

文章编号: 1000-7032(2024)01-0125-14

3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 光纤激光器研究进展及展望

刘永岩¹, 田颖^{1*}, 杨雪莹¹, 蔡恩林^{2,3,4}, 李兵朋¹, 张军杰¹, 徐时清¹

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 光电材料与器件研究院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201200; 4. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘要: 3 μm 激光处于分子指纹区, 在医疗外科、气体检测、军事应用等领域都有重要的应用价值。Er³⁺:ZBLAN 光纤激光器具有效率高、可集成的优点, 是3 μm 激光的主要输出方式。本文从铒离子跃迁产生3 μm 激光出发, 围绕Er³⁺:ZBLAN 光纤激光器, 介绍了3 μm 激光产生的结构原理及能级系统, 总结了实现该波段高功率连续输出和脉冲输出的技术方案和研究进展, 重点介绍了基于不同材料可饱和吸收体的调Q和锁模激光器实验研究, 并对目前实现3 μm 波段高功率输出需要解决的问题进行了分析, 最后对Er³⁺:ZBLAN 激光器的发展方向进行了展望。

关键词: 3 μm 激光; 掺Er³⁺光纤; 光纤激光器; 脉冲激光

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230258

Research Progress and Prospect of 3 μm Band Er³⁺:ZBLAN Fiber Laser

LIU Yongyan¹, TIAN Ying^{1*}, YANG Xueying¹, CAI Enlin^{2,3,4}, Li Bingpeng¹, ZHANG Junjie¹, XU Shiqing¹

(1. Institute of Optoelectronic Materials and Devices, Hangzhou College of Optics and Electronic Technology,

China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

* Corresponding Author, E-mail: tianyingcjl@163.com

Abstract: 3 μm laser is located in the molecular fingerprint region and has important application value in fields such as medical surgery, gas detection, and military applications. Er³⁺:ZBLAN fiber laser has the advantages of high efficiency and integration, making it the main output mode of 3 μm laser. Starting from the generation of 3 μm laser by erbium ion transition, this article introduces the structural principle and energy level system of 3 μm laser generation, summarizes the technical solutions and research progress for achieving high-power continuous output and pulse output in this band, with a focus on the experimental research of Q-switched and mode-locked lasers based on saturable absorbers of different materials. And analysis of the problems is solved in order to achieve high power output in the 3 μm band. Finally, the development direction of Er³⁺:ZBLAN lasers is prospected.

Key words: 3 μm laser; Er³⁺-doped fiber; fiber lasers; pulsed laser

收稿日期: 2023-10-26; 修订日期: 2023-11-07

基金项目: 浙江省自然科学基金(LZ21F050002, LZ22E020001); 国家自然科学基金(62374153, 62075204, U190920054); 浙江省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才项目(2021R52032); 浙江省高校基本科研业务费(2023YW93)
Supported by Zhejiang Natural Science Foundation(LZ21F050002, LZ22E020001); National Natural Science Foundation of China(62374153, 62075204, U190920054); Zhejiang Province's "Special Support Plan for High Level Talents" Science and Technology Innovation Leading Talent Project(2021R52032); Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang(2023YW93)

1 引 言

随着科技的发展,3 μm 激光在医疗外科、气体检测、军事应用等领域发挥着越来越重要的作用。目前实现 3 μm 波段激光输出的方式可以分为四种:气体激光器、量子级联激光器、非线性频率变换激光器和稀土掺杂光纤激光器。其中气体激光器体积庞大,量子级联激光器只能在低温环境下运行,非线性频率变换激光器搭建较为困难。与上述三种激光器相比,稀土掺杂光纤激光器具有高增益和转换效率、光束传输质量好、结构紧凑和功率可扩展等优点,未来有望成为 3 μm 波段主流激光器。

