

# 全固态 561 nm 倍频激光器研究

邵志强 高兰兰 张辰

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 报道了利用激光二极管端面抽运 Nd:YAG 晶体,通过 LBO 非线性晶体腔内倍频实现的 561 nm 激光输出。LBO 晶体尺寸为 2 mm×2 mm×10 mm,采用 I 类相位匹配切割。抽运功率为 5 W 时,561 nm 的最大输出功率为 123 mW,此时的光-光转换效率为 2.46%。实验中发现激光器很容易同时出现 556 nm 及 558 nm 倍频光。从非线性转换效率对基频光振荡的影响角度出发,分析了 1112 nm 与 1116 nm 谱线起振的原因。作为对比,利用允许角范围小的 KTP 作为倍频晶体进行了同样的实验,KTP 晶体的尺寸为 2 mm×2 mm×8 mm,采用 II 类相位匹配切割。实验结果显示,在 KTP 晶体倍频情况下,激光器很容易实现 561 nm 单谱线激光输出。实验结果与理论分析相一致。

**关键词** 激光器;561 nm;谱线竞争;KTP 晶体;LBO 晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.031401

## Research on 561 nm Frequency-Double All-Solid-State Laser

Shao Zhiqiang Gao Lanlan Zhang Chen

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** 561 nm laser output is achieved from LBO intra-cavity frequency doubling of a laser in which Nd:YAG is end-pumped by LD. Using the 2 mm×2 mm×10 mm LBO crystal with type- I phase matching cutting, the 561 nm laser output power is 123 mW when the pump power is 5 W. The conversion efficiency of 2.46% is obtained. The frequency-doubled light waves of 556 nm and 558 nm easily appear in experiment. From the influence of nonlinear conversion efficiency on fundamental-frequency light oscillation, the reason of 1112 nm and 1116 nm line oscillation is analyzed. As a contrast, we carry out the same experiment using a 2 mm×2 mm×8 mm KTP crystal with type- II phase matching cutting. Results show that the laser is easy to realized 561 nm single spectral-line laser. The experimental results and theoretical analysis are consistent with each other.

**Key words** lasers; 561 nm; spectral-line competition; KTP crystal; LBO crystal

**OCIS codes** 140.7260; 140.3570; 140.2020; 230.5298

## 1 引言

近年来,人们对 Nd:YAG 的 1123 nm 谱线产生了浓厚的兴趣。1123 nm 激光器可以作为掺铋光纤的抽运源,通过上转换得到 481 nm 的蓝光输出;同时 1123 nm 的倍频光——561 nm 黄绿光在生物医学方面有着极大的用途,它是共焦显微镜、流式细胞仪及其他生物成像装置的理想光源,同时也是激光治疗复杂眼科疾病的最佳波长<sup>[1]</sup>。

2004 年,Guo 等<sup>[2]</sup>报道了 1123 nm 的连续输出,在抽运功率为 1.57 W 时,输出 1123 nm 功率 132 mW。采用周期性极化铌酸锂(PPLN)腔外倍频,观察到了微弱的黄光。2006 年,Jia 等<sup>[3]</sup>报道了 561 nm 连续输出,在抽运功率为 10 W 时,得到了 1.2 W 的 561 nm 黄绿光。2012 年,崔锦江等<sup>[4]</sup>采用半导体激光抽运腔

