. A. Davydov, L. A. Kulevskii, A. M. Prokhorov, A. D. Savelev, V. V. Smirnov, A. V. Shirkov: Opt. Commun. 9, 234 – 236 (1973)
 4. 604 J. A. Weiss, L. S. Goldberg: Appl. Phys. Lett. 24, 389 – 391 (1974)
 4. 605 R. G. Wenzel, G. P. Arnold: Appl. Opt. 15, 1322 – 1326 (1976)
 4. 606 E. O. Amman, J. M. Yarborough: Appl. Phys. Lett. 17, 233 – 235 (1970)
 4. 607 D. C. Hanna, B. Luther-Davies, H. N. Rutt, R. C. Smith: Appl. Phys. Lett. 20, 34 – 36 (1972)
 4. 608 D. C. Hanna, B. Luther-Davies, R. C. Smith: Appl. Phys. Lett. 22, 440 – 442 (1973)
 4. 609 Y. X. Fan, R. C. Eckardt, R. L. Byer, R. K. Route, R. S. Feigelson: Appl. Phys. Lett. 45, 313 – 315 (1984)
 4. 610 P. A. Budni, M. G. Knights, E. P. Chicklis, K. L. Schepler: Opt. Lett. 18, 1068 – 1070 (1993)
 4. 611 K. L. Vodopyanov, Yu. A. Andreev, G. C. Bhar: Kvant. Elektr. 20, 879 – 881 (1993) [English transl. : Quant. Electron. 23, 763 – 765 (1993)]
 4. 612 K. L. Vodopyanov, L. A. Kulevskii, V. G. Voevodin, A. I. Gribenyukov, K. R. Alakhverdiev, T. A. Kerimov: Opt. Commun. 83, 322 – 326 (1991)
 4. 613 K. L. Vodopyanov: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1723 – 1729 (1993)
 4. 614 J. G. Haub, M. J. Johnson, B. J. Orr: J. Opt. Soc. Am. B 10, 1765 – 1777 (1993)
 4. 615 Y. Lu, Q. Zhao, Y. Li, H. He, Q. Zou, Z. Lu, Z. Geng: Opt. Eng. 32, 713 – 716 (1993)
 4. 616 I. A. Begishev, A. A. Gulamov, E. A. Erofeev, Sh. R. Kamalov, T. Usmanov, A. D. Khadzhaev: Kvantovaya Elektron. 17, 971 – 974 (1990) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 20, 889 – 891 (1990)]
 4. 617 M. K. Srivastava, R. W. Crow: Opt. Commun. 8, 82 – 84 (1973)
 4. 618 A. A. Muravev, A. N. Rubinov: Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 37, 597 – 599 (1983) [English transl. : JETP Lett. 37, 713 – 716 (1983)]
 4. 619 B. Bareika, A. Birmontas, G. Dikchyus, A. Piskarskas, V. Sirutkaitis, A. Stabinis:

- Kvantovaya Elektron. 9, 2534 – 2536 (1982) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 12, 1654 – 1656 (1982)]
4. 620 K. M. Pokhsrryan: Opt. Commun. 55, 439 – 441 (1985)
4. 621 A. J. Campillo, R. C. Hyer, S. L. Shapiro: Opt. Lett. 4, 357 – 359 (1975)
4. 622 P. B. Corkum, P. P. Ho, R. R. Alfano, J. T. Manassah: Opt. Lett. 10, 624 – 626 (1985)
4. 623 R. N. Gyuzalyan, D. H. Sarkisyan, M. L. Ter-Mikaelyan: Kvantovaya Elektron. 4, 1138 – 1140 (1977) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 7, 645 – 647 (1977)]
4. 624 D. H. Sarkisyan: Kvantovaya Elektron. 5, 928 – 930 (1978) [English transl. : Sov. J. Quantum Electron. 8, 535 – 536 (1978)]
4. 625 J. O. White, D. Hulin, M. Joffre, A. Migus, A. Antonetti, E. Toussaere, R. Hierle, J. Zyss: Appl. Phys. Lett. 64, 264 – 266 (1994)



附录 常用激光器的波长

波长以 μm 为单位

固体激光器

$\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 或红宝石激光器					0.694 3
$\text{Nd}:\text{YLF}$ 或 $\text{Nd}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 激光器	1.047 1,	1.053,	1.313,		1.321
$\text{Nd}:\text{YAG}$ 或 $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 激光器	1.064 2,	1.318 8,	1.338,		1.444
$\text{Nd}:\text{YAP}$ 或 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ 激光器			1.079 6,		1.341 4
Cr , Tm , $\text{Ho}:\text{YAG}$ 激光器					2.09
$\text{Dy}^{2+}:\text{CaF}_2$ 激光器					2.358 7
Cr , $\text{Er}:\text{YSGG}$ 激光器					2.79
$\text{Er}:\text{YAG}$ 激光器					2.937

气体激光器

N_2 激光器					0.337
Ar 激光器	0.454 5,	0.457 9,	0.465 8,	0.472 7,	0.476 5
	0.488 0,	0.496 5,	0.501 7,	0.514 5,	0.528 7
Kr 激光器	0.461 9,	0.476 2,	0.484 7,	0.520 8,	0.530 9
	0.568 2,	0.647 1,	0.676 4,	0.752 5,	0.799 3
$\text{He}-\text{Ne}$ 激光器	0.543 4,	0.594 5,	0.604 6,	0.611 8,	0.632 8
				1.152 3,	3.391 3

