

# 大功率医用全固态 561 nm 黄光激光器

崔锦江 檀慧明 王帆 董宁宁 姜琛翌 施燕博 田玉冰

(中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

**摘要** 采用半导体抽运腔内倍频的方法, 获得了可满足医疗应用的瓦级全固态 561 nm 黄光激光输出。在比较和分析了 Nd:YAG 激光晶体各主要谱线的激光参数之后, 通过谐振腔膜系的设计抑制了增益较大的 1064, 1319 和 946 nm 谱线的运转。通过对倍频晶体的合理选择以及晶体放置角度与匹配温度的合理控制, 在 13.5 W 的 808 nm 抽运功率下, 实验获得了 1.41 W 的 561 nm 单一谱线的黄光激光输出, 光-光转换效率为 10.5%。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; 561 nm 黄光激光器; 医用激光技术; 腔内倍频

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.011401

## High Power Medical All-Solid-State 561 nm Yellow Laser

Cui Jinjiang Tan Huiming Wang Fan Dong Ningning

Jiang Chenyi Shi Yanbo Tian Yubing

(Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences,  
Suzhou, Jiangsu 215163, China)

**Abstract** The high power output of medical all-solid-state 561 nm yellow laser is achieved by the method of semiconductor-pump intracavity frequency doubling. After the comparison and analysis for laser parameters of the main lines parameters of the Nd:YAG laser crystal, the high-gain 1064, 1319 and 946 nm line operations suppressed by the membrane system design of the resonator cavity. Through the rational choice of the nonlinear crystal and the reasonable control of crystal placement angle and matched temperature, the single line of 561 nm output is obtained. The output power is 1.41 W at the incident pump power of 13.5 W, with the light to light conversion efficiency of 10.5%.

**Key words** lasers; all-solid-state laser; 561 nm yellow laser; medical laser technique; intracavity frequency doubling

**OCIS codes** 140.2020; 140.7260; 230.3670

## 1 引言

黄光激光器在激光医学和生物医学仪器领域都有着重要的应用, 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, 也是激光治疗复杂眼科疾病的最佳波长<sup>[1,2]</sup>。黄光激光的获得通常采用以下几种方法: 基于双波长振荡腔内和频 Nd:YAG 或者 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器<sup>[3-5]</sup>, 直接倍频的掺镱镁橄榄石激光器<sup>[6]</sup> 以及铜蒸气激光器和染料激光器等。这些方法具有体积大、效率低、稳定性差和操作复杂等缺点。寻找合适的基频光谱线, 同时利用腔内倍频获得高效、稳定、结构紧凑的全固态黄光激光器是一种有效可行的方法。目前已有半导体抽运腔内倍频获得 556 nm 黄光激光的报道<sup>[7]</sup>。而在人眼黄斑病变治疗及流式细胞仪等生物医学领域, 波长更长的 561 nm 光具有更高的实用价值<sup>[8]</sup>。但目前尚未见通过腔内倍频获得连续输出的大功率医用 561 nm 激光的实验报道。

本文利用光纤耦合 808 nm 大功率半导体激光器抽运 Nd:YAG, 激发 1123 nm 的跃迁谱线, 采用 LBO 晶体进行腔内倍频, 通过对谐振腔膜系的设计、倍频晶体的选择以及对晶体的切割角度与匹配温度的合理控

**收稿日期**: 2011-08-05; **收到修改稿日期**: 2011-09-10; **网络出版日期**: 2011-10-21

**基金项目**: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(094305L099)和中国科学院苏州生物医学工程技术研究所筹建期科技创新项目(I05301L101, I05401L102)资助课题。

**作者简介**: 崔锦江(1981—), 女, 助理研究员, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: cuijiciomp@yahoo.com.cn

制,在 13.5 W 的 808 nm 抽运功率下,实验获得了 1.41 W 的可满足医用需要的瓦级全固态 561 nm 黄光激光输出,光-光转换效率为 10.5%。同时研究和分析了消除 Nd:YAG 的 1112 和 1116 nm 谱线倍频以及 1112,1116 和 1123 nm 等三个谱线的和频输出,获得 561 nm 单一谱线输出的方法。

