

文章编号: 1001-3806(2013)01-0085-04

## 红外波段全固态单频激光器研究进展

梁勇<sup>1</sup> 姚志健<sup>2\*</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

**摘要:** 红外波段的全固态单频激光器在民用和军用领域都具有重要应用价值,是全固态激光器的重要发展方向之一。概述了实现全固态单频激光器的主要技术手段和典型的工作原理,总结了1.064 $\mu\text{m}$ 、1.5 $\mu\text{m}$ ~1.6 $\mu\text{m}$ 和2 $\mu\text{m}$ 波段红外全固态单频激光器的主要研究方向和国内外研究进展,分析对比了各波段全固态单频激光器的主要实验方法的优缺点,最后对未来全固态单频激光器的发展前景进行了分析和展望。

**关键词:** 激光器;全固态激光器;单频激光器;红外激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.021

### Development of single-frequency all-solid-state infrared lasers

LIANG Yong<sup>1</sup>, YAO Zhi-jian<sup>2</sup>

(1. School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Ordnance Science Institute of China, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Single-frequency all-solid-state infrared lasers are very important for commercial and military applications. Their typical principle and the technical approaches were summarized. Their development status at wavelengths of 1.064 $\mu\text{m}$ , 1.5 $\mu\text{m}$ ~1.6 $\mu\text{m}$  and 2 $\mu\text{m}$  was reviewed. The characteristics of the main schemes were compared. Finally, the new development in the future was predicated.

**Key words:** lasers; all-solid-state lasers; single-frequency lasers; infrared lasers

### 引言

全固态单频激光器具有相干长度长、谱线宽度窄、光束质量好等优势,已引起人们的广泛关注。在各种单频激光器中,波长在1 $\mu\text{m}$ ~2 $\mu\text{m}$ 波段的全固态单频激光器激光雷达、光学测量、光束相干合成、高功率激光种子源等方面具有重要的应用价值。

为了获得单频激光,必须对激光器的纵模进行选择,让激光器始终只有一个纵模振荡。纵模选择方式有以下几种:短腔法、扭转模腔法、腔内插法布里-珀罗标准具法、单块非平面环形腔法等。短腔法通过缩短谐振腔腔长、增大激光器纵模间隔,使激光器在有效增益线宽内只有一个纵模,从而获得单纵模激光输出,但是短腔法中激光工作物质较短,输出功率很低;扭转模腔法是在激光腔内插入两个 $\lambda/4$ 波片和1个偏振片在激光增益介质内形成扭转模,消除空间烧孔效应,实现单纵模运转;腔内插法布里-珀罗标准具法就是利用法布里-珀罗标准具的选频原理获得单纵模激光输出;单

块非平面环形腔激光器的原理与腔内插入法拉第光学单向器的单向行波平面环形腔激光器的原理类似,消除了空间烧孔效应,实现单纵模激光输出,但单块非平面环形腔激光器只需一块激光晶体构成激光谐振腔,无分立元件,所以具有线宽窄、频率稳定性高、结构紧凑等优点。近年来国内外利用该方法获得了多种单频激光输出。本文中简要总结了近年来1 $\mu\text{m}$ ~2 $\mu\text{m}$ 全固态单频激光器的一些研究进展。

### 1 1.064 $\mu\text{m}$ 波段全固态单频激光器研究进展

1.064 $\mu\text{m}$  波段单频激光器主要采用Nd:YAG晶体和Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作为工作物质,为实现稳定单频运转并获得较高功率激光输出的目的,国内越来越多采用环形激光谐振腔的方案,通过在谐振腔内插入光学单向器使激光器单向工作,能有效消除空间烧孔效应,从而实现单频激光输出。

国内山西大学 ZHAO 等人报道了采用环形腔法实现1.064 $\mu\text{m}$ 单频激光输出,2004年他们选用Nd:YVO<sub>4</sub>作为工作物质,设计了六镜环形腔结构,采用双端抽运方式,在抽运功率为32.3W的情况下,获得10.4W单频1.064 $\mu\text{m}$ 激光输出,斜效率为43.7%<sup>[1]</sup>。2005年,他们选用不同透过率的输出耦合镜实现高效

作者简介:梁勇(1987-),男,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: frank0788@gmail.com

