

高效短脉冲宽带倍频绿光实现方法

张 新 张恒利 毛叶飞 桑思晗

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 针对纳秒量级调 Q 宽频带光纤激光器,分别模拟了利用光栅角色散补偿(ASD),棱镜ASD以及晶体级联方法对倍频效率的影响。采用LBO晶体I类相位匹配,通过数值求解高斯光束三波耦合方程,得到了入射基频光线宽、聚焦光斑位置、聚焦光斑大小以及晶体长度对倍频转换效率的影响,并对晶体参数进行优化。计算结果显示:直接倍频时,对于5 nm宽频带激光,倍频效率只有17%;采用光栅角色散补偿可以在大光谱范围内倍频效率达到70%以上;棱镜提供的补偿较小,但也能使倍频效率提高50%;三块晶体级联可以使倍频效率提高130%。

关键词 非线性光学; 宽带倍频; 色散; 晶体级联; 倍频效率

中图分类号 0437.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0202003

Efficient Methods of Green Output by Second Harmonic Generation with Short Pulse Broad-Band Laser

Zhang Xin Zhang Hengli Mao Yefei Sang Sihan

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The effect of the role on the second harmonic generation of the Q -switched broadband optical fiber laser are simulated by using the methods of grating angular spectral dispersion (ASD), prism ASD, and crystal cascade scheme. LBO crystal type I phase is used to match, by numerically solving the three wave coupling equations of Gauss beam, the incident light frequency width, focal position, focal spot size and crystal thickness influence on the conversion efficiency are obtained, and the parameters of crystal is optimized. The calculation results show that the second harmonic generation (SHG) efficiency is only 17% with the laser bandwidth of 5 nm; the use of the grating ASD can achieve frequency doubling efficiency of more than 70% in a large spectral range; the compensation of the prism is smaller, while can improve the efficiency by 50%; three crystal cascade can make the efficiency increased by 130%.

Key words nonlinear optics; broadband frequency doubling; dispersion; crystal cascade; second harmonic generation efficiency

OCIS codes 190.2620; 190.7070; 140.3515; 140.351

1 引 言

近年来近红外中功率(十瓦至百瓦)调 Q 输出光纤激光器研究进展迅速,成本急剧下降,若能利用有效的倍频(SHG)技术实现中高功率绿光输出,将会大幅降低中高功率绿光激光器的成本,从而具有巨大的市场前景。窄带激光倍频已经具备完善的理论体系^[1],并普遍用于实现绿光输出^[2-4]。但一般光纤激光器输出线宽比较宽(几个纳米),由于受到非线性晶体允许带宽的限制,直接倍频技术转换效率一般很低。为了提高倍频效率,人们提出了多种方法,例如角谱色散补偿法^[5]、多块晶体级联^[6-7]、采用薄的非线性晶体倍频^[8]、折返点匹配方案等^[6]。其中采用薄的非线性晶体可以增大允许波长,但牺牲了作用区长度,从而降低了转换效率。折

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-26

作者简介: 张 新(1991—),女,硕士研究生,主要从事非线性频率变换方面的研究。E-mail: zzhang_xin@126.com;

导师简介: 张恒利(1967—),男,教授,主要从事全固态激光器以及非线性频率变换方面的研究。

E-mail: zh1040325@bit.edu.cn(通信联系人)

返点匹配方案能有效地提高转换带宽和转换效率,但是一种非线性晶体只能在某一特定波长处实现折返点匹配,应用范围有限^[9]。本文针对调 Q 近红外光纤激光器,对光谱角色散补偿倍频以及晶体级联倍频技术进行理论研究。计算结果表明,相对于直接倍频,色散补偿法和晶体级联法都能有效提高倍频效率。

