

# 常温条件下 KTP 晶体应用于 1319 nm 激光 三倍频相位匹配角的测量

温午麒<sup>1,2</sup> 康建翊<sup>1,2</sup> 翟宁<sup>3</sup> 丁欣<sup>1,2</sup> 陆颖<sup>1,2</sup> 周睿<sup>1,2</sup> 盛泉<sup>1,2</sup> 姚建铨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 天津 300072  
<sup>2</sup>天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072  
<sup>3</sup>济南光电晶体有限责任公司, 山东 济南 250100

**摘要** 针对常温工作条件下利用磷酸氧钛钾(KTP)晶体对钕铝石榴石(Nd:YAG)晶体 1319 nm 激光三倍频产生 440 nm 蓝色激光的实验,对三倍频 KTP 晶体的相位匹配角进行了理论计算和实验研究。通过多组色散方程得到 KTP 晶体的相位匹配角,并计算出相应的有效非线性系数。选取一组结果( $\theta=84.6^\circ, \varphi=0^\circ$ )对 KTP 晶体切割,利用一台 1319 nm 激光器,将晶体放入腔中,采用旋转晶体偏角和调节温度的方法寻找出三倍频 KTP 晶体最佳匹配角度( $\theta=85.04^\circ, \varphi=0^\circ$ )。该晶体经过重新切割,440 nm 蓝色激光输出的光束强度有了明显的提高,最佳工作温度为 18 ℃。

**关键词** 非线性光学;三倍频相位匹配角;KTP 晶体;440 nm 蓝色激光

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0802007

## Measurement of Phase-Matching Angle of KTP Crystal Applied for Third Harmonic Generation of 1319 nm Laser at Room Temperature

Wen Wuqi<sup>1,2</sup> Kang Jianyi<sup>1,2</sup> Zhai Ning<sup>3</sup> Ding Xin<sup>1,2</sup> Lu Ying<sup>1,2</sup>  
Zhou Rui<sup>1,2</sup> Sheng Quan<sup>1,2</sup> Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser & Optoelectronics, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>3</sup>Jinan Photonics Crystals Ltd., Jinan, Shandong 250100, China

**Abstract** For the aim of third harmonic generation (THG) experiment of Nd:YAG 1319 nm laser to produce 440 nm blue laser using KTP crystal at room temperature, theoretical calculation and experimental study have been carried out for the THG phase-matching angle of KTP crystal. Using several Sellmeier equations, phase-matching angles are derived, and corresponding effective nonlinear coefficients are calculated. One result ( $\theta=84.6^\circ, \varphi=0^\circ$ ) of the angles is chosen to cut KTP crystal, and then by using a laser of 1319 nm, crystals are carried into the cavity, methods of rotating the crystal and adjusting the temperature to find out optimum phase matching angle of the KTP crystal for THG ( $\theta=85.04^\circ, \varphi=0^\circ$ ) are applied. After re-cutting KTP crystal, the beam intensity of outputting 440 nm blue laser has a significant improvement and the optimum operating temperature is 18 ℃.

**Key words** nonlinear optics; third harmonic generation phase-matching angle; KTP crystal; 440 nm blue laser

**OCIS codes** 190.0190; 140.3380; 140.3580

**收稿日期**: 2011-02-23; **收到修改稿日期**: 2011-04-11

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327801)、国家自然科学基金重点项目(60637010)和国家自然科学基金(60971027, 60978021 和 10874128)资助课题。

**作者简介**: 温午麒(1970—),男,博士,副教授,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: lasertju@163.com

# 1 引 言

全固态蓝光激光器在生物工程、大屏幕显示、激光医疗和海底通信等许多领域都具有重要的应用。目前,为了获得功率高、稳定性好的固体激光输出,通常采用非线性光学手段,如用三硼酸锂(LBO)或偏硼酸钡(BBO)晶体对 946 nm(Nd:YAG)激光倍频(SHG)获得 473 nm 蓝光输出<sup>[1]</sup>;利用 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的 914 nm 及 Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体的 912 nm 激光谱线的倍频获得 457 nm、456 nm 蓝光输出<sup>[2,3]</sup>。还可以对 1.3 μm 红外基频光与其倍频光进行和频而获得三倍频(THG)蓝色激光的输出。这个方案对获得大功率的蓝光激光是有利的。如中国科学院物理研究所利用 LBO 晶体对 1319 nm 激光谱线进行内腔三倍频获得了高功率 440 nm 蓝色激光的输出<sup>[4,5]</sup>;X. D. Mu 等<sup>[6,7]</sup>的 1319 nm 三倍频实验中倍频晶体采用 PP-KTP,和频 KTP 晶体切割角度为  $\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$ ,高温控制;暨南大学对 Nd:YAP 晶体的 1341.4 nm 进行了三倍频实验,三倍频晶体也选用了 KTP 晶体<sup>[8]</sup>。

