物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

KTP倍频器件温度适应性扩展研究

李晓明　沈学举　刘恂　王琳

Study on temperature adaptability extension of KTP frequency-doubling device

Li Xiao-Ming　Shen Xue-Ju　Liu Xun　Wang Lin

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 64, 094205 (2015)　DOI: 10.7498/aps.64.094205
在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094205
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

空气中等离子光栅诱导探测光丝三次谐波辐射放大的实验研究
Efficient generation of third harmonic radiation of air filament induced by plasma grating
物理学报.2014, 63(18): 184206　http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184206

利用椭圆高斯光束产生266nm紫外连续激光
Generation of 266 nm continuous-wave with elliptical Gaussian beams
物理学报.2014, 63(5): 054204　http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054204

高非线性光纤中四波混频的磁控机理研究
Research on magnetic control mechanism of four-wave mixing in highly nonlinear fiber
物理学报.2013, 62(2): 024213　http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024213

飞秒强激光脉冲驱动Ne高次谐波蓝移产生相干可调谐极紫外光实验研究
Investigation of tunable coherent XUV light source by high harmonics generation using intense femtosecond laser pulses in Ne
物理学报.2013, 62(2): 024212　http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024212

可调谐准相位匹配高效宽带二次谐波转换
Tunable high efficiency broadband second-harmonic conversion in quasi-phase matching
物理学报.2012, 61(23): 234206　http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.234206

KTP倍频器件温度适应性扩展研究

李晓明[1)†] 沈学举[1)] 刘恂[1)] 王琳[2)]

1) (军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003)

2) (中国人民解放军77108部队, 成都 611233)

(2014年10月26日收到; 2014年11月5日收到修改稿)

针对目前最常用的KTP倍频晶体, 综合考虑其有效非线性系数和温度半宽度, 采用折中设计有效扩展KTP倍频器件适用温度范围. 对大适用温度范围的KTP倍频器件的设计方法进行了详细的理论分析, 并设计了一种温度半宽度为 −20 °C 到 50 °C 的KTP倍频器件. 实验结果表明该器件在15 °C时达到峰值转换效率22.7%, 温度半宽度为70 °C. 和通常情况下设计的KTP倍频器件相比, 尽管倍频转换效率有所下降, 但显著提高了适用温度范围. 且在温度半宽度高达70 °C情况下, 其有效非线性系数仍大于LBO, BBO等倍频器件. 该方法对于扩展倍频器件的温度适应性具有普适性.

关键词: 非线性光学效应, 倍频器件, 温度适应性, 相位匹配

PACS: 42.65.ky, 42.70.Mp **DOI:** 10.7498/aps.64.094205

1 引 言

三波互作用效应如倍频、差频、参量振荡等已广泛应用于产生特殊波段激光和可调谐光源. 非线性频率变换时, 相互耦合激光需要满足相配匹配条件，而晶体中实际上存在无数个相位匹配角度, 相位匹配角度不同, 输出激光特性也有所变化. KTP晶体作为目前最常用的倍频晶体之一, 为得到最佳倍频效果, 一般采用非临界相位匹配, 常温下其相位匹配角度为$\theta = 90°$, $\varphi = 23.5°$ [1−3], 此时能够得到较高的转换效率和较小走离角, 但适用温度范围小, 其温度半宽度为35 °C左右, 不能满足大适用温度范围情况下的使用要求. 在研究KTP 晶体的温度适应性过程中, Grechin等[4,5]研究发现, 当KTP晶体的相位匹配角度为$\theta = 71.1°$, $\varphi = 67°$时, 温度半宽度超过210 °C, 但此时有效非线性系数很小, 倍频转换效率很低, 不能实用. 为扩展KTP倍频器件的温度适应性, 本文通过定量分析KTP晶体在不同相位匹配方向上的温度半宽度, 并计算有效非线性系数、允许角和走离角等参量, 采用折中方式设计大温度适用范围的KTP倍频器件.

