

# Research Progress of 561 nm All-Solid-State Laser

Yi Li, Lanlan Gao\*

Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin  
Email: 874811922@qq.com

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

All-Solid-State lasers have the characteristics of monochromaticity, collimation and high brightness, 550 - 650 nm wavelength range yellow laser has special uses in biomedical, laser demonstration and various military field operations. The laser of 0.5  $\mu\text{m}$  waveband is very suitable for diagnosis and treatment of eye optics organs. The yellow laser of 561 nm has a significant effect on the treatment of fundus photocoagulation. This paper introduces the research status of 561 nm laser at home and abroad, the experimental principle and experimental device are analyzed, it also points out its future development trend and provides useful reference for the research in this field.

## Keywords

All-Solid-State Lasers, 561 nm Lasers, Yellow Green Lasers

---

# 全固态561 nm激光器研究进展

李 祎, 高兰兰\*

长春理工大学, 吉林 长春  
Email: 874811922@qq.com

收稿日期: 2018年2月8日; 录用日期: 2018年2月21日; 发布日期: 2018年2月28日

---

## 摘 要

全固态激光器具有单色性、准直性和高亮度等特点, 550~650 nm波长范围黄光激光器在生物医学、激光演示和各种军事野外作业中均有特殊的用途。其中0.5  $\mu\text{m}$ 波段的激光非常适合于眼球的诊断和治疗,

\*通讯作者。

561 nm黄激光对于眼底黄斑部进行眼底光凝治疗更是有显著作用。本文介绍了561 nm激光器国内外的研究现状,对实验原理和实验元件进行了分析,并指出了其未来的发展趋势,对该领域内的研究提供了有益参考。

## 关键词

全固态激光器, 561 nm激光器, 黄绿光激光器

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全固态激光器(Laser Diode Pumped Solid-State Laser 或 DPSSL)是指以激光二极管(LD)为泵浦源的固体激光器,是激光技术领域的一个重要分支。全固态激光器有着转换效率高、器件结构紧凑、体积小、可靠性高、结构牢固、光束质量好、输出能量大、峰值功率高、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样等优点,与非线性光学频率技术相结合,可实现多种波长的运转,已成为新一代的优质相干光源。现今全固态激光器的输出波段已经覆盖包括红外,红,绿,蓝,至紫外等,成为当前激光技术发展的主要方向。目前,激光二极管抽运的腔内混频激光器主要应用在腔内倍频激光器上,已经有大量文章对激光二极管抽运腔内倍频红、绿和蓝激光器进行报道,技术上已经非常成熟。

近年来黄绿光波段的全固态激光器是全固态激光器的一个研究热点,这一波段在黄绿光波段的激光在激光显示、生物医学、波色-爱因斯坦凝聚、化学等领域有着广泛的应用。波长为561 nm黄绿光是共焦显微镜流式细胞仪及其它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,在生物医学方面有着极大的用途,因此561 nm激光器的研究备受关注。

## 2. 全固态激光器的发展

在固体激光器发展之初,通常使用闪光灯作为抽运源。但是因为闪光灯的发射光谱范围较宽,固体激光晶体的吸收带宽却很窄,导致总的电-光转换效率很低,仅为1%~5%。因此,在相当长一段时间内,固体激光技术的发展停滞不前。直到1962年[1],前苏联科学家Nikolay Basov报道了世界上第一只同质结砷化镓半导体激光器;1963年[2],美国人纽曼第一次提出LD可以作为固体激光器的抽运源。但在LD发展的初期,由于制作技术不够完善,导致转换效率低、LD输出功率起伏很大,并且工作寿命非常短。更重要的是,当时的LD还要采用液氮来制冷,所以当时没有发挥出它的优点[3][4]。因此当时的LD还不适合用作固体激光器的抽运源,在很长的一段时间内,人们并未给予LD以足够的重视,DPSSL技术研究工作止步不前。步入二十世纪八十年代,人们将MBE和MOCVD等现代“非平衡生长技术”引入到III-V族宽带半导体材料的生长中,采用了量子阱、应变量子阱结构,提升了LD的各项性能,最终使得LD可以作为全固体激光器的抽运源[5]。到了90年代,由于LD制作技术取得了很大的发展并且伴随着外延生长技术的提高,LD的发射波长已经覆盖600 nm~2.0 μm的光谱范围[6]。