2 宽带谐波转换的理论模型

2.1 谐波转换理论模型

本文针对调 Q 宽光谱光纤激光作为基频光源,采用高斯光束耦合波方程^[10]

$$\frac{dE_1}{dz} = iB_1 \frac{E_3 E_2^*}{\sqrt{1 + (z - z_{\text{pot}})^2 / z_0^2}} \exp[-(i\Delta kz - i\phi)], \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = iB_2 \frac{E_3 E_1^*}{\sqrt{1 + (z - z_{\text{pot}})^2 / z_0^2}} \exp[-(i\Delta kz - i\phi)], \quad (2)$$

$$\frac{dE_3}{dz} = iB_3 \frac{E_1 E_2}{\sqrt{1 + (z - z_{\text{pot}})^2 / z_0^2}} \exp[-(i\Delta kz - i\phi)], \quad (3)$$

式中 $B_n = \frac{\omega_n d_{\text{neff}}}{n_n c}$, 其中 $n=1,2,3$, c 为光速, $d_{\text{neff}} = d_{32} \cos \varphi$, 为有效非线性系数, $d_{32} = 0.85 \text{ pm/V}$, z_{pot} 为聚焦束腰在晶体中的位置, $z_0 = \frac{1}{2} k \omega_0^2$ 是瑞利长度, $\sqrt{1 + (z - z_{\text{pot}})^2 / z_0^2}$ 因子反映了随参考点远离光束束腰时,由于高斯光束发散引起的功率密度下降, $\phi = \arctan\left(-\frac{z}{z_0}\right)$ 反应了高斯光束发散带来的相位失配^[10], i 是光谱密度^[11]。对于宽带三次谐波转换,还必须充分考虑输入输出光的光谱分布。

$$I_m = \int i_m(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中 $m=1,2$ 分别表示基频光和倍频光, I 表示光强。

假设入射基频光光谱呈高斯分布,可以表示为:

$$E_1(\lambda, 0) = E_2(\lambda, 0) = A_0 \exp\left[\frac{-\pi}{\Delta\lambda}(\lambda - \lambda_0)^2\right], \quad (5)$$

式中 A_0 为光场的峰值振幅, λ_0 是入射基频光中心波长, $\Delta\lambda$ 是光谱带宽。

初始倍频光强为零,即:

$$E_3(\lambda, 0) = 0, \quad (6)$$

代入初始条件(5),(6)式,通过四阶龙格库塔法求解耦合波方程,可以得到在晶体任意位置处倍频光的振幅谱分布 $E_3(\lambda, z)$ (文中定义晶体入射端面处 $z=0$),从而得到倍频效率。

2.2 相位匹配条件

晶体中相互作用的三波角频率分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, 波失分别为 K_1, K_2, K_3 。本文只研究三波共线的情况,相位失配可写为标量形式:

$$\Delta K(\theta, \varphi, T) = K_3(\theta, \varphi, T, \omega_3) - K_2(\theta, \varphi, T, \omega_2) - K_1(\theta, \varphi, T, \omega_1), \quad (7)$$

通过调节晶体角度 (θ, φ) , 或温度 (T) , 可以达到完全相位匹配 $\Delta K = 0$ 。

然而,由于基频光中不同频谱成分对应的相位匹配角不同,若采用温度匹配方式,不同波长对应的匹配温度也不同。针对这一问题,本文分别计算了棱镜角色散,光栅角色散,以及晶体级联方法对相位失配的补偿和转换效率的影响。

2.3 色散补偿

$1 \mu\text{m}$ 附近 LBO I 类 SHG 相位匹配面在 xoy 平面 $(\theta = 90^\circ)$, 所以只需要将基频光在 φ 方向色散^[1]。保持 $\theta = 90^\circ$ 不变,通过求解 LBO 晶体色散方程得到不同波长对应的匹配角 φ 。