2 KTP倍频器件温度适应性扩展设计

小信号近似下, 倍频转换效率$\eta_{\rm SHG}$与相位失配量Δk以及有效非线性系数$d_{\rm eff}$存在如下关系[6]:

$$\eta_{\rm SHG} \propto \left[\sin\left(\frac{\Delta kl}{2}\Big/\frac{\Delta kl}{2}\right)\right]\cdot d_{\rm eff}^2, \tag{1}$$

式中l为介质长度, 由(1)式可知, 转换效率受相位失配量Δk和有效非线性系数$d_{\rm eff}$影响. 相位失配量Δk与相位匹配角度θ, φ, 温度T, 两互作用光波波长λ_1, λ_2有关, 当晶体处于最佳相位匹配状态时, 记为

$$\Delta k\,(\theta,\ \varphi,\ T,\ \lambda_1,\ \lambda_2) = 0. \tag{2}$$

当T为18 °C, 根据色散方程和晶体中主折射率方程[7,8], KTP 晶体对1064 nm基频光倍频, 计算得到满足(2)式时晶体中I类和II类相位匹配角度如图1所示.

† 通信作者. E-mail: mouwat@163.com

© 2015 中国物理学会 Chinese Physical Society

由图1可知, 对KTP晶体, I类相位匹配和II类相位匹配都存在着无数个相位匹配角度, 为表达方便, 将相位匹配角度θ, φ写作(θ, φ). 对于I类相位匹配, 相位匹配角度存在于$(39°, 90°)$至$(49°, 0°)$之间, 且在yoz主平面和xoz主平面各有一个相位匹配角度; 对于II类相位匹配, 相位匹配角存在于$(68°, 90°)$至$(90°, 23.3°)$之间, 且在yoz主平面和xoy主平面内各存在一个相位匹配角度, 实际应用中多以xoy 为主平面, 取II类相位匹配角度为$(90°, 23.3°)$.

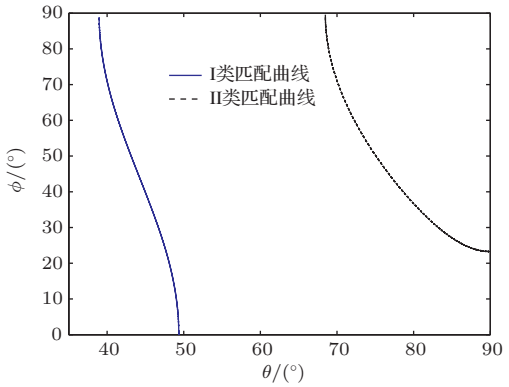

图1 I类和II类相位匹配角度曲线

Fig. 1. Angles curves of typeIand typeIIphase-matching.

在进行倍频转换时, 晶体工作环境温度变化会改变晶体主折射率, 引起相位失配. 当晶体温度T偏离初始匹配温度T_0时, 对相位失配量Δk进行泰勒展开

$$\Delta k = \Delta k\,|_{T=T_0} + \frac{\partial \Delta k}{\partial T}\bigg|_{T=T_0} \times \Delta T + \frac{\partial^2 \Delta k}{\partial T^2}\bigg|_{T=T_0} \cdot (\Delta T)^2 + \cdots \tag{3}$$

对I类匹配

$$\begin{aligned}\Delta k =& \Delta k\,|_{T=T_0} + \frac{\partial\left(\dfrac{4\pi}{\lambda(\omega)}(n_{\mathrm{s},\omega} - n_{\mathrm{f},2\omega})\right)}{\partial T}\bigg|_{T=T_0} \cdot \Delta T \\ =& \Delta k\,|_{T=T_0} + \frac{4\pi}{\lambda(\omega)} \times \left(\frac{\partial n_{\mathrm{s},\omega}}{\partial T} - \frac{\partial n_{\mathrm{f},2\omega}}{\partial T}\right)\bigg|_{T=T_0} \cdot \Delta T.\end{aligned} \tag{4}$$