准分子激光器

ArF 激光器					0.193 3
------------------	--	--	--	--	---------

KrF 激光器	0.248 4
XeCl 激光器	0.308
XeF 激光器	0.351

蒸气激光器

He - Cd 激光器	0.325 0, 0.441 6
铜蒸气激光器	0.510 5, 0.578 2



名词索引

Absorption coefficient

—linear, *see relevant crystal and* 33, 58

—two-photon, *see relevant crystal*

8-(4-Acetylphenyl)-1,4-dioxo-8-

azaspiro[4.5]decane, *see* APDA

Active nonlinear crystals

ADA

ADP

Ag_3AsS_3

AgBr

Ag_3SbS_3

AgGaS_2

AgGaSe_2

Ammonium Dihydrogen Arsenate, *see*

ADA

Ammonium Dihydrogen Phosphate, *see*

ADP

Ammonium Oxalate, *see* AO

Angle

—of anisotropy

—azimuthal

—of birefringence

—of cut

吸收系数 32

线性吸收系数, 见相关晶体和 32, 58

双光子吸收系数, 见相关晶体

8-(4'-羧基苯)-1,4-二氧杂-8-氮

杂[4.5]癸烷, 见 APDA

活性非线性晶体 59

ADA 188—190, 301—303

ADP 83—89, 288—290, 296, 299—306,
310—314, 318, 325, 332—334, 336,
349—350

Ag_3AsS_3 157—161, 307—309

321, 323, 325, 327, 350—353

AgBr 355

Ag_3SbS_3 225—227, 307—309,
321—322

AgGaS_2 128—132, 306, 307—309
321—323, 350—352

AgGaSe_2 164—168, 275, 307—309
325—328, 350—352

砷酸二氢铵, 见 ADA

磷酸二氢铵, 见 ADP

草酸铵, 见 AO

角

各向异性角 26—33

方位角 7, 11, 13

双折射角 7, 22, 31

切角 8, 12

- of diffractive divergence
- incident
- polar
- of reflection
- of refraction
- “walk-off”
- “Angle-detuning” scheme
- Angular dispersive coefficient
- Angular phase-matching bandwidth
 - external
 - internal
- Angular tuning
 - of SFG
 - of SHG
- Anisotropy
- Anisotropy angle
- AO
- APDA
- Aperture function
- Aperture length
- L-Arginine Phosphate Monohydrate, *see* LAP
- Argon laser, *see* Lasers
- Asparagine
- Axis (and Axes)
 - crystallographic
 - dielectric
 - optic
- Azimuthal angle
- β -BaB₂O₄, *see* BBO
- Ba(COOH)₂
- BAMB
- “Banana”, *see* Ba₂NaNb₃O₁₅
- 衍射发散角 49
- 入射角 12
- 极角 6, 11, 13
- 反射角 12
- 折射角 12
- “走离角” 7, 15, 22, 26, 29, 33
56, 300, 310
- “角度失谐”方式 293
- 角色散系数 49, 51
- 相位匹配角度带宽 36, 39
- 相位匹配外角带宽 62
- 相位匹配内角带宽 36—39, 62
- 角度调谐 13, 39
- SFG 的角度调谐 41
- SHG 的角度调谐 40
- 各向异性 33, 44, 51, 55, 58
- 各向异性角 26, 33
- AO 242—244
- APDA 297—298
- 孔径函数 57
- 孔径长度 33, 56, 280
- 水合左旋磷酸精氨酸, 见 LAP
- 氩激光器, 见 激光器
- 天门冬氨酸 282
- 轴
- 晶体学轴 13, 23—24, 26
- 介电轴 13, 20—24, 26, 31
- 光轴 6—7, 8—9, 12—15, 20—21,
56
- 方位角 7, 11, 13
- β -BaB₂O₄, 见 BBO
- Ba(COOH)₂ 202—203
- BAMB 244—245
- “Banana”, 见 Ba₂NaNb₃O₁₅

$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

Barium Formate, *see* $\text{Ba}(\text{COOH})_2$

Barium Sodium Niobate, *see* $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

BBO

Beryllium Sulfate, *see* $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

$\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Beta-Barium Borate, *see* BBO

Biaxial crystal

—index surface of

—negative

—phase-matching angles in

—positive

—principal planes of

—principal values of refractive index

Birefringence

—temperature variation of, *see relevant crystal*

Birefringence angle

m-bis(aminomethyl)benzene, *see* BAMB

Breakdown threshold, *see* damage threshold

Bulk-damage threshold, *see relevant crystal and*

$\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, *see* L-CTT

CaCO_3

Cadmium Germanium Arsenide, *see* Cd-GeAs_2

Cadmium Selenide, *see* CdSe

$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ 215—218, 279, 281
285, 310, 333—334,
347, 350

甲酸钡, 见 $\text{Ba}(\text{COOH})_2$

铌酸钡钠, 见 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

BBO 89—97, 274, 279—280, 282,
286, 287—290, 296—298, 300—306,
310—312, 314—319, 325—327,
334, 339—342, 349—353, 356

硫酸铍, 见 $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

$\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 175—177, 288—289

偏硼酸钡, 见 BBO

双轴晶体 13—20, 22—30

双轴晶折射率面 13—14

负双轴晶 15, 20

双轴晶中的相位匹配角 15—20

正双轴晶 15, 20

双轴晶的主折射率面 13—15, 26—27

双轴晶折射率的主值 14, 15, 20, 27

双折射 6, 29, 57

双折射的温度变量, 见相关晶体

双折射角 7, 22, 31, 282

间-双(氨基)苯, 见 BAMB

破碎阈值, 见损伤阈值

体损伤阈值, 见相关晶体和 65

$\text{CaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 见 L-CTT

CaCO_3 289, 349

碲锗镉, 见 CdGeAs_2

硒化镉, 见 CdSe

- Calcium Tartrate Tetrahydrate, *see*
L-CTT
- CBO 174—175, 274
- CDA 36, 51, 145—148, 278, 280,
300, 334, 336
- CdGeAs₂ 171—173, 296—306,
308—309, 325—329
- CdS 355—356
- CdSe 168—170, 321, 323, 325,
329—330, 350—352
- Cesium Dihydrogen Arsenate, *see* CDA
- Cesium Titanyl Arsenate, *see* CTA
- Cesium Triborate, *see* CBO
- C₆H₄(NO₂)₂, *see* MDNB
- C₁₂H₂₂O₁₁, *see* Saccharose
- Cinnibar, *see* HgS
- CLBO 273
- COANP 255—257, 282—284
- Collinear phase matching 5, 9—11, 15, 16, 58
- CO(NH₂)₂, *see* Urea
- Conversion efficiency 转换效率
- of DFG DFG 的转换效率 45—46
- of SFG SFG 的转换效率 45—46
- Crystalline Quartz, *see* α-SiO₂
- Crystallographic coordinate system 晶体学坐标系 23—24
- Crystallographic reference frame 晶体学参考体系 23—24, 29
- CsB₃O₅, *see* CBO
- CsD₂AsO₄, *see* DCDA
- CsH₂AsO₄, *see* CDA
- CsTiOAsO₄, *see* CTA
- CTA 212—213
- L-CTT 241—242
- 2-cyclooctylamino-5-nitropyridine,
see COANP
- 四水合酒石酸钙, 见 L-CTT
- 硼酸二氢铯, 见 CDA
- 硼酸钛氧铯, 见 CTA
- 三硼酸铯, 见 CBO
- C₆H₄(NO₂)₂, 见 MDNB
- C₁₂H₂₂O₁₁, 见蔗糖
- 辰砂, 见 HgS
- 共线相位匹配 5, 9—11, 15, 16, 58
- CO(NH₂)₂, 见尿素
- DFG 的转换效率 45—46
- SFG 的转换效率 45—46
- 结晶石英, 见 α-SiO₂
- 晶体学坐标系 23—24
- 晶体学参考体系 23—24, 29
- CsB₃O₅, 见 CBO
- CsD₂AsO₄, 见 DCDA
- CsH₂AsO₄, 见 CDA
- CsTiOAsO₄, 见 CTA
- CTA 212—213
- L-CTT 241—242
- 2-环辛氨基-5-硝基吡啶, 见
COANP

