

# 中红外光纤激光器的研究进展

陈昊 李剑峰 欧中华 杨怡 陈明 罗鸿禹 魏涛 刘永智

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 中红外光纤激光器因其特殊的输出波长和良好的光束质量,在军事、大气通信、生物医疗等领域有着广泛的应用前景。从不同掺杂稀土离子的角度介绍了氟化物玻璃和硫化物玻璃中红外光纤激光器的工作原理和结构,并阐述了国内外最新的研究进展。同时,介绍了本研究小组在中红外光纤激光器方面的研究工作及取得的最新成果。最后,对中红外光纤激光器的发展前景进行了展望。

**关键词** 光纤激光器;中红外光纤激光器;氟化物光纤;硫化物光纤;拉曼光纤

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.111402

## Progress of Mid-Infrared Fiber Lasers

Chen Hao Li Jianfeng Ou Zhonghua Yang Yi Chen Ming Luo Hongyu

Wei Tao Liu Yongzhi

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** Mid-infrared fiber lasers have broad application prospects in military, atmospheric communication, medical and other fields owing to their special output wavelength and high beam quality. The latest progress of fluoride and chalcogenide mid-infrared fiber lasers is described from the perspective of different rare-earth doped ions. Meanwhile, our latest progress in mid-infrared fiber lasers is also introduced. Finally, the development trends of the mid-infrared fiber lasers are prospected.

**Key words** fiber lasers; mid-infrared fiber laser; fluoride fiber; chalcogenide fiber; Raman fiber

**OCIS codes** 140.3070; 060.2290; 060.3510

## 1 引言

与传统的固体和气体激光器相比,光纤激光器具有光束质量好、体积小、转换效率高、散热效果好等优点。在近红外波段( $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ),光纤激光器与光纤拉曼激光器已经广泛地应用于通信、工业、医疗、国防等领域<sup>[1]</sup>。由于石英材料的声子能量高达  $1100\ \text{cm}^{-1}$ ,因此在波长大于  $2.2\ \mu\text{m}$  时传输损耗会很大,不能用于制作波长超过  $2.2\ \mu\text{m}$  的光纤激光器或光纤拉曼激光器。而位于  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  中红外波段的激光在国防、医疗、通信方面有着特殊的重要应用。例如,它位于大气“透明窗口”,因此可应用于激光雷达、激光测距和大气通信。另外,它还处于大多数军用探测器的工作波段,因此在激光制导、遥感测控、光电对抗等军事领域有着重要的应用。因为水分子在  $3\ \mu\text{m}$  附近有很强的吸收峰,它还可以用于新一代激光手术,使血液迅速凝结,手术创面小、止血性好<sup>[2]</sup>。为了获得中红外光纤激光,则要求使用的光纤具有低的声子能量并在中红外波段传输损耗较小。目前,最常用的中红外光纤为氟化物(ZBLAN)光纤和硫化物光纤<sup>[3,4]</sup>。氟化物光纤典型的组分

收稿日期: 2011-05-16; 收到修改稿日期: 2011-06-05; 网络出版日期: 2011-09-03

基金项目: 中国博士后科学基金(20090451417)、中国博士后特别资助项目(201003693)和中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2009J053)资助课题。

作者简介: 陈昊(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器和波导探测器等方面的研究。

E-mail: chenh0909@hotmail.com

导师简介: 李剑峰(1982—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤激光器和传感器等方面的研究。

E-mail: lijianfeng@uestc.edu.cn; jfli@physics.usyd.edu.au

ZrF<sub>4</sub>, BaF<sub>2</sub>, LaF<sub>3</sub>, AlF<sub>3</sub>, NaF 的物质的量分数分别为 53%, 20%, 4%, 4% 和 20%, 这种材料的声子能量为 550 cm<sup>-1</sup>, 因此在波长小于 6.0 μm 的范围内可以实现低损耗传输。目前利用在氟化物光纤中掺杂 Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup> 等不同离子已实现 2~3 μm 波段的多种激光输出<sup>[5~8]</sup>。硫化物光纤主要包含一种或多种硫族元素如 S、Se、Te 等与少量其他元素如 Ge、As、Sb 等元素, 这种材料的光纤声子能量比石英光纤小的多(300~450 cm<sup>-1</sup>), 因此对于以 S 元素或 Se 元素为主的光纤可以分别实现在 0.8~7 μm 和 1~10 μm 范围内的低损耗传输<sup>[9]</sup>。特别地, As-Se 硫化物光纤具有很高的非线性系数, 一般为石英光纤的几百倍, 并且其具有很窄的拉曼线宽(约 60 cm<sup>-1</sup>)<sup>[10]</sup>。利用这个特性, As-Se 硫化物光纤可以用于制作中红外拉曼光纤激光器, 这使实现比抽运光更长波长的光纤拉曼激光成为可能。

本文对国内外中红外 ZBLAN 与 As-Se 光纤激光器的研究进展进行了介绍, 给出了本研究小组在该领域的最新成果, 并对中红外光纤激光器的未来发展进行了展望。

## 2 ZBLAN 中红外光纤激光器的研究进展

### 2.1 掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器

掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器近年来发展迅速, 这是因为它在 790 nm 处有很宽的吸收带, 从而为使用 AlGaAs 半导体激光器抽运提供了便利。图 1 为掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器的能级图。基态粒子通过基态吸收(GSA)激发到高能级<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>3</sup>H<sub>4</sub> 到<sup>3</sup>H<sub>5</sub> 间的激光跃迁会产生 2.3 μm 的激光, 而<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 到<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 的能级跃迁会产生 2.0 μm 的激光。由于<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 能级的寿命(1.5 ms)远低于<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级的寿命(6.8 ms), 粒子从<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 跃迁到<sup>3</sup>H<sub>5</sub> 能级后将会迅速通过非辐射衰减弛豫到<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级。另外, 粒子在<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 与<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 能级之间会产生交叉弛豫(CR), 并最终大量聚集在<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级。这对于 2.3 μm 激光的输出效率是一种严重的限制。因此, 可以通过加强<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 和<sup>3</sup>H<sub>6</sub> 能级之间的跃迁产生 2 μm 激光输出的方法来降低<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级粒子数, 从而达到提高 2.3 μm 激光输出效率的目的。使用掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤在实际应用中有助于提高光纤激光器的工作效率和实现多种中红外波长的输出<sup>[10~13]</sup>。