收稿日期:2012-06-01;收到修改稿日期:2012-06-26

单频输出,光光转换效率为47.2%,自由运转时,频率漂移小于150MHz<sup>[2]</sup>。2007年,中国科学院长春光学精密机械研究所HAO等人采用四镜环形腔结构,在腔内插入Cr:YAG饱和吸收体,实现被动调Q单频输出,平均输出功率为3.9W,脉宽为100ns<sup>[3]</sup>。2010年,华北光电技术研究所CHEN等人采用环形腔结构,以Nd:YVO<sub>4</sub>作为工作物质,在抽运功率为30.3W的情况下,获得10.48W的稳定单频1.064μm激光输出,光光转换效率为34.6%,1min内激光器频率漂移为68.65MHz<sup>[4]</sup>。2010年,中国科学院半导体研究所ZHAO等人选用Nd:YAG晶体的四镜环形腔结构实现单频激光输出,在抽运功率为7W时,获得2W单频1.064μm激光输出,光光转换效率为37%,线宽为50MHz<sup>[5]</sup>。

除了利用环形腔结构获得高功率单频输出外,国内许多单位还对采用其它技术方案获得单频输出进行了研究。北京工业大学XI等人利用体布喇格光栅作为选频元件,他们选用Nd:YLF作为工作物质,获得单脉冲能量为2mJ的单纵模激光输出<sup>[6]</sup>。北京理工大学GAO等人采用半导体激光器抽运单块非平面环形腔Nd:YAG,在抽运功率为3.51W时,1.064μm单频激光输出功率1.876W,光光转换效率为53.4%,斜效率为60.3%<sup>[7]</sup>。

环形腔法是目前获得大功率单频激光的有效方法,其具有有效消除腔内驻波效应和空间烧孔效应等优点,在国内研制大功率1.064μm波段单频激光器方面得到广泛使用。

## 2 1.5μm ~ 1.6μm 波段全固态单频激光器的研究进展

1.5μm ~ 1.6μm 波段的全固态单频激光器在国防和民用领域都有重要的应用价值。目前获得1.5μm ~ 1.6μm 波段单频激光输出的主要手段有两个:(1)通过掺Er光纤激光器产生;(2)通过掺Er晶体固体激光器产生。对于单频掺Er光纤激光器,实现的方案主要有短腔法、光纤布喇格光栅法、环形腔法等,由于热分布在很长的吸收路径上,就可以有效地克服热效应的问题,为了取得更高的输出功率,常在Er光纤中加入敏化离子Yb,形成共掺的光纤激光器,这种激光器具有线宽较窄、模式较好等特点。国内北京交通大学FU等人报道了采用短腔法实现1.5μm单频激光输出,他们选用高浓度掺Er光纤作为工作物质,在抽运功率为330mW的情况下,获得31.6mW单频1.5μm激光输出<sup>[8]</sup>。2007年,电子科技大学WU等人结合光纤饱和吸收体与光纤光栅法布里-珀罗标准具,在抽运功率为

145mW的情况下,获得39mW单频1.5μm激光输出,线宽小于10kHz<sup>[9]</sup>;2011年,他们制作基于二波混频的高功率光纤激光器,在抽运功率为3.1W时,获得653.7mW单频1.5μm激光输出,线宽为5kHz<sup>[10]</sup>。此外,中国科学院上海光学精密机械研究所LIU等人于2009年研制了全光纤脉冲1.5μm单频激光器,采用主振荡功率放大结构,重频为10kHz时,平均输出功率为50mW,线宽为1MHz<sup>[11]</sup>。2010年华南理工大学ZHANG等人采用环形腔法实现1.5μm单频脉冲激光输出,抽运功率为300mW时,平均输出功率为8.13mW,3dB带宽为0.49nm<sup>[12]</sup>。

对于掺Er晶体固体激光器,按照不同的抽运源分类可以主要分成两类:第1类,是用1.47μm,1.532μm的半导体激光器作为抽运源;第2类抽运源是1.532μm Er,Yb共掺光纤激光器。使用半导体激光器作为抽运源,由于其谱线较宽、光束质量较差,因此需要更高的Er掺杂浓度,才能有效吸收抽运功率,并要求在端抽运结构中进行模式匹配。澳大利亚阿德莱德大学CHANG等人于2010年开始进行实验,他们利用两个300mW的1470nm半导体激光器谐振抽运Er:YAG晶体,获得输出功率为30mW,频率稳定度小于12kHz, $M^2 = 1.02$ 的单频1645nm连续激光输出<sup>[13]</sup>。