Cubic nonlinear susceptibility

三阶非线性极化率(立方非线性极化率)

4—5

Cut angle

切角 8, 14

DADA

DADA 191—192, 300

DADP

DADP 179—180

Damage threshold, *see relevant crystal and* 59

损伤阈值, 见相关晶体和 59

—of bulk, *see relevant crystal and*

体损伤阈值, 见相关晶体和 58

—of surface, *see relevant crystal and*

表面损伤阈值, 见相关晶体和 58

DAN

DAN 260—262, 283, 284

DCDA

DCDA 36, 148—151, 279,
280—282, 291, 300

Deuterated Ammonium Dihydrogen Arse-
nate, *see* DADA

氘化磷酸二氢铵, 见 DADA

Deuterated Ammonium Dihydrogen Phos-
phate, *see* DADP

氘化磷酸二氢铵, 见 DADP

Deuterated L-Arginine Phosphate Mo-
nohydrate, *see* DLAP

氘化一水合左旋磷酸精氨酸, 见
DLAP

Deuterated Cesium Dihydrogen Arsenate,
see DCDA

氘化砷酸二氢铯, 见 DCDA

Deuterated 4-nitrophenol sodium salt
dihydrate, *see* DNPNa

氘化二水合4-硝基苯钠盐, 见
DNPNa

Deuterated Potassium Dihydrogen Arse-
nate, *see* DKDA

氘化砷酸二氢钾, 见 DKDA

Deuterated Potassium Dihydrogen Phos-
phate, *see* DKDP

氘化磷酸二氢钾, 见 DKDP

Deuterated Potassium Pentaborate Tetra-
hydrate, *see* DKB5

氘化四水合五硼酸钾, 见 DKB5

Deuterated Rubidium Dihydrogen Arse-
nate, *see* DRDA

氘化砷酸二氢铷, 见 DRDA

Deuterated Rubidium Dihydrogen Phos-
phate, *see* DRDP

氘化磷酸二氢铷, 见 DRDP

- DFG 4, 6, 15, 39, 45—47, 324—332
 介电坐标体系 23—26, 29
 介电极化 6
 介电参考系 20, 22—23, 29
 介电不渗透性(介电极化率) 4, 9, 20, 31
 差频 4
 差频发生, 见 DFG
- Difference frequency
 Difference-frequency generation, *see* DFG
- Diffraction
 Diffractive divergence angle
 Diffraction length
 Diffractive spreading
- 4-(N, N-dimethylamino)-3-acetamidonitrobenzene, *see* DAN
- m-dinitrobenzene, *see* MDNB
- Dispersive birefringence
 Dispersive spreading
 Dispersive spreading length
 Disrupted surface layer
 Divergence
- DKB5
 DKDA
 DKDP
- DLAP
 DNPNa
 Doubly-resonant optical parametric oscillation, *see* DROPO
 Down-conversion
 DRDA
- 衍射 33—34, 44, 51, 55—56
 衍射发散角 49, 57
 衍射长度 33
 衍射传播 33—34
- 4-(N, N 双甲基)3-乙酰氨基苯, 见 DAN^{*}
 间双硝基苯, 见 mDNB[△]
 色散双折射 32
 色散传播 31, 33, 34, 51, 55
 色散传播长度 33, 53
 阻挡表面层 58
 发散 49, 57
- DKB5 173—174, 300—304
 DKDA 188, 300—301
 DKDP 78—83, 278, 281—282, 286—288, 296, 300, 307, 324—325, 332—335, 353
- DLAP 237—239, 282—284, 334, 348
 DNPNa 283—284
 双共振光学参量振荡, 见 DROPO
- 下转换 324—332
 DRDA 195—197

* 译者注: 文中为 2-(N, N 双甲基)3-乙酰氨基苯, 在化学上 2, 4 位相同, 以 2 为更好。

△ 译者注: 原文为“MDNB”, 按照化学命名法应为“mDNB”。

DRDP
DROPO

DRDP 185
DROPO 350

Effective length
Effective nonlinearity, *see relevant crystal*
and 20—30, 45

有效长度 33—34
有效非线性, 见相关晶体和 20—30, 45

ERR
External resonant cavity
External ring resonator, *see* ERR
Extraordinary beam

ERR 297
外共振腔 285
外置环形共振腔, 见 ERR
非寻常光 6

Fast wave
FIHG
Fifth-harmonic generation, *see* FIHG
Fixed-field approximation

快波(光) 14, 16, 23, 26
FIHG 4, 289, 290, 307
五次谐波发生, 见 FIHG
固定场近似 34, 36, 44—47,
51—53, 57