与早期闪光灯抽运的固体激光器相比,全固态激光器(DPSSL)的优势在于涵盖了LD和DPSSL两者的优点,并且互相弥补了彼此的某些缺点,使全固态激光器的各项参数指标及在实现产业化方面都取得了很大的进步。概括起来有以下几点[7]:

1) 提高总体转换效率达到 15% 以上, 这比早起闪光灯泵浦的 DPSSL 总效率提高了 5~10 倍。其主要原因是 LD 发射的谱线宽度要比闪光灯的窄很多。这样就提高了抽运光的使用效率(如图 1), 从而使更多的泵浦光用来增加反转粒子数。

2) DPSSL 的频率稳定性更高。在固态激光器中, 泵浦功率的波动对其发射线宽的影响很大, 而 LD 的稳定性明显好于闪光灯[8]; 同时, 使用 LD 作为抽运源时, 激光晶体可以不吸收无用辐射, 大大减小了激光晶体的热效应, 因此在很大程度上改善了激光器噪声特性。目前 LD 泵浦 DPSSL 的频率稳定性和线宽已可以和气体激光器相提并论。单频输出的漂移小于 10 kHz, 输出功率波动小于 1%。

3) DPSSL 的光束质量高。由于 DPSSL 的激光晶体可以采用水冷或者风冷, 这样就有效的减小了激光晶体的热效应, 提高了激光器输出光束的光束质量。例如: 一台千瓦级闪光灯泵浦的固态激光器, 其光束发散角是衍射极限的 40~60 倍[9]。而一台千瓦级 DPSSL 的光束发散角仅仅是衍射极限的二倍。在端面抽运时, 可以得到近于衍射极限的激光输出。

4) DPSSL 的可靠性高, 寿命长。DPSSL 的寿命可长达  $10^4 \sim 10^5$  小时, 而闪光灯抽运的固态激光器寿命通常只有 400 多小时。

5) DPSSL 的体积小, 重量轻, 更适于实现全固化。

此外, DPSSL 还在很大程度上弥补了 LD 的不足, 如:

① DPSSL 的线宽窄。DPSSL 的线宽通常为 0.0001~0.01 nm, 而 LD 的线宽通常为 0.02 nm~2 nm。

② DPSSL 的峰值功率高。固体激光晶体的亚稳态能级寿命较长、发射谱线较宽, 容易实现粒子数反转, 通过调 Q 或锁模等方式可以获得更高的峰值功率。

③ DPSSL 具有确定的输出波长。LD 的泵浦源是电流, 导致它的输出波长随着温度变化, 变化量为 0.1~0.2 nm/°C。

④ DPSSL 可以获得不同波长激光输出。固体激光晶体总类繁多, 如常用的 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub> 等, 因此它们可以发射不同波长的激光, 再利用非线性频率变换技术, 获得不同种类的波长输出[10]。另外还可以使用多个 LD 同时泵浦激光晶体, 得到比单个 LD 大许多的输出功率。

