

文章编号: 0258-7025(2007)03-0313-05

利用 II 类相位匹配实现稳定倍频输出

邓青华^{1,2}, 彭翰生³, 李明中¹, 丁磊¹, 王建军¹

(中国工程物理研究院¹ 激光聚变研究中心, ² 研究生部, ³ 院部, 四川 绵阳 621900)

摘要 提出利用 II 类相位匹配方法实现稳定倍频输出, 并对该方法进行了理论分析和数值模拟。数值模拟是对 KTP 晶体 xy 平面内的 II 类相位匹配倍频过程进行的。数值计算结果表明, II 类相位匹配倍频过程中, 当基频光以除最佳入射偏振角之外的偏振方向入射时, 倍频强度曲线随倍频晶体长度增加而呈周期性变化; 由于这种周期性变化的存在, 当基频光起伏变化时, 倍频强度曲线会交叉汇聚, 出现倍频稳定区; 当偏离角(入射偏振角与最佳入射偏振角差值)一定时, 随着基频光入射强度的增大, 实现稳定倍频输出所需的倍频晶体长度减小, 稳定输出时倍频效率不变; 当基频光强度一定时, 随着偏离角的增大, 倍频输出稳定性提高, 倍频效率稍有下降。

关键词 材料; 稳定倍频输出; II 类相位匹配; KTP 晶体

中图分类号 TN 248.1; TN 437.1 **文献标识码** A

Research on the Method to Stabilize Second Harmonic Generation Using Type II Phase Matching

DENG Qing-hua^{1,2}, PENG Han-sheng³, LI Ming-zhong¹, DING Lei¹, WANG Jian-jun¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China
²Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China
³Headquarter of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China

Abstract The method to stabilize the second harmonic generation (SHG) using type II phase matching is put forward. The theoretical and numerical analysis has been done. Numerical simulation on type II phase matching SHG course in KTP shows that when the fundamental frequency (1ω) light is incident in the SHG crystal deviating the optimal polarizing angle, the second harmonic output (2ω) intensity changes periodically with the length of SHG crystal length increasing. With this kind of periodically changing, when input 1ω intensity fluctuates, the output 2ω intensity curves converge at a certain value of the SHG crystal length. At this point the fluctuation of output 2ω intensity becomes much smaller than that of the input 1ω intensity. With the deviating angle being confined to a certain value, when the input 1ω intensity increases, the required nonlinear crystal length to stabilize 2ω intensity decreases and the energy conversion efficiency does not change. With the input 1ω intensity being confined to a certain value, when the deviating angle increases, the required nonlinear crystal length to stabilize 2ω intensity also decreases and the energy conversion efficiency remains high.

Key words materials; stable second harmonic output; type II phase matching; KTP crystal

1 引言

近年来光学参量啁啾脉冲放大技术获得广泛研究^[1~4], 其抽运系统大都是 Nd:YAG (1064 nm) 倍频绿光输出。人们对倍频绿光输出的稳定性更加关注, 这是因为抽运源的稳定性是影响光学参量啁啾脉冲放大系统输出稳定性的关键因素。理论计算表

明, 不稳定的抽运光源能够造成很大的输出起伏, 10% 的抽运光强的起伏在非稳区造成光学参量啁啾脉冲放大系统输出变化幅度有 44.5% 之多, 即使工作在稳定区, 实验结果也有 $\pm 5.7\%$ 的起伏^[5]。

实例分析证明^[6]了倍频效率与基频光强度及偏振分量比等的关系。但分析中只讨论了倍频效率不断增长最后达到饱和的这部分过程。而本文通过对

收稿日期: 2006-06-23; 收到修改稿日期: 2006-10-15

作者简介: 邓青华(1976—), 女, 四川人, 博士研究生, 主要从事高功率固体激光技术研究。E-mail: dqhaj@yahoo.com.cn

导师简介: 彭翰生(1936—), 男, 四川人, 研究员, 博士生导师, 主要从事等离子体物理研究。E-mail: penghsh@caep.ac.cn

描述 KTP 晶体 xy 平面内 II 类相位匹配的耦合波方程组进行数值模拟发现,在 II 类相位匹配的倍频过程中倍频过程和其差频逆过程会相互交替发生,能量会在倍频光和基频光中循环流动,基频光以某特定角度入射情况除外。

