

文章编号: 0253-2239(2010)04-1061-05

KBe₂BO₃F₂ 晶体的非共线倍频特性数值分析

薛建华 王爱坤* 杨 韧 吕树慧 任清华

(河北科技大学物理系, 河北 石家庄 050018)

摘要 根据 KBBF(KBe₂BO₃F₂)晶体的色散方程、非共线相位匹配时各个光束应该满足的能量和动量守恒条件,用牛顿-拉夫逊迭代法求解非线性方程组,以 YAG 激光器 1064 nm 波长入射为例,数值计算了 KBBF 晶体的 I 类非共线倍频相位匹配角、有效非线性系数和允许角。结果以关系曲线形式给出。第一束基频波角度在 20°~85°的范围内,都可以实现非共线相位匹配,相应的第二基频波和倍频波的匹配角度在 29.1°~52.7°,24.6°~68.8°范围内;随着第一束基频波角度的增大,第二基频波和倍频波的相位匹配角以及倍频光相位匹配允许角也相应增大,而有效非线性系数随之减小;当第一束基频波的角度在 26.1°~26.8°的范围内时它们的取值都出现了振荡现象。

关键词 非线性光学;非共线倍频特性;牛顿-拉夫逊迭代法;KBe₂BO₃F₂ 晶体;相位匹配角;有效非线性系数;允许角

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103004.1061

Numerical Analysis of the Properties of Second Harmonic Generation Under Non-Collinear Phase Matching on KBe₂BO₃F₂ Crystal

Xue Jianhua Wang Aikun Yang Ren Lü Shuhui Ren Qinghua

(Physics Department, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract Based on the Sellmeier equations of KBe₂BO₃F₂ (KBBF), non-collinear phase matching conditions and Newton-Raphson iterative approach, the type-I second harmonic phase-matching angle, effective nonlinear coefficient and the acceptance angle of KBBF crystal whose fundamental-wave wavelength is 1064 nm are respectively calculated with numerical method, under the non-collinear phase matching. The results show that the non-collinear phase matching can be realized when the angle of the first fundamental-wave angle is 20°~85°. Accordingly the angle of the second fundamental-wave the double-frequency wave is 29.1°~52.7° and 24.6°~68.83° respectively. The effective nonlinear coefficient decreases and the acceptance angle increases as the first fundamental-wave angle grows. When the first fundamental-wave angle is 26.1°~26.8°, both of them have an oscillation phenomenon.

Key words nonlinear optics; properties of second harmonic under non-collinear phase matching; Newton-Raphson iterative approach; KBe₂BO₃F₂ crystal; phase matching angle; effective nonlinear coefficient; acceptance angle

1 引 言

利用全固态激光器通过非线性光学晶体变频来获得深紫外激光一直是激光领域研究热点之一^[1~9]。在目前的深紫外实用晶体中,KBe₂BO₃F₂ (KBBF)晶体是目前唯一能在理论和实验中实现

200 nm 以下激光倍频输出的晶体^[10,11]。其非线性系数大,抗光损伤阈值高,透光波段宽,且深紫外区透光性能好,紫外吸收边在 150 nm 左右。KBBF 晶体的非线性性质的研究主要是计算其 I 类共线相位匹配角以及转换效率等^[10~12]。而在光学晶体的变

收稿日期: 2009-04-24; 收到修改稿日期: 2009-05-27

基金项目: 河北科技大学青年基金(2006JC-17)和河北省科技厅科技攻关计划(05213549)资助课题。

作者简介: 薛建华(1974—),女,硕士,副教授,主要从事固体激光及非线性光学频率变换等方面的研究。

E-mail: xuejianhua@hebest.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wak1962@sina.com

频技术中,非共线相位匹配结构因具有作用光束空间分离等特性,近年来在超短脉冲测量、红外信号探测、光学参量过程等技术中和相关光子计量学方面获得快速进展^[13~18]。因此研究 KBBF 晶体在非共线相位匹配下的光学频率变换特性非常必要。本文对其 I 类非共线倍频光学特性进行了数值分析计算。