**收稿日期**: 2012-11-12; **收到修改稿日期**: 2012-12-05 **网络出版日期**: 2013-02-05

**基金项目**: 长春市科技局项目(2011101)和汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金(20111108)资助课题。

**作者简介**: 邵志强(1991—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光技术及非线性频率变换技术等方面的研究。

E-mail: 1871502077@qq.com

**导师简介**: 高兰兰(1974—),女,博士,副研究员,主要从事非线性光学和全固态激光器等方面的研究。

E-mail: gl\_75@163.com

内倍频的方法,获得了可满足医疗应用的瓦级全固态 561 nm 黄绿光激光输出。但是目前国内外有关毫瓦级 561 nm 黄绿光的报道还比较少。

本文利用 5 W 的激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 晶体产生 1123 nm 的基频光,然后在谐振腔中插入 2 mm×2 mm×10 mm, I 类相位匹配切割的 LBO 晶体进行腔内倍频,获得 123 mW 的 561 nm 黄绿光输出。在实验过程中发现激光器的光谱输出很不稳定,很容易同时出现 1112 nm 及 1116 nm 的倍频光即 556 nm 和 558 nm 激光输出。从非线性转换效率对基频光振荡的影响角度出发,分析了 1112 nm 与 1116 nm 谱线起振的原因。并利用 2 mm×2 mm×8 mm, II 类相位匹配切割的 KTP 晶体进行了对比实验,结果显示,在 KTP 晶体倍频情况下,激光器很容易实现 561 nm 倍频单谱线激光输出。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,LD 为抽运源,其最大输出功率为 5 W,输出中心波长为 808 nm,抽运光经过透镜整形后直接注入到激光介质上。激光介质是 Nd 掺杂原子数分数 1% 的 Nd:YAG 晶体,尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm,入射面镀有 808 nm 增透膜(透射率  $T>90\%$ )和 1123 nm 高反膜(反射率  $R>99.8\%$ )。出射面镀有 1123 nm 增透膜( $T>99\%$ )。LBO 晶体两边均镀有 561 nm 和 1123 nm 的增透膜( $T>99\%$ )。输出耦合镜的曲率半径为 100 mm,左表面镀有 1123 nm 的高反膜( $R>99\%$ )和 1064、1318 nm 的增透膜( $T>90\%$ ),右表面镀有 561 nm 的增透膜( $T>90\%$ )。LD 用热电制冷器(TEC)控温,使 LD 发射波长与 Nd:YAG 晶体的吸收波长吻合。整个谐振腔用一个 TEC 实现精确温控确保激光器稳定运行。

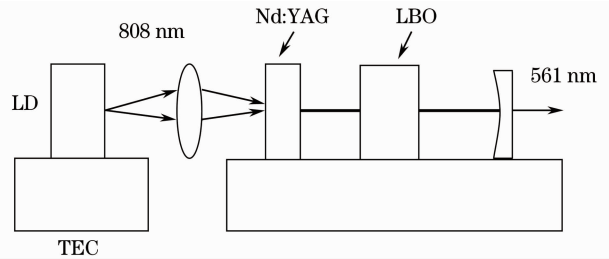


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

## 3 实验结果

将 LBO 晶体放入谐振腔中,调整其放置角度,使得基频光以最佳相位匹配角方向入射,在某一固定角度放置时得到最大输出功率。固定 LBO 晶体角度,调整 LD 的工作电流,得到如图 2 所示的实验结果。在图 2 中可以看出激光器的输出功率随着抽运功率的增加而升高。激光器的阈值是 0.42 W。相应的注入抽运功率为 5 W 时,561 nm 输出功率最高为 123 mW。此时的光-光转换效率为 2.46%,黄绿光的光束质量因子  $M^2=1.1$ 。