2 理论分析

三波相互作用的稳态耦合波方程为^[6]

$$\frac{dE_1}{dz} = i \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c} \frac{1}{\cos^2 \beta_1} E_2^* E_3 \exp(-i\Delta k z), \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = i \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{n_2 c} \frac{1}{\cos^2 \beta_2} E_1^* E_3 \exp(-i\Delta k z), \quad (2)$$

$$\frac{dE_3}{dz} = i \frac{\omega_3 d_{\text{eff}}}{n_3 c} \frac{1}{\cos^2 \beta_3} E_1 E_2 \exp(+i\Delta k z), \quad (3)$$

式中 $E_j, \beta_j (j = 1, 2, 3)$ 分别代表三波的电场振幅和光波在非线性质中传播时的坡印亭(Poyting)矢量的走离角; c 为真空中光速; z 为光的 z 轴传播方向; Δk 为三波耦合的相位失配量; d_{eff} 代表三波作用晶体的有效非线性系数。

对于 II 类相位匹配($o+e \rightarrow e$)的倍频过程而言,耦合波方程中的光波 1, 2, 3 分别代表 $\omega(o), \omega(e), 2\omega(e)$ 。当线偏振基频光入射偏振方向与 $\omega(o)$ 光方向之间的夹角为 α (简称入射偏振角)时,则分配在 $\omega(o), \omega(e)$ 上的光强分别为 $I_1(0) = I(0)\cos^2 \alpha$; $I_2(0) = I(0)\sin^2 \alpha$ 。通过公式 $E_i(0) = \sqrt{2I_i(0)/n_i \epsilon_0 c}$ 可得基频 o 光和 e 光的振幅。入射偏振角为 α 时的偏振分量比^[6] $d = \tan \alpha \times \sqrt{\frac{n_1}{n_2}}, g_3 =$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} \left(\frac{n_1 \cos^2 \beta_1}{n_2 \cos^2 \beta_2} \right)^{1/2}, \text{ 当 } d = 1/g_3, \text{ 即最佳入射偏振角为}$$

$$\alpha_{\text{opt}} = \arctan \left(\frac{1}{g_3} \sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \right) \text{ 时, 倍频过程能实现最大饱}$$

和转换效率 1。此时由于基频光强在 $\omega(o), \omega(e)$ 上的分配非常合适,使两垂直偏振的基频光能同时消耗为 0,完全转换为倍频光。该过程与 I 类相位匹配过程相似,基频光在耗尽后完全消失,如果忽略走离影响,无论 KTP 晶体增至多长,倍频光都不会再转换为基频光。而当入射偏振角偏离此最佳值时,所能达到的饱和转换效率均小于 1,此时基频光强在 $\omega(o), \omega(e)$ 上的分配偏离最佳值,倍频过程中两偏振基频光分量不会同时耗尽。当其中一个偏振基频光分量耗尽时,由于另一个偏振基频光分量的存在,差频过程就会发生,倍频光能量又会回流到基频光中。如果忽略走离影响,随着 KTP 晶体不断增

长,倍频过程和差频过程会循环发生,能量会不断地在倍频光和基频光间来回流动。该能量循环过程能被用来提高倍频输出稳定性。

3 数值模拟结果

以 KTP 晶体 xy 平面内的 II 类相位匹配倍频过程为例进行模拟计算。KTP 的 Sellmeier 方程和有效非线性系数分别取自文献[7]和[8]。

根据 Sellmeier 方程和相位匹配条件 $\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 = 0 (k_i = 2\pi n_i / \lambda_i)$ 可得 xy 平面内 II 类相位匹配角为 $\theta = 90^\circ, \varphi = 23.456^\circ$ (基频光波长为 $1.064 \mu\text{m}$)。由相位匹配角进一步求得 $\omega(o), \omega(e), 2\omega(e)$ 光的折射率和走离角,然后代入公式 $\alpha_{\text{opt}} =$

$$\arctan \left(\frac{1}{g_3} \sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \right) \text{ 可得最佳偏振角约为 } 45.000^\circ \text{。根}$$