2 KBBF 晶体的 I 类非共线倍频特性

2.1 相位匹配角

为有效的进行非线性光学频率变换,必须使参与相互作用的光波在介质中传播时具有相同的相速度,利用非线性晶体的双折射与色散特性达到相位匹配。

KBBF 晶体是负单轴晶体, ($n_o > n_e$), 常温下色散方程^[10]为

$$n_o^2(\lambda) = 1 + \frac{1.169725\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0061926} - 0.009904\lambda^2, \quad (1)$$

$$n_e^2(\lambda) = 1 + \frac{0.956611\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0061926} - 0.027849\lambda^2, \quad (2)$$

式中 λ 为波长,以 μm 为单位, n_o, n_e 分别为寻常光和非寻常光的折射率。

非共线倍频过程作为典型的三波耦合非线性过程,也必须满足能量和动量守恒条件。设参与相互作用的三个光波的圆频率分别为 ω_1, ω_2 和 ω_3 , 其波矢分别为 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ 和 \mathbf{k}_3 。根据能量守恒定律,有

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2, \quad (3)$$

根据动量守恒定理,完全相位匹配时,有

$$\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 = 0, \quad (4)$$

即

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3. \quad (5)$$

由于

$$\mathbf{k}_i = \frac{\omega_i}{c} n_i \mathbf{j}_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

式中 \mathbf{j}_i 是波矢 \mathbf{k}_i 的单位矢量, n_i 是频率为 ω_i 的光波在介质中的折射率。将(6)式代入(4)式中,则有

$$\Delta\mathbf{k} = \frac{\omega_1}{c} n_1 \mathbf{j}_1 + \frac{\omega_2}{c} n_2 \mathbf{j}_2 - \frac{\omega_3}{c} n_3 \mathbf{j}_3. \quad (7)$$

所谓非共线相位匹配是指光波 1, 光波 2 和光波 3 分别沿不同方向传播并满足(4)式的要求。图 1 是三波非共线相互作用的波矢关系图,图中所选坐标系为单轴晶主轴坐标系, x_3 轴为晶体光轴,三光波波矢 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ 与 x_3 轴的夹角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$; 在 x_1ax_2 平面上的投影与 x_1 轴的夹角分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 。如果考虑三束光波共主截面,即 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$, 一般地,以 x_2ax_3 主截面进行讨论,如图 2 所示。则由图 2 及

(4) 式、(6) 式可推得三光波在主截面内满足非共线相位匹配时的数学表达式为

$$\omega_3^2 n_p^2(\theta_3, \omega_3) = \omega_1^2 n_p^2(\theta_1, \omega_1) + \omega_2^2 n_p^2(\theta_2, \omega_2) + 2\omega_1\omega_2 n_p(\theta_1, \omega_1) n_p(\theta_2, \omega_2) \cos(\theta_2 - \theta_1), \quad (8)$$

$$\theta_3 = \theta_1 + \arccos \times$$

$$\left| \frac{\omega_1^2 n_p^2(\theta_1, \omega_1) + c^2 \omega_3^2 n_p^2(\theta_1, \omega_1) - \omega_2^2 n_p^2(\theta_2, \omega_2)}{2\omega_1 n_p(\theta_1, \omega_1) \omega_3 n_p(\theta_3, \omega_3) / c} \right|, \quad (9)$$