综上所述, 我们可以看出, DPSSL 同时弥补了全固体激光器和半导体激光器的缺点, 它在激光运转的稳定性、输出光束的光束质量等方面都是其它激光器无法比拟的。

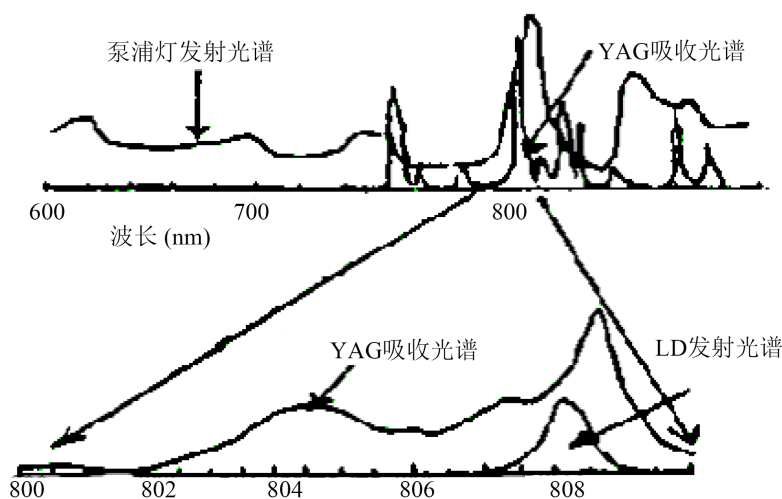


Figure 1. Nd:YAG's absorption spectrum is compared with flash and LD emission spectra

图 1. Nd:YAG 的吸收光谱与闪光灯、LD 发射光谱的比较

### 3. 561 nm 激光器的基本原理及研究现状

目前 561 nm 激光的获得方法有三种[11]: 1) 直接倍频红外波段; 2) 双波长和频; 3) 拉曼频移。这几种方法中直接倍频基频光得到黄激光的输出方式相对而言, 结构简单, 转化效率高, 稳定性好, 比较容易获得高功率的输出, 也比较容易产业化, 是目前研究的重要方向, 其原理图如图 2 所示[12]。

LD 泵浦的 Nd:YAG 激光器是最常见、发展最迅速的 DPSSL 器件。Nd:YAG 是掺入钕钇铝石榴石的简称, 它是将钕离子按一定比例掺入钇铝石榴石中替代钇离子。对于激光介质来说, 三价的钕离子( $Nd^{3+}$ )是激活离子, 钇铝石榴石(YAG)是基质, Nd:YAG 是目前最成熟的固体激光材料。

Nd:YAG 晶体的激光光谱中共有 30 多条跃迁谱线, 其激光跃迁分别发生在激光上能级  $4F_{3/2}$  的斯塔克能级和激光下能级  $3I_{13/2}$ ,  $3I_{11/2}$ ,  $3I_{9/2}$  之间, 如图 3 所示。

