

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0316-04

# 光通信系统中铌酸钾晶体的激光倍频特性

程俊强<sup>1,2</sup>, 俞重远<sup>1,2</sup>, 蒋达娅<sup>1,2</sup>, 张晓光<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京邮电大学理学院, 北京 100876

<sup>2</sup>北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876

**摘要** 全面分析了双轴晶体  $\text{KNbO}_3$  (KN) 的倍频特性, 计算了 KN 晶体在光通信系统中常用的 1550 nm 波长倍频的相位匹配角和有效二阶非线性系数, 得出了二次谐波产生的最佳相位匹配参量。分析计算了离散角对有效二阶非线性系数和倍频效率的影响。

**关键词** 材料; 光通信; 半导体激光器; 铌酸钾晶体; 倍频; 相位匹配

**中图分类号** TN248.4; O437.1 **文献标识码** A

## Second-Harmonic Generation in Biaxial Crystal $\text{KNbO}_3$ for Optical Communication Systems

CHENG Jun-qiang<sup>1,2</sup>, YU Zhong-yuan<sup>1,2</sup>, JIANG Da-ya<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-guang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** Characteristics of second-harmonic generation (SHG) in biaxial crystal  $\text{KNbO}_3$  were studied. The phase-matching angles and effective second-order nonlinear coefficients for the communication wavelength of 1550 nm were calculated, and the optimum phase-matching parameters were obtained. The influences of walk-off angle on effective second-order nonlinear coefficient and SHG efficiency were also analyzed.

**Key words** materials; optical communication; semiconductor lasers;  $\text{KNbO}_3$  crystal; second-harmonic generation; phase-matching

## 1 引 言

光孤子的独特优势使得光纤孤子通信成为光通信的研究热点之一。对于孤子窄脉冲(ps 或 fs), 二次谐波自相关方法是一个有效的测量手段。光通信常用 1550 nm 波长的半导体激光器, 而以往对倍频晶体的研究多集中在 YAG 的 1064 nm, 除了波长不同之外, 半导体激光器功率较低, 倍频转换效率低, 对晶体设计要求较高。二次谐波产生(SHG)是非线性光学的重要现象之一, 而在二次谐波产生中双轴晶体相位匹配<sup>[1~3]</sup>较单轴晶体要复杂得多。

$\text{KNbO}_3$  (KN) 晶体属于斜方晶系,  $C_{2v}$ -mm2 点群, 透光波段 0.35~4.5  $\mu\text{m}$ , 是目前最优秀的非线性光学材料之一, 适用于光通信波段。由于其激光

损伤阈值不高(约为 350  $\text{MW}/\text{cm}^2$ <sup>[4]</sup>), 所以 KN 倍频主要是用在低功率特别是半导体激光器毫瓦级激光的倍频。表 1 是 KN 与其他一些常用非线性晶体对毫瓦级激光倍频情况的比较<sup>[5]</sup>, 可见 KN 对毫瓦级激光的转换效率比  $\text{KTiOPO}_4$  (KTP),  $\beta$ - $\text{BaB}_2\text{O}_4$  (BBO) 等高出三四个数量级。

## 2 $\text{KNbO}_3$ 晶体倍频的相位匹配

### 2.1 相位匹配角

双轴晶体的折射率面是无旋转对称的双层曲面, 倍频的相位匹配曲线是复杂的空间曲线, 无法用简单的解析式表达, 只能用数值方法求解。

**基金项目:** 国家 863 计划(2003AA311070)资助课题。

**作者简介:** 程俊强(1977-), 男, 山东人, 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室博士研究生, 主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: cjg@bupt.edu.cn

表 1 946 nm 倍频离散角、孔径长度、相位匹配角和相对转换效率

Table 1 Relative conversion efficiency,  $\rho$ ,  $L_a$ , and phase-matching angles for 946 nm SHG

Nonlinear crystal	$\rho / (^\circ)$	$L_a / \text{cm}$	$\theta_m, \varphi_m / (^\circ)$	Rel. $ d_{\text{eff}} ^2 L_a^2 / n^3$
KTiOPO <sub>4</sub> (KTP)	2.7	0.11	53, 45	$1.5 \times 10^{-4}$
LiIO <sub>3</sub>	4.6	0.066	35°, —	$1.7 \times 10^{-3}$
$\beta$ -BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3.4	0.089	25, 30	$1.5 \times 10^{-3}$
KNbO <sub>3</sub> (angle)	0.85	0.36	90, 60	0.44
KNbO <sub>3</sub> (noncritical)	0	0.5	90, 90	1
Periodically poled LiNbO <sub>3</sub>	0	0.5	90, —	1.6