光纤激光器的核心是基质材料和增益离子,目前主要的光纤基质有石英玻璃、硫系玻璃、锗酸盐玻璃、碲酸盐玻璃和氟化物玻璃^[1]。石英玻璃作为发展最成熟的光纤基质材料,工作波段为 0.3~2.5 μm ,不适用于 3 μm 波段光的传输,且稀土掺杂浓度很低。硫系玻璃是目前工作波段范围最大(1.5~16 μm)的光纤基质,具有很低的声子能量和极高的非线性系数,但其基质中难以掺入稀土离子,导致输出功率尚未突破瓦级。碲酸盐玻璃工作波段为 0.38~6 μm ,稀土离子的溶解度很高,但其羟基含量有待降低。氟化物玻璃工作波段为 0.3~12 μm ,具有低声子能量(500~600 cm^{-1})和低损耗的优势,可以掺杂多种稀土离子,是 3 μm 波段最佳的光纤基质。目前最常用的氟化物光纤是 ZBLAN 光纤,组分为 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$,其离子的高浓度掺杂技术已实现商业化。此外,氟化物光纤还包括氟化铝^[2]与氟化铟光纤^[3]等,与 ZBLAN 光纤相比,氟化铟光纤具有更低的声子能量,但易潮解、机械强度低,且原料昂贵,无法用于商业化生产;而氟化铝光纤受水分子的影响较小,具有较高的机械强度,但氟化铝玻璃的抗析晶能力差,光纤拉制困难,且声子能量偏高,很难输出大功率激光。

稀土离子作为产生激光的激活离子,可以掺杂在晶体和光纤中,可采用能级寿命较长的镧系离子(如 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Dy^{3+})来产生 3 μm 激光。采用 Er^{3+} 做掺杂离子时,一般使用 InGaAs 半导体激光器(980 nm)进行泵浦,位于基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 的粒子被直接泵浦到上能级 $^4\text{I}_{11/2}$,此时上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 的粒子数远远大于下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 粒子数,粒子向 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级跃

迁产生 2.65~2.95 μm 的输出光。由于 Er^{3+} 上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ (6.9 ms)寿命小于下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ (9.0 ms)寿命,下能级粒子数会随着泵浦功率和时间的增加而越来越多,从而导致激光自终止效应的发生。常见的减少自终止现象的方法有三种:第一种方法是 Er^{3+} 的高浓度掺杂^[4],此时存在两种能量传递上转换(ETU)过程,其中 ETU1 过程(粒子由下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁至能级 $^4\text{I}_{9/2}$ 和 $^4\text{I}_{15/2}$,再通过多声子弛豫过程到达上能级 $^4\text{I}_{11/2}$)增加了上能级粒子数,ETU2 过程(上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 的粒子上转换至能级 $^4\text{F}_{7/2}$ 和 $^4\text{I}_{15/2}$)减少了上能级粒子数,两种 ETU 过程都会随着 Er^{3+} 离子浓度的增加而提高,因而寻找 Er^{3+} 的最优掺杂浓度比是提高激光转换效率的关键,目前报道的 ZBLAN 光纤中 Er^{3+} 的较优掺杂浓度在 6%~8%(mol)。第二种减少自终止现象的方法是对光纤进行低温处理,温度较低时,上能级寿命相对增加,自终止效应被抑制。第三种方法是在掺 Er^{3+} 光纤中引入 Pr^{3+} ,通过 Er^{3+} 能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 Pr^{3+} 能级 $^3\text{F}_3$ 之间的能量传递来减少下能级粒子数,从而抑制自终止效应^[5]。 Ho^{3+} 掺杂的激光器体系一般采用 640 nm、885 nm 和 1 150 nm 的泵浦光,粒子在泵浦光的作用下到达上能级 $^5\text{I}_6$,再向下跃迁至 $^5\text{I}_7$ 时辐射出 2.8~3 μm 的输出光。由于其上能级 $^5\text{I}_6$ (3.5 ms)寿命小于下能级 $^5\text{I}_7$ (12 ms),同样可以上述方法来抑制自终止效应。对 Dy^{3+} 掺杂的激光器体系而言,可以使用 1 090 nm、1 300 nm、1 700 nm 和 2 800 nm 波段的光来泵浦,粒子由上能级 $^6\text{H}_{13/2}$ 到达下能级 $^6\text{H}_{15/2}$,产生 2.9~3.4 μm 的输出光^[6]。与 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 掺杂的光纤激光器相比, Er^{3+} 的 ETU 过程使激光器量子效率大大提高,从而保证激光器高效运行,而 980 nm 激光器的商业化生产也促使 Er^{3+} :ZBLAN 激光器得到迅速的发展。本综述详细介绍了 Er^{3+} :ZBLAN 激光器的研究进展,主要包括连续性光纤激光器和基于饱和吸收体的脉冲激光器工作原理和发展现状,最后对 Er^{3+} :ZBLAN 激光器目前存在的问题和发展趋势进行总结和展望。

2 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 连续输出激光器

Er^{3+} 具有丰富的能级结构,在 0.98 μm 泵浦下产生约 3 μm 激光,而 ETU 过程又提高了激光转换效率,图 1 为 Er^{3+} 部分能级结构及相应的 ETU 过