式中下标 p 表示光波在晶体内的偏振方向,由单轴晶体种类和相位匹配类型来决定。

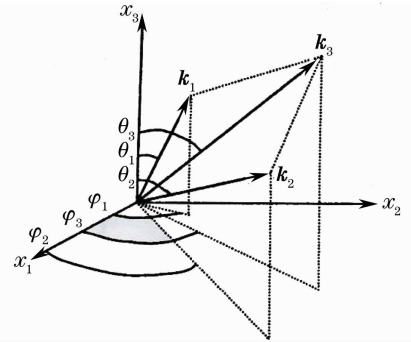


图 1 三波非共线相位匹配波矢关系图

Fig. 1 Vector diagram of non-collinear phase-matching

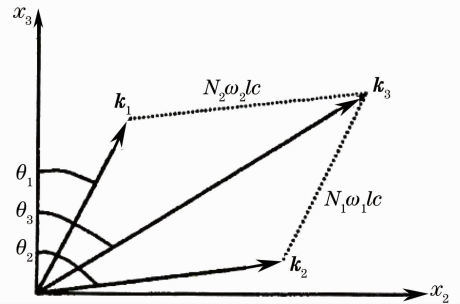


图 2 主截面内三波非共线相位匹配波矢量图

Fig. 2 Vector diagram of non-collinear phase-matching in principal section

下面将讨论非共线条件下 KBBF 晶体的 I 类相位匹配 $o+o \rightarrow e$ 的倍频情况。

对于倍频过程有 $\omega_1 = \omega_2 = \omega, \omega_3 = 2\omega$, 得到

$$n_1(\theta_1, \omega_1) = n_2(\theta_2, \omega_2) = n_o(\omega). \quad (10)$$

光波 3(倍频光)为非寻常光, $\omega_3 = 2\omega$, 其折射率为

$$n_3(\theta_3, \omega_3) = n_e(\theta_3, 2\omega) = \left[\frac{n_o^2(2\omega) n_e^2(2\omega)}{n_o^2(2\omega) \sin^2 \theta_3 + n_e^2(2\omega) \cos^2 \theta_3} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

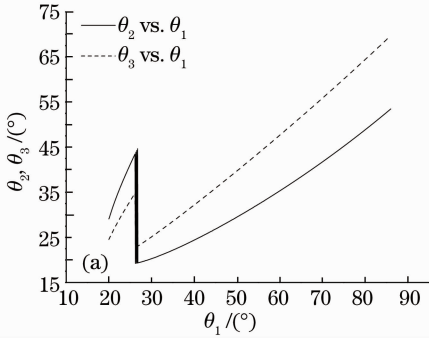
根据(8)~(10)式,可以得到 I 类非共线倍频相位匹配条件:

$$\omega_3^2 n_3^2(\theta_3, \omega_3) = \omega_1^2 n_o^2(\omega_1) + \omega_2^2 n_o^2(\omega_2) + 2\omega_1\omega_2 n_o(\omega_1) n_o(\omega_2) \cos(\theta_2 - \theta_1), \quad (12)$$

$$\theta_3 = \theta_1 +$$

$$\arccos \left| \frac{\omega_1^2 n_o^2(\omega_1) + c^2 \omega_3^2 n_o^2(\omega_1) - \omega_2^2 n_o^2(\omega_2)}{2\omega_1 n_o(\omega_1) \omega_3 n_e(\theta_3, \omega_3) / c} \right|. \quad (13)$$

对(1),(12),(13)式进行数值求解,得到第一束



入射基波与 KBBF 晶体光轴角度在 $20^\circ \sim 85^\circ$ 时, KBBF 晶体的 I 类非共线倍频相位匹配角曲线如图 3 所示。

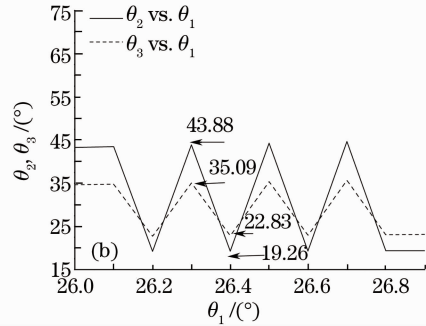


图 3 主截面非共线 I 类相位匹配数据曲线。(a) $0 \sim 85^\circ$; (b) $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$

Fig. 3 Curve of non-collinear type I phase-matching data in principal section. (a) $0 \sim 85^\circ$; (b) $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$