## 2 理论分析

### 2.1 能级结构

Nd:YAG 是固体激光系统中最为通用的激光工作物质,其激光光谱中一共存在 30 多条谱线,除常用的 1064,1319 和 946 nm 谱线外,1112,1116 和 1123 nm 这三条谱线的性能也相对较好。图 1 是 Nd:YAG 激光晶体的能级结构图,在该激光晶体中,钕离子( $\text{Nd}^{3+}$ )取代了 YAG 基质中的钇离子( $\text{Y}^{3+}$ ), $\text{Nd}^{3+}$  在晶格场的作用下,发生了斯塔克分裂。1064,1112,1116 和 1123 nm 四条谱线对应 $^4\text{F}_{3/2}$ 和 $^4\text{I}_{11/2}$ 这两个能带之间的跃迁,只是其上下能级对应不同的斯塔克分裂子能级,其中 1064 nm 对应的是  $\text{R}_2$  到  $\text{Y}_3$  的跃迁,1112 nm 对应的是  $\text{R}_2$  到  $\text{Y}_6$  的跃迁,1116 nm 对应的是  $\text{R}_1$  到  $\text{Y}_5$  的跃迁,1123 nm 对应的是  $\text{R}_1$  到  $\text{Y}_6$  的跃迁。表 1 为 Nd:YAG 中各主要谱线的激光特性比较,其中  $\sigma$  表示受激发射截面, $\Delta\nu$  表示激光谱线的频宽, $\beta$  表示荧光辐射相对强弱的分支比。从表 1 可见,1123 nm 谱线的相对性能为 1064 nm 谱线的 2/5,受激发射截面约为 1064 nm 的 1/15、1319 nm 的 1/3 或 946 nm 的 3/5,因此为了获得增益较小的 1123 nm 基频光谱线的运转,需要对 1064,1319 和 946 nm 三条谱线同时进行抑制。这里通过提高谐振腔镜对这三种谱线的透射率来抑制它们的起振。虽然 1112,1116 和 1123 nm 三条激光谱线的相对性能比较接近<sup>[9,10]</sup>,容易出现同时受激并相互竞争的现象,导致倍频后出现几条倍频光及和频光同时输出的情况,但是由于通过镀制窄反射带激光膜来选择性地获得三者中任意一条激光谱线的单独运转难度很大,因此本文通过倍频晶体的选择和晶体的切割角度与匹配温度的合理控制来获得 1123 nm 倍频光的单独输出。

表 1 Nd:YAG 中主要谱线的激光特性比较

Table 1 Comparison of laser performance of the Nd:YAG at the main laser transitions

$\lambda$ /nm	Transition	$\sigma / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Delta\nu / \text{cm}^{-1}$	$\beta$	Relative performance
1064	$\text{R}_2 \rightarrow \text{Y}_3$	45.8	5	0.135	100
1123	$\text{R}_2 \rightarrow \text{Y}_6$	3.0	13	0.030	40
946	$\text{R}_2 \rightarrow \text{Z}_5$	5.1	9	0.040	46
1319	$\text{R}_2 \rightarrow \text{X}_1$	8.9	6	0.018	34

### 2.2 倍频晶体选择

KTP 和 LBO 是目前常用的两种倍频晶体,其中 KTP 晶体具有有效非线性系数大、允许角较大、允许温度较高和不易潮解等优点,但是它用于 1123 nm 倍频的走离角较大,晶体长度使用时受到限制。LBO 晶体则具有损伤阈值高、允许角度宽而走离角小、较宽的 I 类及 II 类非临界相位匹配范围,但是 LBO 的有效非线性系数较 KTP 小。表 2 为利用非线性光学软件计算得到的两种倍频晶体对 1123 nm 激光倍频时的参数。从表中可见,KTP 的有效非线性系数约为 LBO 的 4 倍,走离角约是 LBO 的 6 倍。倍频晶体最大相互作用距离表达式为

$$l_{\max} = 1.16 \omega / \rho, \quad (1)$$

式中  $l_{\max}$  为倍频晶体中基频光与倍频光的最大作用长度, $\omega$  为晶体中基频光光斑半径, $\rho$  为倍频晶体中由双折射决定的走离角。当走离角过大时,倍频晶体的长度选取受  $l_{\max}$  制约,同时考虑到腔内倍频效率与有效非线性系数和晶体长度乘积的平方成正比,相比之下 LBO 的效果会更好。同时在接收带宽和接收角度上,KTP 远不及 LBO 性能好。所以从整体上考虑,选择 LBO 作为倍频晶体。

