

# 2.7 $\mu\text{m}$ 掺 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器的研究进展

叶斌 戴世勋 刘自军 焦清 许银生 王训四 沈祥 聂秋华

宁波大学高等技术研究院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211

**摘要** 中红外相干光源在光谱学、遥感、生物和医疗以及军事等诸多领域都有重要的应用前景和价值,而掺铒氟化物光纤(ZBLAN)激光器是实现2.7  $\mu\text{m}$ 中红外激光输出的有效途径之一。综述了2.7  $\mu\text{m}$ 掺 $\text{Er}$ :ZBLAN光纤激光器在连续激光输出、高功率脉冲激光输出、波长可调谐激光输出、以及调 $Q$ 和锁模激光输出等领域研究现状,并对其应用及发展前景进行了展望。

**关键词** 激光器; 相干光源; ZBLAN 光纤; 铒掺杂; 2.7  $\mu\text{m}$ ;

**中图分类号** TN253      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.090004

## Research Progress of $\text{Er}^{3+}$ : ZBLAN Fiber Laser Operating at 2.7 $\mu\text{m}$

Ye Bin Dai Shixun Liu Zijun Jiao Qing Xu Yinsheng Wang Xunsi

Shen Xiang Nie Qiuhua

Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** Coherent light sources in the mid-infrared (mid-IR) range have broad practical and potential applications in spectroscopy, remote sensing, medical and military. Erbium(Er)-doped ZBLAN fiber lasers are well suitable for mid-infrared coherent light source at 2.7  $\mu\text{m}$ . The latest progress of watt-level continuous wave (CW), high-power pulsed, wavelength-tunable,  $Q$ -switched and CW mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ : ZBLAN fiber lasers operating at 2.7  $\mu\text{m}$  is introduced in this article. Finally, the development trends of the mid-infrared Er-doped ZBLAN fiber lasers are prospected.

**Key words** lasers; coherent light sources; ZBLAN fiber; erbium doped ; 2.7  $\mu\text{m}$

**OCIS codes** 140.3500; 140.3510; 140.3538; 140.3540

## 1 引言

光纤激光器是使用掺稀土类的光纤作为增益介质的激光器,其研究始于20世纪60年代。1961年,美国光学公司的Snitzer等<sup>[1-2]</sup>用氙灯抽运掺钕( $\text{Nd}^{3+}$ )钽冕玻璃,首次观察到受激辐射现象(中心波长为1.06  $\mu\text{m}$ ),提出了光纤激光器与放大器的理念,随即在掺 $\text{Nd}^{3+}$ 玻璃纤维中首次实现了激光输出。随着光纤制造工艺、光纤通信技术及激光器生产技术的快速革新,光纤激光器作为一种新型光器件得到了快速发展,在传感、激光加工、相干光源等诸多领域都具有极大的技术优势和应用前景<sup>[3]</sup>,得到了各国科研工作者的广泛关注,现已成为国际学术界的热门研究领域之一。

掺铒氟化物光纤(ZBLAN)激光器一般由增益介质、光学谐振腔和抽运源三部分构成,其基本结构如图1所示,增益介质为掺 $\text{Er}^{3+}$ 离子的纤芯。掺杂稀土光纤置于两个反射率特定的腔镜之间,抽运光经过左边腔镜耦合进入光纤纤芯,使 $\text{Er}^{3+}$ 离子发生能级跃迁并实现粒子束反转,经过受激发射而从右边腔镜输出激光。

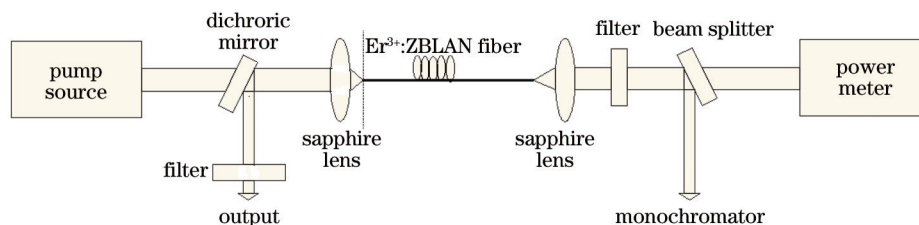
收稿日期: 2015-02-09; 收到修改稿日期: 2015-04-29; 网络出版日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61435009)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)、宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 叶斌(1990—),男,硕士研究生,主要从事中红外光纤激光器等方面的研究。E-mail: allan\_ye0718@sina.com