2.2 相位匹配的有效非线性系数

KBBF 晶体的 I 类非共线倍频时的有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_3 \cos \varphi \\ -\cos \theta_3 \sin \varphi \\ \sin \theta_3 \end{bmatrix}^T \mathbf{d} \begin{bmatrix} \sin^2 \varphi \\ \cos^2 \varphi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2 \sin \varphi \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

则

$$d_{\text{eff}} = d_{11} \cos \theta_3 \cos 3\varphi. \quad (15)$$

d_{eff} 与第一束入射基频光角度之间的曲线如图 4 所示。

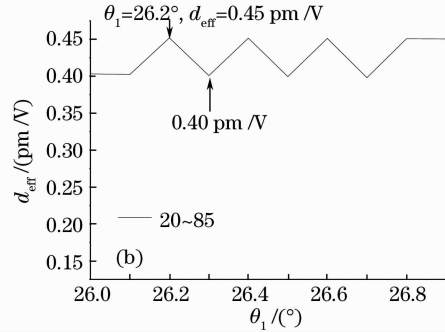
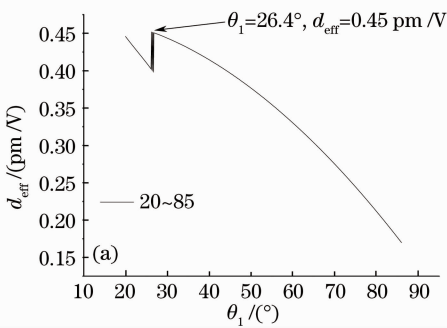


图 4 有效非线性系数与第一束基波倍频角度的关系曲线。(a) $0 \sim 85^\circ$; (b) $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$

Fig. 4 Curve of effective nonlinear coefficient vs the fundamental-wave angle under non-collinear type I phase-matching in the principal section. (a) $0 \sim 85^\circ$; (b) $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$

2.3 相位匹配允许角

三光波相互作用满足相位匹配时,要实现较高的转换效率,就必须考虑光束发散度的影响,即光束接受容限角(相位匹配允许角)的大小。

由图 2 可以得出,当三光波波矢满足相位匹配条件时,有

$$\tan \theta_3 = \frac{\omega_1 n_1 \sin \theta_1 + \omega_2 n_2 \sin \theta_2}{\omega_1 n_1 \cos \theta_1 + \omega_2 n_2 \cos \theta_2}. \quad (16)$$

定义相位失配因子:

$$\Delta \mathbf{k} = \Delta \mathbf{k} \Big|_{\theta=\theta_{\text{pm}}} + \frac{\partial(\Delta \mathbf{k})}{\partial(\theta)} \Big|_{\theta=\theta_{\text{pm}}} \times \Delta \theta + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\Delta \mathbf{k})}{\partial^2(\theta)} \Big|_{\theta=\theta_{\text{pm}}} (\Delta \theta)^2 + \dots, \quad (17)$$

取(17)式右边前两项,定义 $\frac{\partial(\Delta \mathbf{k})}{\partial(\theta)} \Big|_{\theta=\theta_{\text{pm}}}$ 为相位失配梯度。

当三光波满足相位匹配条件(3)和(4)式时,(17)式右边第一项 $\Delta \mathbf{k} \Big|_{\theta=\theta_{\text{pm}}} = 0$,且相位失配 $|\Delta \mathbf{k}| \leq \pi/l$ 时

(l 为晶体在谐波传播方向的长度), 相位失配在允许范围内, 故接受容限角(晶体内部角度)定义为

$$\Delta\theta_{ac} = \frac{\pi}{l} \left| \frac{\partial(\Delta\mathbf{k})}{\partial(\theta)} \right|_{\theta=\theta_{pm}}^{-1}. \quad (18)$$