对II类匹配

$$\begin{aligned}\Delta k =& \Delta k\,|_{T=T_0} + \frac{\partial\left(\dfrac{4\pi}{\lambda(\omega)}\left(\dfrac{n_{\mathrm{s},\omega}}{2} + \dfrac{n_{\mathrm{f},\omega}}{2} - n_{\mathrm{f},2\omega}\right)\right)}{\partial T}\bigg|_{T=T_0} \times \Delta T \\ =& \Delta k\,|_{T=T_0} + \frac{4\pi}{\lambda(\omega)} \times \left(\frac{1}{2}\left(\frac{\partial n_{\mathrm{s},\omega}}{\partial T} + \frac{\partial n_{\mathrm{f},\omega}}{\partial T}\right) - \frac{\partial n_{\mathrm{f},2\omega}}{\partial T}\right)\bigg|_{T=T_0} \times \Delta T,\end{aligned} \tag{5}$$

式中, s指慢光, f指快光, 主折射率$n_{i,j}$对温度T的关系满足下式[5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial n_{i,j}}{\partial T} =& \frac{n_{i,j}^3}{4}\left[\frac{\partial B_i}{\partial T} \pm \frac{B_i \dfrac{\partial B_i}{\partial T} - 2\dfrac{\partial C_i}{\partial T}}{(B_i^2 - 4C_i)^{1/2}}\right] \\ =& n_{i,j} A_{i,j},\end{aligned} \tag{6}$$

式中, i为ω和2ω, j为s和f, 加号指f分量, 减号指s分量, B_i和C_i满足如下关系:

$$\begin{aligned}\frac{\partial B_i}{\partial T} =& -k_x^2\left(\frac{\partial b_i}{\partial T} + \frac{\partial c_i}{\partial T}\right) - k_y^2\left(\frac{\partial a_i}{\partial T} + \frac{\partial c_i}{\partial T}\right) \\ & - k_z^2\left(\frac{\partial a_i}{\partial T} + \frac{\partial b_i}{\partial T}\right),\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_i}{\partial T} =& k_x^2\left(b_i\frac{\partial c_i}{\partial T} + c_i\frac{\partial b_i}{\partial T}\right) + k_y^2\left(a_i\frac{\partial c_i}{\partial T} + c_i\frac{\partial a_i}{\partial T}\right) \\ & - k_z^2\left(a_i\frac{\partial b_i}{\partial T} + b_i\frac{\partial a_i}{\partial T}\right),\end{aligned} \tag{8}$$

$$a_i = n_{i,1}^{-2}, \quad b_i = n_{i,2}^{-2}, \quad c_i = n_{i,3}^{-2}, \tag{9}$$

$$\begin{aligned}k_x =& \sin\theta\cos\varphi, \quad k_y = \sin\theta\sin\varphi, \\ k_z =& \cos\theta.\end{aligned} \tag{10}$$

由(1)式求出转换效率为最大值一半时的相位失配量, 再由(4)—(10)式求得不同相位匹配角时适应温度半宽与θ的关系如图2所示, 适应温度半宽定义为非线性转换效率为最大值一半时最高温度和最低温度之差.

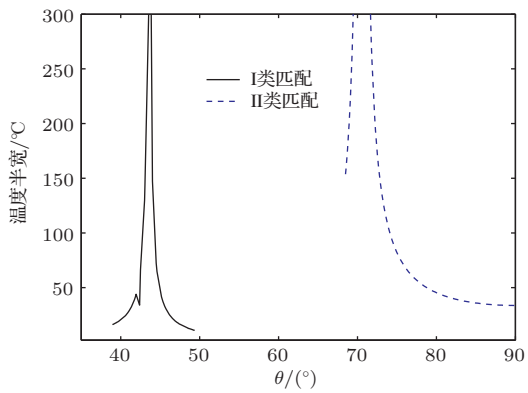

图2 相位匹配适应温度半宽随θ角变化的关系曲线

Fig. 2. Temperature halfwidth of phase-matching vs θ angles.

从图2中可见, I类和II类相位匹配的温度半宽随匹配角度变化, 且各存在一组温度半宽理论近似无限大的相位匹配角度, 分别为(43.8°, 46.5°)和(70.6°, 67.7°). 对II类相位匹配, 匹配角度为(90°, 23.3°)时, 是目前常用的KTP晶体切割角度, 温度半宽为33.7 °C; 匹配角度为(70.6°, 67.7°)时, 温度半宽接近无限大, 这分别是晶体温度适用范围的两个极端, 若采用折中方案, 则可以在两角度之间根据需要设计满足相应适用温度范围的宽温晶体.