导师简介: 戴世勋(1974—),男,博士,研究员,主要从事光功能玻璃材料及器材等方面的研究。

E-mail: daishixun@nbu.edu.cn(通信联系人)

图1 掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器的结构Fig.1 Structure of Er<sup>3+</sup>:ZBLAN fiber laser

相对于传统的固体和气体激光器,光纤激光器具有其独特的技术优势:1)特殊的波导式结构,可在较低的阈值下获得大增益系数、高转换效率的激光输出;2)具有大的比表面积,散热性能好,易于冷却;3)优良的光束品质,从光纤发射的激光数值孔径( $NA$ )较小,光束质量因子 $M^2$ 高;4)可实现全光纤化,能够与其他光纤器件直接熔接;5)可根据需要,使用不同的稀土离子掺杂获得不同的输出波长<sup>[3-12]</sup>。

根据经典的光谱理论,只有在声子能量较低且在中红外波段传输损耗较小的玻璃光纤中才能获得中红外光纤激光输出。目前最常用的红外光纤激光器基质材料仍然是氟化物玻璃。氟化物光纤(ZBLAN)声子能量为 $550\text{ cm}^{-1}$ ,可以在波长小于 $6.0\text{ }\mu\text{m}$ 范围内实现低损耗传输<sup>[9]</sup>。稀土离子在氟化物光纤中的溶解度很大,且具有较长的荧光寿命,能形成更多的介稳能级,可获得丰富的激光跃迁波长。目前在掺Er<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>、Pr<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>等不同离子的氟化物光纤中已实现了 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 波段的多种激光输出<sup>[11-18]</sup>。

本文总结了近年来国内外 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器的研究进展,分别对掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器获得连续激光输出、高功率脉冲激光输出、波长可调谐激光输出以及调Q和锁模激光输出的最新研究进展做了介绍和总结,指出了 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 光纤激光器研究中存在的问题并对其研究前景进行了展望。

## 2 研究热点及进展

自从第一台光纤激光器实现以来,国际上对光纤激光器的研究便不断深入。但光纤激光器的实用化是从20世纪80年代中期英国南安普顿大学掺铒光纤激光器的突破开始的<sup>[19]</sup>。1989年,Allain等<sup>[20]</sup>首次报道了单模掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器,获得了波长为 $2.71\text{ }\mu\text{m}$ 的连续激光。1997年,南安普顿大学Pollnau等<sup>[21]</sup>利用高浓度Er<sup>3+</sup>离子掺杂,并掺入适量的Pr<sup>3+</sup>离子的ZBLAN光纤获得功率为1W的 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 单模激光输出。1999年Srinivasan等<sup>[22]</sup>利用交叉弛豫和能量转移机制,在Er<sup>3+</sup>/Pr<sup>3+</sup>:ZBLAN矩形包层光纤中获得斜率效率为13%,功率为660 mW的连续激光输出。该方法可有效减缓粒子束瓶颈效应,提高激光输出效率。2000年,Jackson等<sup>[23]</sup>利用Er/Pr共掺的双包层ZBLAN光纤获得高效的 $2.71\text{ }\mu\text{m}$ 连续激光输出。2007年,Zhu等<sup>[24]</sup>采用975 nm二极管抽运,在长度为4 m,掺Er<sup>3+</sup>摩尔分数为6%的双包层ZBLAN光纤中实现了连续可调 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出,其输出功率超过了2 W,可调谐范围为20 nm。

随着高质量新型中红外光源的需求越来越广泛, $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右的ZBLAN中红外光纤激光器正在快速发展。目前,国内外诸多学者都对该波段的ZBLAN光纤激光器进行了深入研究报道,主要集中于瓦量级的连续波输出<sup>[22,27-28]</sup>、高功率脉冲激光输出<sup>[29]</sup>、波长可调谐激光输出<sup>[24-25]</sup>、调Q和锁模激光输出<sup>[14,26,30-32]</sup>的ZBLAN光纤激光器等方面。