KTP 晶体作为优良的非线性光学晶体在 440 nm 处有较好透射率(晶体长度为 1 cm 时透射率约为 88%),虽有少量的吸收,但是 KTP 晶体有较大的有效非线性系数。与 946 nm 倍频的情况相反,在 1319 nm 激光三倍频处存在相位匹配角,并有较小的走离角,不潮解,价格低廉的优点<sup>[9~11]</sup>。

非线性晶体的色散方程在人们已重点关注的波长有很好的精度,但当应用于新的波长、新非线性变换时(如本文研究的 1319 nm 三倍频、临界相位匹配),由于色散方程本身的误差,将导致计算所得的相位匹配角数值存在较大的误差<sup>[9]</sup>,难以直接采用。所以对相位匹配角的实验探索是正式激光实验的重要前期工作。本文在计算的基础上利用激光器实验,根据晶体在腔内旋转时激光输出的强弱变化现象,利用激光器实验获得了该相位匹配角的实验值。

## 2 1319 nm 三倍频相位匹配角的计算

晶体中共线条件下三波相互作用要满足的相位匹配可表示为

$$\Delta k = \frac{\omega_1}{c}n_1 + \frac{\omega_2}{c}n_2 - \frac{\omega_3}{c}n_3 = 0. \quad (1)$$

由于 KTP 晶体 I 类匹配有效非线性系数远小于 II 类匹配,所以实验中三倍频处选择 II 类匹配方式为

$$1319(o) + 660(e) = 440(o). \quad (2)$$

根据不同文献中的 KTP 色散方程计算得到的 1319 nm 三倍频(II 类相位匹配)的相位匹配曲线如图 1 所示。计算依据的色散方程分别是 K. Kato 等<sup>[12,13]</sup>于 1992 年和 2002 年得出的色散方程,B. Boulanger 等<sup>[14]</sup>在 1994 年得出的结果和 SNLO<sup>[11]</sup>软件中色散数据。图 2 为与图 1 中 4 条曲线相对应的有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  和  $\theta$  的关系图。最佳相位匹配角( $\theta, \varphi$ )的值通常在  $d_{\text{eff}}$  取最大值时取得。所以,获得 4 组相位匹配角度计算值:1)  $\theta=87.74^\circ, \varphi=0^\circ$  (K. Kato, 1992); 2)  $\theta=87.40^\circ, \varphi=0^\circ$  (B. Boulanger, 1994); 3)  $\theta=85.63^\circ, \varphi=0^\circ$  (K. Kato, 2002); 4)  $\theta=84.40^\circ, \varphi=0^\circ$  (SNLO)。

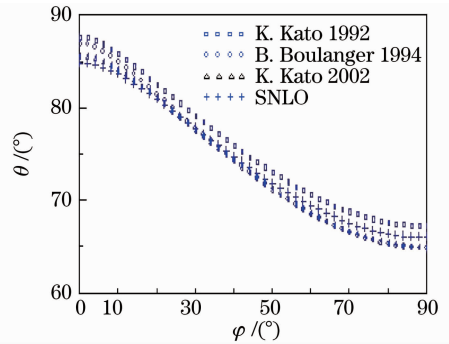


图 1 KTP 晶体 1319 nm 激光三倍频 II 类相位匹配曲线

Fig. 1 II phase matching curve of 1319 nm laser THG in KTP crystal

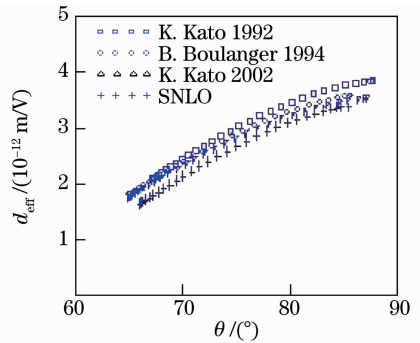


图 2 KTP 晶体 1319 nm 激光三倍频有效非线性系数曲线

Fig. 2 Effective nonlinear coefficient curve of 1319 nm laser THG in KTP crystal

4 组结果中  $\theta$  角度范围为:  $84.40^\circ \sim 87.74^\circ$ 。晶体在切割时一般具有  $0.1^\circ$  的精度(角度的测量精度要高于晶体加工精度),所以上述角度范围太大。为了找出更准确的相位匹配角度数值,先挑选一个计算结果对 KTP 晶体进行切割及做激光实验。实验中选取的角度是( $\theta=84.6^\circ, \varphi=0^\circ$ ),晶体切割后再进行测量,实际  $\theta$  值略大于  $84.7^\circ$ 。