3 主要参量计算

在满足角度相位匹配和温度相位匹配前提下, 走离角、允许角和有效非线性系数等参数都会影响激光倍频效率和相关器件可靠性, 需要对其进一步计算.

采用文献[9]的方法求解得KTP晶体在不同温度下有效非线性系数随相位匹配角度变化关系如图3和图4所示.

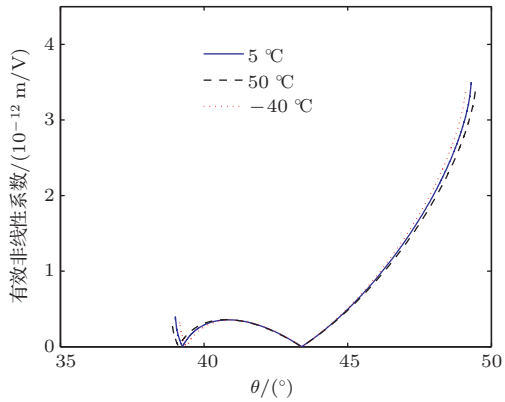

图3 不同温度时KTP晶体I类匹配有效非线性系数随θ的变化曲线

Fig. 3. Type I phase-matching effective nonlinear coefficients of KTP crystal vs θ angles in different temperatures.

从图3和图4可以看出, 温度变化对有效非线性系数大小的影响很小, 因此改变温度时, (1)式中$d_{\rm eff}$对转换效率的影响可以忽略; 角度变化对有效非线性系数影响很大, 改变相位匹配角时, (1)式中$d_{\rm eff}$对转换效率具有较大影响.

双轴晶体中, 需考虑θ和φ的允许角度, 以$\Delta k = \pm\pi/l$时的相位匹配角度与$\Delta k = 0$时的相位匹配角度之差为允许角度. 以KTP晶体II类相位匹配为例, 数值模拟中使用的晶体长度为7 mm, 对1064 nm激光倍频, 计算得到任意相位匹配角度时, θ允许角和φ允许角与θ关系如图5所示.

从图5中可以, 根据宽温要求扩展适应温度范围而调整了相位匹配角后, θ允许角变化不明显, 而φ允许角出现较大幅度下降, 当适用温度范围很宽时, θ允许角大幅增加, 而φ允许角在大幅下降后趋缓.

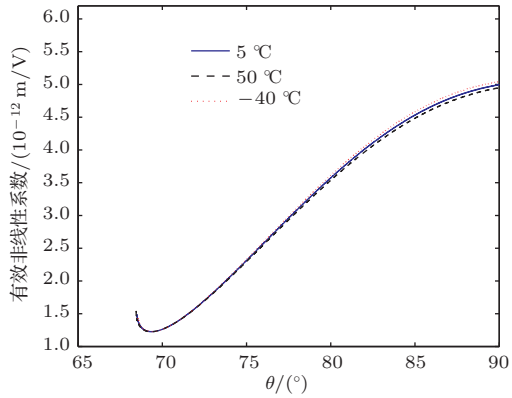

图4 不同温度时KTP晶体II类匹配有效非线性系数随θ的变化曲线

Fig. 4. Type II phase-matching effective nonlinear coefficients of KTP crystal vs θ angles in different temperatures.

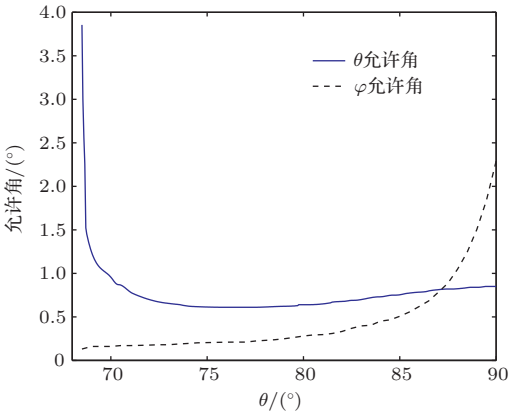

图5 II类相位匹配时θ和φ允许角随θ角变化的关系曲线

Fig. 5. Type II phase matching acceptance angles of θ and φ vs θ angles.