图 1 为 KNbO<sub>3</sub> 晶体的色散曲线,其塞米尔方程<sup>[6]</sup>为

$$\begin{cases} n_x^2 = 4.4222 + \frac{0.09972}{\lambda^2 - 0.05496} - 0.01976\lambda^2, \\ n_y^2 = 4.8353 + \frac{0.12808}{\lambda^2 - 0.05674} - 0.02528\lambda^2 + 1.8590 \times 10^{-6}\lambda^4 - 1.0689 \times 10^{-6}\lambda^6, \\ n_z^2 = 4.9856 + \frac{0.15266}{\lambda^2 - 0.06331} - 0.02831\lambda^2 + 2.0754 \times 10^{-6}\lambda^4 - 1.2131 \times 10^{-6}\lambda^6, \end{cases} \quad (1)$$

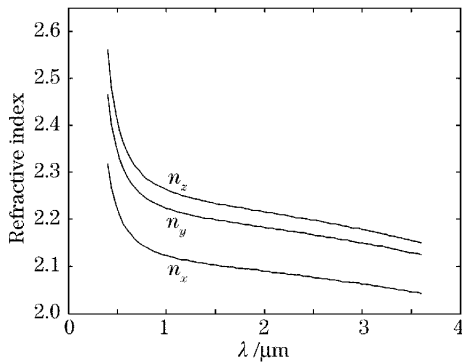


图 1 KNbO<sub>3</sub> 晶体的色散曲线

Fig. 1 Dispersion curve of KNbO<sub>3</sub>

波矢  $\mathbf{K}$  方向上基波折射率( $n_1$ )和倍频波折射率( $n_2$ )可分别按以下两式求出:

$$\frac{\sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{n_1^{-2} - n_{1x}^{-2}} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi}{n_1^{-2} - n_{1y}^{-2}} + \frac{\cos^2 \theta}{n_1^{-2} - n_{1z}^{-2}} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{n_2^{-2} - n_{2x}^{-2}} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi}{n_2^{-2} - n_{2y}^{-2}} + \frac{\cos^2 \theta}{n_2^{-2} - n_{2z}^{-2}} = 0, \quad (3)$$

其中  $\theta$  和  $\varphi$  为波矢的方位角,  $n_{ix}, n_{iy}, n_{iz}$  ( $i = 1, 2$ ) 分别为基波和倍频波的主折射率。由双轴晶体的匹配类型<sup>[1]</sup>分析,KNbO<sub>3</sub> 晶体只存在 I 类相位匹配。对第 I 类相位匹配有

$$n'_1 = n''_2, \quad (4)$$

$n'_1$  是  $n_1$  两个正实根中较大的一个,  $n'_2$  是  $n_2$  的两个正实根中较小的一个。

图 2 是由 (2) ~ (4) 式计算得到的 KNbO<sub>3</sub> 晶体的第 I 类相位匹配的相位匹配曲线。有无数组解 ( $\theta, \varphi$ ) 满足相位匹配方程,下面的任务就是求最佳相位匹配角,其判断标准是使  $|d_{\text{eff}}|$  取得最大值。

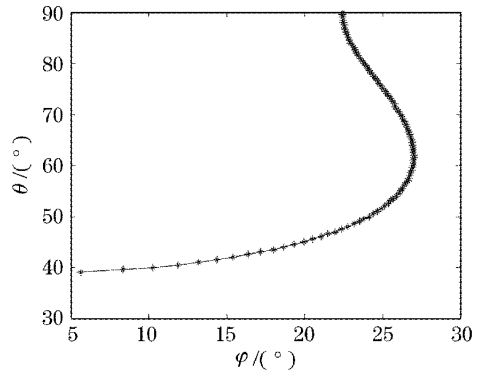


图 2 KNbO<sub>3</sub> 晶体的 I 类相位匹配曲线

Fig. 2 I type phase-matching curve of KNbO<sub>3</sub>

## 2.2 有效二阶非线性系数

倍频转换效率很大程度上取决于有效二阶非线性系数  $|d_{\text{eff}}|$  的大小。

如图 3 所示,用  $e_1$  和  $e_2$  分别表示晶体中慢光和快光的单位矢量,  $\delta$  为  $e_1$  和 ZOY 平面所成的角度。