为检测激光器的光谱输出特性,利用海洋光学公司 HR4000CG-UV-NIR 光谱仪对激光器的输出谱线进行了测试,得到如图 3 所示结果。

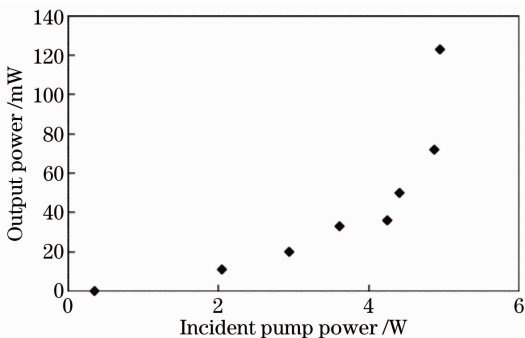


图 2 激光输出功率随 LD 抽运功率的变化

Fig. 2 Laser output power versus LD pump power

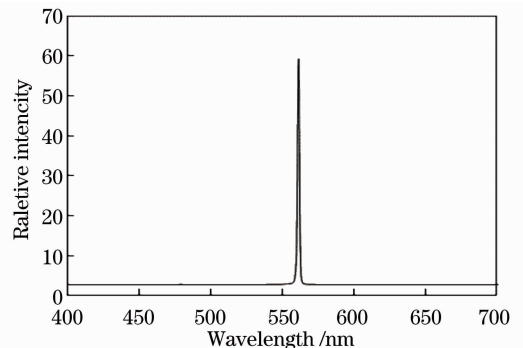


图 3 LBO 晶体倍频的 561 nm 输出谱线

Fig. 3 561 nm spectrum of frequency doubling output by LBO crystal

结果显示此时激光器输出谱线为单一的 561 nm 谱线。但是,实验中发现谱线输出特性很不稳定,561 nm、556 nm 及 558 nm 3 条谱线存在较大的竞争,激光器很难保证在较长的时间内固定在 561 nm 单谱

线输出。图4是在激光器稳定工作一段时间后,用光谱仪在某一时刻测试的输出光谱图。由图4可以看出输出激光束有3条谱线:556、558、561 nm,分别对应1112、1116、1123 nm的倍频转换。而且,在实验过程中,当调整LD的工作电流或者调整晶体的温控时,也会发现输出波长在556、558、561 nm之间跳跃性变化。

将倍频晶体换为KTP进行了同样的实验,调整KTP晶体的放置角度,使得基频光以最佳相位匹配角方向入射,得到69 mW的黄绿光输出。此时的光-光转换效率为1.38%,光束质量因子 $M^2=1.1$ 。然后用光谱仪测试激光光谱,得到如图5所示的实验结果。由图5可以看出,在KTP晶体倍频情况下,激光器很容易实现561 nm单谱线激光输出,且激光器可以实现561 nm单谱线稳定运转。采用KTP晶体时激光器的转换效率比较低,主要原因是KTP晶体和LBO晶体由不同的公司提供,在质量上存在较大差异。我们曾试图采用其他公司的KTP晶体进行重复实验,但是没有买到,在后续实验中将继续关注。尽管KTP晶体转换效率低,但其对于1123、1116、1112 nm 3条谱线倍频过程的有效非线性系数比例及最大允许角不受影响。因此,这一实验结果对本文的理论分析没有影响。

