

# 全固态绿激光技术的评述与展望

耿爱丛,徐登辉,李 熊,朱耀辉  
(北京工商大学机械工程学院,北京 100048)

**摘 要:**回顾了绿激光技术的发展背景,总结了全固态绿激光技术的应用,对比了世界范围内的相关研究,标定了目前所达到的研究水平,对于即将开展相关研究的科研工作者是一份有益的参考。目前,有必要解决将全固态绿激光器进行实际应用上的技术难题,促使其进入产业化的高速发展期。

**关键词:**激光;全固态;绿光;倍频

**中图分类号:**TN248.1

**文献标识码:**A

## Reviews and prospects of all-solid-state green laser technology

GENG Ai-cong, XU Deng-hui, LI Xiong, ZHU Yao-hui

(Department of Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The research history and application of all-solid-state green laser technology are reviewed. A comparison of relevant researches world widely is made, and the current research level is demarcated. It is important and beneficial for upcoming researches on green lasers. The current research should focus on solving the practical application problems of all-solid-state green lasers, which will result in the advent of its industrialization.

**Key words:** laser; all-solid-state; green laser; frequency doubling

### 1 全固态绿激光技术的发展背景

全固态绿激光器是利用二极管(LD)泵浦激光晶体产生波长在1  $\mu\text{m}$ 附近的振荡,再结合非线性晶体的倍频过程获得绿光的激光器。在此之前,获得绿光光源的方法有许多,例如利用气体激光器、半导体激光器、利用上转换效应可直接输出绿光,但都存在制约其发展和应用的不利因素,因此这些激光器逐渐被全固态绿激光器取代。

气体激光器以氩离子气体激光器和铜蒸汽激光器为代表,气体激光器获得的绿光输出功率虽然可达百瓦量级,但是其体积庞大、外部设备复杂、工作物质有毒,而氩离子气体激光器只能以连续方式工作的,很难通过激光调制技术获得高的峰值功率,这些缺点均限制了其在更大范围内的应用,因此逐渐被取代。

绿激光器还可利用上转换效应获得,上转换是通过多光子机制把长波辐射转换成短波辐射的过

程。在固体基质材料中掺入稀土离子,通过外界泵浦光的激励,由稀土离子的能级跃迁辐射而产生绿光激光。但是,上转换激光器走向实际应用的最大障碍就是效率低,输出激光功率极其有限。

半导体激光器也可直接获得绿光输出,半导体激光器是以直接带隙半导体材料形成的PN结或在PIN结为工作物质、端面直接镀膜形成谐振腔的一种小型化激光器。但是,由于半导体绿激光器材料制备和器件工艺方面的困难,其研究进展一直比较缓慢。

基于半导体激光和灯泵固体激光技术发展起来

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61007021);北京市教委科技发展计划(No. KM200910011010);中国博士后科学基金(No. 20080430563);北京市属高等学校人才强教计划(No. PHR201007122)资助。

**作者简介:**耿爱丛(1977-),女,博士,主要从事全固态激光频率变换技术研究。E-mail: aicong\_77@126.com

**收稿日期:**2010-09-28

的全固态激光器,继承了半导体激光器效率高、寿命长的优点及固体激光器光束质量好的优点,摒弃了半导体激光器光束质量差的缺点,没有了传统灯泵浦的固体激光器体积大、效率低、寿命短等缺点。具有效率高、光束质量好、体积小、寿命长、可靠性高、易操作、运转灵便(连续波/长脉冲/短脉冲)、易智能化、无污染等优点,因此,正在逐步取代其他类型的绿激光器在各领域的应用。进入20世纪90年代以后,随着半导体激光技术的发展及其价格的降低,高功率全固态绿激光器得到了空前的发展,人们尝试了各种手段努力获得高倍频效率、高光束质量和高平均功率的绿光输出,取得了的成果也是日新月异。1997年,美国Livemore实验室实现了高达315 W的绿光输出<sup>[1]</sup>,到2009年,美国Coherent公司获得输出功率420 W的全固态绿激光器<sup>[2]</sup>。目前,国内全固态绿激光器最高输出功率也达到230 W<sup>[3]</sup>。

## 2 全固态绿激光技术的应用

由于全固态绿激光器具有效率高、功率大、激光输出光束质量好、运转可靠、体积小以及寿命长等优点,已经在加工、通讯、医疗、激光显示和科学研究等领域得到了较为广泛的应用。全固态绿激光器主要应用有如下几方面:

### 2.1 全固态绿激光进行激光精密加工

全固态绿激光具有高亮度、聚焦光斑小以及作用时间短、热影响区小、工件在加工过程中不会产生大的形变等优点,因此在精密加工中显示出其独特的优越性,可以对一些硬度高、脆性大的材料进行切割或焊接。以全固态绿激光器为光源制成的紧凑、高效焊接装备,能稳定、可靠的在工程环境下长期稳定运行,使用小功率的激光束使材料熔化而不汽化,在冷却后成为一块连续的固体结构,可满足汽车或船舶等工业应用的金属板材的加工。另外,利用全固态激光器结构紧凑、无污染、光束质量好、运转成本低等独特优势,加之激光打标标记速度快,字迹清晰、永久、非接触式加工,无磨损,防伪功能强的特点,使得全固态绿激光打标机已广泛应用。

### 2.2 全固态绿激光是重要的医疗手段

绿光具有功率大、光斑小的特点,可以用来对病变组织进行切除,有创伤小、止血快、患者恢复较快等优点<sup>[4]</sup>。医学上使用的绿激光大多采用1064 nm Nd:YAG激光经过倍频得到的532 nm激光。例如人眼对绿光是最为敏感的,532 nm波长全固态绿光脉冲激光可用于眼科疾病的治疗。另外,532 nm脉冲激光器还可用于治疗如鲜红斑痣等血管性疾病,

因为绿光波段位于氧合血红蛋白吸收峰附近,高功率脉冲绿激光器对皮肤的作用时间对于选择性光解热来说相对较短,不会对目标组织周围的皮肤组织产生非选择性加热,从而不会导致热损伤。此外,532 nm激光在泌尿外科中具有重要应用,高功率的532 nm激光能在膀胱充盈的情况下通过内窥镜以微创形式在腔内高效、精确汽化病变组织,具有止血效果好,周围组织损伤小、手术时间短,穿透深度浅,较之电切手术副作用小等优点,是目前最有效,最安全的一种微创治疗泌尿系统疾病的方法。

### 2.3 全固态绿激光是重要的泵浦源

紫外激光器、深紫外激光器在医学、军事、工业、印刷等方面都有着广泛的应用,使用全固态绿光作为泵浦源进行三倍频、四倍频等变频技术成为当前产生紫外、深紫外激光最有效、最广泛的方法<sup>[5]</sup>,为开展紫外波段的光谱学、能谱学、化学和生命科学等新领域研究奠定基础。目前,利用全固态532 nm激光器作泵源,获得的355 nm,266 nm,177 nm紫外激光的最高输出功率分别为160 W(LBO晶体)<sup>[2]</sup>、40 W(CLBO晶体)<sup>[6]</sup>,41 mW(KBBF晶体)<sup>[7]</sup>。

飞秒激光在信息技术、超快现象、生命科学等领域具有重要的应用价值,飞秒超强激光是近十年来激光技术和物理学最前沿的研究内容之一,而用LD泵浦的绿激光器是其重要的泵浦源,目前飞秒超强激光在实验室已能得到聚焦功率密度大于 $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>量级的光场强度。

另外,绿激光器还可以作为参量振荡器的泵浦源<sup>[8]</sup>,拓展全固态激光器的输出波长范围,并且提供高功率、高光束质量、宽调谐的稳定激光光源,在医学、物理学、化学、生物学等领域都有重要的应用。

### 2.4 激光演示

利用激光的高亮度、优异的方向性、单色性等其他常规灯光所无法比拟的优势,可见激光作为一种全新的视觉元素已经进入了公众演出,激光演示也成为城市景观的重要组成部分。同时,激光演示技术与多媒体技术相结合的激光多媒体技术赋予了激光演示艺术更为生动、灵活、多样的表现手法,这就使得想象所及的任何激光文字、动画、图案都可以得到实现。而绿激光在激光演示中占据了重要的地位,全固态绿激光器演示具有色彩艳丽、大气损耗低、亮度高等特点,已被广泛的应用于制作激光射灯、特殊激光光束效果表演、激光动画以及三维图文。

### 2.5 激光显示

激光显示技术是以高色饱和度的三基色激光作

为显示光源,具有色域范围广、寿命长(数万小时)、环保、节能等优点。激光显示有望成为下一代显示技术,绿光是三基色之一,对高质量的全固态绿色激光的研发也是激光显示研究中的重要部分<sup>[9]</sup>。

## 2.6 海洋探测

高功率绿光全固态激光器的一个重要应用方向是激光水下探测,绿光(波长 532 nm)处于海水透射窗口之内,在水中的传输距离较远,是海底探测和通讯的理想光源。由于全固态绿激光器效率高、功耗小,非常适用于舰载和机载条件下长时间连续工作。