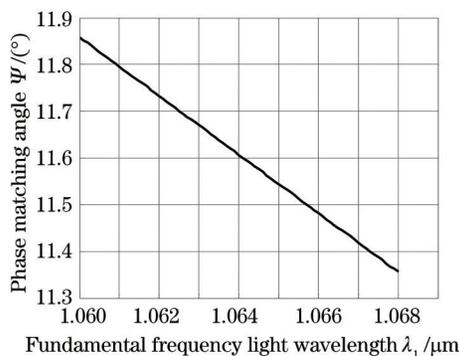


图1 LBO晶体I类相位匹配图

Fig.1 Phase matching diagram of LBO crystal type I phase

由图看出,在中心波长1064 nm附近,相位匹配角与波长近似成线性关系。

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = 1.07, \tag{8}$$

也就是说完全补偿相位失配需要 1.07 mrad/nm 的色散。通过棱镜或光栅等元件将基频光不同频率成分分开然后以其各自的相位匹配角入射进倍频晶体,可有效地提高倍频效率。其原理图如图2、图3所示:

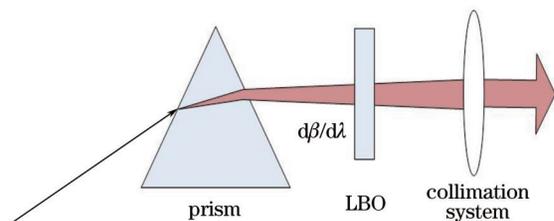


图2 棱镜色散原理图

Fig.2 Principle of prism dispersion

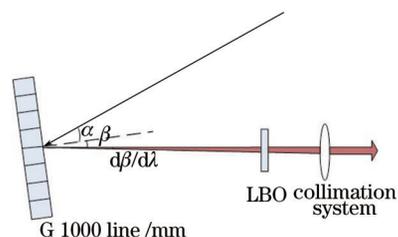


图3 光栅色散原理图

Fig.3 Principle of grating dispersion

首先考虑棱镜色散,其角色散率如下

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2 \sin(\alpha/2)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\alpha/2)}} \times \frac{dn}{d\lambda}, \tag{9}$$

式中 α 是棱镜顶角。选用火石玻璃 N-SF11 等边色散棱镜。在中心波长处,折射率与波长的对应关系为 $\frac{dn}{d\lambda} = 3.67 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$,通过(9)式可得棱镜对的角色散率为 0.148 mrad/nm,并不能完全满足所需色散要求。

相对棱镜色散补偿,采用光栅可以提供更大的角色散,且闪耀光栅一级衍射效率可以达到90%以上,可以对较大带宽的入射基频光进行相位补偿^[12]。假设光栅能够完全补偿倍频所需色散,并且对中心波长1064 nm一级闪耀,可得到光栅方程:

$$2d \sin \theta = \lambda_0, \tag{10}$$

$$\frac{1}{d \cos \theta} = \frac{d\varphi}{d\lambda} = 1.07. \tag{11}$$

求解光栅方程得到光栅常数 $d=943 \text{ line/mm}$,闪耀角 $\theta=30.13^\circ$ 。取 $d=1000 \text{ line/mm}$, $\theta=30^\circ$,可得光栅角色散率为 1.154 mrad/nm,这已经基本满足了所需色散要求。

图4是不同频率成分对应的波矢失配图,其中黑线表示未加补偿,蓝线表示棱镜对补偿,红线表示光栅补偿。由图4可以看出棱镜对的补偿效果较小,波矢失配量只减小了13%,而采用光栅可以使基频光在整个光谱范围内都近似达到相位匹配。

2.4 参数优化

采用LBO晶体I类非临界相位匹配。假设入射基频光中心波长1064 nm,峰值功率7.8 kW,束腰半径50 μm (对应光强100 MW/cm^2),晶体长度15 mm,求解耦合波(1)~(3)式,得到倍频效率随聚焦位置的变化如图1所示。由图可知,最佳聚焦位置在距离晶体前端面5 mm处,这是因为基频光将能量不断传递给倍频光,导