Fixed-intensity approximation

固定强度近似 51—54

F_2^+ : LiF

F_2^+ : LiF 349

FMA

FMA 248—249

FOHG

FOHG 4, 288, 307

Four-frequency interaction

四频相互作用 5

Four-photon parametric interaction

四光子参量相互作用 290

Four-photon parametric process

四光子参量过程 290

Four-wave interaction

四波相互作用 5

Fourth-harmonic generation *see* FOHG

四次谐波发生, 见 FOHG

Free-carrier generation, *see* FCG

自由载流子产生, 见 FCG

Frequency generation

频率发生

—difference, *see* DFG

差频发生, 见 DFG

—sum, *see* SFG

和频发生, 见 SFG

Fructose

果糖 282

Fundamental frequency

基频 47—48, 50—51, 56

Fundamental radiation

基频辐射 51, 56

Fundamental wave depletion

基频波耗尽 47—48

2-Furil Methacrylic Anhydride, *see*
FMA

Galactose

Gallium Selenide, *see* GaSe

GaAs

GaSe

Group-velocity matching

Group-velocity mismatch

Hardness

—Knoop, *see relevant crystal*

—Mohs, *see relevant crystal*

—Vickers, *see relevant crystal*

Harmonic generation

—fifth, *see* FIHG

—fourth, *see* FOHG

—second, *see* SHG

—sixth, *see* SIHG

—third, *see* THG

Heat mismatch

HgGa₂S₄

HgS

α -HIO₃

ICSFG

ICSHG

Idler frequency

Idler radiation

Incident angle

2-呋喃异丁烯酸酐, 见 FMA

半乳糖 282

硒化镓, 见 GaSe

GaAs 331, 355

GaSe 161—164, 308—309, 321,
323—335, 328, 330, 350, 352

群速匹配 53, 55

群速失配 33—34, 51, 54—55,
310—311

硬度

诺氏硬度, 见相关晶体

莫氏硬度, 见相关晶体

维氏硬度, 见相关晶体

谐波发生

五次谐波发生, 见 FIHG

四次谐波发生, 见 FOHG

二次谐波发生, 见 SHG

六次谐波发生, 见 SIHG

三次谐波发生, 见 THG

热失配 32

HgGa₂S₄ 221—223, 321, 323, 324

HgS 223—225, 308—309, 321, 323

α -HIO₃ 207—210, 334, 347—350,
353—354

ICSFG 303

ICSHG 59, 284—285, 291, 297,
302—303, 306—307, 310—311,
349, 353

闲频 9

闲频辐射 9

入射角 12

- Index surface
- Injection seeding
- Intracavity SFG, *see* ICSFG
- Intracavity SHG, *see* ICSHG
- Inverse group-velocity mismatch, *see*
relevant crystal and 33
- α -Iodic Acid, *see* α -HIO₃
- KB5
- KB₃O₈ · 4D₂O, *see* DKB5
- KB₃O₈ · 4H₂O, *see* KB5
- K₂Ce(NO₃)₅ · 2H₂O, *see* KCN
- KCN
- KDA
- KD₂AsO₄, *see* DKDA
- KDP
- KD₂PO₄, *see* DKDP
- KH₂AsO₄, *see* KDA
- KH₂PO₄, *see* KDP
- K₂La(NO₃)₅ · 2H₂O, *see* KLN
- Kleinman symmetry relations
- K₃Li₂Nb₅O₁₅
- KLN
- KNbO₃
- KTA
- KTiOAsO₄, *see* KTA
- KTiOPO₄, *see* KTP
- 折射率面 7, 13—14
- 注射种籽 333
- 腔内 SFG, 见 ICSFG
- 腔内 SHG, 见 ICSHG
- 逆群速失配, 见相关晶体和 33
- α -碘酸, 见 α -HIO₃
- KB5 138—142, 288—291, 296,
300—302, 303—308, 312,
316—318, 320, 353
- KB₃O₈ · 4D₂O, 见 DKB5
- KB₃O₈ · 4H₂O, 见 KB5
- K₂Ce(NO₃)₅ · 2H₂O, 见 KCN
- KCN 218—220
- KDA 185—188
- KD₂AsO₄, 见 DKDA
- KDP 48, 55, 71—78, 278, 281—282,
286—296, 300—301, 303—308,
318, 324—325, 334—335,
349—356
- KD₂PO₄, 见 DKDP
- KH₂AsO₄, 见 KDA
- KH₂PO₄, 见 KDP
- K₂La(NO₃)₅ · 2H₂O, 见 KLN
- Kleinman 对称关系 21—23, 27—30
- K₃Li₂Nb₅O₁₅, 220—221
- KLN 210—212
- KNbO₃ 122—128, 279, 286,
297—302, 310, 332—334, 348,
350, 353
- KTA 151—154, 275, 334, 347
- KTiOAsO₄, 见 KTA
- KTiOPO₄, 见 KTP

KTP

—hydrothermally grown

—flux-grown

Lactose

Lasers

—alexandrite

—argon

— $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$

—CO

— CO_2

—copper-vapor

—DF

—dye

— $\text{Er}^{3+} : \text{YLF}$

Lasers (Contd.)

—GaAlAs

—gas

—He-Ne

—HF

—Ho: YLF

—iodine

—Krypton

— $\text{Nd}^{3+} : \text{CaWO}_4$

— $\text{Nd}^{3+} : \text{NdP}_2\text{O}_{14}$

—Nd: YAG

KTP 103—114, 275, 345—346,
281, 285—286, 296—297, 299,
303, 305, 321, 327, 330, 333—334,
345—347, 349—350, 353

KTP 水热生长 105—108, 110—111

KTP 熔盐生长 105, 107—114

乳糖 282

激光器

金绿宝石激光器 310

氩离子激光器 303, 306, 319, 416

$\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ 351, 415

CO 激光器 306—307, 324

CO_2 激光器 308—309, 312, 321,
324, 329, 330, 355

铜蒸气激光器 310, 416

DF 激光器 310

染料激光器 299—303, 311—317,
321—333, 356

$\text{Er}^{3+} : \text{YLF}$ 310

激光器

GaAlAs 激光器 297

气体激光器 306—307

He-Ne 激光器 306, 319, 320—321,
324, 416

HF 激光器 310, 351

Ho: YLF 激光器 351

碘激光器 307

氪激光器 321, 416

$\text{Nd}^{3+} : \text{CaWO}_4$ 激光器 278

$\text{Nd}^{3+} : \text{NdP}_2\text{O}_{14}$ 激光器 310

Nd: YAG 激光器 278—282, 285,
286—290, 311—316, 319—321,
324—330, 333, 349—351, 353,
415

- Nd³⁺:YAlO₃
- Nd³⁺:LiYF₄
- neodymium glass
- NH₃
- nitrogen
- ruby
- semiconductor
- SOAP:Ho
- Ti:sapphire
- XeCl