### 2.1 连续激光输出

Er<sup>3+</sup>离子掺杂的ZBLAN光纤激光器是获得 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段范围内高平均功率激光光源的有效方式之一。由于光纤具有很大的比表面积,对热效应的敏感性远低于块状玻璃,所以光纤激光器可获得更高的平均输出功率。近十年来,在Er<sup>3+</sup>:ZBLAN和Er<sup>3+</sup>/Pr<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器中获得瓦量级的 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 连续波输出功率不断增大<sup>[22,27,33-34]</sup>,目前输出功率已达20 W以上<sup>[22]</sup>。

但Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器的热性能较差,其原因在于ZBLAN光纤基质材料为氟化物玻璃,熔点低,相对于近红外的石英光纤,ZBLAN光纤的损耗较大。掺杂其中的激发态Er<sup>3+</sup>离子将产生较高的热量,从而限制了光纤的使用长度。因此,为了进一步增大激光输出功率,必须采用一种高效的冷却方式。

2009年,日本京都大学Shigeki Tokita等<sup>[28]</sup>采用一种新型的氟氮液体冷却装置,使得整根光纤及其两端都得到高效的冷却,实现了掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 连续激光输出(功率达到了24 W),实验装置图如图

2所示。激光二极管被放置在一个恒温20℃的水箱中。实验所用的光纤长度4 m,纤芯直径200 μm,NA为0.22,ErF<sub>3</sub>浓度为6%的ZBLAN光纤(ZBLAN光纤在3 μm左右的损耗一般在50~500 dB/km<sup>[27]</sup>)。同时,为获得更加有效的冷却并防止光纤端面吸收冷却液,光纤两端都抛光成球面并与CaF<sub>2</sub>窗接触。该装置获得了迄今为止在Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器中获得的最高的2.7 μm连续激光功率。如果能进一步加大抽运功率,其输出功率可以进一步提高。目前国际上在掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器中获得连续波输出的功率一般集中在10 W左右,因此寻找一种更加有效的冷却方式以及使用更高抽运功率是进一步提高连续波输出的主要途径。

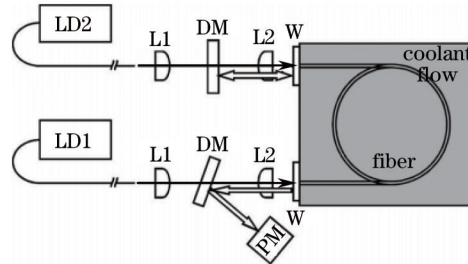


图2 液体冷却二极管抽运Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器装置图

Fig.2 Schematic of liquid-cooled diode-pump Er<sup>3+</sup>:ZBLAN fiber laser

## 2.2 高功率脉冲激光输出

3~5 μm波段范围包括多种重要的分子特征谱线,是空气中相对透明的重要的大气窗口,对大雾、烟尘等穿透力较强。3~5 μm中红外光源在军用和民用领域都有重要应用。在军用方面,红外制导导弹和红外预警系统的探测器都对该波段敏感,而可以在瞬间提供很高峰值功率的该波段超短激光脉冲,从而损伤这些探测器件。因此,具有高功率的超短中红外激光脉冲在军事对抗中有很大的应用价值。

2011年,Gorjan等<sup>[35]</sup>利用增益可调脉冲二极管(LD)抽运Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器获得了高功率并具有高效率以及高平均功率的超短脉冲激光输出,其实验装置图如图3所示。实验采用7个增益可调的976 nm光纤耦合单端发射二极管束作为抽运系统,通过一个7×1耦合器,连接直径为220 μm,NA为0.22的光纤作为输出端。该装置的抽运耦合效率高达62%。该研究小组通过使用一片反射率为50%的Ge镜片把输出激光脉冲分为两部分,一部分作为InAs二极管探测器的反馈光,另一部分通过一个Current Field MaxII功率计用于测量平均功率。所获得的脉冲激光峰值功率为68 W,平均功率可达2 W,这是目前可获得的2.7 μm脉冲激光中最高平均功率。脉冲持续时间为300 ns,频率为100 kHz,转换效率达到了34%,这比连续激光输出的转换效率(31%)更高。