据 KTP 晶体 II 类相位匹配有效非线性系数计算公式^[8] $d_{\text{eff}} = d_{15} \sin^2 \varphi + d_{24} \cos^2 \varphi (d_{15} = 6.1 \times 10^{-12} \text{ V/m}, d_{24} = 7.6 \times 10^{-12} \text{ V/m})$ 可得该倍频过程中的有效非线性系数。本文用四阶龙格-卡塔法在不同条件下对三波耦合方程组进行数值模拟计算。

假设基频光强度为 400 MW/cm^2 , 倍频过程为理想相位匹配,即 $\Delta k = 0$ 。基频光以最佳偏振角入射时,倍频过程中基频光和倍频光强度变化曲线如图 1(a)所示。由图 1(a)可知,该过程与 I 类相位匹配过程相似,两垂直偏振的基频光同时消耗为 0,完全转换为倍频光,基频光在耗尽后完全消失,如果忽略走离影响,无论 KTP 晶体增至多长,倍频光都不会再转换为基频光。稍稍偏离最佳偏振角的 45° 入射偏振角在 II 类相位匹配倍频过程中是常用的,因为此时两偏振方向上的基频光强度相等,能实现较高的转换效率。

图 1(b)给出了基频光的入射偏振角为 45° 时倍频过程中基频光和倍频光强度变化曲线。由图 1(b)可知,当入射偏振角偏离最佳入射偏振角时,随着倍频晶体长度的增大,倍频过程和差频过程会循环发生,能量会不断地在倍频光和基频光间来回流动。图 1(c)是图 1(b)中 A 点处的扩大示图,由该图可以看出,当 $\omega(e)$ 光在 B 点耗尽,强度减为 0 时, $\omega(o)$ 并未同时耗尽,而是保有很小的强度。正是由于该小强度基频光的存在,使得差频过程接着发生,倍频光能量分解为基频光;当倍频光完全耗尽时,倍频过程又开始发生。于是,只要相互作用长度足够,

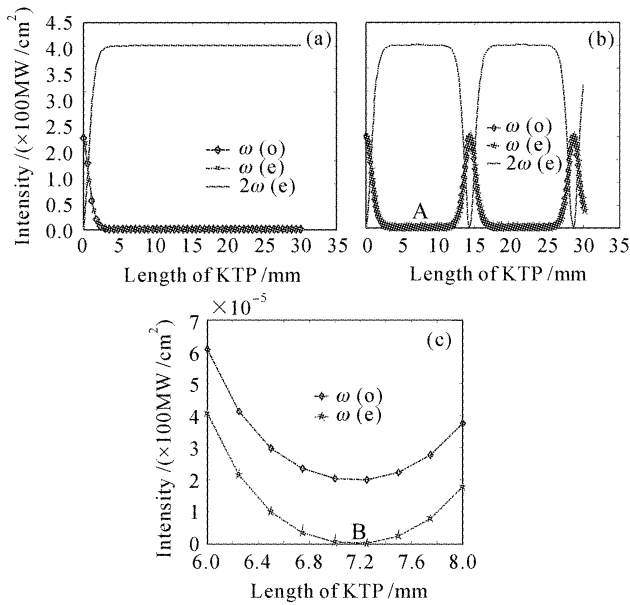


图 1 基频光最佳偏振角入射(a)和 45°偏振角入射(b)时 II 类相位匹配倍频过程中基频光和倍频光强度变化曲线,(c)为图(b)中 A 点处的放大示意图

Fig.1 Intensity of ω and 2ω varying with the length of SHG crystal length in type II phase matching SHG course when ω light incidenting at the optimal polarizing angle (a) and at 45° (b), (c) is expansion plot of A in (b)