- LAP
- LBO

- LFM

- LiB₃O₅, see LBO
- LiCOOH · H₂O, see LFM
- LiGaO₂
- LiIO₃

- LiNbO₃
- from congruent melt
- from stoichiometric melt

- Nd³⁺:YAlO₃ 激光器 278, 285, 288, 290, 333, 349, 415
- Nd³⁺:LiYF₄ 激光器 291, 295, 333, 350, 415
- 钕玻璃激光器 278, 288, 291—293, 330, 349, 355
- NH₃ 激光器 306—307
- 氮激光器 415
- 红宝石激光器 296, 319, 321, 330
- 半导体激光器 297
- SOAP:Ho 激光器 310
- 钛宝石激光器 297, 330, 333, 349
- XeCl 激光器 312, 324, 334, 416

- LAP 235—237
- LBO 62—71, 274, 280, 282, 286—287, 291, 297—298, 310—312, 314—316, 319, 332, 334, 342—345, 350, 353
- LFM 197—200, 297, 287—289, 299—304
- LiB₃O₅, 见 LBO
- LiCOOH · H₂O, 见 LFM
- LiGaO₂ 206—207
- LiIO₃ 55—56, 97—103, 278—282, 285—287, 291, 296—301, 303—304, 306—307, 310, 319—320, 324—326, 329—331, 334—339
- LiNbO₃ 35, 55, 114—122, 278—282, 285, 296—301, 303—304, 306, 319—321, 325—326, 329—334, 337—339, 350—351, 353—356
- 同成分熔体生长 LiNbO₃ 116—121, 282
- 化学计量比熔体生长 LiNbO₃ 116—121

- lithium-rich
- MgO-doped
- Linear absorption
- Linear absorption coefficient, *see relevant crystal and* 33, 58
- Lithium Formate Monohydrate, *see* LFM
- Lithium Gallium Oxide, *see* LiGaO₂
- Lithium Iodate, *see* LiIO₃
- Lithium Niobate, *see* LiNbO₃
- Lithium Triborate, *see* LBO
- Magnesium Barium Fluoride, *see* MgBaF₄
- Magnesium-Oxide-Doped Lithium Niobate, *see* MgO:LiNbO₃
- Maltose
- MAP
- Mass density, *see relevant crystal* MDNB
- Mercury Thiogallate, *see* HgGa₂S₄
- Methyl-(2,4-dinitrophenyl)-aminopropanoate, *see* MAP
- 3-methyl-4-methoxy-4-nitrostilbene, *see* MMONS
- 2-Methyl-4-Nitroaniline, *see* MNA^{*}
- 3-methyl-4-nitropyridine-1-oxide, *see* POM
- 3-methoxy-4-hydroxy-benzaldehyde, *see* MH-BA
- MgBaF₄
- MgO: LiNbO₃
- MHBA
- 富锂 LiNbO₃ 115, 117—119, 287
- MgO 掺杂 LiNbO₃ 154—157, 281—286, 333, 350
- 线性吸收 31, 33, 44, 51, 58
- 线性吸收系数, 见相关晶体和 33, 58
- 甲酸锂—水合物, 见 LFM
- 镓酸锂, 见 LiGaO₂
- 碘酸锂, 见 LiIO₃
- 铌酸锂, 见 LiNbO₃
- 三硼酸锂, 见 LBO
- 氟化钙镁, 见 MgBaF₄
- 氧化镁掺杂铌酸锂, 见 MgO: LiNbO₃
- 麦芽糖 282
- MAP 29, 262—264, 282—283
- 密度, 见相关晶体
- MDNB 259, 260, 282—283
- 硫镓汞, 见 HgGa₂S₄
- 甲基-(2,4-硝基苯)-氨基丙酮, 见 MAP
- 3-甲基-4-甲氧基-4'-硝基苯, 见 MMONS
- 2-甲基-4-硝基苯胺, 见 MNA^{*}
- 3-甲基-4-硝基吡啶-1-氧化物, 见 POM
- 3-甲氧基-4-羟基-苯甲醛, 见 MH-BA
- MgBaF₄ 178—179
- MgO: LiNbO₃ 154—157, 281—286, 333, 350
- MHBA 245—247, 283—284, 297—298

MMONS

MNA

MNA^{*}

NaCOOH

NaNO₂

NH₄D₂AsO₄, *see* DADA

ND₄D₂PO₄, *see* DADP

(NH₄)₂C₂O₄ · H₂O, *see* AO

NH₄H₂AsO₄, *see* ADA

NH₄H₂PO₄, *see* ADP

m-nitroaniline, *see* MNA

4-nitrophenol sodium salt dihydrate, *see*
NPNa

N-(4-nitrophenyl)-N-methylami-
noacetonitrile, *see* NPAN

N-(4-nitrophenyl)-L-prolinol,
see NPP

L-N-(5-nitro-2-pyridyl)
leucinol, *see* NPLO

5-nitrouracil, *see* 5NU

Noncollinear phase matching

Noncritical phase matching, *see* 90°
phase matching

Nonlinear absorption

Nonlinear coefficient, *see relevant crys-
tal*

Nonlinear coupling coefficient

Nonlinear interaction length

Nonlinear susceptibility coefficients

NPAN

MMONS 269—270

mNA^Δ 264—266, 282—283

MNA^{*} 282, 284, 356

NaCOOH 200, 201, 287

NaNO₂ 213—215

NH₄D₂AsO₄, 见 DADA

ND₄D₂PO₄, 见 DADP

(NH₄)₂C₂O₄ · H₂O, 见 AO

NH₄H₂AsO₄, 见 ADA

NH₄H₂PO₄, 见 ADP

间硝基苯胺, 见 mNA

四硝基酚钠盐二水合物, 见 NPNa

N-(4-硝基苯)-甲基氨丙酮腈,
见 NPAN

N-(4-硝基苯)-L-脯氨酸, 见
NPP

L-N-(5-硝基-2-吡啶基)亮氨
酸, 见 NPLO

5-硝基腺嘧啶, 见 5NU

共线相位匹配 5, 9, 12, 58

非临界相位匹配, 见 90°相位匹配

非线性吸收 31—33, 44, 51, 58

非线性系数, 见相关晶体

非线性耦合系数 22, 31, 33

非线性相互作用长度 33

非线性极化系数 4

NPAN 266—267, 283—284

Δ 译者注: 原文为 "MNA", 按照化学命名法应为 "mNA".