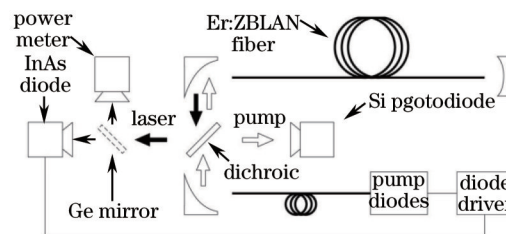


图3 脉冲二极管抽运Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器实验装置图

Fig.3 Experimental setup of pulsed diode-pump Er<sup>3+</sup>:ZBLAN fiber laser

## 2.3 波长可调谐激光输出

小型高效的中红外相干光源在光谱传感器、红外对抗、激光手术以及高效率的抽运源等领域都具有十分重要的实际和潜在应用价值。除了激光输出功率、斜率效率等因素以外,中红外光源较宽的波长可调谐范围以及窄线宽等特性对其在光谱传感器以及选择性抽运源等方面的应用具有很大的影响。在氟化物玻璃中,Er<sup>3+</sup>离子具有的多个斯塔克能级(<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>能级具有7个斯塔克能级,<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>有6个)使得其具有带宽范围约200 nm的准连续发射以及非均匀展宽(约20~90 cm<sup>-1</sup>)特性<sup>[30]</sup>。这使得掺Er<sup>3+</sup>:ZBLAN光纤激光器具有很宽的波长调谐范围。

2000年,朱秀山及Jain课题组<sup>[37]</sup>采用二极管抽运获得了近120 nm可调谐范围的连续波输出钇ZBLAN光纤激光器。然而其输出功率仅在毫瓦量级,且光-光转换效率只有约1%,限制了该光纤激光器的应用范围。2007年,该课题组使用一根长8 m掺Er摩尔分数为6%的双包层ZBLAN光纤获得了转换效率为10%

的瓦量级波长可调谐中红外光纤激光器<sup>[24]</sup>,其实验装置图如图4所示。光纤纤芯直径为 $15\ \mu\text{m}$ ,  $NA$ 为0.12。实验中采用两根激光二极管棒作为抽运源,一根为低功率的975 nm激光二极管棒(发散角为 $4^\circ\times 10^\circ$ ,经准直校准后输出光束尺寸为 $10\ \text{mm}\times 14\ \text{mm}$ ),另一根为功率32 W的光束准直975 nm商用二极管棒(输出光束尺寸为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ )。波长调谐通过一片为600 lp/mm的,倾斜角 $\theta_B$ 为 $54^\circ$ 的涂金光栅实现,为防止菲涅耳反射,光纤输出端被抛光成为 $8^\circ$ 倾角。所获得的连续波输出功率大于2 W,光谱线宽为1.27 GHz,波长调谐范围将随着抽运功率的增加而振荡。

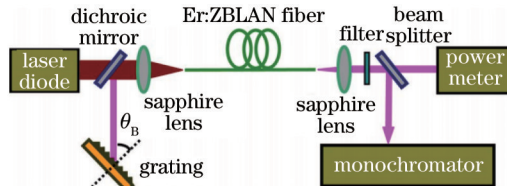


图4 瓦量级的二极管抽运波长可调谐 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN光纤激光器实验装置图

Fig.4 Experimental setup for watt-level diode-pump wavelength-tunable  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN fiber laser

2010年, Tokita等<sup>[25]</sup>采用如图5所示实验装置获得了输出功率为10 W的掺 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN波长可调谐光纤激光器。波长调谐范围达到了110 nm(2770~2880 nm),输出功率为8~11 W,斜率效率为12.2%。随着抽运功率增加,波长调谐范围的中心波长往长波方向移动,而波长宽度不受影响。该研究小组所得到的波长调谐范围以及输出功率是目前为止所能获得的最佳结果。