使用Er,Yb共掺光纤激光器抽运的单频激光器近年来也引起人们的广泛关注。2008年,英国南安普顿大学KIM等人利用环形腔结构,在抽运功率为14W时,获得功率为4.7W单频1.645μm激光输出<sup>[14]</sup>。2011年,美国宇航公司CHEN等人利用光纤激光抽运Er:YAG单块非平面环形腔实现了单频运转,在抽运功率为6.5W时,获得0.5W单频1645nm激光输出,线宽20kHz左右<sup>[15]</sup>。北京理工大学GAO等人报道了利用光学激光抽运Er:YAG单块非平面环形腔单频激光器,获得了6.1W的单频1645nm激光输出,斜效率为55.2%,线宽为14.4kHz,这是目前国内报道的1645nm单频激光器的最高输出功率<sup>[16]</sup>。

从上述研究情况,掺Er光纤单频激光器具有系统容易小型化、不易受环境影响、线宽窄、散热好等优点,但当峰值功率较高时,光纤端面容易损坏,很难输出较高能量的调Q脉冲。掺Er晶体单频激光器具有结构稳定、可靠性好、效率高、寿命长等优点,可以获得高功率和脉冲能量的1.5μm ~ 1.6μm波段单频激光输出,但晶体的热效应一直是限制掺Er晶体单频激光器性能的主要问题。

## 3 2μm 波段全固态单频激光器的研究进展

目前实现2μm单频输出主要采用3种方法:第1

种采用半导体激光器抽运 Tm, Ho 共掺晶体; 第2种采用半导体激光器抽运掺 Tm 晶体和光纤; 第3种利用半导体激光器抽运掺 Tm 晶体和光纤产生的 1.9 $\mu\text{m}$  激光, 再抽运掺 Ho 晶体获得 2 $\mu\text{m}$  单频输出。

采用半导体激光器抽运 Tm, Ho 共掺晶体是早期实现 2 $\mu\text{m}$  单频激光的主要手段, 自 1965 年 JOHNSON 等人首次报道掺杂敏化离子的 Ho 激光器以来, 人们对于 2 $\mu\text{m}$  Tm, Ho 共掺激光器进行了许多研究工作, 但由于 Tm, Ho 粒子之间的能量转换, 上转换效应明显, 导致激光效率降低, 同时增加了激光晶体的热积累, 因此逐渐采用第3种方法。最典型的是美国宇航局 YU 等人在 2006 年利用半导体激光器抽运 Tm, Ho:LuLF 晶体, 采用种子注入的方法, 重频为 10Hz 时, 获得脉冲能量为 300mJ 的 2.053 $\mu\text{m}$  单频激光输出, 线宽小于 5MHz<sup>[17]</sup>。

对于采用半导体激光器抽运掺 Tm 晶体和光纤, 常用的工作物质有 Tm:YAG, Tm:YLF, Tm:LuAG, Tm:LiLuF<sub>4</sub> 等。哈尔滨工业大学 WU 和 YAO 等人在 2009 年采用腔内插法布里-珀罗标准具方法, 半导体激光器抽运 Tm:LuAG 晶体获得了单频 2.026 $\mu\text{m}$  激光输出, 输出功率为 148mW; 同年, 他们采用腔内插两片法布里-珀罗标准具方法, 半导体激光器抽运 Tm:YLF 晶体, 当抽运功率为 56.3W 时, 输出 14W 的单频 1907.7nm 激光, 斜效率为 32.2%, 光谱宽度为 0.15nm<sup>[18-19]</sup>; 2011 年, 采用种子注入的方法, 实现了 2 $\mu\text{m}$  单频调 Q 激光输出, 当重复频率为 15Hz 时, 输出脉冲能量 2mJ, 脉宽为 356.2ns, 线宽为 1.5MHz<sup>[20]</sup>。