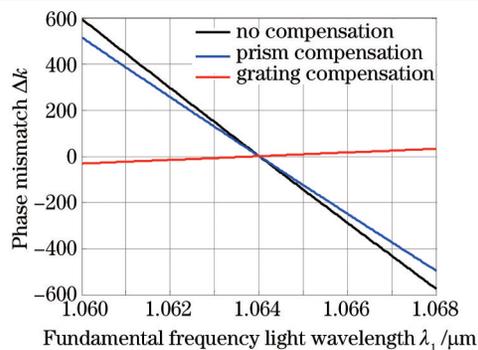


图4 补偿前后不同频率对应的波矢失配量

Fig.4 Phase mismatch corresponding to different frequency components

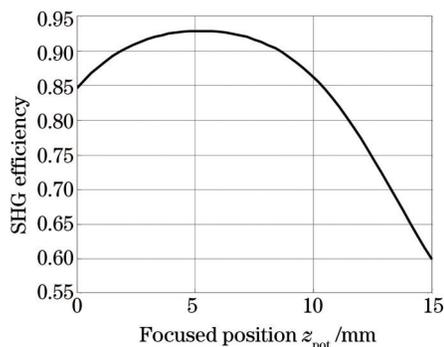


图5 高斯光束倍频效率随聚焦位置的变化

Fig.5 Gaussian beam SHG efficiency varies with the change of focused position

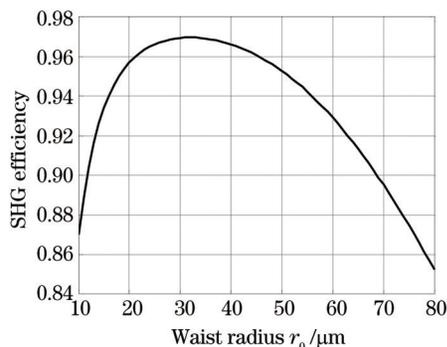


图6 高斯光束倍频效率随基频光束尺寸的变化。

Fig.6 Gaussian beam SHG efficiency varies with the change of fundamental frequency beam size

致晶体后半部分基频光减弱的缘故。假设基频光聚焦到晶体中心位置,改变束腰尺寸,通过仿真得到倍频效率随基频光束腰尺寸的变化如图6所示。

当束腰半径较小时,由于过度聚焦导致激光发散严重;束腰半径太大时,又会导致光强的降低。由图6可以看出,最佳束腰半径为30 μm,此时对应光强为275 MW/cm²。

根据LBO晶体的色散方程^[13]以及I类相位匹配条件($n_1=n_2=n_3$),可以得到1064 nm中心波长对应的相位匹配角为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=11.6^\circ$ 。将晶体沿此角度切割,其他频率成分的相位失配可由图7来表示。由图7(a)可以看出波矢失配量 Δk 与波长偏移量 $\Delta\lambda$ 近似成线性关系。图7(b)是基频光不同波长成分对应的倍频效率图。当晶体长度为10 mm时,半波转换带宽为1.5 nm;20 mm时半波转换带宽为0.8 nm。可见晶体越长,转换带宽越窄,晶体短又意味着相互作用长度变短,也无法实现高效倍频。因此对于宽光谱光纤激光器的倍频,要根据初始基频光光谱参数,合理选择晶体长度。