1989 年, Allen 等<sup>[14]</sup>率先采用 790 nm 的 AlGaAs 半导体激光器作为抽运源实现了 2.3 μm 的 10 mW 连续激光输出, 斜率效率为 10%。1992 年, Percival 等<sup>[15]</sup>利用 790 nm 的 Ti: 蓝宝石激光器作为抽运源, 实现了在 2.25~2.5 μm 波段可调谐的连续激光输出。2008 年, Eichhorn 等<sup>[16]</sup>对掺 Tm<sup>3+</sup> 物质的量分数为 2.5% 的 ZBLAN 光纤激光器, 使用 2 个 792 nm 半导体激光器抽运, 将其输出功率提高到了 20 W, 斜率效率为 49%, 其实验原理如图 2 所示。该结果表明, 尽管掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器的输出功率不能跟掺 Tm<sup>3+</sup> 石英光纤激光器相比, 但随着新型的光纤设计和新的抽运技术的出现, 其输出功率同样可以提升到一个较高的水平。

### 2.2 掺 Ho<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器

Ho<sup>3+</sup> 为掺稀土中红外 ZBLAN 光纤激光器提供了一个新的选择。Ho<sup>3+</sup> 在<sup>5</sup>I<sub>7</sub> →<sup>5</sup>I<sub>8</sub> 间的能级跃迁会产生 2.1 μm 的激光输出, 而<sup>5</sup>I<sub>6</sub> →<sup>5</sup>I<sub>7</sub> 间的能级跃迁会产生 2.8 μm 的输出。许多早期室温下连续输出的掺 Ho<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器中都掺杂了 Tm<sup>3+</sup>, 其能级如图 3 所示。Tm<sup>3+</sup> 通过 GSA 作用被激发到高能级<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, 如果 Tm<sup>3+</sup> 浓度足够高, 由于两个相邻 Tm<sup>3+</sup> 间交叉弛豫的作用, 即当一个<sup>3</sup>H<sub>4</sub> 能级的 Tm<sup>3+</sup> 弛豫到<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级的同

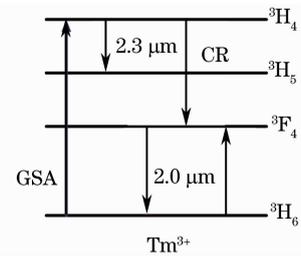


图 1 掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤中 Tm<sup>3+</sup> 能级图

Fig. 1 Simplified energy-level diagram for Tm<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber laser

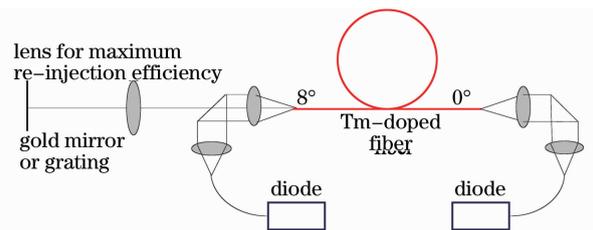


图 2 掺 Tm<sup>3+</sup> ZBLAN 光纤激光器实验原理图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup of Tm<sup>3+</sup> fiber laser

时,另一个  $\text{Tm}^{3+}$  将会从  $^3\text{H}_6$  能级激发到  $^3\text{F}_4$  能级<sup>[13]</sup>,这样可以促进发生于  $\text{Tm}^{3+}$  的  $^3\text{F}_4$  能级与  $\text{Ho}^{3+}$  的  $^5\text{I}_7$  间的能量传递(ET),从而进一步提升  $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$  跃迁所产生的  $2.1 \mu\text{m}$  激光的输出效率和稳定性。因此,使用  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤可以使  $2 \mu\text{m}$  掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器的工作性能得到显著改善<sup>[17,18]</sup>。

1988年, Brierley 等<sup>[19]</sup> 采用  $488 \text{ nm}$  的氩离子光纤激光器抽运掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤, 获得  $2.08 \mu\text{m}$  激光输出。然而,其输出效率非常低(小于  $0.3\%$ ),而且  $2 \mu\text{m}$  的输出在室温下是不连续的。当用  $890 \text{ nm}$  的 Ti:蓝宝石激光器抽运时,则可以得到较高的转换效率( $30\%$ )。第一个  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  共掺的激光器产生于 1992 年<sup>[15]</sup>,由一个 Ti:蓝宝石光纤激光器作为抽运源,其输出功率达到  $250 \text{ mW}$ ,斜率效率为  $52\%$ 。2001年, Jackson<sup>[20]</sup> 采用  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  共掺双包层 ZBLAN 光纤,获得了  $2.1 \mu\text{m}$  的激光输出,最大输出功率为  $8.8 \text{ W}$ ,斜率效率为  $33\%$ 。其实验原理如图 4 所示。

除此之外,利用掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器中  $\text{Ho}^{3+}$  在  $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$  间的能级跃迁也可实现  $3 \mu\text{m}$  激光输出,但是通常会在  $\text{Ho}^{3+}$  中掺杂  $\text{Pr}^{3+}$ 。图 5 为使用  $1100 \text{ nm}$  激光抽运  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器的能级图。基态  $\text{Ho}^{3+}$  在抽运光作用下被激发到  $^5\text{I}_6$  能级,而发生于  $^5\text{I}_6$  能级的能量传递上转换(ETU)将会导致  $^5\text{I}_6$  能级上粒子数降低,因此需要尽量避免。 $\text{Ho}^{3+}$  的  $^5\text{I}_7$  能级到  $\text{Pr}^{3+}$  的  $^3\text{F}_2$  能级的能量传递则会使得激光低能级  $^5\text{I}_7$  的粒子数迅速衰减,从而保证粒子数反转和激光器的稳定输出。由于  $3 \mu\text{m}$  掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器上能级 ETU 有着相对较高的速率系数,这将导致  $\text{Ho}^{3+}$  的利用受到限制。因此,在设计光纤时既要保证有足够高浓度的  $\text{Ho}^{3+}$  使抽运光得到充分吸收,同时又要要有足够浓度的  $\text{Pr}^{3+}$  使激光下能级  $^5\text{I}_7$  粒子数能够通过能量传递而减少,再通过  $\text{Pr}^{3+}$  多声子衰减而迅速下降到基态。但是当  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  总掺杂浓度很高的时候,会导致散射损耗增加,所以不能一味提高离子浓度,而应该找到一个平衡点,在通过增加离子浓度提高激光器工作效率的同时尽量减少损耗的影响<sup>[21]</sup>。

2004年, Jackson<sup>[21]</sup> 利用输出激光波长为  $1080 \text{ nm}$  的掺 Yb 光纤激光器抽运  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  共掺光纤,实现了  $2.86 \mu\text{m}$  的激光输出,其输出功率达到了  $2.5 \text{ W}$ ,斜率效率为  $29\%$ 。2009年, Jackson<sup>[22]</sup> 利用高功率  $1150 \text{ nm}$  二极管抽运,实现了  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  共掺光纤激光器  $2.94 \mu\text{m}$  的输出,其输出功率达到了  $2.5 \text{ W}$ ,斜率效率为  $32\%$ ,其实验结构与结果如图 6 所示。光纤长度为  $5 \text{ m}$ ,图中 PBS 表示偏振分束器, D1~D4 表示 4 个抽运激光器。