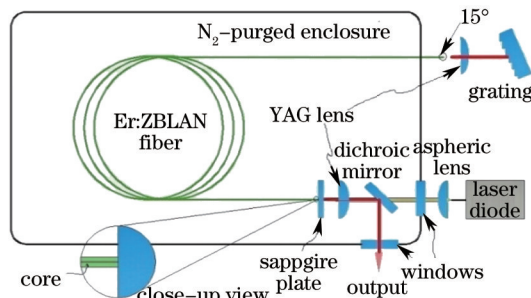


图5 氮气置换装置保护的波长可调谐激光器装置图

Fig.5 Schematic diagram of the wavelength-tunable Er-doped ZBLAN fiber laser pumped by a laser diode

## 2.4 调Q和锁模激光输出

皮秒或飞秒相干激光输出的超快激光器在光梳子以及超稳定射频光源的革新以及材料加工、精密成像、显微学、光谱学以及非线性频率转换等应用领域中具有重要的作用。包括利用外部信号的腔内信号光调制的主动锁模方式,以及利用饱和吸收体进行自相位调制的被动锁模方式在内的多种锁模方式,都已经被利用于产生超快脉冲信号。而光纤激光器具有宽增益带宽、低阈值功率以及极高转换效率等优点,使其对超短脉冲信号的产生具有极大的应用价值。近十年以来,稀土离子掺杂的中红外ZBLAN光纤激光器由于其广泛的应用需求而得到了快速的发展。然而,受到ZBLAN玻璃的脆性大以及对光-机械效应敏感的限制,连续激光输出的ZBLAN光纤激光器的输出功率无法达到硅光纤激光器所能达到的千瓦量级。中红外脉冲激光是获得更高功率中红外激光输出的可选材料,可应用于中红外非线性波长转换以及医疗手术领域。高输出功率,脉宽窄的脉冲激光输出,可通过调Q和锁模技术获得。近几年来,稀土离子掺杂的中红外ZBLAN光纤激光器的调Q和锁模技术得到了快速的发展。

2012年,台湾国立成功大学Tsai<sup>[31]</sup>等提出并数值模拟了一种新型的脉冲级联 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN光纤激光器,其中 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的粒子 $N_1$ 作为 $2.7\ \mu\text{m}$ 内在饱和吸收体及 $1.6\ \mu\text{m}$ 处的增益介质。通过腔内 $1.6\ \mu\text{m}$ 调Q突然移除 $N_1$ ,从而获得高强度的 $2.7\ \mu\text{m}$ 脉冲激光输出, $1.6\ \mu\text{m}$ 级联激光可以有效减小由多声子弛豫产生的热量。 $1.6$ 、 $2.7\ \mu\text{m}$ 脉冲在级联装置中可以相互扩大增益,该装置可以获得很大的增益调制深度。本实验采用了18.7 dB的调制深度。当采用980 nm连续波抽运,吸收抽运功率为0.65 W时,获得了脉冲能量为170  $\mu\text{J}$ 、峰值功率为6 kW的 $2.7\ \mu\text{m}$ 脉冲激光输出。

### 3 掺 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器应用前景

近年来,小型、高效的中红外相干光源由于其在光谱传感器、红外对抗、激光手术以及更长波长的中红外或远红外振荡器的高效抽运光源方面具有广泛的实际和潜在应用,国内外学者对该波段范围光源的研究日益深入。 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器由于具有较宽的发射光谱范围(2.65~2.85  $\mu\text{m}$ ),并与水分子以及多种重要的气体分子(如  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等)的吸收峰频谱重叠,正好满足以上应用。另一方面,由于  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤具有高增益能力,并且随着掺  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤的制备工艺的优化可在这些中红外波段获得相对较低的损耗(小于 0.05 dB/m)。此外,掺  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器可用商用二极管激光器(790/793 和 980 nm)直接抽运,使其成为了制备高输出功率、高效率、优良光束质量的小型化中红外光源的具有应用前景的材料<sup>[24]</sup>。