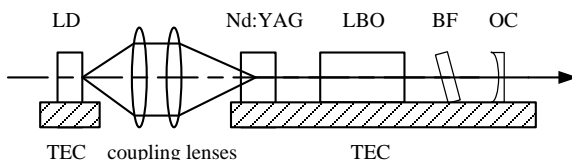


Figure 2. Solid-state 561 nm single-frequency laser solid schematic diagram

图 2. 全固态 561 nm 单频激光器实验原理图

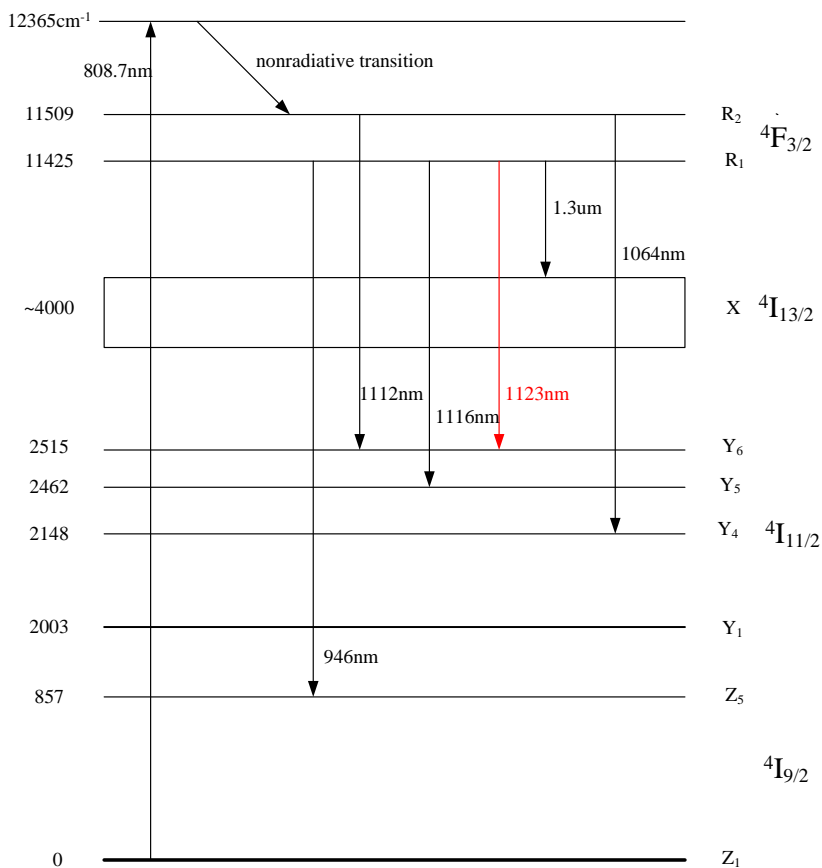


Figure 3. Diagram of the energy levels of Nd:YAG with a description of the main transition lines

图 3. Nd:YAG 的能级和主要跃迁图

除了经常利用的 1064 nm, 1319 nm 和 946 nm 谱线以外, 1112 nm, 1116 nm 和 1123 nm 这三条谱线的性能也相对较好。但  $4F_{3/2} \rightarrow 3I_{11/2}$  的所有跃迁(1112 nm、1116 nm、1123 nm)中最不活跃的谱线是 561 nm 激光的基频光——1123 nm 谱线。

从表 1 可以看出 1123nm 谱线的相对性能是 1064 nm 谱线的 2/5, 和 946 nm、1318 nm、1112 nm、1116 nm 这些谱线的相对性能相差不多, 受激发射截面接近, 在对一个波长腔内倍频的过程中, 受其他波长倍频及与该波长和频的影响, 使得功率输出稳定性差, 波长也容易跳变。所以, 要实现 561nm 单谱线输出, 需要通过附加与波长相关的选择性损耗来抑制其他谱线的振荡。

在常用的选择性损耗光学元件中双折射滤波器因其可调谐范围大、调谐方便、插入损耗小和抗损伤能力强等优点被广泛应用。双折射滤波器, 简称 BF, 作用原理基于双折射效应, 由于双折射效应, 经过晶体的偏振光会分成 o 光和 e 光, 并且他们的折射率不同, 传播速度在晶体中也不同, 所以会产生相位差, 利用这一特性, 适当选择晶体厚度、光轴与晶体表面夹角可使晶体具有调谐作用, 实现选频。

1992 年天津大学王兴龙和姚建铨教授对双折射滤波器的传输和调试特性进行研究[13], 分析了双折射滤波器的原理以及调制特性, 给出双折射滤波器的传输公式, 绘制出双折射滤波器透射曲线。1999 年, 天津大学应用物理系进行了用于钛宝石激光器的可调谐双折射滤光片的综合设计[14]。2004 年中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室研究了布氏角放置的双折射滤光片在腔内倍频中的作用[15], 同样以钛宝石激光器为例, 详细研究了双折射滤光片在宽带增益激光器腔内倍频中的作用以及双折射滤光片在腔内位置对倍频效率的影响。2016 年西北核技术研究所对 787~952 nm 可调谐全固态 Cr:LiSAF 激光器[16]的研究, 分析了激光器效率和调谐范围的限制因素。利用 BF 具有插入损耗较小、调谐范围宽等优点, 进行调谐, 实验发现在加入 BF 后输出功率下降约 10 mW。