除了以上提到的几方面应用之外,全固态绿激光器还在光存储、准直、干涉测量、全息摄影、信息处理、表面淬水、流场显示、污染检查等许多民用技术领域有着广泛的应用,而且为激光雷达、激光制导、瑞利信标等军事应用提供了可靠的光源。因此,全固态绿激光器具有重要的科学研究价值和广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。基于此,国内外众多企业及科研机构正在积极从事全固态绿激光器方面的研究工作。

## 3 全固态绿激光技术的研究现状

在全固态可见光激光器中,绿激光器是发展最快、最成熟、输出功率最高的。这是因为  $\text{Nd}^{3+}$  对应的  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{F}_{11/2}$  四能级结构跃迁谱线  $1.06 \mu\text{m}$  是增益最强、发射截面最大、效率也最高的。用来泵浦掺  $\text{Nd}^{3+}$  的 YAG,  $\text{YVO}_4$ , YLF 和 YAP 等激光晶体的半导体激光器 ( $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$ ,  $\sim 808 \text{ nm}$ ) 输出功率已经达到相当高的水平,而倍频晶体 KTP 和 LBO 在非线性光学材料中也是最成熟的。因此,近年来全固态绿激光器发展十分迅速,运转模式包括连续和准连续,泵浦结构包括侧泵和端泵,倍频方式包括腔内倍频和腔外倍频,谐振腔结构多样,发展方向主要包括高输出功率、高倍频效率、高光束质量等。下面本文将分别从准连续绿光、连续绿光这两个方面评述当前全固态绿激光技术的研究现状。

### 3.1 准连续绿光技术

进入 20 世纪 90 年代,基于半导体激技术和非线性变频技术的迅速发展,全固态绿激光器输出功率很快突破百瓦级<sup>[11]</sup>,并且输出功率迅速增长。到了 1997 年,美国 Livemore 实验室利用复合抛物线聚光腔(CPC)激光模块,采用 KTP 作为倍频晶体腔内倍频,采用双声光  $Q$  开关调制的 Z 形双端输出谐振腔,双端输出 315 W 的绿光输出<sup>[1]</sup>,这是 20 世纪报道的输出功率最高的全固态绿激光器<sup>[12]</sup>。1998 年, Eric C. Honea 等人采用端面泵浦、双  $Q$  开关调制、KTP 晶体 V 形腔内倍频技术,双端输出 140 W

绿光,这是目前端面泵浦全固态绿激光器获得的最高功率<sup>[13]</sup>。

进入新世纪后,对于准连续全固态绿激光器的研究,人们除了注重高功率以外,还开展了高光束质量、高效率、高实用性等更多方面的研究工作。2009 年,美国相干公司报道了迄今为止输出功率最高的全固态绿激光器,采用双  $\text{Nd}:\text{YAG}$  棒串接,双  $Q$  开关调制、II 类匹配 LBO 晶体在 Z 形腔内倍频方式,获得了 420 W 的绿光,重复频率 10 kHz,脉宽 70 ns,光束质量因子  $M^2$  约等于 24。值得指出的是:与之前 315 W 绿激光器不同,该激光器为单端输出,实用性更强。紧接着,利用该绿光为泵浦进行三倍频,获得了 160 W 波长为 355 nm 的紫外激光输出,这也是目前报道的 355 nm 激光的最高输出功率<sup>[2]</sup>。

在国际上全固态绿激光技术迅速发展的同时,国内相关的研究也从未落后。2005 年至 2006 年,作者所在的中科院物理所许祖彦院士课题组,利用双声光调  $Q$  器件,采用两个泵浦模块中间加  $90^\circ$  石英旋光片的方式,利用 LBO 晶体倍频先后实现 120 W, 140 W 高光束质量、准连续绿光输出<sup>[14-15]</sup>;通过设计热近非稳腔结构,在输出功率为 120 W 时,控制光束质量因子  $M^2$  仅为 6.2<sup>[16]</sup>;2007 年,通过采用自行设计的侧泵激光模块,获得平均功率 218 W,  $M^2 = 20.2$ 、脉宽 86 ns、重复频率 12.5 kHz 的全固态绿激光器,在国际上率先实现单端输出功率突破两百瓦<sup>[17]</sup>。

在追求高输出功率的同时,国内也开展了高光束质量等方面的研究工作。2008 年,清华大学采用主振荡器 + 4 级放大器的 MOPA 系统、利用 LBO 晶体腔外倍频获得 103.5 W 全固态绿光输出,重复频率为 60 kHz,此时绿激光接近基模输出:  $M_x^2 < 1.44$ ,  $M_y^2 < 1.23$ ,倍频效率为 67%<sup>[18]</sup>。