### 2.3 掺 $\text{Er}^{3+}$ ZBLAN 光纤激光器

尽管掺  $\text{Ho}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器可以产生波长在  $3 \mu\text{m}$  附近的激光,但是其使用的抽运激光器波长为  $1100 \text{ nm}$ ,并不能使用廉价而且成熟的半导体激光器,因而其实用化受到了限制。以  $\text{Er}^{3+}$  作为掺杂介质的

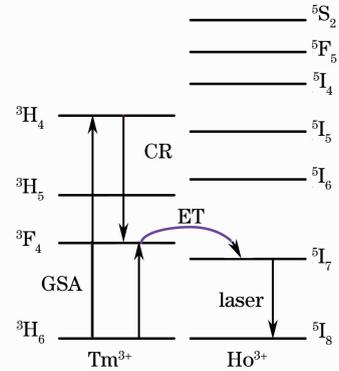


图 3  $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器中  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  能级图

Fig. 3 Partial energy-level scheme of  $\text{Ho}^{3+}$  with  $\text{Tm}^{3+}$  sensitizer

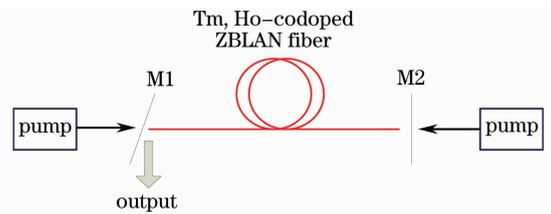


图 4  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器实验原理图

Fig. 4 Schematic of the experimental setup of  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ -codoped ZBLAN fiber laser

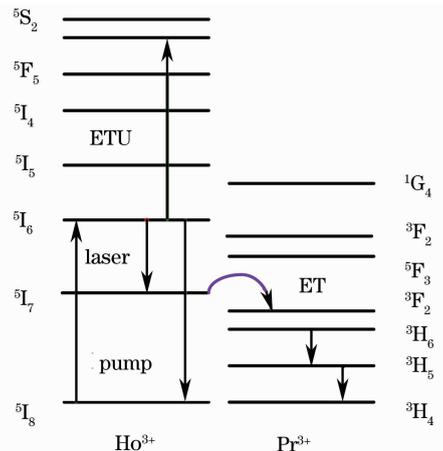


图 5  $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器中  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  能级图

Fig. 5 Simplified energy-level diagram for  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ -codoped ZBLAN fiber laser

ZBLAN 中红外光纤激光器因可直接使用 790 nm 或 975 nm 的半导体激光器抽运而受到了广泛关注。

图 7 是 3  $\mu\text{m}$  掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器的能级图,975 nm 的 GSA 激发  $\text{Er}^{3+}$  到高能级  $^4\text{I}_{11/2}$ 。同时,由于激发态吸收(ESA)作用, $\text{Er}^{3+}$  从  $^4\text{I}_{11/2}$  能级激发到  $^4\text{F}_{7/2}$  能级。为了实现 3  $\mu\text{m}$  输出,必须尽量降低 ESA。幸运的是,在双包层 ZBLAN 光纤中,由于激励密度变小,ESA 的作用并不明显。在 3  $\mu\text{m}$  掺  $\text{Er}^{3+}$  激光器中,ZBLAN 光纤中  $\text{Er}^{3+}$  在低能级 ( $^4\text{I}_{13/2}$ ,  $\tau_1 = 9$  ms) 的寿命高于高能级 ( $^4\text{I}_{11/2}$ ,  $\tau_2 = 6.9$  ms),因此  $^4\text{I}_{13/2}$  与  $^4\text{I}_{11/2}$  激光能级跃迁也可能导致自终止。而发生于 ( $^4\text{I}_{13/2}$ ,  $^4\text{I}_{13/2}$ )  $\rightarrow$  ( $^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2}$ ) 的 ETU1 则会促进连续激光的输出,这是因为半数离子通过 ETU1 会弛豫到基态,另外半数粒子因为 ETU1 的作用上转换到  $^4\text{I}_{9/2}$  能级,然后通过多声子弛豫,粒子将回到  $^4\text{I}_{11/2}$  能级,从而发射第二个激光光子,这样不仅可以解决激光自终止的问题,还可以提高光光转换效率  $\eta_q = \eta/\eta_p$  ( $\eta_p$  指抽运光子, $\eta$  指与抽运光激发相关的激光光子)<sup>[23]</sup>。

第一个单模掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器由 Allain 等<sup>[24]</sup>实现,输出功率为 250 mW。1991 年,Toebben<sup>[25]</sup>实现了一个 12 cm 长的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器,输出激光波长为 3.5  $\mu\text{m}$ ,然而此激光器的工作温度是 77 K。2007 年,Zhu 等<sup>[26]</sup>采用 975 nm 二极管抽运,实现了连续可调 2.8  $\mu\text{m}$  的激光输出,其输出功率超过了 2 W,可调波长范围 20 nm。

2009 年,Tokita 等<sup>[27]</sup>在冷却条件实现了 2.7  $\mu\text{m}$  掺  $\text{Er}^{3+}$  中红外激光器的输出,功率达到了 24 W,其实验结构如图 8 所示。其中 DM 为分色镜,L1 为非球面镜,L2 为 YAG 激光镜片,W 为  $\text{CaF}_2$  窗,PM 为光功率计,LD1 和 LD2 为抽运源。两个光纤耦合器二极管(LD1 和 LD2)用作连续输出的抽运源,激光二极管被放置于一个恒温 20  $^{\circ}\text{C}$  的水箱中,所使用的光纤直径 200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径(NA)为 0.22,LD1 抽运功率为 89 W,LD2 抽运功率为 77 W,激光器输出功率 24 W,有效光-光转换效率为 14.5%。

2009 年,Bernier 等<sup>[28]</sup>利用飞秒激光器在 ZBLAN 光纤上刻写了光纤布拉格光栅(FBG),实现了高稳定性全光纤掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 激光器输出,其实验原理如图 9 所示。所采用的 ZBLAN 光纤长 6.42 m, $\text{Er}^{3+}$  物