### 4 结 论

目前, $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器由于其在 3~5  $\mu\text{m}$  中红外相干光源中具有广泛的应用前景,得到了快速发展并已广泛应用于军用和民用领域。 $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器输出功率正不断提高,未来有望达到百瓦量级,其中级联掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器因其较低的掺杂浓度和温度更具前景。中红外  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器相比于近红外石英光纤激光器,其热学性能较差,同时其较大的损耗限制了可用光纤长度。此外,由于 2.7  $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器低能级寿命高于高能级寿命而导致的粒子束瓶颈效应,将严重制约激光发射效率及输出功率。因此,室温条件下获得高效率的 3~5  $\mu\text{m}$  中红外光纤激光输出以及有效地克服粒子束瓶颈效应,是  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN 光纤激光器未来两个非常重要的研究方向。

### 参 考 文 献

- 1 C J Koester, E Snitzer. Amplification in a fiber laser[J]. Appl Opt, 1964, 3(10): 1182-1186.
- 2 E Snitzer. Optical maser action of  $\text{Nd}^{3+}$  in a barium crown glass[J]. Phys Rev Lett, 1961, 7(12): 444.
- 3 Shen Rensheng, Zhang Yushu, Du Guotong. Latest development of fiber lasers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(1): 1-5.  
申人升, 张玉书, 杜国同. 光纤激光器研究进展[J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 1-5.
- 4 Yang Qing, Yu Benli, Zhen Shenglai, *et al.*. The survey of optic fiber lasers[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002, 15(5): 13-18.  
杨 青, 俞本立, 甄胜来, 等. 光纤激光器的发展现状[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(5): 13-18.
- 5 Liu Songhao. New development of fiber laser[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2003, 16(1): 1-8.  
刘颂豪. 光纤激光器的新进展[J]. 光电子技术与信息, 2003, 16(1): 1-8.
- 6 Dong Shufu. Researches on the Rear Earth Doped Fiber Laser[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 1-10.  
董淑福. 稀土掺杂光纤激光器研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2004: 1-10.
- 7 Xi Congling, Qiao Xueguang, Jia Zhenan, Research and development foreground of fiber optic laser[J]. Optical Communication Technology, 2006, 30(1): 52-54.  
习聪玲, 乔学光, 贾振安. 光纤激光器的研究与发展前景[J]. 光通信技术, 2006, 30(1): 52-54.
- 8 Li Dajun, Du Geguo. The recent research progress of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber lasers[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 540-543.  
黎大军, 杜戈果. 掺铥光纤激光器研究进展[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 540-543.
- 9 Chen Hao, Li Jianfeng, Ou Zhonghua, *et al.*. Progress of mid-infrared fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111402.  
陈 昊, 李剑峰, 欧中华, 等. 中红外光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111402.
- 10 Hou Lantian, Han Ying. Recent progress and application of optical fiber lasers[J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(2): 95-101.  
侯蓝田, 韩 颖. 光纤激光器的发展与应用[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(2): 95-101.
- 11 Li li, Zeng Wenfeng, Jiang Heng, *et al.*. The recent research progress of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser[J]. Laser Journal, 2011, 32(1): 60-61.  
李 莉, 曾文锋, 江 恒, 等. 掺铥光纤激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2011, 32(1): 60-61.
- 12 Hu Renwen. The application and recent progress of optical fiber lasers[J]. Science & Technology Information, 2013, (33): 82-82.