考虑到非线性相位匹配下, 对第一基频光, 第二基频光和谐波(即晶体位置取向)均存在接受容限角

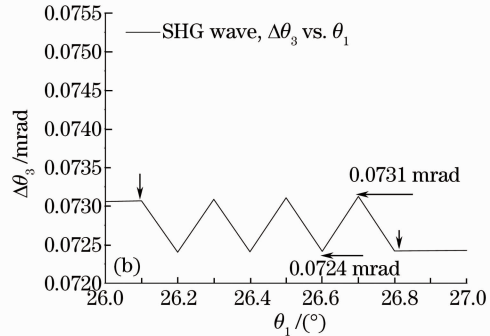
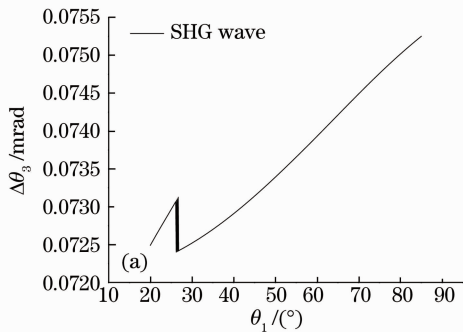


图 5 相位匹配接允许与第一束基波角度的关系曲线。(a) $0 \sim 85^\circ$; (b) $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$

Fig. 5 Curve for acceptance angle of harmonic beam versus the fundamental-wave angle under non-collinear type I phase-matching in the principal section. (a) $0 \sim 85^\circ$; (b) $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$

结果表明, 在第一束入射基波与其光轴角度在 $20^\circ \sim 85^\circ$ 时, KBBF 晶体有宽广的非共线倍频匹配角度, 相应的第二基频波和倍频波的匹配角度在 $29.1^\circ \sim 52.7^\circ$, $24.6^\circ \sim 68.8^\circ$ 范围内。第一束基频波的角度 θ_1 取 26.4° 时, 第二基频波和倍频波的相位匹配角 θ_2 和 θ_3 分别为 19.3° 和 22.8° , 此时有效非线性系数有最大值 0.45 pm/V , 谐波的允许角为 0.072 mrad 。

3 结 论

KBBF 晶体在满足 I 类非共线倍频完全相位匹配时, 第二基频波和倍频波的相位匹配角 θ_2 和 θ_3 随着第一束基频波的角度 θ_1 增大而增大; 有效非线性系数从总体上看随着 θ_1 的增大而减小; 随着 θ_1 的增大, 倍频光相位匹配允许角 $\Delta\theta_3$ 也相应的增大。但在 θ_1 从 $26.1^\circ \sim 26.8^\circ$ 的范围内它们的取值都出现振荡现象, θ_2 振荡范围在 $19.26^\circ \sim 43.88^\circ$, θ_3 振荡范围为 $22.83^\circ \sim 35.09^\circ$; d_{eff} 振荡范围为 $0.40 \sim 0.45 \text{ pm/V}$; $\Delta\theta_3$ 振荡范围为 $0.0724 \sim 0.0731 \text{ mrad}$ 。

参 考 文 献

- 1 Wang Xu, Liu Lei, Liu Juan *et al.*. Study of Q-switching ultraviolet Light Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(7): 537~538
王旭, 刘磊, 刘娟等. 调 Q 脉冲紫外光 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(7): 537~538
- 2 Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima *et al.*. New nonlinear optical crystal: cesium lithium borate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13): 1818~1820

大小问题, 故需要分别计算三束光波的相位失配梯度和接受容限角, 即在三束光波中固定任意两束在理想相位匹配位置, 对第三束光波的相位失配梯度和接受容限角进行计算, 结果如图 5 所示。