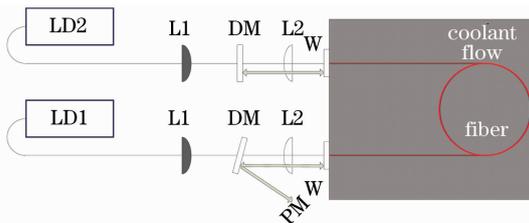


图 8 水冷二极管抽运掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器工作示意图

Fig. 8 Schematic of liquid-cooled diode-pumped  $\text{Er}^{3+}$ ZBLAN fiber laser

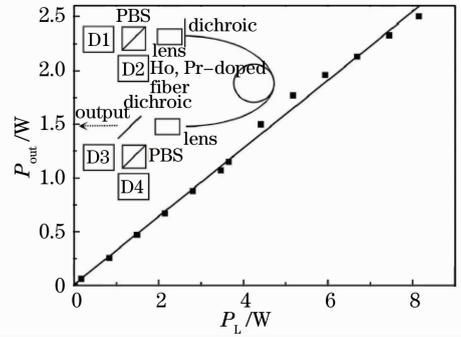


图 6  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  共掺光纤激光器结构以及输出功率  $P_{\text{out}}$  与起效的抽运功率  $P_L$  的关系图

Fig. 6 Structure of  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  codoped fiber laser and output power ( $P_{\text{out}}$ ) as a function of the launched pump power ( $P_L$ )

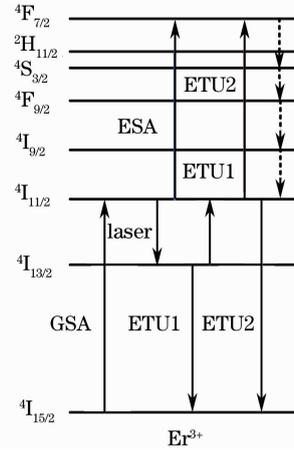


图 7 掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 光纤激光器中  $\text{Er}^{3+}$  能级图

Fig. 7 Simplified energy-level diagram for  $\text{Er}^{3+}$ -doped ZBLAN fiber laser

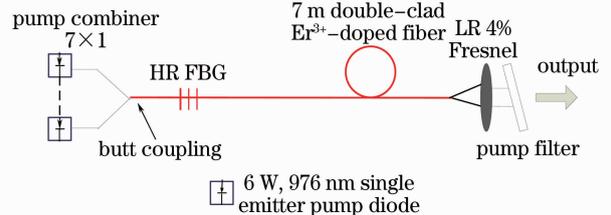


图 9 FBG 高反射作用下的全光纤掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 激光器示意图

Fig. 9 Erbium-doped all fiber laser configuration with a FBG acting as the high reflector

质的量分数为 7%，抽运光波长 976 nm，输出激光波长为 2.8  $\mu\text{m}$ ，功率 5 W。976 nm 光纤耦合抽运源所能提供的功率可以达到 36 W，通过 ZBLAN 光纤对接耦合，其高反射工作效率可以达到 84%。2011 年，Faucher 等<sup>[29]</sup>将全光纤掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 激光器的输出功率提高到了 20.6 W，斜率效率为 35.4%，超过了 34.3% 的斯托克斯限制，这也是迄今为止 3  $\mu\text{m}$  波段获得的最高效率。

## 2.4 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤激光器

$\text{Er}^{3+}$  与  $\text{Pr}^{3+}$  之间的能量传递被认为是解决粒子数瓶颈限制的另一个方法，因此  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器引起了广泛的关注。3  $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  共掺光纤激光器是一个简单的四能级系统，其能级图如图 10 所示。975 nm 的抽运光 GSA 激发  $\text{Er}^{3+}$  到  $^4\text{I}_{11/2}$  能级，而由于 ESA 作用将会使  $\text{Er}^{3+}$  从  $^4\text{I}_{11/2}$  激发到  $^4\text{F}_{7/2}$  能级，因此必须尽量避免 ESA。由于  $\text{Pr}^{3+}$  的作用，使得激光下能级  $^4\text{I}_{13/2}$  粒子通过能量传递 ET1 而减少，并通过  $\text{Pr}^{3+}$  多声子衰减而迅速下降到基态，这个过程可以克服前面所述的由  $\text{Er}^{3+}$  在  $^4\text{I}_{13/2}$  低能级较高寿命引起的粒子数瓶颈限制问题。然而，ET1 会对能级跃迁产生负面影响，这是因为其会阻止有助于提高激光量子效率的 ETU1。

1999 年，Jackson 等<sup>[30]</sup>率先使用 790 nm 二极管抽运实现了  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  共掺光纤激光器，获得 2.71  $\mu\text{m}$  的激光输出，输出功率达到了 1.7 W，斜率效率 17.3%。2006 年，Zhu 等<sup>[31]</sup>利用双向抽运和非涅耳反射镜，实现了 4 m 长和 12 m 长  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器的 3  $\mu\text{m}$  输出，其斜率效率分别为 20.95% 和 22.28%，且理论模拟预计当抽运功率提升到 50 W 时，可以产生大于 10 W 的激光输出，其实验原理如图 11 所示。

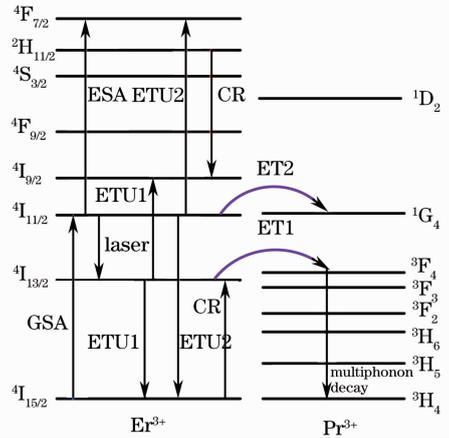


图 10  $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$  共掺 ZBLAN 光纤激光器中  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  能级图

Fig. 10 Partial energy-level diagram for  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ -codoped ZBLAN fiber laser

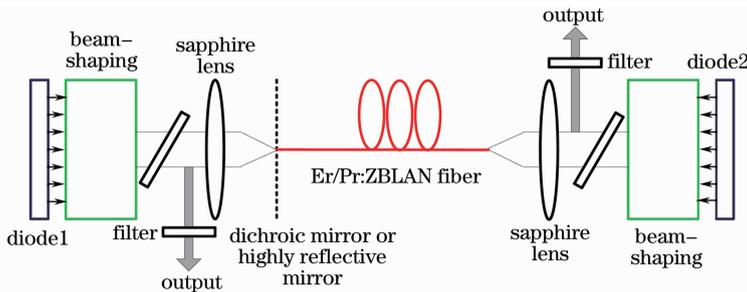


图 11  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$  共掺双层光纤激光器实验原理图

Fig. 11 Experimental setup of  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ -codoped ZBLAN double-clad fiber laser