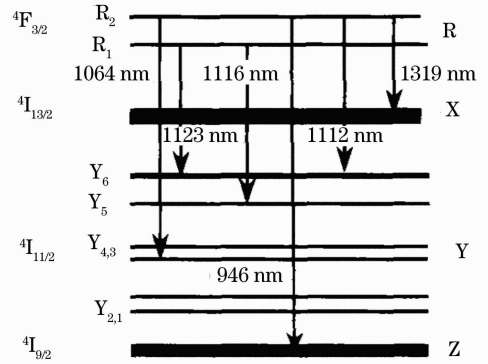


图 1 Nd:YAG 能级图

Fig. 1 Energy level of Nd:YAG

表 2 KTP 和 LBO 倍频参数对比

Table 2 Comparison of the frequency doubling parameters of KTP and LBO

Crystal	Frequency doubling type	Effective nonlinear optical coefficient / ( $\mu\text{m}/\text{W}$ )	Acceptance angle / ( $\text{mrad}\cdot\text{cm}$ )	Acceptance bandwidth / $\text{cm}^{-1}$		Walkoff / $\text{mrad}$
KTP	$1123.0(o)+1123.0(e)=561.5(o)$	-3.690	241	9.00(o-light)	35.79(e-light)	25.53
LBO	$1123.0(o)+1123.0(o)=561.5(e)$	0.836	15.15	104.86		4.62

### 3 实验装置与膜系选择

实验装置如图 2 所示,抽运源使用 LIMO 公司生产的 LIMO30-F200-DL808-LM-A 型光纤耦合模块,数值孔径为 0.22,最大输出功率为 30 W,中心发射波长为 807.5 nm。抽运光经过耦合光学系统 CO 准直聚焦后射入谐振腔。谐振腔为平凹腔,腔长约为 34 cm。输入镜为焦距  $R=50\text{ mm}$  的平凹镜,其镀膜曲线如图 3 所示,输入镜对 1123 nm 高反,对 1319,1064,946 和 808 nm 高透。图 4 为输出镜的镀膜曲线,输出镜为平面镜,对 1123 nm 高反,对 561 nm 高透。整体考虑谐振腔对各谱线的透射率情况后,增益较大的 1064,1319 和 946 nm 光已经被抑制,增益较小的 1123 nm 已经可以起振,实验结果表明膜系设计是合理的。激光介质为掺杂 Nd 原子数分数 1.1% 的 Nd:YAG,尺寸为  $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,晶体两端镀有 1123 和 808 nm 的抗反射膜。倍频晶体为按 1123 nm I 类临界相位匹配切割的 LBO( $\theta=90^\circ, \varphi=7.5^\circ$ ),晶体尺寸为  $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,晶体两端镀有基频光和倍频光的抗反射膜,以降低 LBO 的插入损耗。抽运源和谐振腔分别由半导体制冷器 TEC1 和 TEC2 进行温度控制。