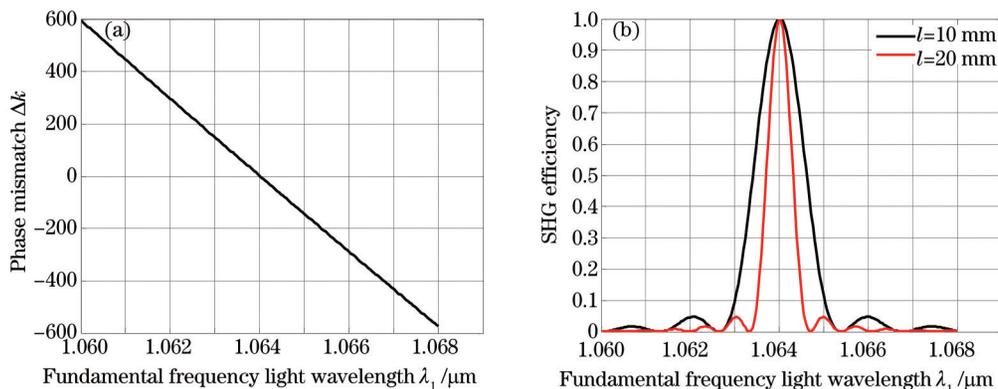


图7 波矢失配图。(a) 不同频率成分对应的相位失配量;(b) 不同频率成分对应的效率

Fig.7 Wave vector mismatch figure. (a) Phase mismatch of different frequency components; (b) SHG efficiency of different frequency components

3 仿真结果及分析

3.1 角谱色散补偿方案

采用LBO晶体 I 类角度相位匹配,入射基频光为基膜高斯光束,强度为 100 MW/cm^2 。充分考虑棱镜和光栅的补偿作用,为了研究基频光带宽对倍频效率的影响,分别取基频光带宽为 3 nm 、 5 nm 、 8 nm ,求解耦合波方程,计算得到倍频效率随晶体长度的变化曲线图如图 8 所示。

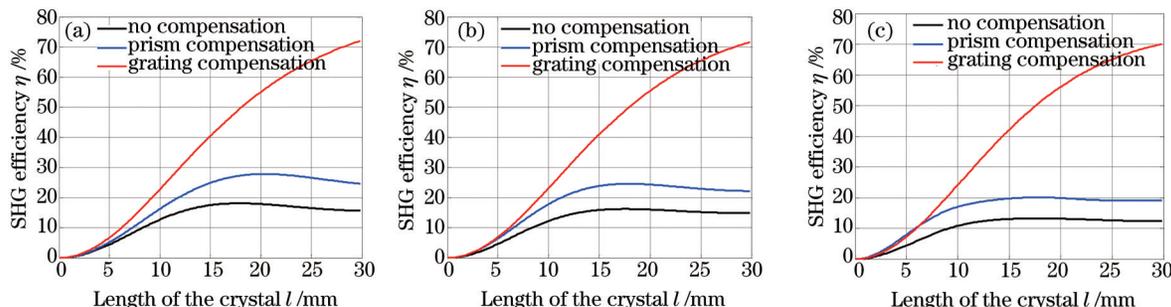


图 8 倍频效率随晶体长度的变化。(a) 基频光带宽 3 nm ; (b) 基频光带宽 5 nm ; (c) 基频光带宽 8 nm
 Fig.8 SHG efficiency varies with the change of the crystal length. (a) Fundamental frequency bandwidth is 3 nm ;
 (b) fundamental frequency bandwidth is 5 nm ; (c) fundamental frequency bandwidth is 8 nm

由图 8 可见,当基频光线宽 3 nm 时,采用一块晶体倍频就能达到 19% 的效率,随着基频光带宽的增加,倍频效率逐渐下降。采用棱镜对补偿能使效率提高 50% 左右。采用光栅补偿后,基频光线宽对倍频效率的影响并不大,倍频效率都能达到 70% 以上,说明采用光栅补偿可以使基频光在大光谱范围内实现较好的相位匹配,并且可以通过增加倍频晶体的长度进一步提高倍频效率。图 9 和图 10 分别表示了当基频光带宽为 5 nm 时,采用光栅角色散补偿和采用棱镜角色散补偿时基频光光谱分布和倍频光光谱分布随倍频晶体长度的变化情况。