- 胡人文. 光纤激光器的应用及发展综述[J]. 科技信息, 2013, (33): 82–82.
- 13 D Faucher, M Bernier, N Caron, *et al.*. Erbium-doped all-fiber laser at 2.94  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3313–3315.
- 14 C Wei, X Zhu, R A Norwood, *et al.*. Passively continuous-wave mode-locked  $\text{Er}^{3+}$ -doped ZBLAN fiber laser at 2.8  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt Lett* 2012, 37(18): 3849–3851.
- 15 D Hudson, L Anderson, E Magi, *et al.*. Diode-pumped  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride glass double clad fibre laser tuneable from 2.825  $\mu\text{m}$  to 2.90  $\mu\text{m}$ [C]. *Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, 2011 IEEE, 2011: 87–88.
- 16 G Zhu, X Zhu, K Balakrishnan, *et al.*.  $\text{Fe}^{2+}$ : ZnSe and graphene Q-switched singly  $\text{Ho}^{3+}$ -doped ZBLAN fiber lasers at 3  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt Mater Express*, 2013, 3(9): 1365–1377.
- 17 K Ramaswamy, C Jia, M Dastmalchi, *et al.*. Dual-wavelength  $\text{Tm}^{3+}$ :ZBLAN fiber lasers[C]. *OSA*, 2013: F2.4.
- 18 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601002.
- 王 璞, 刘 江. 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0601002.
- 19 H Haus, K Tamura, L Nelson, *et al.*. Stretched-pulse additive pulse mode-locking in fiber ring lasers: theory and experiment [J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1995, 31(3): 591–598.
- 20 J Allain, M Monerie, H Poignant. Erbium-doped fluorozirconate single-mode fibre lasing at 2.71  $\mu\text{m}$ [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(1): 28–29.
- 21 M Pollnau. The route toward a diode-pumped 1-W erbium 3- $\mu\text{m}$  fiber laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(11): 1982–1990.
- 22 B Srinivasan, J Tafoya, R Jain. High-power "Watt-level" CW operation of diode-pumped 2.7  $\mu\text{m}$  fiber lasers using efficient cross-relaxation and energy transfer mechanisms[J]. *Opt Express*, 1999, 4(12): 490–495.
- 23 S D Jackson, T A King, M Pollnau. Efficient high power operation of erbium 3  $\mu\text{m}$  fiber laser diode-pumped at 975 nm [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(3): 223–224.
- 24 X Zhu, R Jain. Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2381–2383.
- 25 S Tokita, M Hirokane, M Murakami, *et al.*. Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71–2.88  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(23): 3943–3945.
- 26 Luo Hongyu, Li Jianfeng, He Yulian, *et al.*. High power passively Q-switched  $\text{Ho}^{3+}$ -doped mid-infrared ZBLAN fiber lasers at 2.97  $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0202003.
- 罗鸿禹, 李剑锋, 何雨莲, 等. 高功率 2.97  $\mu\text{m}$  中红外被动调 Q 掺钬 ZBLAN 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0202003.
- 27 J W Fleming. Fluoride glass optical fibres[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1990, 124(2–3): 278.
- 28 S Tokita, M Murakami, S Shimizu, *et al.*. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(20): 3062–3064.
- 29 X Zhu, R Jain. High power diode-pumped Er:ZBLAN double-clad fiber lasers and amplifiers[C]. *OSA*, 2006: OSuB3.
- 30 S Tokita, M Murakami, S Shimizu, *et al.*. 12 W Q-switched Er: ZBLAN fiber laser at 2.8  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 2812–2814.
- 31 T Y Tsai, Y C Fang, H X Tsao, *et al.*. Passively cascade-pulsed erbium ZBLAN all-fiber laser[J]. *Opt Express*, 2012, 20(12): 12787–12792.
- 32 C Wei, X Zhu, R Norwood, *et al.*.  $\text{Er}^{3+}$ -doped ZBLAN fiber laser Q-switched by Fe: ZnSe[C]. *Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2012 Conference on. IEEE, 2012: 1–2.
- 33 X Li, X Liu, L Zhang, *et al.*. Emission enhancement in  $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ -codoped germanate glasses and their use as a 2.7- $\mu\text{m}$  laser material[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 121601.
- 34 X Zhu, R Jain. 10-W-level diode-pumped compact 2.78  $\mu\text{m}$  ZBLAN fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(1): 26–28.
- 35 M Gorjan, R Petkovek, M Marinek, *et al.*. High-power pulsed diode-pumped Er: ZBLAN fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(10): 1923–1925.
- 36 Y Huang, M Mortier, F Auzel. Stark level analysis for  $\text{Er}^{3+}$ -doped ZBLAN glass[J]. *Opt Mater*, 2001, 17(4): 501–511.
- 37 N Libatique, J Tafoya, N Viswanathan, *et al.*. 'Field-usable' diode-pumped ~120 nm wavelength-tunable CW mid-IR fibre laser[J]. *Electron Lett*, 2000, 36(9): 791–792.

栏目编辑: 宋梅梅