在对 1123 nm 的基频光进行倍频的过程中, LBO 晶体和 KTP 晶体都是目前比较常用的两种非线性晶体。KTP 晶体电光系统大, 非线性系数大, 不潮解, 允许角度大和允许温度高, 走离角小, 折射率小, 对温度不敏感, 机械性能好, 导热性能好, 化学性能稳定, 除了在紫外区不透明外, 是一种特性优良的晶体。LBO 晶体透明范围宽, 甚至可以达到紫外波段, 非线性系数较大, 允许角大, 损伤阈值高, 不潮解, 机械性能好。在选择合适的倍频晶体和选频手段后, 561nm 激光器可获得较高的转化效率, 获得高功率的激光输出。

近年来国内外已有很多关于通过腔内倍频获得 561nm 激光输出的报道。2008 年, E. Rääkkönen, O. Kimmelma 等人, 使用 2.5 W 的激光二极管抽运 Nd:YAG, 获得 1123nm 谱线振荡, 再使用 KTP 晶体进行腔外倍频, 得到脉冲频率为 12 kHz 的, 平均功率为 55 mW、波长为 561nm 的激光输出[17]。2011 年, 何艳艳, 夏丹青等人采用半导体模块作为泵浦源, 在泵浦功率为 50 W 得到了 6.3 W 的 1123nm 激光输出。使用 KTP 晶体腔内倍频, 采用镀选择性介质膜的方式, 对 1064nm、946nm 和 1318nm 激光进行抑制, 最终得到了 3.5 W 的 561nm 黄激光连续输出[18]。

**Table 1.** Comparison of laser performance of the Nd:YAG at the main laser transition

**表 1.** Nd:YAG 的主要几条谱线的相对性能比较

$\lambda/\text{nm}$	跃迁	相对性能
1064	$R_2 \rightarrow Y_3$	100
1318	$R_2 \rightarrow X_1$	34
1112	$R_2 \rightarrow Y_6$	49
1116	$R_1 \rightarrow Y_5$	46
1123	$R_1 \rightarrow Y_6$	40

2012年, 崔锦江, 檀慧明等人采用半导体抽运腔内倍频的方法, 通过选择允许角度和允许温度较小的倍频晶体, 通过调整晶体放置位置, 采用LD端面泵浦, 当泵浦功率为13.5 W, 通过设计了合理的谐振腔膜系, 使增益较大的1064, 1319和946nm谱线的振荡被抑制, 得到了1.41 W的561 nm单谱线输出, 光-光转换效率为10.5% [19]。2013年, Jing Gao, Xianjin Dai等人报道了一种连续腔内倍频561nm激光器, 采用标准具和特殊的膜系设计, 实现了1123nm单谱线运转, 在吸收泵浦功率为21.8 W时, 得到最大输出2.3 W, 光光转换效率为10.6% [20]。2013年, 邵志强, 高兰兰等人利用激光二极管端面抽运Nd:YAG晶体, LBO非线性晶体采用一类相位匹配切割, 对1123nm基频光倍频的方法, 得到561nm激光输出如图4所示, 在抽运功率为5 W时的最大输出功率为123 mW, 此时的光-光转换效率为2.46% [21]。

2017年, 马刚飞, 姚文明等人利用LD抽运Nd:YAG晶体, 实验装置如图5所示, 得到1123 nm基频光, 通过LBO晶体腔内倍频得到561 nm输出[22]。

在泵浦功率为5 W时, 实现了561 nm激光单波长输出, 输出功率达到107 mW, 此时561 nm激光功率在5 min内不稳定性为0.7%, 如图6所示。

#### 4. 结束语

波长在550~600 nm范围的黄绿光可以应用于军工、通讯、信息存储、医疗美容、生物医学、食品药品检测、大气遥感等方面。军事上黄光激光可用于空间目标的探测与识别。本文对全固态激光器的发展进行了简单的介绍, 并对561 nm激光器的基本原理及几种常用元件的性能进行了分析, 并对561 nm激光器的研究进展进行了回顾。虽然LD泵浦的全固态561 nm激光器因其结构紧凑、重量轻等优点逐渐成