- 3 N. Umemura, K. Kato. Ultraviolet generation tunable to $0.185 \mu\text{m}$ in CsLiB₆O₁₀[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6794~6796
- 4 Li Wang, Jianhua Xue. Efficiency comparison analysis of second harmonic generation on flattened gaussian and gaussian beams through a crystal CsLiB₆O₁₀[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(12): 7373~7376
- 5 Li Wang, Jianhua Xue. Performance curves comparison of THG efficiency in CsLiB₆O₁₀ on flattened Gaussian and Gaussian beams [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 708~710
- 6 Wang Li, Xue Jianhua. Conversion efficiency properties of the second harmonic generation of flattened Gaussian and Gaussian beams in CsLiB₆O₁₀[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2003, **20**(5): 553~557
王丽, 薛建华. CsLiB₆O₁₀ 晶体用于平顶高斯光束和高斯光束二次谐波转换效率的特性比较[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 553~557
- 7 Yang Shengli. Phase matching parameters for doublings in principal planes of biaxial crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1159~1164
杨胜利. 双轴晶体主平面上倍频的相位匹配参量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1159~1164
- 8 Tan Tianya, Huang Jianbing, Zhan Meiqiong *et al.*. Design of 1064 nm, 532 nm frequency-tripled antireflection coating for LBO [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1327~1332
谭天亚, 黄建兵, 占美琼等. 三硼酸锂晶体上 1064 nm, 532 nm, 355 nm 三倍频增透膜的设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1327~1332
- 9 Teng Bing, Dong Shengming, Ding Yunfeng *et al.*. BiB₃O₆ nanosecond optical parametric oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1998~2001
滕冰, 董胜明, 丁蕴丰等. BiB₃O₆ 纳秒光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1998~2001
- 10 Chen Chuangtian, Lin Zheshuai. Recent development for UV and deep-UV nonlinear optical crystals[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2004, **33**(4): 455~463
- 11 Cheng Chuangtian, Xu Zuyan. Prism coupling technique and deep-UV harmonic output of KBBF crystal [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2002, **31**(3): 224~227
陈创天, 许彦祖. KBBF 晶体的棱镜耦合技术和深紫外谐波输出

- [J]. 人工晶体学报, 2002, **31**(3): 224~227
- 12 Zhang Jianxiu, Zhang Chengqian, Huang Qingjie *et al.*. Growth, surface morphology and defects of $\text{KBe}_2(\text{BO}_3)\text{F}_2$ crystal[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2003, **32**(1): 8~12
张建秀, 张承乾, 黄庆杰等. 氟硼铍钾晶体的生长、表面形貌和缺陷[J]. 人工晶体学报, 2003, **32**(1): 8~12
- 13 Xu Guibao, Wang Zhengping, Du Chenlin *et al.*. Investigation of noncollinear phase matching in uniaxial crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 315~321
许贵宝, 王正平, 杜晨林等. 单轴晶非共线相位匹配研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4): 315~321
- 14 Zhan Yiangqin, Zhao Hua, Gong Zhenglie *et al.*. Non-collinear phase matching for optical double-frequency crystal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(3): 17~34
詹仰钦, 赵华, 龚正烈. 光学倍频晶体的非共线相位匹配[J]. 光电工程, 2003, **30**(3): 17~34
- 15 Cao Hui, Sun Junqiang, Chen Guoqiang *et al.*. Investigation on the amplification of strong pulse signal in fiber optical parametric amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1329~1333
曹辉, 孙军强, 陈国杰等. 强脉冲信号在光纤参变放大器中的放大特性研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1329~1333
- 16 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study on the bandwidth of three-wave mixing optical parametric amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(8): 680~686
刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 三波混频光参量放大器中带宽的研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(8): 680~686
- 17 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Feng Yu *et al.*. The research of spontaneous parametric down-conversion and its application in the optics metrology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(7): 2~6
李健军, 郑小兵, 冯瑜等. 自发参量下转换的研究及其在光学计量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(7): 2~6
- 18 Hu Minyuan, Liang Xiaoyan, Zhao Baozhen *et al.*. Theoretical investigation on broad band semi-noncollinear optical parametric amplification in periodically poled lithium niobate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 146~150
胡志远, 梁晓燕, 赵宝真等. 周期性极化铌酸锂晶体中半非共线型宽带光学参变放大理论研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 146~150