### 3 对三倍频相位匹配角的实验测量

#### 3.1 实验装置

在实验中,采用直短腔激光二极管(LD)端面抽运内腔三倍频的实验方案,如图3所示。

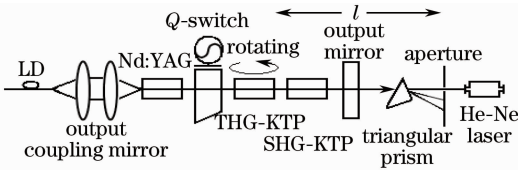


图3 LD端面抽运1319 nm内腔三倍频结构示意图  
Fig. 3 Structure diagram of 1319 nm LD end-pumped intracavity third harmonic

LD最大输出功率为7.3 W, Nd:YAG晶体尺寸 $\phi 3\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ , Nd<sup>3+</sup>参杂原子数分数为1%,左端面镀膜情况:808 nm@HT, 660 nm@HR, 1319 nm@HR,右端面:1319 nm@HT。声-光Q开关(为了增加峰值功率,提高腔内增益)调至重复频率7.1 kHz。实验中倍频KTP晶体<sup>[15~17]</sup>( $\theta = 59.8^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )和三倍频处KTP晶体尺寸均为3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 10 mm,端面未镀膜。输出耦合镜镀膜情况为:440 nm@HT, 660 nm@AT, 1319 nm@AT。三倍频KTP晶体水冷温度设定为20 $^\circ\text{C}$ 。He-Ne激光有两个作用:1)用于对激光器各器件进行准直,2)三倍频KTP晶体旋转后,用于测量该晶体的转动角度。

#### 3.2 测量实验

首先正确放置KTP晶体,以满足(2)式的要求。图4给出了腔内各波长激光偏振情况,对于倍频晶体,1319 nm o光和e光产生660 nm的o光,而660 nm相对三倍频KTP晶体要作为e光入射,并与相对三倍频晶体来说为o光的1319 nm相互作用而产生440 nm的o光。另外,在倍频过程中由于1319 nm的e光走离较为严重,在具体实验中将倍频晶体放在靠近输出镜一端,而三倍频晶体放在腔内部,如图3所示,以减少走离带来的影响<sup>[18,19]</sup>。

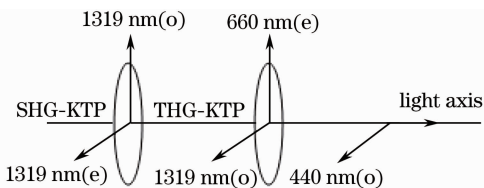


图4 激光偏振方向示意图

Fig. 4 Laser polarization direction

实验中LD抽运功率为4 W,输出440 nm蓝光,并有660 nm红光漏出。用光谱仪测量1319 nm

带宽约0.5 nm,660 nm带宽约0.2 nm,调Q的脉冲宽度约40 ns。在激光器右端,用三棱镜将输出光分光,照射在光屏上(分成红蓝两个光斑)。然后分别向不同的方向精细旋转三倍频KTP晶体(改变 $\theta$ 和 $\varphi$ 的大小),观察光屏上蓝光光斑的强度变化。在KTP晶体右端面竖直向上偏转时( $\theta$ 发生变化),光斑亮度经历了由亮到暗,然后再到明亮,最后逐渐变暗消失的过程。而改变 $\varphi$ 的过程中没有发生此现象。光斑亮暗变化过程的原因可解释为,在开始的光路中,腔内各器件是准直好的,于是输出光斑亮度高;三倍频晶体偏转后,光斑亮度明显减弱,这是由于晶体端面未镀增透膜,发生了反射(输出损耗,导致腔内基频和倍频光的功率下降),而且偏角越大,损耗越严重,光斑继续变暗;但晶体旋转到一定角度时输出光斑又变亮,这是由于此时激光在晶体中的传播方向达到了相位匹配的条件,虽然基频和倍频光的功率仍处于下降趋势中,但由于三倍频效率的提高,三倍频蓝光的输出强度升高了;继续旋转晶体,蓝光亮度又变弱。由此可以判断目前晶体的匹配角不是最佳的,而最佳相位匹配角度应该在晶体旋转后光斑最亮时,激光在晶体中的传播方向。