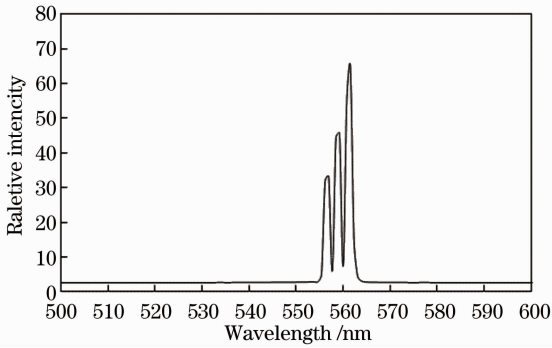


图4 LBO晶体倍频的三波长输出谱线

Fig. 4 Three-wavelength spectrum of frequency doubling output by LBO crystal

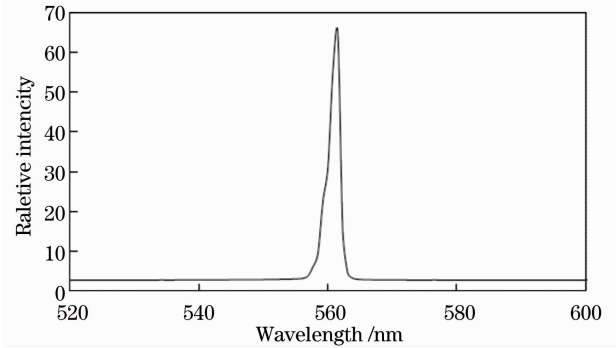


图5 KTP倍频晶体的输出谱线

Fig. 5 Spectrum of frequency doubling output by KTP crystal

## 4 理论分析

对于Nd:YAG晶体,1123、1116、1112 nm的受激发射截面相差不到 $0.1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ ,并且由于3条谱线波长相差太小,无法通过简单的输出镜镀膜的方法抑制1116 nm和1112 nm基频光的振荡从而获得1123 nm谱线单独振荡<sup>[5~7]</sup>。因此,在谐振腔中插入倍频晶体后,在倍频晶体的允许角范围内就容易出现561、556、558 nm相互竞争的情况。利用SNLO软件对LBO晶体对特定波长的非线性转换过程的相位匹配参数进行了计算,计算结果如表1所示,其中 $d_{\text{eff}}$ 是非线性晶体的有效非线性系数。

表1 LBO晶体非线性变换时的相位匹配参数

Table 1 Phase matching parameters for nonlinear conversion by LBO crystal

Second harmonic generation	Phase matching angle $[\theta/(\circ), \phi/(\circ)]$	$d_{\text{eff}}/(\text{pm/V})$	Maximum acceptable angle /mrad
1123 nm(o) + 1123 nm(o) $\rightarrow$ 561 nm(e)	(90, 7.5)	0.836	15.15
1116 nm(o) + 1116 nm(o) $\rightarrow$ 558 nm	(90, 8)	0.836	14.21
1112 nm(o) + 1112 nm(o) $\rightarrow$ 556 nm	(90, 8.3)	0.836	13.72

(o) and (e) represents ordinary and extraordinary light, respectively

从表1中可以看出,LBO晶体在(1123 nm $\rightarrow$ 561 nm),(1116 nm $\rightarrow$ 558 nm)以及(1112 nm $\rightarrow$ 556 nm)倍频过程的最佳相位匹配角在 $\phi$ 方向依次相差 $0.5^\circ$ 和 $0.3^\circ$ ,即8.26 mrad和5.24 mrad,而 $\theta$ 方向相同。3种频率变换过程对应的最大允许角分别为15.15 mrad,14.21 mrad和13.72 mrad。

图6中的 $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3$ 矢量方向分别是(1123 nm $\rightarrow$ 561 nm),(1116 nm $\rightarrow$ 558 nm)和(1112 nm $\rightarrow$ 556 nm)倍频过程的最佳相位匹配方向<sup>[8,9]</sup>。调整LBO的放置角度,使得基频光波沿着 $\mathbf{z}_1$ 方向入射,根据相位匹配和倍频转换效率公式<sup>[10]</sup>

$$\eta \propto \left[ \frac{\sin\left(\frac{\Delta k}{2} \ell\right)}{\frac{\Delta k}{2} \ell} \right]^2, \quad (1)$$

$$\Delta k = \Delta k|_{\theta=\theta_m} + \left. \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta} \right|_{(\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m)} \Delta \theta + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \theta^2} \right|_{(\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m)} (\Delta \theta)^2 + \dots, \quad (2)$$