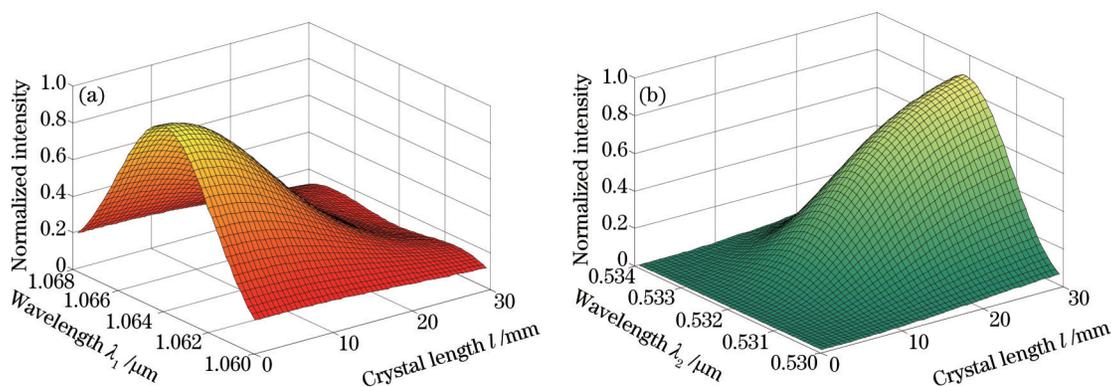


图 9 宽频带激光倍频过程(采用光栅角色散补偿)。(a) 基频光; (b) 倍频光

Fig.9 SHG of broadband laser (grating ASD compensation). (a) Fundamental frequency light; (b) frequency doubling light

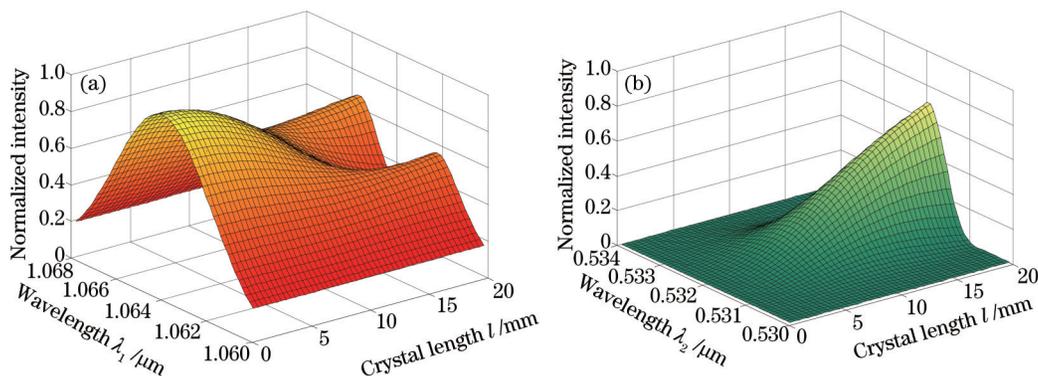


图 10 宽频带激光倍频过程(采用棱镜角色散补偿)。(a) 基频光; (b) 倍频光

Fig.10 SHG of broadband laser (prism ASD compensation). (a) Fundamental frequency light; (b) frequency doubling light

3.2 晶体级联方案

晶体级联方案最早由美国 LLNL 实验室的 Eimerl 提出^[14], 相对于光栅或棱镜角色散补偿方案, 系统更简单可靠。本文采用的晶体级联结构原理图如图 11 所示。相对于其他倍频晶体, LBO 更容易实现温度相位匹配, 图 12 是 LBO 晶体 I 类相位匹配温度调谐曲线, 1064 nm 对应的调谐温度是 149 °C, 偏离中心波长处, 其对应的匹配温度也不同。本文拟将多块 LBO 晶体串联, 并分别控温, 但考虑到高斯光束的发散, 以及基频光谱强度分布, 串联在后面的单块晶体的倍频作用很小。本文只研究两块和三块晶体级联的情况, 并在图中给出了晶体长度和控温参数。图 13 展示了三块晶体级联时每块晶体输出的倍频光谱图。