程。早在 1976 年, Robinson^[7]便报道了 Er^{3+} 由 $^4\text{I}_{11/2}$ 到 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级可以受激辐射 $(2.69 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 的光。1989 年, Allain^[8]制备出 Er 掺杂浓度为 0.9% (mol) 的氟硼酸盐单模光纤, 在 476.5 nm 泵浦下获得了 2.714 μm 的连续输出激光, 其阈值泵浦功率为 7 mW, 输出激光功率为 0.25 mW, 线宽小于 2 nm, 这是氟化物光纤首次在 3 μm 波段实现激光的连续输出。此后几年间, 研究者对该波段激光器展开了一系列实验探究。

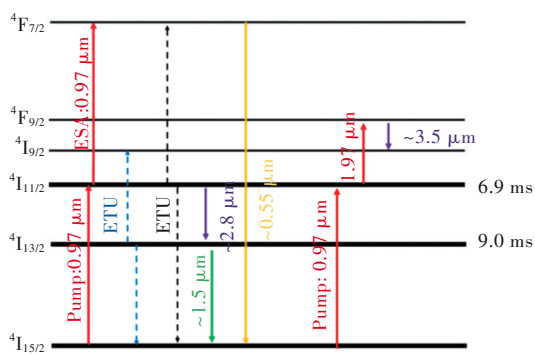


图 1 Er^{3+} 部分能级结构及相应的 ETU 过程

Fig.1 Er^{3+} partial energy level structure and corresponding ETU process

对于波长可调谐的激光器, 由于再吸收过程的增强和较短波长辐射的减弱, 实验中输出波长的可调范围随泵浦功率的增加而减小。2007 年, Zhu^[9]采用 600 条/mm 沟槽的镀金光栅来拓宽光谱宽度, 得到 2.7~2.83 μm 波长可调谐的 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 中红外光纤激光器, 连续输出功率大于 2 W, 突破了 3 μm 波段氟化物光纤激光器瓦量级的输出。

空间耦合是最常用的光耦合方法, 操作简单, 不需要很高的工艺, 但由于氟化物光纤本身的物理性质, 光纤在实验中产生的热量会持续积累, 从而对端面造成损伤, 所以需要光纤进行散热和端面除水处理。图 2 是两种光纤散热结构简图, 分别采用液体与纤身直接接触和间接接触的方式对光纤进行降温。图 2(a) 为直接冷却法, 采用的液体一般为循环流动的氟碳液体冷却剂, 温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 将光纤浸泡在充满氟碳液体冷却剂的铝板中以达到降温的目的; 图 2(b) 为间接冷却法, 在铝板内部通水以保持 20 $^{\circ}\text{C}$ 的恒定温度, 通过铝板与纤身的接触来进行散热。2007 年, Zhu^[10]采用了主动水冷的方式来降温, 有效防止光纤端部的软化弯曲的同时提高了激光器的损伤阈值, 在泵浦功率 42.8 W 时得到了 9 W 的输出功

率, 将 ZBLAN 光纤激光器的转换效率提高到 21%。2009 年, 日本 Tokita^[11]采用液体直接散热的方式, 纤身处理与图 2(a) 相似, 同时对光纤两端进行导电降温, 在级联泵浦下获得了 24 W 的输出功率和 14.5% 的转换效率。2010 年, 他们^[12]又对光路进行改装, 采用间接水冷却的方式, 将光纤放置在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的铝板上, 光纤末端由带 U 型槽热沉夹紧, 同时采用鼓吹氮气的方式来清除光纤端面的水分。由于光纤很难与光纤槽完美贴合, 实验中散热效果并不理想, 得到的最大输出功率为 11 W。2011 年, Ashoori^[13]根据传热方程建立了三维氟化物光纤热量分布模型, 从理论方面证明了氟化物光纤进行散热可以提高其损伤阈值。