式中  $\Delta k$  为相位矢配量,  $\ell$  为非线性晶体的长度,  $\theta, \varphi$  为相位匹配角,  $\theta_m, \varphi_m$  为最佳相位匹配角。可知此时(1123 nm→561 nm)的相位因子平方为最大值 1, 频率转换效率达到最高。但是  $z_1$  方向距离(1116 nm→558 nm)和(1112 nm→556 nm)倍频过程的最佳匹配方向非常近(8.26 mrad 和 13.5 mrad)。由(1),(2)式可以计算出当光沿着  $z_1$  方向传播时(1116 nm→558 nm)和(1112 nm→556 nm)倍频过程相位因子平方值分别为 69% 和 41%, 所以在光谱仪上能观察到 558 nm 和 556 nm 的谱线出现, 并且竞争非常激烈。相比而言,  $z_2$  方向比  $z_3$  方向更接近  $z_1$  方向, 所以在  $z_1$  方向(1116 nm→558 nm)的相位因子平方值比(1112 nm→556 nm)倍频过程的相位因子平方值大(69% > 41%), 这就解释了微调 LD 的工作电流和晶体的温控时在光谱仪上观察到 558 nm 谱线比 556 nm 谱线强的原因。

将倍频晶体换为 KTP, 使用 SNLO 软件对 KTP 晶体的特定波长的非线性转换过程的相位匹配参数进行了计算, 计算结果如表 2 所示。

表 2 KTP 晶体非线性变换时的参数

Table 2 Phase matching parameters for nonlinear conversion by KTP crystal

Second harmonic generation	Phase matching angle [ $\theta/^\circ, \phi/^\circ$ ]	$d_{\text{eff}}/(\text{pm}/\text{V})$	Maximum acceptable angle /mrad
1123 nm(o)+1123 nm(e)→561 nm(o)	(75.3, 0)	3.69	2.41
1116 nm(o)+1116 nm(e)→558 nm	(76.4, 0)	3.72	2.57
1112 nm(o)+1112 nm(e)→556 nm	(77.1, 0)	3.74	2.69

(o) and (e) represent ordinary and extraordinary light, respectively.

从表 2 中可以看出 KTP 晶体在(1123 nm→561 nm), (1116 nm→558 nm)以及(1112 nm→556 nm)倍频过程的最佳相位匹配角在  $\theta$  方向依次相差 1.1° 和 0.7°, 即 19.20 mrad 和 12.21 mrad,  $\phi$  方向相同。三种频率变换过程对应的最大允许角(对于 8 mm 长度的 KTP 晶体)分别为 3.01 mrad, 3.25 mrad 和 3.36 mrad, 远远小于 3 种频率变换过程最佳相位匹配角之间的夹角。图 7 中的  $x_1, x_2, x_3$  矢量方向是 KTP 晶体(1123 nm→561 nm), (1116 nm→558 nm)和(1112 nm→556 nm)倍频过程的最佳相位匹配方向。调整 KTP 的放置角度, 使得基频光以  $x_1$  方向入射时, 由(1),(2)式可知, 此时(1123 nm→561 nm)的相位因子平方为最大值 1, 频率转换效率达到最高。但是  $x_1$  方向距离(1116 nm→558 nm)和(1112 nm→556 nm)倍频过程的最大允许角度较远, 所以(1116 nm→558 nm)和(1112 nm→556 nm)倍频过程的相位因子平方值很小(分别为 6% 和 4%)。因此, 选用 KTP 晶体作为倍频晶体时, 561 nm 激光器不会受到 1112 nm 及 1116 nm 谱线振荡的干扰, 从而很容易在光谱仪上观察到 561 nm 单一谱线输出。

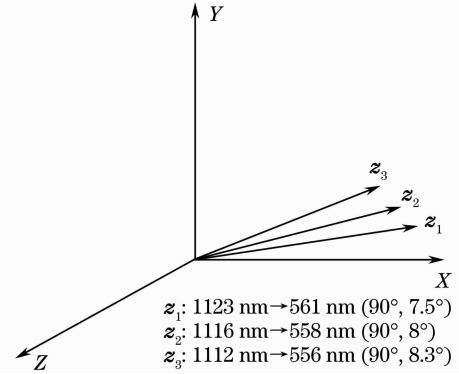


图 6 LBO 晶体 3 种非线性过程的相位匹配角  
Fig. 6 Phase matching angles of three nonlinear conversion processes for LBO crystal