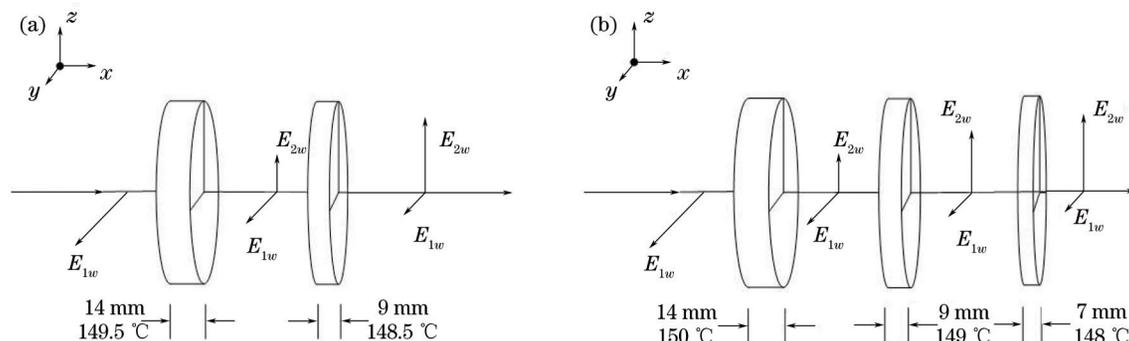


图 11 多晶体级联方案。(a) 两块晶体级联; (b) 三块晶体级联

Fig.11 Crystal cascade scheme. (a) Two pieces of crystal; (b) three pieces of crystal

由图 13 看出, 通过级联倍频晶体个数, 倍频光的光谱宽度增宽, 强度明显增大。但相对于第二块倍频晶体, 第三块晶体的倍频效果较小, 这与上文中的讨论是一致的。

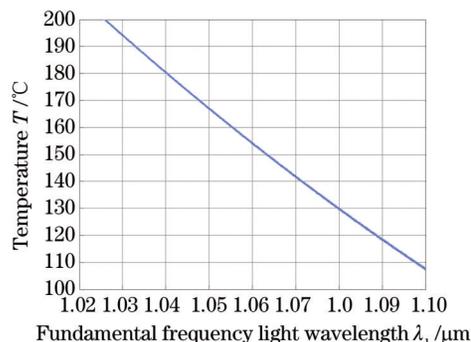


图 12 LBO 晶体 I 类相位匹配温度调谐曲线

Fig.12 LBO type I phase matching temperature curve

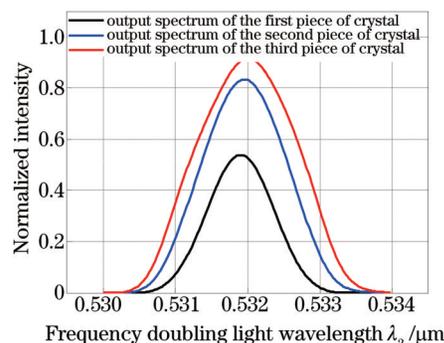


图 13 倍频光谱分布图

Fig.13 Spectra distribution of SHG light

表 1 总结了不同带宽的基频光入射情况下, 不加任何补偿、光谱角色散补偿以及晶体级联方法得到的倍频效率结果。由表 1 可以看出采用棱镜对色散补偿可以使倍频效率提高 50% 左右。采用光栅角色散补偿时, 即使在基频光带宽很宽的情况下, 也可以达到 70% 的倍频效率。通过增加级联晶体个数, 倍频效率增加, 但第三块晶体较第二块晶体倍频效率增加幅度减小。

表 1 级联晶体参数及倍频效率

Table 1 Parameters and SHG efficiency of cascading crystals

Scheme	Bandwidth		
	3 nm	5 nm	8 nm
Monolithic crystal	19%	16.2%	13%
Prism ASD compensation	28%	25%	20%
Grating ASD compensation	71.5%	71%	70%
Two pieces of crystal cascade	30.5%	26.5%	22.2%
Three pieces of crystal cascade	43.7%	37%	30.5%