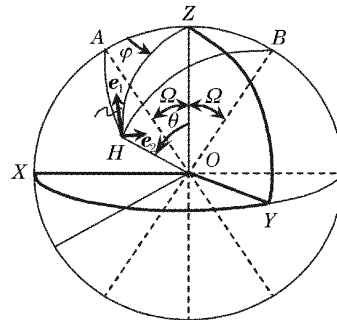


图 3 双轴晶体中光波传播和偏振方向

Fig. 3 Propagation and polarization directions of optical waves in a biaxial

由毕奥-菲涅耳 (Biot-Fresnel) 定理, 根据球面三角形关系可得  $\delta$  满足:

$$\cot 2\delta = \frac{\cot^2 \Omega \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}{\cos \theta \sin 2\varphi}. \quad (5)$$

基波和倍频波的光轴同  $z$  轴的夹角差别不大, 通常  $\Omega$  取其平均值。在文献[7,8]中, 该式中分母写成了  $\cos \theta - \sin 2\varphi$ , 正确的关系应如(5)式所示。

求得  $\delta$  后即可求得基波慢光的电场  $E^{\alpha_1}$  在  $x, y, z$  上的投影:

$$E_j^{\alpha_1}(\omega) = a_j^{\alpha_1} E^{\alpha_1}(\omega),$$

其中

$$a_j^{\alpha_1} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi \cos \delta - \sin \varphi \sin \delta \\ \cos \theta \sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \sin \delta \\ -\sin \theta \cos \delta \end{bmatrix},$$

将三个方向上基频电场的投影产生的非线性极化强度再投影到  $E^{\alpha_2}(\omega)$  方向上, 得到:

$$P(2\omega) = d_{\text{eff}}^{\alpha_2} E^{\alpha_1}(\omega) E^{\alpha_1}(\omega), \quad (6)$$

其中

$$d_{\text{eff}}^{\alpha_2} = (a_k^{\alpha_2})^T d_{ijk} a_j^{\alpha_1} a_k^{\alpha_1},$$

$$a_k^{\alpha_2} = \begin{bmatrix} -\cos \theta \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \\ -\cos \theta \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \\ \sin \theta \sin \delta \end{bmatrix},$$

将前面得到的相位匹配角  $\theta, \varphi$  代入, 可得  $\text{KNbO}_3$  晶体 I 类相位匹配的  $|d_{\text{eff}}| \sim \theta$  关系如图 4 所示。

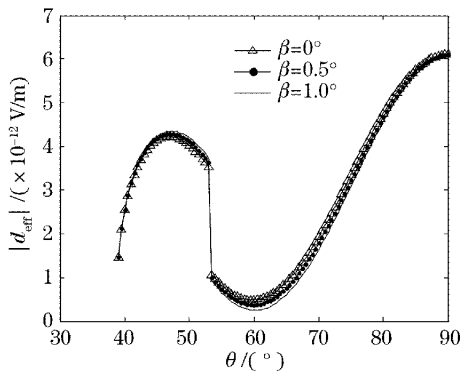


图 4  $\text{KNbO}_3$  晶体的有效二阶非线性系数

Fig. 4 Effective second-order nonlinear coefficient of  $\text{KNbO}_3$

另外, 计算了离散角分别为  $0.5^\circ$  和  $1^\circ$  的情况, 在离散角不太大的情况下, 可以不考虑其对有效二阶非线性系数的影响。

通过计算得到低功率半导体激光器  $1550 \text{ nm}$  波长倍频的  $\text{KNbO}_3$  晶体最佳相位匹配角  $\theta = 90.0^\circ$ ,  $\varphi = 22.4^\circ$ 。此时,  $|d_{\text{eff}}|$  取得最大值  $|d_{\text{eff}}|_{\text{max}} = 6.1 \text{ pm/V}$ 。

### 3 倍频转换效率

假设晶体对基频光和倍频光都没有吸收, 在小信号近似的情况下, 基频光消耗可以忽略, 这种情况下倍频转换效率很低, 由耦合波方程可得转换效率为

$$\eta = 2 \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/2} \frac{\omega^2 (d_{\text{eff}})^2 L^2}{n^3} \left[ \frac{p(\omega)}{A} \right] \text{sinc}^2 \left( \frac{\Delta KL}{2} \right).$$