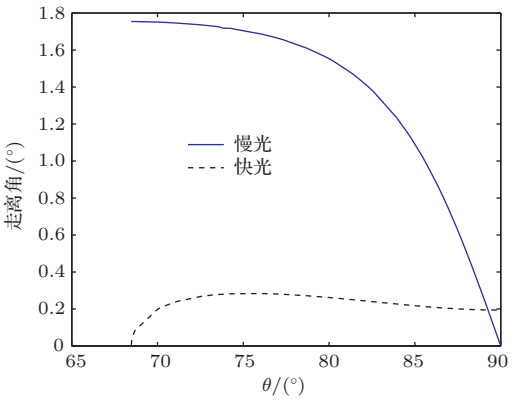

图6 慢光和快光走离角随θ角变化的关系曲线

Fig. 6. Walk-off angles of slow and fast light vs θ angles.

对于双轴晶体, 走离角发生在两个平面上, 慢光 $\boldsymbol{e}_1$ 和快光 $\boldsymbol{e}_2$ 方向对应的走离角不相同. 通过计算 $\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{E}$ 的夹角可确定光波走离角, 求得KTP晶体对1064 nm基频光倍频时偏振方向为 $\boldsymbol{e}_1$ 和 $\boldsymbol{e}_2$ 光波的走离角与 θ 角度的关系如图6所示.

从图6可知, 对KTP晶体, 改变相位匹配角度对快光走离角影响不大, 而慢光走离角随相位匹配角度的变化明显, 当处于(90°, 23.3°)时, 慢光走离角为零, 即实现角度非临界相位匹配.

4 实验及结果分析

实验设计了KTP晶体外腔倍频激光系统, 如图7所示, 采用BeamTech公司的SGR-10型脉冲激光器作为1064 nm激光源, 重频1 Hz, 透过小孔光阑后进入倍频晶体, 经1064/532 nm分光镜分离出532 nm倍频光被能量计接收. 倍频晶体放置于温控箱中, 能实现 −20 °C—50 °C范围的温度调节, 所用晶体尺寸为6 mm × 6 mm × 7 mm, 依据理论计算取KTP晶体相位匹配角度为(76.1°, 46.87°), 此时激光正入射时晶体适应温度半宽应为70 °C, 15 °C时应达到最大转换效率, 此外还使用匹配角度为(90°, 23.5°), 尺寸为6 mm × 6 mm × 6 mm的KTP晶体进行对比实验, 结果如图8所示.

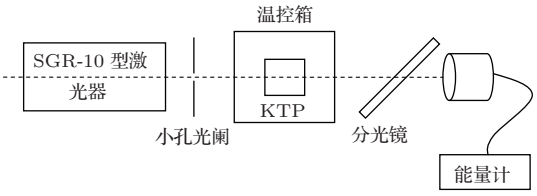

图7 实验装置示意图

Fig. 7. Schematic of experimental setup.

图8中基频光输出能量为46.95 mJ, 由图8知, (76.1°, 46.87°) 切割的KTP晶体的在 −20 °C到50 °C范围内均能实现有效倍频光输出, 15 °C时输出能量达到最大值10.65 mJ, 转换效率为22.7%, 在 −20 °C和50 °C时输出能量分别为6.161 mJ和4.717 mJ, 接近最大值的一半, 实验结果表明(76.1°, 46.87°)切割的晶体适应温度半宽达到70 °C, 与理论计算结果一致. 同(90°, 23.5°)切割KTP晶体相比, 虽然峰值转换效率有所下降, 但适应温度半宽得到极大扩展. 测得不同温度下(76.1°, 46.87°)晶体转换效率随基频光能量的变化关系如图9所示, 由图9可知转换效率随基频光能量增大而升高, 在一定基频光能量下, 15 °C时转换效率最高, 这是因为此时相位失配量最小; 基频光能量增大到一定量时, 转换效率均出现饱和, 这是因为随着基频光能量增加, 逆转换效应开始影响转换效率.