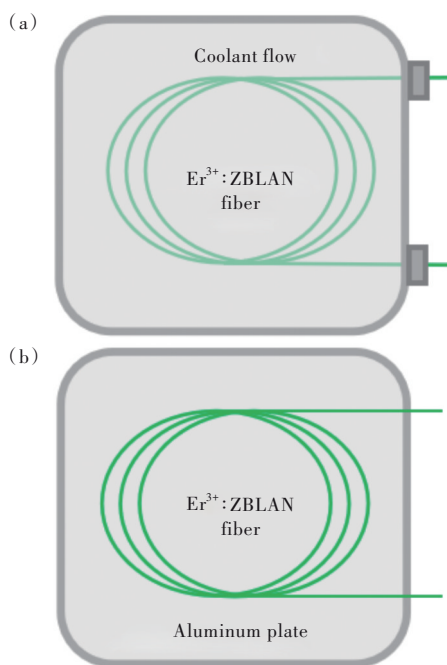
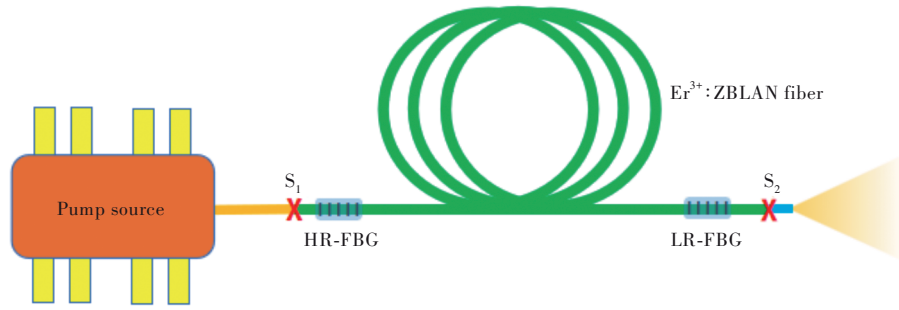


图 2 光纤散热结构简图。(a) 液体直接冷却; (b) 液体间接冷却

Fig.2 Schematic diagram of fiber optic heat dissipation structure. (a) Liquid direct cooling. (b) Liquid indirect cooling

与空间耦合相比, 全光纤结构可以完美地避开端面因光子碰撞产生的热损伤, 从而提高激光器损伤阈值。图 3 为 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 激光器全光纤结构装置示意图, 实现全光纤技术的关键是泵浦尾纤与氟化物光纤的熔接 (S_1)、光纤端帽的熔接 (S_2)、高反和低反光纤光栅 (HR-FBG 和 LR-FBG) 的写入。其中光纤光栅是利用光纤的光敏性对光纤纤芯折射率进行周期性调制的一种无源器件, 它与光纤兼容度很高, 在光路中起到振荡反馈、滤

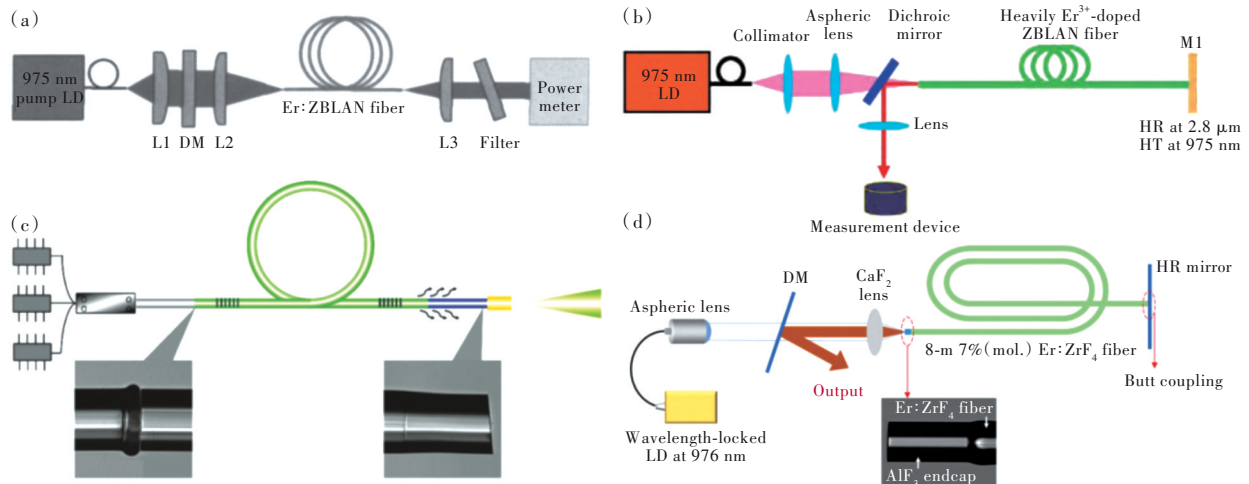
图3 Er^{3+} :ZBLAN激光器全光纤结构装置示意图Fig.3 Schematic diagram of all fiber structure device for Er^{3+} :ZBLAN laser