在相位匹配情况下, 必须考虑基频光的耗尽效应, 不能直接积分给出倍频光的强度。可通过求解耦合波方程组得到解为

$$|A_3(z)| = \frac{|A_1(0)|}{\sqrt{2}} \tanh(\sqrt{2}\kappa |A_1(0)| z),$$

$$|A_1(z)| = |A_1(0)| \text{sech}(\sqrt{2}\kappa |A_1(0)| z),$$

图 5 是  $|A_3(z)|$  及  $|A_1(z)|$  对  $|A_1(0)|$  归一化的变化关系。可见随倍频晶体长度的增加, 基频光不断转换成倍频光, 当  $z = 2L_{\text{SHG}}$  时已接近饱和。

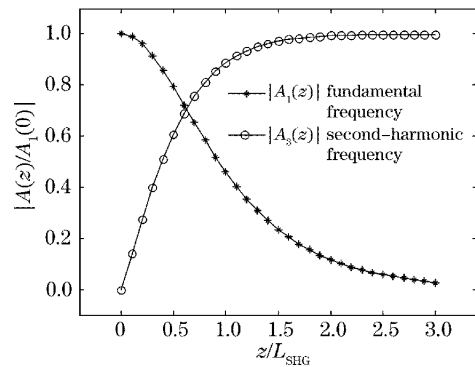


图 5 倍频转换效率

Fig. 5 Conversion efficiency of second-harmonic frequency

一般半导体激光器的功率为数毫瓦, 考虑到激光传输过程中的损耗等, 取激光入射到晶体表面上的功率为  $1 \text{ mW}$ ; 我们实验室用的半导体激光器光束截面约为  $1 \text{ mm}$ , 由此求得它的有效倍频长度约为  $3 \text{ mm}$ 。理论上晶体长度为  $6 \text{ mm}$  时能实现接近 1 的转换效率; 但实际上不可能达到, 因为上述结果是在平面波近似下得到的, 在高斯光束情况下效率低于  $60\%$ 。

由激光聚焦高斯光束特点可知, 其倍频性质与平面波条件下的倍频是相同的, 差别只是光束截面上光电场强度分布不同。在没有离散效应时, 两者倍频转换效率相同; 光束的聚焦加大了离散, 减小了有效作用长度。

### 4 结 论

对  $\text{KN}$  晶体的倍频进行了分析和计算, 得到了  $\text{KN}$  晶体在光通信系统常用波长  $1550 \text{ nm}$  倍频的最

佳相位匹配参量,讨论了离散角对有效二阶非线性系数和倍频效率的影响,为进行半导体激光器超短脉冲的自相关测量等打下了良好的基础。

**致谢** 感谢人工晶体研究院沈德忠院士的指导和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 M. V. Hobden. Phase-matched second-harmonic generation in biaxial crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(11): 4365~4372
- 2 F. C. Zumsteg, J. D. Bierlein, T. E. Gier.  $K_xRb_{1-x}TiOPO_4$ : A new nonlinear optical material [J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**(11): 4980~4985
- 3 Yao Jianquan, T. S. Fahlen. Calculations of optimum phase match parameters for the biaxial crystals  $KTiOPO_4$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**(1): 65~68
- 4 W. Seelert, P. Kortz, D. Rytz *et al.*. Second-harmonic generation and degradation in critically phase-matched  $KNbO_3$  with a diode-pumped Q-switched Nd:YLF laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(20): 1432~1434
- 5 T. Y. Fan, Robert L. Byer. Continuous-wave operation of a room-temperature, diode-laser-pumped, 946-nm Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 809~811
- 6 N. Umemura, K. Yoshida, M. Iwasa *et al.*. New data on the phase-matching properties of  $KNbO_3$  [C]. CLEO, Lasers and Electro-Optics, 1999. 302~303
- 7 H. Ito, H. Naito, H. Inaba. New phase-matchable nonlinear optical crystals of the formate family [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1974, **QE-10**(2): 247~252
- 8 H. Ito, H. Naito, H. Inaba. Generalized study on angular dependence of induced second-order nonlinear optical polarizations and phase matching in biaxial crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(9): 3992~3998