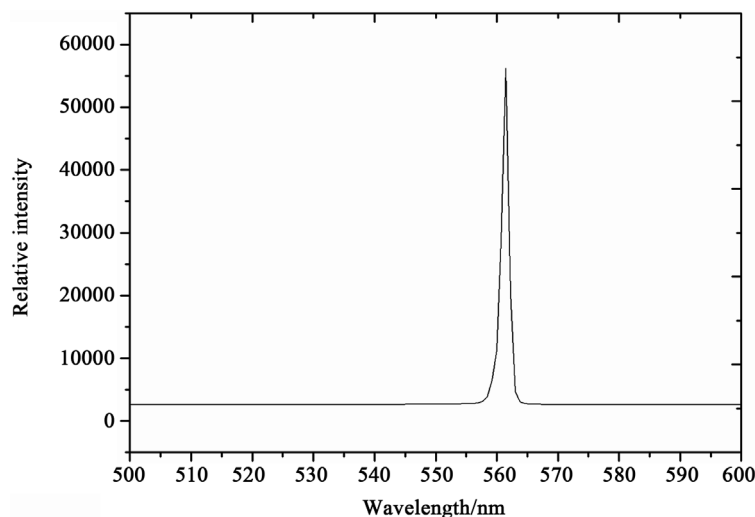


Figure 4. 561 nm spectrum of frequency doubling output by LBO crystal

图4. LBO晶体倍频的561 nm输出谱线

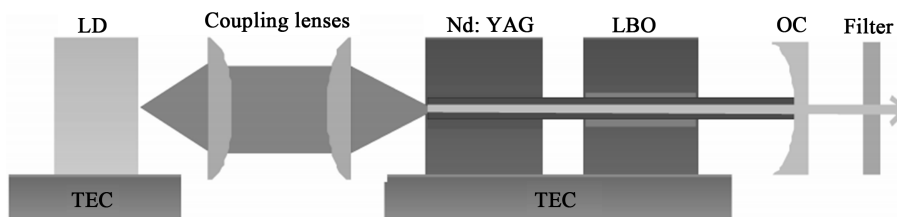


Figure 5. Schematic diagram of experimental device

图5. 实验装置原理图

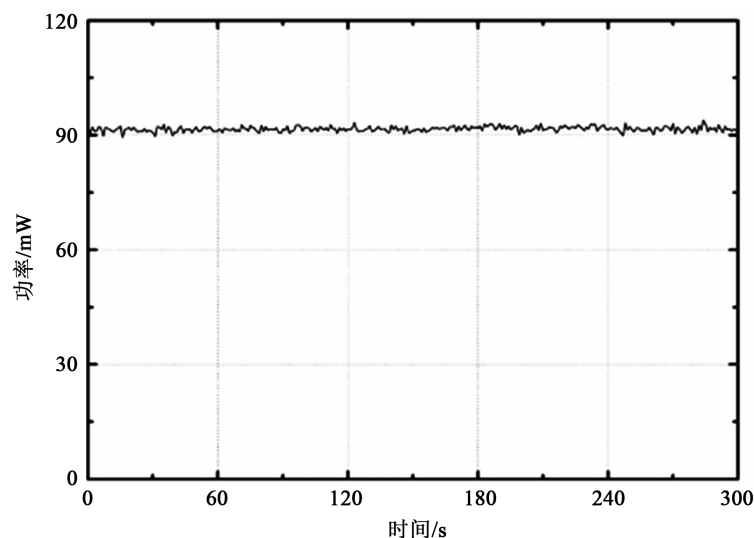


Figure 6. Stability test in 5 minutes

图 6. 5 min 内稳定性测试

为激光器领域的研究热点, 但输出激光的稳定性和光束质量, 在一定程度上限制了其应用, 所以如何采取更好的方法平衡各参数指标、并且提高激光的光束质量和稳定性, 将是下一步的研究重点。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘媛, 方高瞻, 马晓宇, 肖建伟. 大功率二极管泵浦固体激光器[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 139-142.
- [2] Newman, R. (1963) Excitation of the  $\text{Nd}^{3+}$  Fluorescence in  $\text{CaWO}_4$  by Recombination Radiation in GaAs. *Journal of Applied Physics*, **34**, 437.
- [3] Keyes, R.J. and Quist, T.M. (1964) Injection Luminescent Pumping of  $\text{CaF}_2\text{U}^{3+}$  with GaAs Diode Lasers. *Applied Physics Letters*, **4**, 50-52. <https://doi.org/10.1063/1.1753958>
- [4] Ross, M. (1968) YAG Laser Operation by Semiconductor Laser Pumping. *Proceedings of the IEEE*, **56**, 196-197. <https://doi.org/10.1109/PROC.1968.6220>
- [5] 陈义红, 赵兵, 赵德政, 等. 全固化固体激光器研究及进展[J]. 激光产品世界, 2003(7): 6-16.
- [6] Honea, E.C., Beach, R.J., Mitchell, S.G., et al. (2000) High-Power Dual-Rod Yb:YAG Laser. *Optics Letters*, **25**, 805-807. <https://doi.org/10.1364/OL.25.000805>
- [7] Kracht, D., Wilhelm, R. and Frede, M. (2005) 407W End-Pumped Multi-Segmented Nd:YAG Laser. *Optics Express*, **13**, 10140-10144. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.010140>
- [8] 陈进. 高功率 LD 泵浦的内腔倍频 Nd:YAG 激光器研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003.
- [9] 王志勇. 固体 RGB 激光光源及其在显示技术方面的应用研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003.