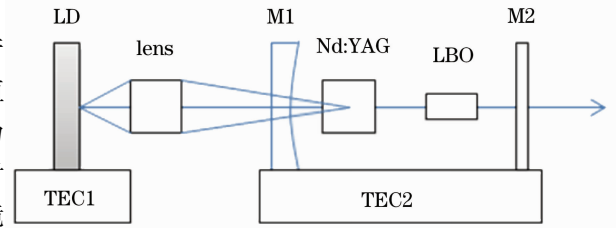


图 2 实验原理图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

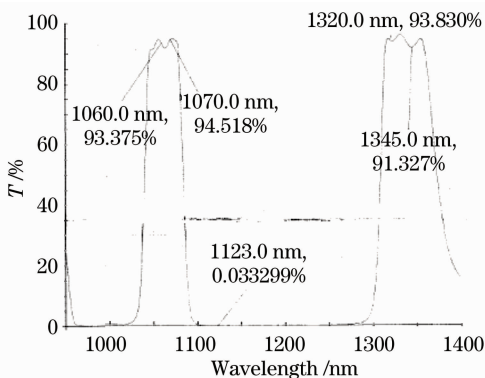


图 3 输入镜的透射率曲线

Fig. 3 Transmissivity of input coupler

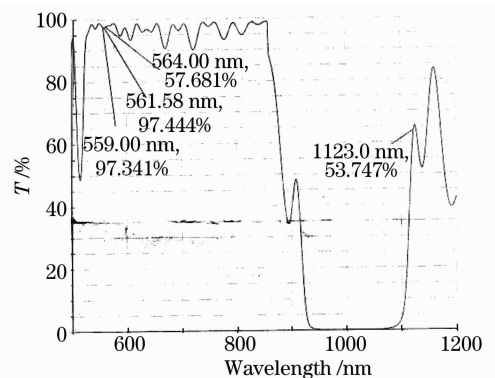


图 4 输出镜的透射率曲线

Fig. 4 Transmissivity of output coupler

首先调节 TEC1 温度使抽运源发射峰与 Nd:YAG 的吸收峰 808.5 nm 重合,调节输出镜的位置和 TEC2 的温度,找到红外基频光光斑和功率达到最佳状态的位置。将倍频晶体 LBO 插入谐振腔内,并用 Ocean Optics 公司的 HR4C4419 型号的光谱仪对输出光谱进行扫描,调节 LBO 放置角度,在此过程中发现,会有 1112,1116 和 1123 nm 三种谱线的倍频光(556,558 和 561 nm)交替出现的情况。此时既有如图 5 所示的 556 nm 倍频光单独输出,也会有三种倍频光和 550~560 nm 范围内倍频光与和频光混合输出的情况,如图 6 所示的 558.7,559.7 和 561.2 nm 的三种波长混合输出。其中 559.7 nm 为 1116 与 1123 nm 的和频光,558.7 nm 为 1112 与 1123 nm 的和频光。

由于 1112,1116 和 1123 nm 三种谱线相对性能比较接近,无法通过谐振腔镜镀窄反射带膜的方法获得

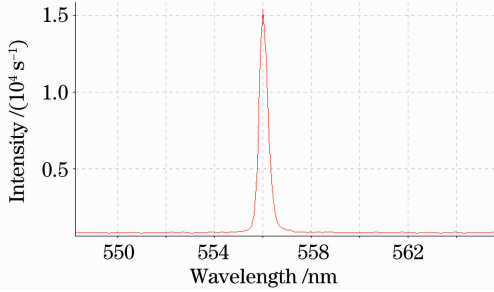


图5 556 nm 倍频光的输出光谱图

Fig. 5 Spectrum of the 556 nm frequency-doubled wave

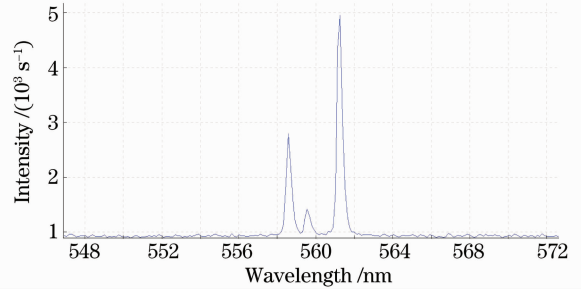


图6 多个波长倍频光的输出光谱图

Fig. 6 Spectrum of several frequency-doubled waves

其中一条谱线的单独运转,因此容易出现这三条基频谱线同时受激并相互竞争的情况,导致加入倍频晶体后出现几条倍频谱线及和频谱线同时输出或交替输出的现象。但是当 LBO 放置到某一特定位置时,即 LBO 放置角度满足且只满足 1123 nm 相位匹配角的时候,只对该波长有倍频作用而不满足其他波长的相位匹配条件,此时只有 561 nm 一种倍频光输出。若 LBO 放置角度与 1123 nm 相位匹配角度相差较大,则 LBO 可能对其他基频光产生倍频输出。利用非线性光学软件计算得出 LBO 对三种波长基频光的相位匹配角分别为 1112 nm,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 8.3^\circ$ ; 1116 nm,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 8.0^\circ$ ; 1123 nm,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 7.5^\circ$ 。由于 LBO 晶体对 1123 nm 的接收角度较小,而 1123 nm 的受激发射截面也相对较小,因此对谐振腔的调节精度和固定方式要求较高。调整 LBO 角度到输出功率最高,输出谱线为 561 nm 单一波长时(如图 7 所示),固定好 LBO。图 8 为 561 nm 输出功率随抽运功率的变化曲线,在 13.5 W 的 808 nm 抽运功率下,实验获得了 1.41 W 的全固态黄光激光输出,光-光转换效率为 10.5%。图 8 插图为倍频光光斑。