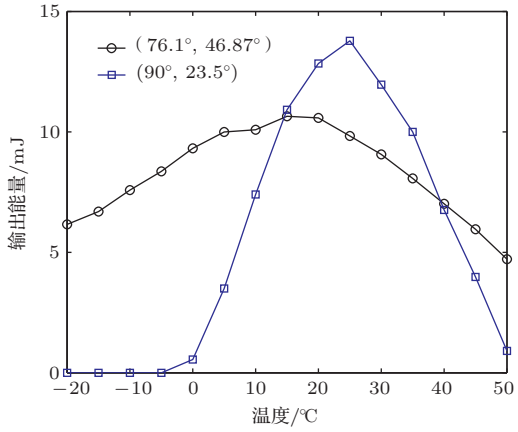

图8 转换效率随温度变化的关系曲线

Fig. 8. Conversion efficiency vs change of temperature.

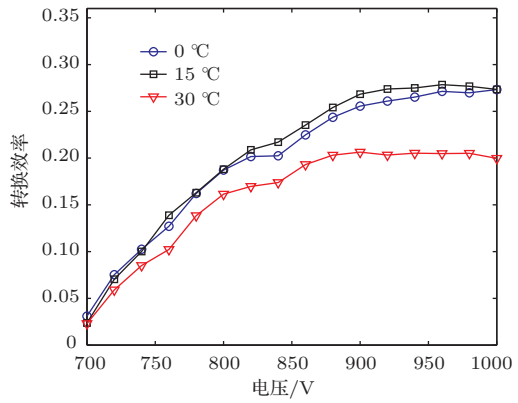

图9 不同温度下转换效率随基频光变化的关系曲线

Fig. 9. Conversion efficiency vs change of fundamental frequency light in different temperatures.

5 与其他常用晶体的对比

扩展KTP晶体倍频的适用温度范围, 需选择合适的相位匹配角度. 相位匹配角度改变时, 有效非线性系数、允许角、走离角等都将发生变化. 以适应温度半宽为70 °C的KTP晶体为例, 比较LBO, BBO等几种常用的非线性倍频晶体的主要性能指标[10−13]如表1所示.

宽温KTP晶体相位匹配角度为(76.1°, 46.87°), 普通KTP晶体的相位匹配角度为(90°, 23.3°). 表1中LBO和BBO的适应温度半宽采用的是三波互作用允许温度数据[13]换算而来, 达到最大允许温度时, 三波互作用效率下降为最大值的 $4/\pi^2$, 大约为40%, 允许温度比半宽温度稍大, 因此不影响后续分析.

表 1 常用倍频晶体及其主要参数

Table 1. Several nonlinear crystals and its main parameters.

	LBO	BBO	宽温 KTP	普通 KTP
适应温度半宽/°C	5.6	16.1	70	33.7
有效非线性系数/(10^{-12} m/V)	0.92	2.08	2.59	5.0
走离角/(°)	0.7	3.5	1.687(慢光) 0.284 (快光)	0(慢光) 0.194(快光)
θ 允许角/mrad·cm	2.29	0.42	2.56	27.96

从表1中可知, 与普通KTP晶体相比, 宽温KTP的适用温度范围得到很大扩展, 达到70 °C, 但有效非线性系数、走离角、θ允许角等指标性能均有所下降. 与另外两种常用非线性晶体LBO, BBO相比, 宽温KTP晶体的有效非线性系数和允许角更大, 快光走离角最小, 慢光走离角介于LBO和BBO之间, 而适用温度半宽则远高于后两者.

实际中, 在某些适用温度范围要求不需要70 °C的场合, 根据本文计算结果, 可根据需要自行设计晶体切割角度, 在满足要求的适用温度半宽前提下, 提高有效非线性系数, 降低走离和扩大允许角, 以获得更高的输出能量并提升系统可靠性.

6 结 论

本文主要进行了KTP倍频器件温度适应性扩展研究, 通过与常用倍频晶体的对比, 理论证明通过改变相位匹配角度来获得宽适用温度范围的方法可行. 根据理论分析结果设计的KTP外腔倍频激光器在 −20 °C—50 °C温度范围内实现有效的倍频光输出, 峰值转换效率为22.7%. 根据非线性光学频率变换相关理论可知, 本文研究思路同样适用于其他二次谐波非线性晶体, 也可用于和频、差频和参量振荡等其他非线性效应的研究.