## 2.5 高功率掺 $\text{Er}^{3+}$ 级联 ZBLAN 光纤激光器

虽然通过能量传递与 ETU 的作用可以克服  $\text{Er}^{3+}$  粒子数瓶颈的限制，产生稳定的激光输出，并且也已证明在掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤中 ETU 可以有效地提升激光器的斜率效率，甚至突破斯托克斯限制，但是 ETU 只能在高浓度掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤中产生，而且  $\text{Er}^{3+}$  掺杂浓度过高将会导致光纤的损耗增大并引起  $\text{Er}^{3+}$  离子团簇效应。因此，为了降低掺  $\text{Er}^{3+}$  浓度同时提高激光器的输出效率，一种“级联”方式的光纤激光器应运而生。如图 12 所示， $\text{Er}^{3+}$  在  $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  能级间跃迁时，会产生 1.5  $\mu\text{m}$  的激光输出，而在  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$  间跃迁时，会产生 3  $\mu\text{m}$  的输出，当 2 个波长的激光同时存在时，将有助于克服  $^4\text{I}_{13/2}$  能级  $\text{Er}^{3+}$  粒

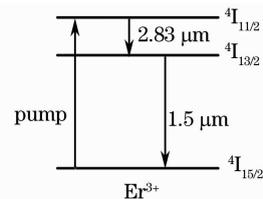


图 12 1.5  $\mu\text{m}$  和 2.83  $\mu\text{m}$  掺  $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN 级联光纤激光器  $\text{Er}^{3+}$  能级图

Fig. 12 Simplified energy level diagram of  $\text{Er}^{3+}$  showing pump and laser transitions

子数瓶颈的限制。可以同时构建两个用于实现 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $3\ \mu\text{m}$ 波长的谐振腔来保证稳定的 $3\ \mu\text{m}$ 激光输出,这也就是所谓的“级联”激光输出。

2009年, Jackson<sup>[32]</sup>在非水冷条件下采用 $850\ \text{nm}$ 高功率二极管抽运掺 $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN光纤激光器,同时产生了 $2.83\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 的激光输出,所使用的光纤纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ ,掺杂物质的量分数为 $0.5\%$ ,长度 $11\ \text{m}$ 。其中 $2.83\ \mu\text{m}$ 激光的最大输出功率达到了 $4.6\ \text{W}$ ,斜率效率 $13\%$ 。

2010年,本研究小组与悉尼大学 Jackson 研究小组合作,在非水冷条件下采用 $56\ \text{W}$   $975\ \text{nm}$ 高功率二极管抽运掺 $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN光纤激光器,同时产生了 $8.2\ \text{W}$ 的 $2.8\ \mu\text{m}$ 与 $1.6\ \mu\text{m}$ 激光输出<sup>[33]</sup>。实验结构如图13所示,所使用的光纤纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为 $0.12$ ,包层直径为 $300\ \mu\text{m}$ 。光纤掺杂物质的量分数为 $0.5\%$ ,有效吸收系数为 $0.09\ \text{m}^{-1}$ ,长度 $11\ \text{m}$ 。实验中共用到3个反射镜:M1是一个二色镜,对抽运光高反(大于 $98\%$ ),用于耦合抽运光进入光纤,它对 $2.8\ \mu\text{m}$ 与 $1.6\ \mu\text{m}$ 波长的激光透射率分别为 $95\%$ 和 $50\%$ ;第二个反射镜M2对抽运光和 $2.8\ \mu\text{m}$ 的激光高反射,其与M1构成一个谐振腔来产生 $2.8\ \mu\text{m}$ 的激光输出,但是会有 $80\%$ 的 $1.6\ \mu\text{m}$ 激光从M2透射;第三个反射镜M3是一个与M2平行的镀金反射镜,用于增强 $1.6\ \mu\text{m}$ 激光反射,它与M2共同构造一个 $1.6\ \mu\text{m}$ 低阈值激光谐振腔。采用这样的级联结构, $\text{Er}^{3+}$ 的掺杂浓度可以很低,因此光纤吸收系数非常低,其抽运端纤芯的温度比同样条件下掺 $\text{Er}^{3+}$  ZBLAN和 $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤激光器要低得多。

实验中未使用任何的冷却装置,输出激光随抽运光的变化如图14所示,其中 $2.8\ \mu\text{m}$ 激光的斜率效率为 $16\%$ 。有望通过这种方法在无水冷的条件下获得超过 $20\ \text{W}$ 的激光输出。

### 3 As-Se 中红外光纤激光器的研究进展

#### 3.1 概述

硫化物光纤主要是由硫族元素如 S、Se、Te 掺入其他元素如 Ge、As、Sb 构成。同硅光纤和氟化物光纤相比,硫化物光纤有着更低的声子能量( $300\sim 450\ \text{cm}^{-1}$ ),它可以工作在近、中和远红外区域。同时,硫化物光纤具有超快的三阶光学响应、高非线性系数以及很窄的拉曼线宽(约 $60\ \text{cm}^{-1}$ ),因此它能够应用于中红外与长波红外波段的光纤拉曼激光器,并非常容易产生四波混频、自相位调制以及交叉相位调制等非线性效应<sup>[34]</sup>。目前使用最为广泛的硫化物光纤为 As-Se 光纤,相对于 As-S 等其他硫化物光纤,其具有超高的非线性效应。

拉曼光纤中的单程增益  $G_A$  定义为

$$G_A = \exp\left(\frac{g_R P_0 L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}}\right), \quad (1)$$

式中  $g_R$  为拉曼增益系数,  $P_0$  为抽运功率,  $A_{\text{eff}}$  是光纤的有效面积。光纤的有效长度  $L_{\text{eff}}$  为

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha \cdot L)] \approx \frac{1}{\alpha}, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  是光纤损耗。对于较长的光纤,  $L_{\text{eff}} \approx 1/\alpha$ 。结合(1),(2)式可知,光纤的拉曼增益正比于  $\exp(-g_R/\alpha)$ , 一般采用品质因数(FOM)来评估拉曼增益,其值可粗略地用  $g_R/\alpha$  近似。

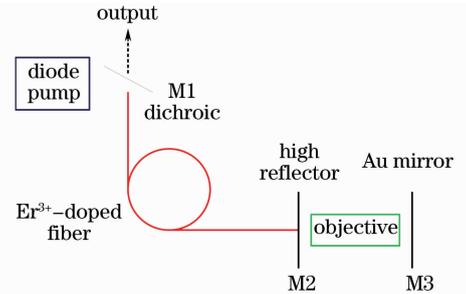


图13 掺 $\text{Er}^{3+}$ 级联光纤激光器实验原理图  
Fig. 13 Schematic of the experimental setup of  $\text{Er}^{3+}$ -doped cascade fiber laser