2009 年,华北光电技术研究所苑利钢等人采用双棒串接 - 对称直腔结构,获得了 400 W 基频输出,采用 LBO 晶体腔内倍频,获得了平均功率为 230 W 的 532 nm 绿光输出,这也是目前我国报道的全固态绿光最高输出功率<sup>[3]</sup>。

### 3.2 连续绿光技术

全固态连续波绿激光器具有效率高、光束质量好、体积小、稳定性高和寿命长等优点,因此,在医疗卫生、潜艇卫星通讯和大屏幕彩色显示等领域有重要的应用。目前,国际上对于全固态连续波绿激光器的研究热点是高功率、小型化、高性能等,根据泵浦结构的不同,全固态连续绿激光器研究可分为类:

端泵绿激光器和侧泵绿激光器。端面泵浦具有结构简单、体积紧凑、输出激光模式好,容易获得基模等一系列优点,但是泵浦结构限制其只适合小功率激光器。侧面泵浦虽然具有模式较差,低阶模和高阶模均容易振荡的缺点,但是由于激光晶体尺寸可以做得很大,能实现大功率输出,因此在对激光模式要求不是特别严格的情况下,为了获得大功率激光输出,选择侧面泵浦结构的谐振腔更有优势。

2006年,印度的 Mukhopadhyay 等人采用侧面抽运的单 Nd:YAG 棒 V 形腔结构激光器,利用 KTP 为腔内倍频晶体,输出最大功率为 30.5 W 的绿光,其光束质量因子  $M^2$  值为  $20^{[19]}$ 。2007年,德国 Mc-Donagh 等人利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和临界相位匹配的 LBO 晶体倍频,采用较为复杂的双 Z 形腔结构,获得了功率为 62 W,  $M^2 = 1.05$  的基膜连续绿光输出,这是目前报道的全固态连续绿光的最高输出功率<sup>[20]</sup>。

国内对全固态连续绿光的研究主要集中在中科院理化所,天津大学,西北大学,山西大学等研究单位。2009年,山西大学采用 V 字形热不灵敏折叠式谐振腔,利用 LD 从单端泵浦激光晶体,当抽运功率为 30 W 时,获得了连续单横模绿光的最高输出功率 12.9 W,光-光转换效率为 43%,LBO 晶体保证了激光器的稳定性,该激光器特别之处在于选择了低掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> 复合晶体<sup>[21]</sup>。2009年,中科院理化所许祖彦院士研究组采用侧面泵浦、双头串接结构,利用 LBO 为倍频晶体获得 40 W 的连续绿光输出,电光转换效率和光-光转换效率分别为 5.0% 和 8.6%,这是目前我国报道的全固态连续绿光的最高输出功率;在输出激光为 34 W 时,测得光束质量因子  $M^2 = 1.6^{[22]}$ 。

#### 4 全固态绿激光技术的展望

尽管全固态激光技术越来越成熟,研究人员还在努力研制新型全固态绿激光器,如利用板条、盘片形状的激光晶体,采用混合泵浦模式,尝试新型倍频晶体等,力争激光器从低功率,大尺寸,多模式,低效率,低稳定性,高成本逐渐向高功率,紧凑型,低阶模,高稳定性、低成本方面发展,从而使全固态绿激光器不断实用化,产品化。目前来看,国内全固态绿激光器某些方面的性能指标已经达到相当高的水平,但是,这些技术主要是在实验室取得的成功,离批量生产还有一定距离。如果将其应用到医学等实用科学技术上,还有很多的技术难题需要解决。例如,我国现阶段在泌尿外科中临床应用的绿激光治

疗仪还全部依赖进口。因此,研究人员有必要对全固态绿光激光设备及其应用开展研究,与使用部门配合,开发出具有我国自主知识产权的新一代绿激光产品,推动我国全固态绿激光器及其医用或工业装备进入产业化的高速发展期。