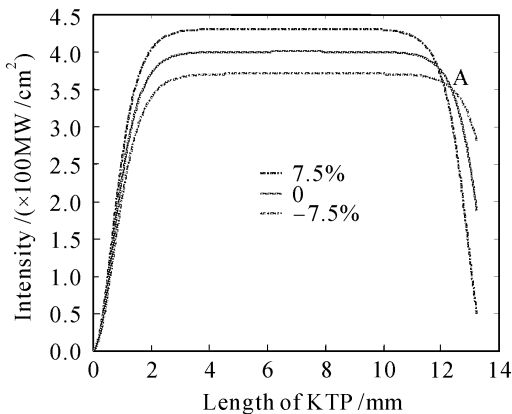


图 2 基频光强度起伏变化时倍频输出强度曲线
Fig.2 2ω output curves when ω intensity fluctuating

倍频过程和差频过程就会循环下去。

为了表明提高输出稳定性的有效性,假设基频光强度有 15% 的起伏。这里依然将入射基频光强度设为 400 MW/cm²,将 15% 的基频光起伏转化为以 400 MW/cm² 为基准基频光强度分别变化 +7.5%,0 和 -7.5% 三种情况。假设入射偏振角为 45°,分别计算了上述三种情况下倍频输出强度随 KTP 倍频晶体长度变化曲线,如图 2 所示。从图可以看出,当基频光起伏变化时,倍频输出强度在 A 处附近交叉汇聚,出现倍频稳定区。对基频光强度

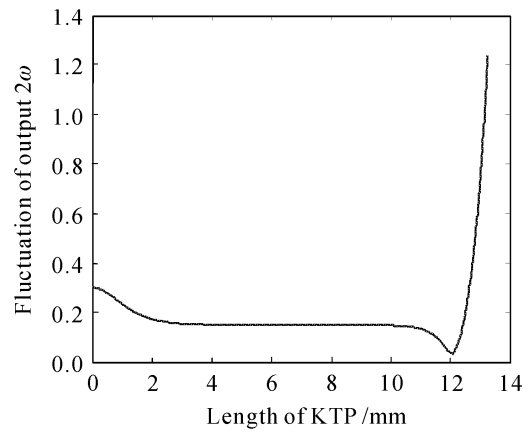


图 3 基频光强度起伏 15% 时倍频输出稳定性曲线
Fig.3 Stability curve of the output 2ω varying with the KTP crystal length when ω intensity fluctuating 15%

变化时倍频输出的稳定性进行了计算。计算过程是求出不同晶体长度处三种基频光强度入射条件下倍频输出强度的最大差值,再将该差值除以基频光强度变化为 0 时该处的倍频输出强度,将该结果作为倍频输出起伏百分比,作为稳定性判据。计算结果如图 3 所示。当 KTP 晶体长度为 12.075 mm 时,倍频输出强度的最小起伏只有 3.26%,远小于基频光强度起伏 15%,此时输出倍频光强度为 371 MW/cm²,倍频转换效率达 92.75%。所以图 2 和图 3 表明了能利用 II 类相位匹配实现稳定倍频输出。

生长 12.075 mm 长的 KTP 晶体,对于现今的晶体生长工艺来说并非难事。但由于倍频过程中存在走离和衍射等效应,走离效应会降低倍频效率,也会使倍频光束近场质量变差;而且倍频晶体长度越长,倍频接受角也将减少。所以倍频过程中在保证一定转换效率条件下应尽可能地使用较短倍频晶体。以下两种方法可减短实现稳定倍频输出所需晶体长度,一种是在确保晶体不被损坏的条件下,尽可能地增大入射基频光强;二是将基频光入射偏振方向更大地偏离最佳入射偏振方向。

图 4 显示了基频光 45° 偏振入射条件下,基频光强度从 200 MW/cm² 变化到 500 MW/cm² 时输出的归一化倍频强度曲线。可知随着入射基频光强度的增加,倍频输出循环周期减小。由此可以想象随着入射基频光强度的增加,实现稳定倍频输出所需晶体长度将会减小。分别计算了以上各基频光强度条件下,基频光强度分别起伏 +7.5%,0 和 -7.5% 时倍频输出光强随晶体长度的变化曲线,并对倍频输出光强稳定性进行分析计算,结果列于表 1。由