- [10] 王金定. 小型增益开关 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 绿光激光器研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [11] 王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. 综合评述, 2008, 45(1): 29-36.
- [12] 张帆, 高兰兰. 全固态被动调 Q 黄绿激光器研究[硕士论文]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [13] Wang, X. and Yao, J. (1992) Transmitted and Tuning Characteristics of Birefringent Filters. *Applied Optics*, **31**, 4505-4508. <https://doi.org/10.1364/AO.31.004505>
- [14] 陆樟献, 唐多强, 胡鸿璋, 刘威. 用于钛宝石激光器的可调谐双折射滤光片的综合设计[J]. 光电子·激光, 1999(6): 498-500.
- [15] 程光华, 王屹山, 于连君, 赵卫, 陈国夫. 布氏角放置的双折射滤光片在腔内倍频中的作用[J]. 光学学报, 2004(2): 284-288.
- [16] 栾昆鹏, 于力, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 马连英, 易爱平. 787~952nm 可调谐全固态 Cr:LiSAF 激光器[J]. 现代应用物理, 2016(2): 31-34.

- 
- [17] Raikkonen, E., Kimmelma, O., Kaivola, M. and Buchter, S.C. (2008) Passively Q-Switched Nd:YAG/KTA Laser at 561 nm. *Optics Communications*, **281**, 4088-4091. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.04.016>
- [18] 何艳艳, 夏丹青. 全固态 561nm 黄激光器的研制[J]. 应用激光, 2011, 31(4): 327-331.
- [19] 崔锦江, 檀慧明, 王帆, 等. 大功率医用全固态 561nm 黄光激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 87-91.
- [20] Gao, J., Dai, X.J., Zhang, L., Sun, H.X. and Wu, X.D. (2013) All-Solid-State Continuous-Wave Yellow Laser at 561nm under In-Band Pumping. *Journal of the Optical Society of America B*, **30**, 95-98. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.30.000095>
- [21] 邵志强, 高兰兰, 张辰. 全固态 561nm 倍频激光器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 104-108.
- [22] 马刚飞, 姚文明, 鞠乔俊, 等. 高稳定性低噪声的 561nm 黄光激光器[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 499-505.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)