4 结 论

针对近红外调 Q 宽光谱光纤激光的倍频,在最佳参数条件下分别模拟了棱镜角色散补偿,光栅角色散补偿以及晶体级联对倍频效率的影响。结果表明:棱镜对补偿可以使倍频效率提高50%;光栅能使基频光在大范围内实现相位匹配,从而在大带宽情况下也能达到70%的效率,但受到光栅损伤阈值的影响,入射到光栅前需要扩束,然后再聚焦,增加了系统的复杂度;多晶体级联方案结构简单,倍频效率高,但是需要对不同晶体单独控温。下一步工作将进行宽光谱多模混合高斯光束倍频的理论以及实验研究。

参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 652-711.
姚建铨,徐德刚.全固态激光及非线性光学频率变换技术[M].北京:科学出版社,2007:652-711.
- 2 Liu A, Norsen M A, Mead R D. 60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2005, 30(1): 67-69.
- 3 Liu Xuesheng, Xia Jiaozhen, Yan Xin, *et al.*. 63 W green laser based on an intracavity-frequency-doubled lamp-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 15-18.
刘学胜,夏姣贞,鄢 歆,等.63 W灯抽运声光调 Q 腔内KTP倍频Nd:YAG激光器[J].中国激光,2009,36(1):15-18.
- 4 Li Fengqin, Yu Lin, Shen Yumei, *et al.*. All-solid-state CW 12.9 W TEM00 mode green laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1332-1336.
李凤琴,于 琳,申玉梅,等.输出功率12.9 W的全固态连续TEM00模绿光激光器[J].中国激光,2009,36(6):1332-1336.
- 5 Li K, Zhang B. Analysis of broadband third harmonic generation with non-collinear angular dispersion in KDP crystals[J]. Optics Communications, 2008, 281(8): 2271-2278.
- 6 Pronko M S, Lehmborg R H, Obenschain S, *et al.*. Efficient second harmonic conversion of broad-band high-peak-power Nd: glass laser radiation using large-aperture KDP crystals in quadrature[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(2): 337-347.
- 7 Deng Qinghua, Zhang Xiaomin, Ding Lei, *et al.*. Stabilizing second harmonic generation output using cascaded crystals[J]. Acta Phys, 2011, 60(2): 326-331.
邓青华,张小民,丁 磊,等.应用级联倍频方法提高倍频系统输出稳定性研究[J].物理学报,2011,60(2):326-331.
- 8 Zheng Wanguo. High Power Laser Broadband Frequency Doubling Technology Research[D]. Shanghai: Fudan university, 2006.
郑万国.高功率激光宽带倍频技术研究[D].上海:复旦大学,2006.
- 9 Han Wei, Zheng Wanguo, Zeng Xiaoming, *et al.*. Experimental study of the broadband frequency doubling at the retracing point of phase_matching [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(1): 31-33.
韩 伟,郑万国,曾小明,等.折返点匹配的宽带二倍频实验研究[J].中国激光,2006,33(1):31-33.
- 10 Dai Ming. Research on Frequency Doubling of Yb-Doped Fiber Laser[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
戴 明.掺镱光纤激光器倍频特性研究[D].北京:清华大学,2005.
- 11 Nyga S, Geiger J, Jungbluth B. Frequency doubling of fiber laser radiation of large spectral bandwidths[C]. SPIE LASE International Society for Optics and Photonics, 2010: 75780P.
- 12 Li Kun, Zhang Bin, Wu Xianyun, *et al.*. Analysis of second harmonic generation and focusing property of broadband laser with grating angular spectral dispersion[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(2): 260-264.
李 琨,张 彬,吴显云,等.采用光栅角色散的宽带二倍频及聚焦特性分析[J].光子学报,2008,37(2):260-264.
- 13 Nikogosyan D N (translated by Wang J Y). Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 25-26.
Nikogosyan D N著(王继扬译).非线性光学晶体:一份完整的总结[M].北京:高等教育出版社,2005:25-26.
- 14 Eimerl D. Quadrature frequency conversion[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(8): 1361-1371.

栏目编辑:张浩佳