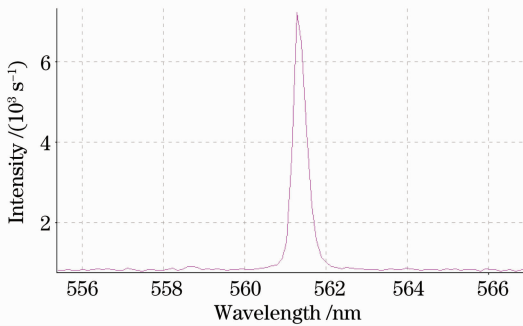


图7 561 nm 倍频光的输出光谱图

Fig. 7 Spectrum of the 561 nm frequency-doubled wave

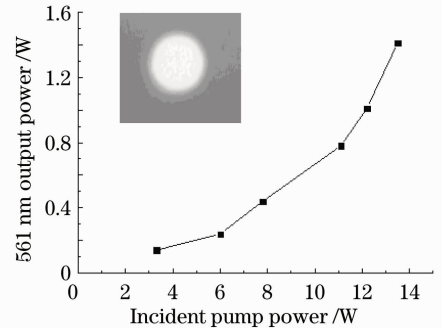


图8 561 nm 黄光随抽运光功率变化曲线

Fig. 8 Output power at 561 nm versus the incident pump power

## 4 结 论

为了获得结构紧凑、高效稳定的可满足大功率医用需要的全固态 561 nm 黄光激光,采用了半导体抽运及腔内倍频的方法。在比较和分析了 Nd:YAG 激光晶体各主要谱线的激光参数之后,通过谐振腔膜系的设计抑制了增益较大的 1064, 1319 和 946 nm 谱线的运转。通过对倍频晶体的合理选择以及对晶体放置角度与匹配温度的合理控制,在 13.5 W 的 808 nm 抽运功率下,实验获得了 1.41 W 的 561 nm 单一谱线的黄光激光输出,光-光转换效率为 10.5%。

## 参 考 文 献

- 1 E. L. Tanzi, J. R. Lupton, T. S. Alster. Lasers in dermatology: four decades of progress [J]. *J. Am. Acad. Dermatol.*, 2003, **49**(1): 1~34
- 2 W. Telford, M. Murga, T. Hawley *et al.*. DPSS yellow-green 561-nm lasers for improved fluorochrome detection by flow cytometry [J]. *Cytomet. Part A.*, 2005, **68A**(1): 36~44
- 3 Y. F. Chen, S. W. Tai, S. C. Wang *et al.*. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-

- frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(20): 1809~1811
- 4 D. Joseph Vance, Chiao-Yao She, Hans Moosmuller. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400-mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator [J]. *J. Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4891~4896
- 5 J. Janousek, S. Johansson, P. Tidemand-Lichtenberg *et al.*. Efficient all solid-state continuous-wave yellow-orange light source [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1188~1192
- 6 I. T. Mckinnie, A. M. L. Dien. Tunable red-yellow laser based on second harmonic generation of Cr:forsterite in KTP [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **141**(3-4): 157~161
- 7 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
- 8 Terje Silsand, Torgeir Flatmark. Purification of cytochrome b-561; an integral heme protein of the adrenal chromaffin granule membrane [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure*, 1974, **359**(2): 257~266
- 9 S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Uitert. Stimulated-emission crosssection and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**(6): 2566~2572
- 10 W. Koechner. Solid State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl.. Beijing: Science Press, 2002. 45
- W.克希耐尔著. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 45