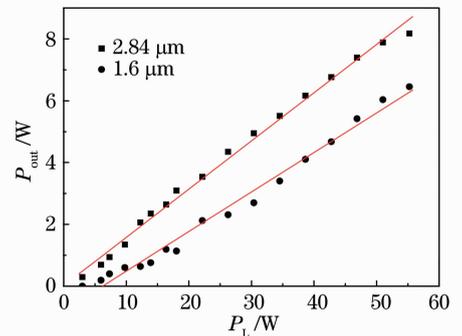


图14 掺 $\text{Er}^{3+}$ 级联光纤激光器  
输出激光随抽运光的变化

Fig. 14 Output power of  $\text{Er}^{3+}$ -doped cascade fiber laser as a function of the launched pump power

表 1 对用于  $4\ \mu\text{m}$  的 As-Se 拉曼光纤和用于  $1.5\ \mu\text{m}$  的硅拉曼光纤进行了比较。对于光纤损耗  $\alpha$ , 硅光纤的典型值为  $0.2\sim 0.3\ \text{dB/km}$ , 其 FOM 值经计算为  $1.1\times 10^{-6}\ \text{W}^{-1}$ ; 而对于 As-Se 光纤, 由于拉曼增益系数与波长成反比, 其拉曼增益系数  $g_R$  预计为硅光纤的 780 倍。As-Se 光纤理论计算的损耗为  $3\ \text{dB/km}$ , 计算得到的 FOM 为  $23\times 10^{-6}\ \text{W}^{-1}$ , 为硅光纤的 20 倍<sup>[35]</sup>, 因此 As-Se 光纤能够更好地应用于光纤拉曼激光器和放大器。

表 1  $4\ \mu\text{m}$  拉曼增益 As-Se 光纤与  $1.5\ \mu\text{m}$  拉曼增益硅光纤 FOM 的比较

Table 1 Figure of merit for Raman amplification in As-Se fiber at  $4\ \mu\text{m}$  compared with Raman amplification in silica fiber at  $1.5\ \mu\text{m}$

	$\lambda/\mu\text{m}$	$g_R/(\text{cm}/\text{W})$	Loss/(dB/km)	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	FOM/ $(10^{-6}\ \text{W}^{-1})$
Silica fiber	1.5	$0.65\times 10^{-12}$	0.2~0.3	$6\times 10^{-7}$	1.1
As-Se fiber	4	$1.7\times 10^{-10}$	3	$7.5\times 10^{-6}$	23

### 3.2 As-Se 中红外光纤激光器的研究进展

图 15 为一个  $1\ \text{m}$  长的 As-Se 在  $5.4\ \mu\text{m}$  的连续 CO 激光器抽运下的受激拉曼散射 (SRS) 现象, 在  $6.1\ \mu\text{m}$  处观测到了 SRS。另外, 通过对由  $5.59\ \mu\text{m}$  连续 CO 激光器抽运 As-Se 光纤实现  $6.45\ \mu\text{m}$  拉曼激光输出的研究也表明 As-Se 光纤可以用于实现低阈值和高斜率效率的激光器<sup>[9]</sup>。

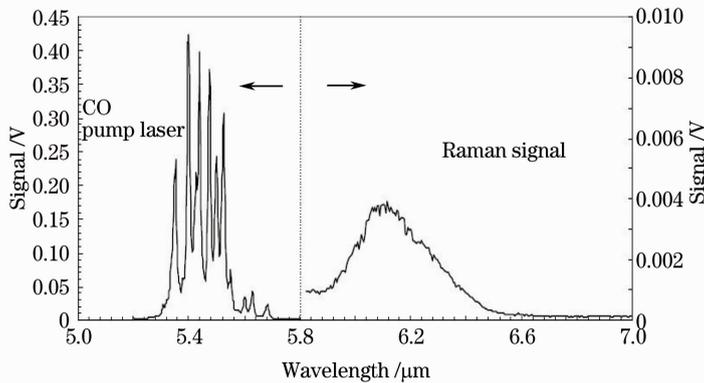


图 15  $5.4\ \mu\text{m}$  CO 抽运下观测到的 SRS 信号图

Fig. 15 SRS signal observed at  $6.1\ \mu\text{m}$  under  $5.4\ \mu\text{m}$  CO laser pumping

2006 年, Jackson 等<sup>[36]</sup> 用一个掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤激光器抽运, 对 As-Se 光纤拉曼激光特性进行了实验研究, 如图 16 所示。实验中使用的为  $g\text{-As}_2\text{Se}_3$  光纤, 在  $2.05\ \mu\text{m}$  的背景损耗为  $0.6\ \text{dB/m}$ 。抽运源的工作波长是  $2051\ \text{nm}$  ( $0.61\ \text{eV}$ )。光纤末端放置了一个镀金的反射镜以保证拉曼激光持续运行。

图 17 为拉曼光纤激光输出功率随抽运光功率的变化关系, 同时给出了最大抽运功率下的输出光谱图。由图可知,  $2062\ \text{nm}$  的一阶拉曼激光由内层弛豫振荡产生, 最大输出功率为  $0.64\ \text{W}$ , 其斜率效率约为  $66\%$ , 阈值功率约为  $1.06\ \text{W}$ 。  $2102\ \text{nm}$  的二阶拉曼激光的最大输出功率为  $0.2\ \text{W}$ , 斜率效率为  $21\%$ , 抽运阈值为  $1.08\ \text{W}$ 。  $2166\ \text{nm}$  的三阶拉曼激光最大输出功率为  $16\ \text{mW}$ , 斜率效率约为  $3\%$ , 阈值相对较高, 为  $1.56\ \text{W}$ 。

为了实现  $2\ \mu\text{m}$  抽运 As-Se 光纤拉曼激光器稳定而高效的输出, 对抽运功率、光纤长度、输出耦合器件反射率以及热损耗在内的几个影响激光器输出的重要参数进了数

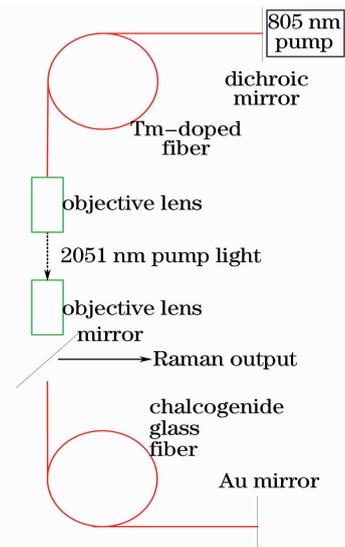


图 16 As-Se 拉曼光纤激光器实验装置图

Fig. 16 Schematic diagram of the As-Se Raman fiber laser setup

值模拟和优化<sup>[37]</sup>。图 18(a)为在 10 W 的抽运功率下,输出拉曼激光功率随输出镜反射率和光纤长度变化的三维图。可以看出,反射率和光纤长度共同影响输出拉曼激光功率,而且该影响并不是简单的线性关系。为了进行更直观的分析,给出了输出拉曼激光功率随输出耦合器反射率和光纤长度变化的等高线图,如图 18(b)所示。可以看出,输出功率高的区域集中在光纤长度为 1~1.5 m 之间,耦合输出镜的反射率为 0.15~0.5 之间。