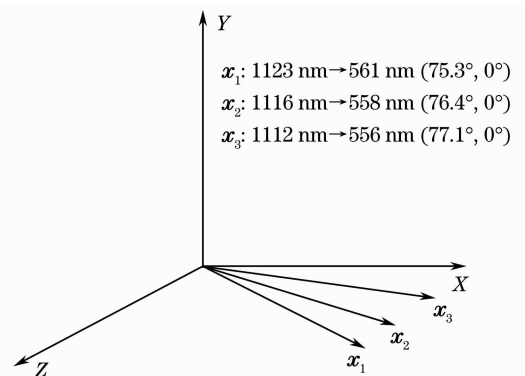


图 7 KTP 晶体 3 种非线性过程的相位匹配角  
Fig. 7 Phase matching angles of three nonlinear conversion processes for KTP crystal

## 5 结 论

利用 LD 端面抽运 Nd:YAG 晶体,通过 LBO 非线性晶体腔内倍频实现 561 nm 激光输出。实验结果表明,由于 LBO 晶体的允许角范围比较大,在使用 LBO 作为激光倍频晶体时容易出现 556 nm,558 nm 谱线和 561 nm 谱线相互竞争的现象。而采用相位允许角比较小的 KTP 晶体则激光器容易实现 561 nm 单一谱线输出。该实验研究对于谱线较密集、无法用镀膜参数来消除谱线振荡的激光器具有一定的参考价值。实验中,当 LD 抽运功率为 5 W 时,561 nm 最大输出功率为 123 mW,转换效率为 2.46%。转换效率比较低,原因主要有:Nd:YAG 晶体经过多次实验,高反射膜损坏比较严重,影响激光器的转换效率;LBO 晶体与散热块没有进行紧密接触,温度控制没有达到最优状态,影响了转换效率。因此,如果改用新的 Nd:YAG 晶体,对 LBO 晶体进行精确控温,按照 1123 nm 谐振优化谐振腔结构,一定可以提高激光器的转换效率。

## 参 考 文 献

- 1 William Telford, Matilde Murga, Teresa Hawley. DPSS yellow-green 561 nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry[J]. *Cytometry Part A*, 2005, **68**(1): 36~44
- 2 Xiaoping Guo, Meng Chen, Gang Li *et al.*. Diode-pumped 1123-nm Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 402~404
- 3 Fuqiang Jia, Quan Zheng, Qinghua Xue *et al.*. Yellow light generation by frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(1): 212~215
- 4 Cui Jinjiang, Tan Huiming, Wang Fan *et al.*. High power medical all-solid-state 561 nm yellow laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 011401  
崔锦江, 檀慧明, 王 帆 等. 大功率医用全固态 561 nm 黄光激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 011401
- 5 C. Y. Li, Y. Bo, Y. T. Xu *et al.*. 219.3 W CW diode-side-pumped 1123 nm Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(14): 2885~2887
- 6 Zhichao Wang, Qinjun Peng, Yong Bo *et al.*. 60 W yellow laser at 561 nm by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(3): 328~330
- 7 C. Y. Li, Y. Bo, J. L. Xu *et al.*. Simultaneous dual-wavelength oscillation at 1116 and 1123 nm of Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4574~4576
- 8 Gao Huanhuan, Gao Lanlan, Liu Hongbo *et al.*. Laser diode pumped continuous wave three-wavelength laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1683~1687  
高缓缓, 高兰兰, 刘宏博 等. 激光二极管抽运连续三波长固体激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1683~1687
- 9 Gao Lanlan, Tan Huiming, Wang Wei *et al.*. LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> CW three-wavelength laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1749~1753  
高兰兰, 檀慧明, 王 巍 等. LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 连续 3 波长激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1749~1753
- 10 Yao Jianquan, Xu Degang. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007  
姚建铨, 徐德刚. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 科学出版社, 2007