表 1 可知当基频光 45° 偏振入射时,随着入射基频光强度的增加,实现稳定倍频输出所需的倍频晶体长度减小,而最小倍频输出起伏不变,倍频转换效率也不变。所以为了减小稳定倍频输出时所用的倍频晶体长度,应在安全范围内尽量增大入射基频光强度。

将入射基频光强度固定为 500 MW/cm^2 ,而将基频光入射偏振方向稍稍偏离最佳入射偏振方向。图 5(a)显示了偏离角 δ (定义为基频光偏振入射角与最佳入射偏振角之间的差值)分别为 $-0.4^\circ, 0.4^\circ$ 时倍频光输出强度曲线,由图可见两条曲线完全重合。所以基频光偏振入射方向稍稍偏离最佳入射偏振方向时,倍频输出变化只与偏离角 δ 绝对值大小相关,而与其正负无关。

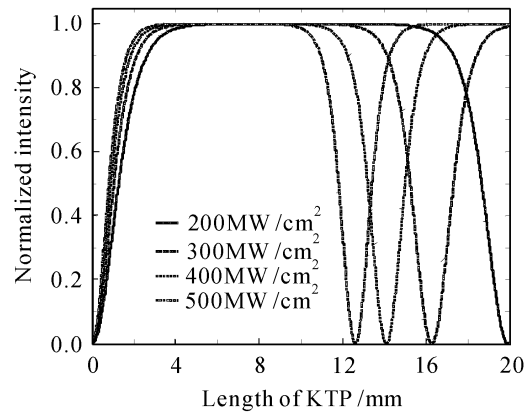


图 4 基频光强度变化时输出倍频光强度随晶体长度的变化曲线

Fig. 4 2ω intensity curves with different ω intensities

表 1 不同基频光强度条件下稳定倍频输出参数

Table 1 Parameters of stable 2ω output with different ω intensities

ω intensity / (MW/cm^2)	Minimum fluctuation of 2ω / %	KTP length for stablest 2ω / mm	Intensity of stablest 2ω / (MW/cm^2)	Conversion ratio of stablest 2ω
200	3.26	17.075	185.52	0.9276
300	3.27	13.945	278.20	0.9273
400	3.26	12.075	371.06	0.9277
500	3.27	10.8	463.88	0.9278

表 2 不同入射偏振方向条件下稳定倍频输出参数

Table 2 Parameters of stable 2ω output with different ω incident polarizing angles

δ / ($^\circ$)	Minimum fluctuation of 2ω / %	KTP length for stablest 2ω / mm	Intensity of stablest 2ω / (MW/cm^2)	Conversion ratio of stablest 2ω
0.1	1.85	5.575	426.71	0.8534
0.2	1.70	4.995	418.67	0.8373
0.3	1.59	4.660	412.89	0.8258
0.4	1.51	4.425	408.07	0.8161

图 5(b)显示了偏振入射方向偏离角 δ 分别为 $0.1^\circ, 0.2^\circ, 0.3^\circ, 0.4^\circ$ 时倍频输出变化曲线。可知随着入射偏振角偏离量的增加,倍频输出循环周期减小。由此也可推断随着入射偏振角偏离量的增加,实现稳定倍频输出所需晶体长度将会减小。分别计算了以上各入射偏振角度情况下,基频光强度分别起伏 $+7.5\%, 0, -7.5\%$ 时倍频输出光强随晶体长度的变化曲线,并对倍频输出光强稳定性进行分析计算,结果列于表 2。由表 2 可知随着入射偏振角偏离量的增大 ($0.1^\circ \rightarrow 0.4^\circ$),最小倍频输出起伏减小,实现稳定倍频输出所需的倍频晶体长度也减小。