另外,还分析了 As-Se 光纤拉曼激光器的散热和温度分布,如图 19 所示。结果表明,随着抽运功率的提高,光纤温度迅速增加,在抽运功率为 22 W 时达到光纤的热损伤阈值。

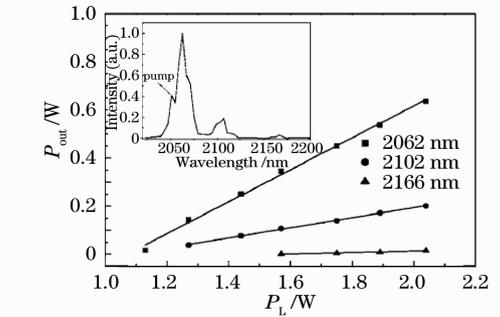
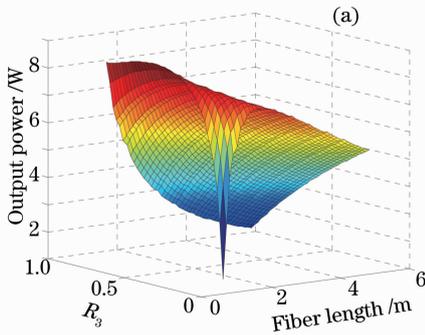


图 17 硫化物拉曼光纤激光器输出功率与抽运功率的关系图

Fig. 17 Measured output power from the chalcogenide glass Raman fiber laser as a function of launched pump power

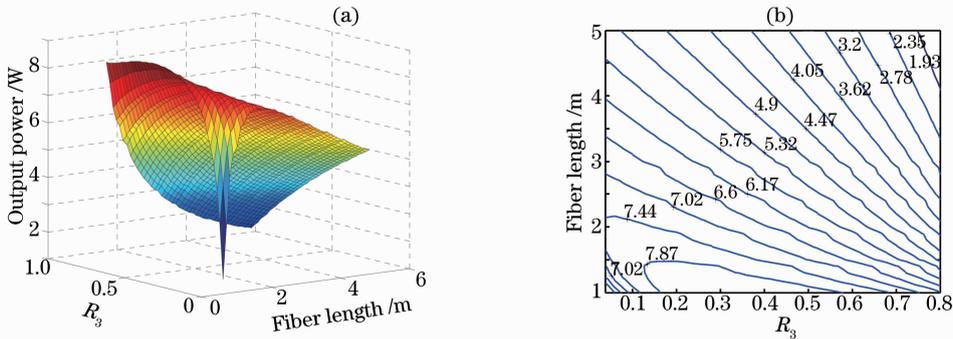


图 18 不同的光纤长度和耦合输出镜反射率条件下的输出功率变化图。(a) 3D 图;(b) 等高线图

Fig. 18 (a) 3D diagram and (b) contour map of variation of output laser power on fiber length and reflection

## 4 前景与展望

目前,3  $\mu\text{m}$  左右的 ZBLAN 中红外光纤激光器正在快速发展,相信不久之后将能达到百瓦量级,尤其是级联掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器因其较低的掺杂浓度和温度最具前景,另外掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光器因使用 1150nm 的激光抽运,因此可以获得比掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器更高的斜率效率,也具有较好的应用前景。除此之外,基于 ZBLAN 的中红外光纤激光器还可以满足 3~4  $\mu\text{m}$  的输出要求,比如 3.22  $\mu\text{m}$  和 3.95  $\mu\text{m}$  的激光输出可以由掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光器得到,3.45  $\mu\text{m}$  输出可以由掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器实现。但是到目前为止,3.45~3.95  $\mu\text{m}$  输出还只能在冷却条件下实现。而且在此输出区域内涵盖了 5~6 个最大声子能量,输出区域中任意一个激光上能级相对于其他较短波长激光上能级的寿命都很短暂,这将会引起抽运光阈值功率的增加,妨碍充分利用抽运光,导致输出效率的降低。因此,如何在室温下实现高功率 3~5  $\mu\text{m}$  的中红外光纤激光输出,是未来一个非常重要的研究方向。

由于硫化物低损耗传输波段更宽,因此利用拉曼硫化物光纤激光器和掺稀土硫化物光纤激光器可以实现更长波长的激光输出。表 2 列出了未来可以用于掺入硫化物光纤的稀土离子及其输出波长。最近报道的写入硫化物光纤波导的 FBG,也为全光纤拉曼激光器的实现提供了一种解决方案,但是制备硫化物光纤时的纯度以及毒性控制成为了制约其发展的瓶颈,阻碍了硫化物光纤在中红外光纤激光器中的大范围使用。一旦这些困难被克服,并且选择适合的掺杂物质及其浓度,将会实现硫化物光纤激光器超低损耗、高功率的稳定激光输出。

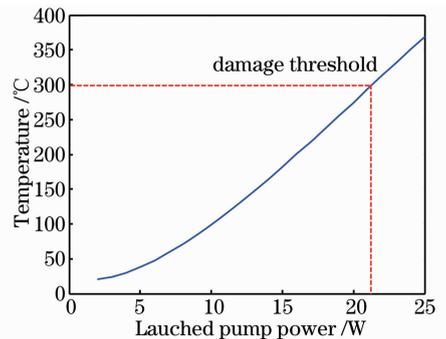


图 19 光纤前端最高温度与抽运功率关系图

Fig. 19 Calculated maximum temperature at fiber front versus the launched pump power

表 2 未来硫化物光纤掺杂稀土元素的比较

Table 2 Examples of luminescent transitions investigated as candidates for mid-infrared lasers in chalcogenide fibers

Ion	$\lambda / \mu\text{m}$	Transition
Dy <sup>3+</sup>	3.2	<sup>6</sup> H <sub>13/2</sub> - <sup>6</sup> H <sub>15/2</sub>
Tm <sup>3+</sup>	3.8	<sup>3</sup> H <sub>5</sub> - <sup>3</sup> H <sub>4</sub>
Ho <sup>3+</sup>	3.9	<sup>5</sup> I <sub>5</sub> - <sup>5</sup> H <sub>6</sub>
Dy <sup>3+</sup>	4.3	<sup>6</sup> H <sub>11/2</sub> - <sup>6</sup> H <sub>13/2</sub>
Tb <sup>3+</sup>	4.8	<sup>7</sup> F <sub>5</sub> - <sup>7</sup> F <sub>6</sub>
Ho <sup>3+</sup>	4.9	<sup>5</sup> I <sub>4</sub> - <sup>5</sup> I <sub>5</sub>