NPLO

NPNa

NPP

5NU

NPLO 257—259, 283—284

NPNa 283—284

NPP 267—269, 334, 348

5NU 257—259

OPA

OPO

—doubly-resonant

—resonant

—singly-resonant

—synchronously-pumped

—traveling wave

Optic axis

Optical activity, *see relevant crystal* "Optical damage"

Optical indicatrix

Optical parametric oscillation, *see* OPO

Optical rectification

Optimal focusing

Ordinary beam

OPA 333

OPO 4, 9, 58, 311, 317, 321, 329, 332—353

双共振 OPO 333

共振 OPO 333

单共振 OPO 333

同步泵浦 OPO 333

行波 OPO 333—334, 349

光轴 6—7, 8—9, 12—15, 20—21, 56

旋光性, 见相关晶体

"光学损伤" 281

光率体(光学折射率面) 22

光学参量振荡, 见 OPO

光学整流 4

最佳聚焦 58

寻常光 6

Parameter of focusing

Parametric luminescence

L-PCA

Phase matching

—angle of

—bandwidth

—collinear

—noncollinear

—noncritical, *see* 90° phase matching

聚焦参数 57—58

参量发光 4, 9, 59

L-PCA 239—241, 283—284

相位匹配 5—6, 9—12, 15—20, 36—44, 55

相位匹配角 11—12, 16—20

相位匹配带宽 36—44

共线相位匹配 5, 9—11, 15—16, 58

非共线相位匹配 5, 9, 12, 58

非临界相位匹配, 见 90°位相匹配

- scalar
- of type I
- of type II
- vector
- 90°-phase-matching
- Phase-matching angle, *see relevant crystal and* 11—12, 16—20
- temperature variation of, *see relevant crystal*
- Phase-matching bandwidth
 - angular
 - internal angular, *see relevant crystal and* 36—39, 62
 - external angular
 - spectral, *see relevant crystal and* 36, 39—41, 310
 - temperature, *see relevant crystal and* 36—39
- Phase-matching conditions
- Phase-matching direction
- Photorefraction
- Photorefractive effect
- Picosecond continuum generation
- Plane-wave approximation
- PNP
- Point group, *see relevant crystal and* 23—30
- Polar angle
 - "Polarization-bypass" scheme
 - "Polarization-mismatch" scheme
- Polarization vector
- 标量相位匹配 9—11, 55
- I 类相位匹配 9—11, 15—16, 29—30, 55—56
- II 类相位匹配 9—11, 15—16, 29—30, 55—56
- 矢量相位匹配 9—11, 57
- 90°相位匹配 38—39, 57
- 相位匹配角, 见相关晶体和 11—12, 16—20
- 相位匹配角的温度变量, 见相关晶体
- 相位匹配带宽 36—44
- 相位匹配的角度带宽 36—39, 310
- 相位匹配的内角带宽, 见相关晶体和 36—39, 62
- 相位匹配的外角带宽 62
- 相位匹配的光谱带宽, 见相关晶体和 36, 39—41, 310
- 相位匹配的温度带宽, 见相关晶体和 36, 39
- 相位匹配条件 5—6, 9, 15
- 相位匹配方向 9, 11, 15, 32, 45, 49
- 光折变 32, 51
- 光折变效应 32, 34, 281
- 皮秒连续谱发生 354—356
- 平面波近似 34, 44—47, 49, 51—53, 57
- PNP 245—255
- 点群, 见相关晶体和 23—30
- 极角 6, 11, 13
- "偏振旁通" 方式 293
- "偏振失配" 方式 293, 307
- 极化矢量 4, 21—23

POM

Potassium Cerium Nitrate Dihydrate,
see KCN

Potassium Dihydrogen Arsenate, *see*
KDA

Potassium Dihydrogen Phosphate, *see*
KDP

Potassium Lanthanum Nitrate Dihydrate,
see KLN

Potassium Lithium Niobate, *see*
 $K_3Li_2Nb_5O_{15}$

Potassium Niobate, *see* $KNbO_3$

Potassium Pentaborate Tetrahydrate *see*
KB5

Potassium Titanyl Arsenate, *see* KTA

Potassium Titanyl Phosphate, *see* KTP

Principal plane (or planes)