在晶体旋转后蓝光最强时,保持晶体的偏转角度不变,关闭激光器,撤去输出镜、三棱镜和倍频KTP晶体,测量三倍频晶体的偏转角度。利用三倍频晶体到光屏的距离 $l$ 值(图3)、He-Ne激光束在光屏上的入射小孔位置及He-Ne激光在三倍频晶体反射后在光屏上的光斑间的距离 $\Delta x$ ,根据公式 $2\theta' = \arctan(\Delta x/l)$ 可计算出He-Ne激光的入射光线与反射光线的夹角 $2\theta'$ ,从而得到三倍频晶体的偏转角度 $\theta'$ 。激光器运转时,腔内晶体外面(自由空间)振荡光的运行方向是和准直光方向平行的,如图5所示。振荡光在晶体表面发生折射,在晶体内部,振荡激光和晶体端面法线的夹角记为 $\Delta\theta$ ,即为KTP晶体相位匹配角需要修正的值。根据折射公式计算时,晶体内部振荡光的折射率可根据目前晶体的方位( $\theta, \varphi$ )使用色散方程进行计算,由于基频光和倍频光的折射率略有差异,本实验近似都取折射率为1.8。当KTP晶体的温度控制为20 $^\circ\text{C}$ ,经过多

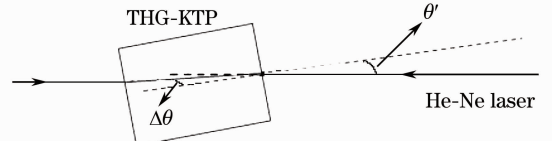


图5 三倍频晶体旋转示意图

Fig. 5 THG crystal rotation

次测量,  $\Delta x \approx 0.9 \text{ cm}$ ,  $l \approx 53.5 \text{ cm}$  时, 计算得到  $\Delta\theta = 0.27^\circ$ 。

为确定  $\Delta\theta$  的变化方向, 改变晶体工作温度, 通过 SNLO 软件计算可知, KTP 晶体的相位匹配角度 ( $xOz$  面) 随着温度升高,  $\theta$  值增加。调节三倍频 KTP 晶体的水冷温度, 绘制出从  $7^\circ\text{C}$  到  $40^\circ\text{C}$  之间  $\Delta\theta$  大小随温度的变化曲线, 如图 6 所示。从中可以判断出  $20^\circ\text{C}$  时, 此 KTP 晶体最佳相位匹配角  $\theta$  应该在原角度的基础上增加  $0.27^\circ$ 。

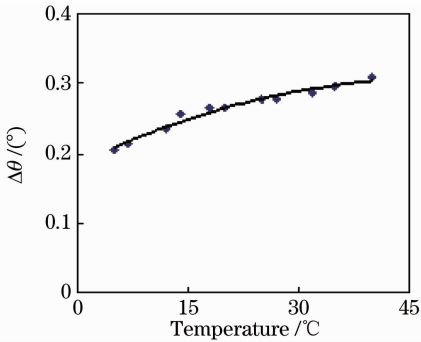


图 6 三倍频 KTP 晶体  $\Delta\theta$  随温度的变化曲线

Fig. 6  $\Delta\theta$  as a function of temperature of KTP for THG

晶体按照实验结果 ( $\Delta\theta = 0.27^\circ$ ) 对角度进行修整后测量为  $\theta = 85.04^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ 。将晶体放入激光腔中重新进行实验, 并通过调节温度的方法来观察输出  $440 \text{ nm}$  蓝光功率的变化情况, 寻找最佳相位匹配温度, 如图 7 所示, 在  $18^\circ\text{C}$  时功率达到最大值。