但是最稳输出倍频光强度及该值与入射基频光强度之比(即转换效率)也稍有减小,但转换效率还比较高,在 80% 以上。为了减小稳定倍频输出时所

用的倍频晶体长度,在转换效率可接受的情况下,可将基频光偏振入射方向稍微偏离最佳入射偏振角。

4 结 论

对利用 II 类相位匹配实现倍频稳定输出方法进行了理论分析和数值模拟。数值计算结果表明,II 类相位匹配倍频过程中,当基频光以除最佳入射偏振角之外的偏振方向入射时,倍频强度曲线随倍频晶体长度增加而周期性变化;由于这种周期性变化的存在,当基频光起伏变化时,倍频强度曲线会交叉汇聚,出现倍频稳定区。进一步的数值模拟结果表明,当偏离角(入射偏振角与最佳入射偏振角差值)一定时,随着基频光入射强度的增大,实现稳定倍频

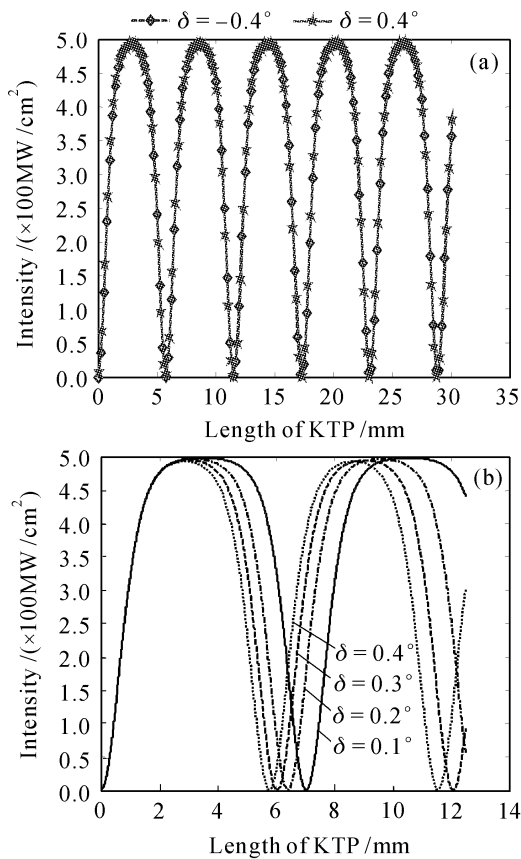


图 5 基频光入射偏振偏离角为 $\pm 0.4^\circ$ (a) 和 $0.1^\circ, 0.2^\circ, 0.3^\circ, 0.4^\circ$ (b) 时倍频输出强度随晶体长度的变化曲线
 Fig. 5 2ω intensity curves when $\delta = \pm 0.4^\circ$ (a) and $\delta = 0.1^\circ, 0.2^\circ, 0.3^\circ, 0.4^\circ$ (b)

输出所需的倍频晶体长度减小, 稳定输出时倍频效率不变。所以在倍频晶体损坏阈值强度限制下, 应尽可能增大注入基频光强度; 当基频光强度一定时,

随着偏离角的增大, 倍频输出稳定性提高, 倍频效率稍有下降, 所以在倍频效率可以容忍的条件下, 可适当增大偏离角来减小所需倍频晶体长度。

参 考 文 献

- 1 I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*. The prospect for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**:125~133
- 2 Ian N. Ross, John L. Collier, Pavel Matousek *et al.*. Generation of terawatt pulse by use of optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15):2422~2427
- 3 Xiaodong Yang, Zhizhan Xu, Yuxiao Leng *et al.*. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13):1135~1137
- 4 Igor Jovanovic, Brian J. Comaskey, Christopher A. Ebberts *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15):2923~2929
- 5 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. The generation of high efficiency and high stability parametric amplified light [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1):105~113
刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 高质量高效率高稳定性参量放大光产生的研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1):105~113
- 6 Yao Jianquan. *Nonlinear Frequency Conversion and Laser Tuning Technique* [M]. Beijing: Science Press, 1995
姚建铨. *非线性频率转换和激光调谐技术* [M]. 北京: 科学出版社, 1995
- 7 Kiyoshi Kato, Eiko Takaoka. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for KTP [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24): 5040~5044
- 8 Zhang Kecong, Wang Ximin. *Science of Nonlinear Optics Crystal Materials* [M]. Beijing: Science Press, 2005
张克从, 王希敏. *非线性光学晶体材料科学* [M]. 北京: 科学出版社, 2005