Principal values of refractive index

2-(N-Prolinol) -5-nitropyridine,
see PNP

Proustite, *see* Ag_3AsS_3

Pyrargyrite, *see* Ag_3SbS_3

L-Pyrrolidone-2-carboxylic Acid,
see L-PCA

Pump depletion

Pump frequency

Pump radiation

"Quadrature" scheme

Quality parameter

Quantum conversion efficiency

—of DFG

—of SFG

Quartz, *see* $\alpha-SiO_2$

Quasi-static interaction length

POM 249—251, 282—283

二水合硝酸铈钾, 见 KCN

砷酸二氢钾, 见 KDA

磷酸二氢钾, 见 KDP

二水合硝酸镧钾, 见 KLN

铌酸锂钾, 见 $K_3Li_2Nb_5O_{15}$

铌酸钾, 见 $KNbO_3$

四水合五硼酸钾, 见 KB5

砷酸钛氧钾, 见 KTA

磷酸钛氧钾, 见 KTP

主平面 6, 13—16, 26—31

主折射率值 6, 14, 16, 27

2-(N-脯氨酸) -5-硝基吡啶, 见
PNP

淡红银矿, 见 Ag_3AsS_3

锑砷银矿, 见 Ag_3SbS_3

左旋吡咯烷酮-2-羧酸, 见 L-PCA

泵浦亏损 333—349

泵浦频率 9

泵浦辐射 9

"正交" 方式 295—296

品质因子 46

量子转化效率 46—47

DFG 的量子转化效率 46—47

SFG 的量子转化效率 46—47

石英, 见 $\alpha-SiO_2$

准静态相互作用长度 33, 35

RbD_2AsO_4 , *see* DRDA

RbD_2PO_4 , *see* DRDP

RbH_2AsO_4 , *see* RDA

RbH_2PO_4 , *see* RDP

RDA

RDP

Reflection angle

Reflection coefficient

Refraction angle

Refractive indices

—experimental values, *see relevant crystal*

—temperature dependences, *see relevant crystal*

—temperature derivatives, *see relevant crystal*

RTA

Rubidium Dihydrogen Arsenate, *see*
RDA

Rubidium Dihydrogen Phosphate, *see*
RDP

Saccharose

Scalar phase matching

Se

Second harmonic

Second-harmonic generation, *see* SHG

Selenium. *see* Se

Self-focusing

—critical power of

Sellmeier equations, *see relevant crystal*

—temperature-dependent, *see relevant crystal*

RbD_2AsO_4 , 见 DRDA

RbD_2PO_4 , 见 DRDP

RbH_2AsO_4 , 见 RDA

RbH_2PO_4 , 见 RDP

RDA 192—195, 279, 287,
296, 300

RDP 181—184, 279, 287, 296,
300—301, 303

反射角 12

反射系数 12, 13

折射角 12—13

折射率

折射率的实验值, 见相关晶体

折射率的温度关系, 见相关晶体

折射率的温度微商, 见相关晶体

RTA 275

砷酸二氢铷, 见 RDA

磷酸二氢铷, 见 RDP

蔗糖 233—234, 282—283

标量相位匹配 9—11

Se 227—228, 308—309

二次谐波 4

二次谐波发生, 见 SHG

硒, 见 Se

自聚焦 32

自聚焦的临界能量 32

Sellmeier 方程, 见相关晶体

Sellmeier 方程的温度关系, 见相关
晶体

SFG

- angular bandwidth
- angular tuning of phase matching
- conversion efficiency
- quantum conversion efficiency
- spectral bandwidth
- temperature bandwidth
- temperature tuning of phase matching

SHG

- angular bandwidth
- angular tuning of phase matching
- conversion efficiency
- nonlinear regime of
- spectral bandwidth
- temperature bandwidth
- temperature tuning of phase matching

Signal frequency

Signal radiation

SIHG

Silver Gallium Selenide, *see* AgGaSe₂

Silver Thiogallate, *see* AgGaS₂

Singly-resonant optical parametric oscillation, *see* SROPO

α -SiO₂

Sixth-harmonic generation, *see* SIHG

Slowly varying amplitudes

Slow wave

Sodium Formate, *see* NaCOOH

Sodium Nitrite, *see* NaNO₂

Spectral phase-matching bandwidth

Sr(COOH)₂

SFG 4—6, 9, 15, 33, 39—40,
44—47, 55, 59, 311—324, 356

SFG 的角度带宽 36—39

SFG 相位匹配的角度调谐 39, 41—42

SFG 的转换效率 44—46

SFG 的量子转换效率 46—47

SFG 的光谱带宽 36, 40

SFG 的温度带宽 36, 39

SFG 相位匹配的温度调谐 39,
43—44

SHG 4—6, 10, 15, 20, 33, 39—40,
44—46, 49—53, 55—59, 276—286,
291—311, 352—353, 356

SHG 的角度带宽 36—39

SHG 相位匹配的角度调谐 39—41

SHG 的转换效率 44—46

SHG 的非线性方式 47—49

SHG 的光谱带宽 36, 39

SHG 的温度带宽 36, 38

SHG 相位匹配的温度调谐 42

单频 9

单辐射 9

SIHG 4, 307

硒镓银, 见 AgGaSe₂

硫镓银, 见 AgGaS₂

单共振光学参量振荡, 见 SROPO

α -SiO₂ 270—273, 331

六次谐波发生, 见 SIHG

慢变振幅 30

慢波 14, 16, 23, 26

甲酸钠, 见 NaCOOH

亚硝酸钠, 见 NaNO₂

相位匹配的光谱带宽 36—41

Sr(COOH)₂ 203—204

- $\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 SROPO
 SRS
 Strontium Formate, *see* $\text{Sr}(\text{COOH})_2$
 Strontium Formate Dihydrate, *see*
 $\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 Sucrose, *see* Saccharose
 Sum frequency
 Sum-frequency generation, *see* SFG
 Surface-damage threshold, *see relevant crystal and* 58
- T-17
 TAS
 Te
 Tellurium, *see* Te
 Temperature-dependent Sellmeier equations, *see relevant crystal*
 Temperature phase-matching bandwidth
 Temperature tuning of SFG
 Temperature tuning of SHG
 Temporary modulation
 Tensor
 —of linear dielectric polarization
 —of square nonlinearity
 Thallium Arsenic Selenide, *see* TAS
 Thermal conductivity coefficient, *see relevant crystal and* 32
 Thermal conductivity equation
 Thermal self-actions
 THG
 Thienylchalcone, *see* T-17
- $\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 204—206
 SROPO 333
 SRS 312, 334, 353—355
 甲酸锶, 见 $\text{Sr}(\text{COOH})_2$
 二水合甲酸锶, 见 $\text{Sr}(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 蔗糖, 见 Saccharose
 和频 4, 8—9
 和频发生, 见 SFG
 表面损伤阈值, 见相关晶体和 58
- T-17 251—252
 TAS 228—230, 307, 309
 Te 230—233, 306, 307, 309, 325, 329
 碲, 见 Te
 Sellmeier 方程的温度关系, 见相关晶体
 相位匹配的温度带宽 36—40
 SFG 的温度调谐 39, 43—44
 SHG 的温度调谐 42
 瞬时调制 33
 张量
 线性介电极化张量 20
 二阶非线性张量 21
 碲砷硒, 见 TAS
 热导率, 见相关晶体和 32
 热导方程 32, 35—36
 热自作用 31—32, 35
 THG 4, 286, 287—288, 289—296, 309, 314
 噻嗯查耳酮, 见 T-17

Third-harmonic generation, *see* THG
Three-frequency interactions
Three-wave interactions
 Ti_3AsSe_3 , *see* TAS
Travelling-wave optical parametric oscillation, *see* TWOPO
Transparency range, *see relevant crystal*
Truncated equations
Tryptophan
Type I phase matching
Type II phase matching
Two-photon absorption
Two-photon absorption coefficient, *see relevant crystal*
TWOPO

Uniaxial crystal
—cut angle of
—index surface of
—negative
—orientation
—positive
Up-conversion
Up-converter
Urea

Vector phase matching

"Walk-off" angle

三次谐波发生, 见 THG
三频相互作用 3—4, 16
三波相互作用 3—5, 11, 26
 Ti_3AsSe_3 , 见 TAS
行波光学参量振荡, 见 TWOPO
透明范围, 见相关晶体
主干方程 30, 35—36, 53, 55
色氨酸 282
I类相位匹配 8—11, 15—16, 24—25, 29—31, 49, 55—56
II类相位匹配 9—11, 15—16, 24—25, 55—56
双光子吸收 31—32, 58
双光子吸收系数, 见相关晶体
TWOPO 333—334, 349