北京理工大学 GAO 等人在 2009 年采用半导体激光器抽运 Tm:YAG 单块非平面环形腔结构, 抽运功率为 4.66W 时, 获得 867mW 单频 2.012 $\mu\text{m}$  激光输出, 斜效率为 31.6%, 频率稳定性为 0.32%<sup>[21]</sup>。2010 年, GAO 等人利用半导体激光器抽运 Tm:YAG 单块非平面环形腔结构产生单频激光作为种子源, 采用种子注入的方法, 实现了 2 $\mu\text{m}$  单频调 Q 激光输出。当重复频率为 200Hz 时, 输出脉冲能量 2.23mJ, 脉宽为 290ns, 线宽为 2MHz<sup>[22]</sup>。

对于第3种方案, 最常用的方式是利用 1.9 $\mu\text{m}$  激光抽运 Ho:YAG 晶体和 Ho:YLF 晶体, 英国南安普顿大学 SHEN 等人利用 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YAG 晶体, 采用环形腔结构, 获得 3.7W 单频 2114nm 激光输出<sup>[23]</sup>。2009 年, 美国宇航局 YU 等人利用 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YLF 晶体, 采用种子注入的方法实现了 2 $\mu\text{m}$  单频调 Q 激光输出, 重频为 1.25kHz 时, 脉冲能量为 5.5mJ, 脉宽为 50ns<sup>[24]</sup>。2011 年, Q-Peak 公司 DERGACHEV 等人抽运 Ho:YLF 晶体, 采用环形腔结

构, 腔内插入 Cr:ZnSe 可饱和吸收体, 实现了被动调 Q 的 2 $\mu\text{m}$  单频激光输出<sup>[25]</sup>。同年, 南非国家激光中心 STRAUSS 等人利用 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YLF 晶体, 采取主振荡功率放大结构, 获得了大于 330mJ 的 2064nm 单频激光输出<sup>[26]</sup>, 这是目前最高的 2 $\mu\text{m}$  单频输出能量。国内方面, 哈尔滨工业大学 YAO 等人在利用 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YAG 单块非平面环形腔晶体, 获得输出功率为 7.3W 的 2.09 $\mu\text{m}$  单频激光输出, 斜效率达到 71%<sup>[27]</sup>。

对于 2 $\mu\text{m}$  单频激光器, 从半导体激光器抽运 Tm, Ho 共掺晶体变为 Tm 和 Ho 单掺晶体, 相比之下该方法具有晶体热效应小、转换效率高、容易获得高功率输出等优点。目前, 这成为 2 $\mu\text{m}$  单频激光器的主要研究方案。

#### 4 小结

由于全固态单频激光器的重要应用前景, 高性能全固态单频激光器的研究一直受到人们的关注。为了实现高功率的全固态单频激光输出, 需要考虑热效应、单频稳定性、谐振腔优化等问题。随着激光技术的发展, 全固态单频激光器将具有广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] ZHAO J Y, ZHANG K Sh. High power single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser dual-end-pumped by diode laser [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(2): 87-92 (in Chinese).
- [2] ZHENG Y H, ZHANG K Sh. Diode end-pumped, high-efficiency Nd:YVO<sub>4</sub> laser of single-frequency operation [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2005, 11(2): 88-92 (in Chinese).
- [3] HAO E J, TAN H M, LI T, et al. Study of LD end pumped Q-switched single frequency laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 41-43 (in Chinese).
- [4] CHEN S B, ZHOU S H, ZHAO H, et al. 10W linearly polarized ring cavity configuration cw single-frequency laser [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 793-796 (in Chinese).
- [5] ZHAO H F, HOU W, LI G, et al. Single-frequency Nd:YAG ring laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2810-2812 (in Chinese).
- [6] XI Y L, LI Q, ZHANG X, et al. Single frequency mode laser controlled by volume Bragg gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2805-2807 (in Chinese).
- [7] GAO Ch Q, GAO M W, LIN Z F, et al. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1704-1708 (in Chinese).
- [8] FU Y J, ZHENG K, CHANG D Y, et al. Short cavity and high concentration erbium doped fiber ring lasers [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 46-49 (in Chinese).
- [9] WU B, LIU Z Z, LIU S. Frequency stabilized narrow linewidth fiber laser by fiber saturable absorber [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(10): 30-33 (in Chinese).
- [10] DAI Z Y, ZHANG X X, PENG Z S, et al. High-power single-frequency narrow linewidth fiber laser with nonlinear two-wave mixing [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(2): 159-163 (in Chinese).