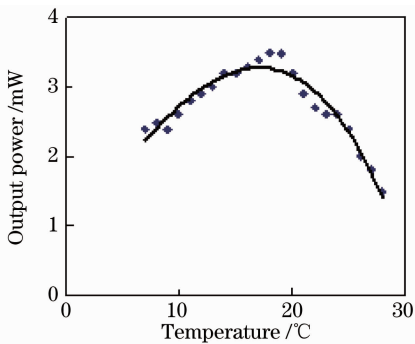


图 7 蓝光输出功率随温度的变化曲线

Fig. 7 Output power of blue laser as a function of temperature

## 4 结 论

根据激光器运转时, 输出激光强度随着腔中器件的偏转变化较为明显的原理, 在理论计算的基础上, 采用旋转晶体和调节温度的方法对三倍频 KTP 晶体切割角的大小进行了实验测量, 最终确定  $1319 \text{ nm}$  激光三倍频 KTP 晶体相位匹配角的大小为  $\theta = 85.04^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 对应的最佳工作温度为  $18^\circ\text{C}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 W. P. Risk, W. Length. Room-temperature, continuous-wave, 946-nm Nd:YAG laser pumped by laser-diode arrays and intracavity frequency doubling to 473 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12): 993~995
- 2 P. Zeller, P. Peuser. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the  $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$  transitions of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 34~36
- 3 C. Czeranowsky, M. Schmidt, E. Heumann *et al.*. Continuous-wave diode pumped intracavity doubled Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with 840 mW output power at 456 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**(4-6): 361~365
- 4 Z. P. Sun, R. N. Li, Y. Bi *et al.*. Generation of 4.3-W coherent blue light by frequency-tripling of a side-pumped Nd:YAG laser in LBO crystals[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(26): 6428~6433
- 5 H. B. Peng, W. Hou, Y. H. Chen *et al.*. Generation of 7.6 W of blue laser by frequency-tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(14): 6543~6549
- 6 X. D. Mu, Yujie J. Ding. Efficient third-harmonic generation in partly periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 623~625
- 7 X. D. Mu, Yujie J. Ding. Efficient generation of coherent blue light at 440 nm by intracavity-frequency-tripling 1319-nm emission from a Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1372~1374
- 8 Li Jingzhao, Zhu Haiyong, Chen Zhenqiang *et al.*. All-solid-state continuous-wave laser at 447nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 28~32  
李景照, 朱海永, 陈振强 等. 全固态 447 nm 连续激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 28~32
- 9 Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology*[M] (1st ed.). Beijing: Science Press, 1995. 18  
姚建铨. *非线性光学频率变换及激光调谐技术*[M](第 1 版). 北京: 科学出版社, 1995. 18
- 10 D. Z. Shen, C. E. Huang. A new nonlinear optical crystal KTP[J]. *Prog. Crystal Growth Characterization*, 1985, **11**: 269~274
- 11 SNLO nonlinear optics code available from A. V. Smith[CP]. Sandia National Laboratories, Albuquerque, N M 87185-1423
- 12 K. Kato. Temperature insensitive SHG at  $0.5321 \mu\text{m}$  in KTP [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10): 1974~1976
- 13 K. Kato, E. Takaoka. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for KTP[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24): 5040~5044
- 14 B. Boulanger, J. P. Fève, G. Marnier. Absolute measurement of quadratic nonlinearities from phase-matched second-harmonic generation in a single KTP crystal cut as a sphere[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **14**(6): 1380~1386
- 15 Wen Wuqi, Liu Huan, Cai Zhiqiang *et al.*. LD side-pumped Nd:YAG/KTP CW laser with 1.8 W output at 659.5 nm[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(10): 1167~1170  
温午麒, 刘欢, 蔡志强 等. LD 侧面抽运 Nd:YAG/KTP 连续波 1.8 W 659.5 nm 激光器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(10): 1167~1170
- 16 Yang Tao, Wang Jianjun, Jiang Dongsheng *et al.*. All-solid-state red laser with 83 W output power at 659.5 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1178~1181  
杨涛, 王建军, 姜东升 等. 83 W 659.5 nm 全固态红光激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1178~1181
- 17 Wen Wuqi, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. LD pumped Nd:YAG/KTP quasi-continuous wave red light laser with 8.1 W output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1281~1284  
温午麒, 姚建铨, 丁欣 等. 8.1 W 全固态准连续红光 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1281~1284
- 18 Gao Lanlan, Tan Huiming, Chen Yingxin. To eliminate the

walk-off effect in intracavity doubling blue laser with two BBO crystals[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3): 245~247

高兰兰, 檀慧明, 陈颖新. 双 BBO 腔内倍频消除走离效应对激光器的影响[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3): 245~247

19 F. Bréhat, B. Wyncke. Calculation of double-refraction walk-off angle along the phase-matching directions in non-linear biaxial crystals[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1989, **22**(11): 1891~1898