## 5 结 论

总之, 3~5  $\mu\text{m}$  波段的中红外光纤激光器是一个充满魅力的研究方向, 随着其技术不断革新, 相信在不久的将来它将在国防、通信、传感、生物医学等领域发挥重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 J. S. Sanghera, L. B. Shaw, L. E. Busse et al. . Infrared optical fibers and their applications[C]. SPIE, 1999, **3849**: 38~49
- 2 M. Pollnau, S. D. Jackson. Advances in Mid-Infrared Fiber Lasers. In: Mid-Infrared Coherent Sources and Applications. The NATO Science for Peace and Security Programme, Series B: Physics and Biophysics[M]. Berlin: Springer, 2008. 315~346
- 3 P. W. France, M. G. Drexhage, J. M. Parker et al. . Fluoride Glass Optical Fibres[M]. Glasgow: Blackie, 1990
- 4 L. B. Shaw, B. Cole, P. A. Thielen et al. . Mid-wave IR and long-wave IR laser potential of rare-earth doped chalcogenide glass fiber[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(9): 1127~1137
- 5 Y. D. Huang, M. Mortier, F. Auzel. Stark level analysis for Er<sup>3+</sup>-doped ZBLAN glass[J]. *Opt. Mater.*, 2001, **17**(4): 501~511
- 6 S. D. Jackson. Single-transverse-mode 2.5 W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.86  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 334~336
- 7 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
- 8 S. D. Jackson. High-power and highly efficient diode-cladding-pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.94  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2327~2329
- 9 I. D. Aggarwal, L. B. Shaw, J. S. Sanghera. Chalcogenide glass fiber-based mid-IR sources and applications[C]. SPIE, 2007, **6453**: 645312
- 10 D. C. Hanna, I. M. Jauncey, R. M. Percival et al. . Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(19): 1222~1223
- 11 W. L. Barnes, J. E. Townsend. Highly tunable and efficient diode pumped operation of Tm<sup>3+</sup> doped fibre lasers[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(11): 746~747
- 12 J. N. Carter, R. G. Smart, D. C. Hanna et al. . CW diode-pumped operation of 1.97  $\mu\text{m}$  thulium-doped fluorozirconate fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(9): 599~601
- 13 T. Y. Fan, G. Huber, R. L. Byer et al. . Spectroscopy and diodelaser-pumped operation of Tm, Ho:YAG[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6): 924~933
- 14 J. Y. Allain, M. Monerie, H. Poignant. Tunable CW lasing around 0.82, 1.48, 1.88 and 2.35  $\mu\text{m}$  in thulium-doped fluorozirconate fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(24): 1660~1662
- 15 R. M. Percival, D. Szebesta, S. T. Davey. Highly efficient CW cascade operation of 1.47 and 1.82  $\mu\text{m}$  transitions in Tm doped fluoride fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(20): 1866~1868
- 16 M. Eichhorn, S. D. Jackson. Comparative study of continuous wave Tm<sup>3+</sup>-doped silica and fluoride fiber lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(1): 35~41
- 17 J. K. Tyminski, D. M. Franich, M. Kokta. Gain dynamics of Tm:Ho:YAG pumped in near infrared[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(8): 3181~3188
- 18 V. A. French, R. R. Petrin, R. C. Powell et al. . Energy-transfer processes in Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Tm, Ho[J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(13): 8018~8026

- 19 M. C. Brierley, P. W. France, C. A. Millar. Lasing at 2.08  $\mu\text{m}$  and 1.38  $\mu\text{m}$  in a holmium doped fluorozirconate fiber laser[J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(9): 539~540
- 20 S. D. Jackson. 8.8 W diode-cladding-pumped  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  doped fluoride fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(13): 821~822
- 21 S. D. Jackson. Single-transverse-mode 2.5 W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.86  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 334~336
- 22 S. D. Jackson. High-power and highly efficient diode-cladding pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.94  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2327~2329
- 23 M. Pollnau, Ch. Ghisler, W. Lüthy *et al.*. Three-transition cascade erbium laser at 1.7, 2.7, and 1.6  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 612~614
- 24 J. Y. Allain, M. Monerie, H. Poignant. Erbium doped fluorozirconate single-mode fibre lasing at 2.71  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(1): 28~29
- 25 Toebben. CW lasing at 3.45  $\mu\text{m}$  in erbium-doped fluorozirconate fibres[J]. *Frequenz*, 1991, **45**(9-10): 250~252
- 26 Xiushan Zhu, Ravi Jain. Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2381~2383
- 27 Shigeki Tokita, Masanao Murakami, Seiji Shimizu *et al.*. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 3062~3064
- 28 Martin Bernier, Dominic Faucher, Nicolas Caron *et al.*. Highly stable and efficient erbium-doped 2.8  $\mu\text{m}$  all fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 16941~16946
- 29 Dominic Faucher, Martin Bernier, Guillaume Androz *et al.*. 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(7): 1104~1106
- 30 S. D. Jackson, Terence A. King, Markus Pollnau. Diode-pumped 1.7 W erbium 3  $\mu\text{m}$  fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16): 1133~1135
- 31 Xiushan Zhu, Ravi Jain. Numerical analysis and experimental results of high-power Er/Pr:ZBLAN 2.7  $\mu\text{m}$  fiber lasers with different pumping designs[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(27): 7118~7125
- 32 S. D. Jackson. High-power erbium cascade fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(16): 830~832
- 33 S. D. Jackson, Markus Pollnau, Jianfeng Li. Diode pumped erbium cascade fibre lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2011, **47**(4): 471~478
- 34 O. P. Kulkarni, C. Xia, D. J. Lee *et al.*. Third order cascaded Raman wavelength shifting in chalcogenide fibers and determination of Raman gain coefficient[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7924~7930
- 35 P. A. Thielen, L. B. Shaw, J. S. Sanghera *et al.*. Modeling of a mid-IR chalcogenide fiber Raman laser [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3248~3253
- 36 S. D. Jackson, Gilberto Anzueto-Sánchez. Chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(22): 221106
- 37 Jianfeng Li, Yu Chen, Ming Chen *et al.*. Theoretical analysis and heat dissipation of mid-infrared chalcogenide fiber Raman laser[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **284**(5): 1278~1283