- Chinese) .
- [11] LIU Y ,LIU J Q ,CHEN W B. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent doppler wind lidar[J]. Chinese Journal of Lasers , 2009 ,36( 7) : 1857-1860( in Chinese) .
- [12] ZHANG W N ,WEI X M ,XU S H , *et al.* Er/Yb co-doped phosphate fiber short-pulse ring laser[J]. Materials Research and Application , 2010 ,4( 4) : 360-362.
- [13] CHANG N W H ,HOSKEN D J ,MUNCH J , *et al.* Stable single frequency Er:YAG lasers at 1.6 $\mu$ m [J]. IEEE Journal of Quantam Electronics 2010 ,46( 7) : 1039-1042.
- [14] KIM J W ,SAHU J K ,CLARKSON W A. Efficient single-axial-mode operation of an Er:YAG ring laser at 1645nm [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose Conformia , USA: Optical Society of America 2008: CTuAA4.
- [15] CHEN D W ,BELDEN P M ,ROSE S T , *et al.* Narrowband Er:YAG nonplanar ring oscillator at 1645nm [J]. Optics Letters ,2011 ,36( 7) : 1197-1199.
- [16] GAO Ch Q ,ZHU L N ,WANG R , *et al.* 6.1W single frequency laser output at 1645nm from a resonantly pumped Er:YAG nonplanar ring oscillator[J]. Optics Letters 2012 ,37( 11) : 1859-1861.
- [17] YU J R ,TRIEU B ,BAI Y X , *et al.* 300mJ , injection seeded , compact 2 $\mu$ m coherent lidar[J]. SPIE 2006 ,6409: 1-10.
- [18] WU C T ,JU Y L ,WANG Q , *et al.* Room temperature operation of single frequency Tm:LuAG laser end-pumped by laser-diode[J]. Laser Physics Letters 2009 ,6( 10) : 707-710.
- [19] YAO B Q ,KE L ,DUAN X M , *et al.* Stable wavelength , narrow line-width diode pumped Tm:YLF laser with double etalons [J]. Laser Physics Letters 2009 ,6( 8) : 563-566.
- [20] WU C T ,JU Y L ,WANG Q , *et al.* Injection-seeded Tm:YAG laser at room temperature [J]. Optics Communications 2011 ,284( 4) : 994-998.
- [21] GAO Ch Q ,GAO M W ,ZHANG Y S , *et al.* Stable single-frequency output at 2.01 $\mu$ m from a diode-pumped monolithic double diffusion-bonded Tm:YAG nonplanar ring oscillator at room temperature [J]. Optics Letters 2009 ,34( 19) : 3029-3031.
- [22] GAO Ch Q ,LIN Z F ,GAO M W , *et al.* Single-frequency operation diode-pumped 2 $\mu$ m Q-switched Tm:YAG laser injection seeded by monolithic nonplanar ring laser [J]. Applied Optics 2010 ,49( 15) : 2841-2844.
- [23] SHEN D Y ,CLARKSON W A ,COOPER L J , *et al.* 3.7W single-frequency cw Ho:YAG ring laser end-pumped by cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser [C]//Advanced Solid-State Photonics. Santa Fe , New Mexico , USA: Optical Society of America ,2004: WA8.
- [24] BAI X Y ,YU J R ,PETZAR P , *et al.* Single longitudinal mode ,high repetition rate ,Q-switched Ho:YLF laser for remote sensing [C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore , Maryland , USA: Optical Society of America 2009: CWHS.
- [25] DERGACHEV A. Pulsed , single-frequency , ring laser with a holographic output coupler [C]//Advanced Solid-State Photonics. Istanbul , Turkey: Optical Society of America 2011: AWA28.
- [26] STRAUSS J H ,PREUSSLER D ,COLLETT P J O , *et al.* 330mJ , 2 $\mu$ m , single frequency , Ho:YLF slab amplifier [C]//Advanced Solid-State Photonics. Istanbul , Turkey: Optical Society of America , 2011: ATuA4.
- [27] YAO B Q ,DUAN X M ,FANG D , *et al.* 7.3W of single-frequency output power at 2.09 $\mu$ m from an Ho:YAG monolithic nonplanar ring laser [J]. Optics Letters 2008 ,33( 18) : 2161-2163.