参考文献

[1] Wang Y Y, Xu D G, Liu C M, Wang W P, Yao J Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094212

[2] Zhang Y P, Zhang H Y, He Z H, Wang P, Li X F, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4647 (in Chinese) [张玉萍, 张会云, 何志红, 王鹏, 李喜福, 姚建铨 2009 物理学报 **58** 4647]

[3] Zhang H Y, Zhang Y P, Zhong K, Wang P, Li X F, Yao J Q 2008 *Chinese J. Lasers* **35** 3 (in Chinese) [张会云, 张玉萍, 钟凯, 王鹏, 李喜福, 姚建铨 2008 中国激光 **35** 3]

[4] Grechin S G, Dmitriev V G, D'yakov V A, Pryalkin V I 1998 *IEEE J. Quant. Elect.* **28** 937

[5] Grechin S G, Dmitriev V G, D'yakov V A, Pryalkin V I 1999 *IEEE J. Quant. Elect.* **29** 77

[6] Ma Y H, Zhao J L, Wang W L, Huang W D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2084 (in Chinese) [马仰华, 赵建林, 王文礼, 黄卫东 2005 物理学报 **54** 2084]

[7] Kato K 1991 *IEEE J. Quant. Elect.* **27** 1137

[8] Kato K 1992 *IEEE J. Quant. Elect.* **28** 1974

[9] Yao J Q, Xu D G 2007 All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Coversion Technology (Beijing: Higher Education Press) p681 (in Chinese) [姚建铨, 徐德刚 2007 全固态激光及非线性光学频率变换技术 (北京: 科学出版社) 第 681 页]

[10] Czeranowsky C, Heumann E, Huber G 2003 *Opt. Lett.* **28** 432

[11] Kellner T, Heine F, Huber G 1997 *Appl. Phys. B-Lasers O.* **65** 789

[12] Zheng Q, Zhao L 2004 *Opt. Laser Technol.* **36** 449

[13] Zheng Q, Zhao L, Dong S M 2004 *Chinese J. Lasers* **31** 1030 (in Chinese) [郑权, 赵岭, 董胜明 2004 中国激光 **31** 1030]

Study on temperature adaptability extension of KTP frequency-doubling device

Li Xiao-Ming[1)†] Shen Xue-Ju[1)] Liu Xun[1)] Wang Lin[2)]

1) (*Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

2) (*People's Liberation Army of 77, 108 troops, Chengdu 611233, China*)

(Received 26 October 2014; revised manuscript received 5 November 2014)

Abstract

For the most commonly used KTP frequency-doubling crystal, its temperature adaptability range should be effectively extended. For this purpose, a compromise design is given by comprehensively considering both its effective nonlinear coefficient and the half-width of temperature range. The design method of KTP frequency-doubling device with a wide temperature range is analyzed in detail; furthermore, the curves of effective nonlinear coefficients, acceptance angles, and walk-off angles as a function of phase-matching angle are plotted via computer simulation. According to the results of theoretical study, a device used in the temperature range from −20 °C to 50 °C is designed and validated experimentally by the KTP external cavity frequency-doubling laser. Experimental results indicate that a peak conversion efficiency of 22.7% at 15 °C with a 70 °C temperature halfwidth is achieved by using the designed device. Compared with the commonly designed KTP frequency-doubling device, the temperature adaptability range increases notably although its frequency conversion efficiency decreases a little. Additionally, the effective nonlinear coefficient is still bigger than that of the commonly used crystals such as LBO and BBO when temperature halfwidth increases to 70 °C. The above method would have the potential for extending the temperature adaptability range of other frequency-doubling devices.

Keywords: nonlinear optical effect, frequency-doubling device, temperature adaptability, phase-matching

PACS: 42.65.ky, 42.70.Mp **DOI:** 10.7498/aps.64.094205

† Corresponding author. E-mail: mouwat@163.com