单轴晶体 6—13, 20—22, 55
单轴晶体的切角 8—12
单轴晶体的折射率面 7
负单轴晶体 7—11, 22
单轴晶体的取向 8
正单轴晶体 7—8, 15, 22
上转换 312—324
上转换器件 58
尿素 142—145, 282, 289—290, 302—304, 334, 348, 352

矢量相位匹配 9—11, 57—58

"走离"角 7, 15, 22, 26, 29, 33, 56, 281, 299—300, 310—311

Zinc Germanium Phosphide, *see* ZnGeP_2
 ZnGeP_2

ZnSe

ZnTe

磷锗锌, 见 ZnGeP_2

ZnGeP_2 132—138, 307—309, 321,
323, 332, 350—352

ZnSe 332, 355

ZnTe 331—332



译者后记

功能晶体研究是功能材料研究中的一个热点和前沿领域。在我国晶体生长有着悠久的历史 and 传统。我国现代的晶体生长研究工作自 20 世纪 50 年代后期开始,从模仿和跟踪国际新晶体和有用晶体的生长起步。到 80 年代初,以偏硼酸钡(β -BBO)晶体的发现、生长和应用为标志,我国的功能晶体,特别是非线性光学晶体的探索和研究走上了独立自主、创新发展的道路。近 30 年来,各种新的、有实用意义的非线性光学晶体在我国涌现,并成为国际公认具有领先水平材料领域。

非线性光学的基本参数是晶体研究工作的结果,同时又是晶体应用的基础。由于各种晶体的研究成果发表于全世界各种不同的学术刊物,同一晶体的性质,不同研究者获得的结果又各有差异(由于晶体质量和测试条件的差异),因此,获得系统、可靠的晶体基本性质资料是从从事晶体研究和应用的科技工作者共同的愿望。

本人长期从事功能晶体的生长工作,非常了解朋友和同事们的需求。我于 1998 年在美国访问工作时,第一次看到刚出版的《非线性光学晶体手册》(第二版)时,就有马上购买的欲望。当回到中国,这本书就被同事和学生们辗转借阅,不知所终。好在 1999 年此书又有第三版,当我得到这一版后又有不少人借阅。于是我想,既然这本书在中国这么受欢迎,把它译成中文在国内出版,岂不是一方面扩大了这本书的流通范围,另一方面又为我国读者提供了更大方便?

自从有了这一想法,我也一直想抽时间动手将其译成中文。但无奈此心虽有,空闲却无。直到人过六十,一些杂事从身上卸下,终于有了动手的机会。而当翻译《非线性光学晶体手册》之时,又见到新版的《非线性光学晶体——一份完整的总结》一书。虽然两书出版时间有先后,但各有特色、相互补充,可谓珠联璧合。于是我将两本书一起译成了中文,又由老友吴以成院士进行校对。

虽然文字翻译工作完成,未曾想更为繁杂的工作接踵而来。看来手册类的著作不同于其他著作,手册中充满着各种数据,由各类不同符号和数字构成,这是手册的主体和精髓。打印、编辑、校对,处处小心,处处仔细,但极易出错!故从文字到数字,一遍遍地整理、校对。我和吴以成院士曾数遍重改全

稿，激光的相关理论部分由何京良教授校读，我们的助手和学生姚淑华、张建新、张素芳、郭永解、张娜娜、韩树娟、李真、秦海明、任娜等几次反复校对所有数据符号。我们希望将本书的错漏减到最少，尽管也许很难为零。

我们感谢蒋民华、陈创天、沈德忠和许祖彦院士，他们十分支持我们的翻译工作，陈创天院士还为译本写了序。

我们要感谢高等教育出版社的刘剑波编辑，她为这两本译著的出版做了大量的工作。

我们还要感谢国家自然科学基金委员会工程与材料学部的高瑞平副主任和陈克新处长长期以来对我们研究工作的支持。这两本书的出版受到国家自然科学基金重大项目“功能晶体的低对称特性、生长和应用探索”和晶体材料国家重点实验室的支持。

我们感谢支持过我们工作和本书出版的所有朋友，也希望读者能不吝指出本书中仍然存在的错误。



图字: 01-2009-0940 号

Translation from the English language edition:

Handbook of Nonlinear Optical Crystals by Valentin G. Dmitriev, Gagik G. Gurzadyan, and David N. Nikogosyan

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008

Springer-Verlag Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学晶体手册: 第3版(修订本)/(俄罗斯)德米特里耶夫, (俄罗斯)古尔扎姜, (俄罗斯)尼科戈相; 王继扬译. —北京: 高等教育出版社, 2009. 11

书名原文: *Handbook of Nonlinear Optical Crystals*
ISBN 978-7-04-027780-7

I. 非… II. ①德…②古…③尼…④王… III. 非线性光学晶体-材料科学-手册 IV. 07-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第158929号

策划编辑	刘剑波	责任编辑	张海雁	封面设计	刘晓翔
责任绘图	杜晓丹	版式设计	张岚	责任校对	杨雪莲
责任印制	陈伟光				

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2009年11月第1版
印 张	28.75	印 次	2009年11月第1次印刷
字 数	530 000	定 价	80.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

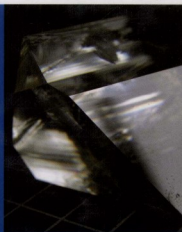
版权所有 侵权必究

物料号 27780-00

本书历经三版，收集了20世纪60年代开始到1999年为止被人们广泛研究和应用的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与非线性晶体光学和非线性光学晶体应用相关的基础理论。

与本书同时翻译出版的《非线性光学晶体——一份完整的总结》，则总结了21世纪以来在非线性光学晶体研究和应用方面的最新成就，为读者提供了最新的发展领域和发展趋势。

两本书相结合，给出了近50年非线性光学晶体研究的概貌、最主要的理论和材料成果，为读者了解非线性光学晶体研究发展的全貌提供了重要的基础，对于非线性光学晶体及激光技术相关领域的科技工作者具有重要的参考价值。



封面照片为磷酸钛氧钾(KTP)晶体，这是目前在中小功率倍频激光器中应用最广泛的非线性光学晶体。20世纪80年代，我国首创熔盐法生长大尺寸、高质量KTP晶体，使这种晶体获得实用化。

学科类别：材料科学与工程、物理学

ISBN 978-7-04-027780-7



9 787040 277807 >