#### 参考文献:

- [1] J J Chang, E P Dragon, I L Bass. 315 W pulsed-green generation with a diode-pumped Nd:YAG laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digests, 6, 1998, CPD2-2.
- [2] David R Dudley, Oliver Meh, Gary Y Wang, et al. Q-switched diode pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm [C]. Proc. of SPIE, 2009, 7193: 0Z-1-0Z-8.
- [3] Yuan Ligang, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun, et al. Green solid-state laser with 230 W output power [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 980-983. (in Chinese)
- [4] 苑利钢,姜东升,王建军,等. 输出功率达 230 W 的绿光固体激光器 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 980-983.
- [5] Bai Jintao, Chen Xiuyan, Gu Ying, et al. Novel medical applications of all-solid-state multi-wavelength lasers [J]. Laser and Optoelectronic Progress, 2009, (4): 65-67. (in Chinese)
- [6] 白晋涛,陈秀艳,顾瑛,等. 新型全固态多波长激光器的医学应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, (4): 65-67.
- [7] Guiling Wang, Aicong Geng, Yong Bo, et al. 28.4 W 266 nm ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. Opt. Commun., 2006, 259: 820-822.
- [8] M Nishioka, S Fukumoto, F Kawamura, et al. Improvement of laser-induced damage tolerance in CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> for high-power UV laser source [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, MD, USA, 2003 (CLEO'03), paper CTuF2.
- [9] Feng Yang, Zhimin Wang, Yong Zhou. 41 mW high average power picosecond 177.3 nm laser by second-harmonic generation in KBBF [J]. Optics Communications, 2010, 283(1): 142-145.
- [10] Huiqing Li, Aicong Geng, Yong Bo, et al. A 18-W single average power nanosecond LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> optical parameter oscillator around 860 nm and the beam quality [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(7): 1694-1697.
- [11] Xu Zuyan. Laser displays [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(supplement): 737-741. (in Chinese)
- [12] 许祖彦. 激光显示-新一代显示技术 [J]. 激光与红

- 外,2006,36(增刊):737-741.
- [10] Geng Aicong. Study on technologies of high power all-solid-state lasers and the frequency-changing[D]. Beijing: Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- 耿爱丛. 高功率全固态激光及其变频技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- [11] B J Le Garrec, G J Razé, P Y Thro, et al. High-average-power diode-array-pumped frequency-doubled YAG laser[J]. Opt. Lett., 1996, 21(24):1990-1992.
- [12] J J Chang, E P Dragon, C A Ebbers, et al. An efficient diode-pumped Nd:YAG laser with 451 W of CW IR and 182 W of pulsed green output[Z]. OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers, 1998, 300-304.
- [13] E C Honea, C A Ebbers, R J Beach, et al. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532  $\mu\text{m}$ [J]. Opt. Lett., 1998, 23(15):1203-1205.
- [14] Aicong Geng, Yong Bo, Yong Bi, et al. High beam quality green generation with output 140 W based on thermally-near-unstable flat-flat resonator[J]. Chin. Phys. Lett., 2005, 22(1):125-127.
- [15] Aicong Geng, Yong Bo, Yong Bi, et al. One hundred and twenty one W green laser generation from a diode-side-pumped Nd:YAG laser by use of a dual-V-shaped configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2006, 44:589-596.
- [16] Yong Bo, Aicong Geng, Yong Bi, et al. High-power and high-quality, green-beam generation by employing a thermally near-unstable resonator design[J]. Appl. Opt., 2006, 45(11):2499-2503.
- [17] Yong Bo, Qianjin Cui, Aicong Geng, et al. 218 W,  $M^2 = 20.2$  green beam generation by intracavity-frequency-doubled diode-pumped Nd:YAG laser[C]. CLEO 2007, 2007, CTuD4.
- [18] Qiang Liu, Xingpeng Yan, Mali Gong, et al. 103 W high beam quality green laser with an extra-cavity second harmonic generation[J]. Opt. Express, 2008, 16:14335-14340.
- [19] P K Mukhopadhyay, S K Sharma, K Ranganathan, et al. Efficient and high-power intracavity frequency doubled diode-side-pumped Nd:YAG/KTP continuous wave (CW) green laser[J]. Optics Communications, 2006, 259:805-811.
- [20] L McDonagh, R Wallenstein. Low-noise 62 W CW intracavity-doubled  $\text{TEM}_{00}$  Nd:YVO<sub>4</sub> green laser pumped at 888 nm[J]. Opt. Letters, 2007, 32(7):802-804.
- [21] Li Fengqin, Yu Lin, Sshen Yumei, et al. All-solid-state CW 12.9 W  $\text{TEM}_{00}$  mode green laser[J]. Chinese J Lasers., 2009, 36(6):1332-1336. (in Chinese)
- 李凤琴, 于琳, 申玉梅, 等. 输出功率 12.9 W 的全固态连续模绿光激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(6):1332-1336.
- [22] Xiankun Cheng, Qianjin Cui, Yong Zhou, et al. High power and high beam quality CW green beam generated by diode-side-pumped intracavity frequency doubled Nd:YAG laser[J]. Optics Communications, 2009, 282:4288-4291.