波和波长调谐的作用。ZBLAN 光纤光敏性低,可以利用材料的非线性吸收特性,通过相位掩模法与激光直写法直接将光栅刻入光纤内。2009年,加拿大拉瓦尔大学^[14]成功在光纤中刻入FBG,在泵浦功率为 20.5 W 的条件下,得到了最大输出功率为 5 W、转换效率为 24% 的激光输出。由于光纤与空气界面中水分的存在,该实验在输出功率达 2 W 时光纤端面出现了热损伤。为了在不影响光束质量的情况下消除端面热损伤,该课题组在同年^[15]采取加压氮气的方式来清除输出端水分,并熔接一段多模光纤作端帽,得到的激光器最大输出功率为 5.2 W。2011年,他们^[16]又对光纤进行了光栅刻写,将激光输出功率提高到 20.6 W,对应的转换效率为 35.4%。在泵浦尾纤与氟化物光纤熔接的问题中,由于 ZBLAN 光纤的软化温度 T_s (320 °C) 低于石英光纤,需要在石英玻璃的端面沉积 Ta_2O_5 介电涂层以提高两种光纤的粘附性,然

后将石英光纤加热到 ZBLAN 玻璃 T_s 以上,立即将两种光纤压在一起完成熔接。此后,拉瓦尔大学又对谐振腔进行多次全光纤化改进^[17-19],包括采用双向泵浦来减少光路的热负载,在 2018 年将 3 μm 激光最大输出功率提高至 41.6 W,这是国际上 Er^{3+} :ZBLAN 连续激光器最高的输出功率。

2021年,Newburgh^[20]通过 T 型耦合器接通 N_2 ,确定了非级联操作的情况下泵浦的最佳波长为 985 nm,并将光纤转换效率提高到 28%,这是目前非级联激光器最高的转换效率;然后采用双端泵浦来耦合更大的泵浦功率,当组合泵浦功率为 325 W 时,输出峰值功率达 70 W。由于实验是在泵浦运行状态为“通电 1 ms、重复频率 5 Hz”的准连续波模式下实现的,所以该结果也适用于连续状态下的 Er^{3+} :ZBLAN 激光器。

受材料和器件限制,国内在中红外波段起步较晚,本节汇总了我国在 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN

图4 国内 Er^{3+} :ZBLAN 激光器结构示意图。(a)线性腔结构图^[21];(b)激光器前端输出装置图^[23];(c)全光纤结构示意图^[24];(d)熔有光纤端帽的激光器结构图^[25]Fig.4 Schematic diagram of domestic Er^{3+} :ZBLAN laser structure. (a) Linear cavity structure diagram^[21]. (b) Laser front-end output device diagram^[23]. (c) Schematic diagram of all fiber structure^[24]. (d) Diagram of the structure of a laser with a fiber end cap^[25]

激光器的所有研究成果,具体实验装置如图 4 所示。2012 年,中国工程物理研究院黄园芳^[21]采用如图 4(a)的空间耦合方式,使用 Er^{3+} :ZBLAN 光纤搭建线性腔,在泵浦功率 25 W 时,获得了 2.61 W 的中红外激光输出,转换效率为 11.6%。2014 年,西北核技术研究所沈炎龙^[22]将光纤后端紧贴高反镜,采用前端输出结构,获得最大功率为 0.98 W 的激光输出,转换效率 17%。2015 年,他们^[23]又对光路进行改进,实验装置如图 4(b)所示,将光纤尾部的高反镜替换为二相色镜,并使用紫铜热沉对光纤两端进行冷却,得到最大功率 9.2 W、斜率效率 24.8% 的激光输出。2021 年,深圳大学郭春雨^[24]采用全光纤结构,如图 4(c)所示,在

光纤内直接刻写高反光栅和低反光栅,使用合束器将 3 束 976 nm 泵浦光耦合进增益光纤中,采用包层光滤除器和 AlF_3 光纤端帽来提高光纤损伤阈值,该实验得到最大的转换效率为 18.6%,当组合泵浦光功率为 140 W 时,输出功率 20.3 W。2023 年,天津大学张钧翔^[25]使用图 4(d)所示光路结构,在 Er^{3+} :ZBLAN 光纤前端熔接一段 AlF_3 光纤做端帽,光纤入射端面采取水冷散热,在单端泵浦功率为 128 W 时,实现了 33.8 W 的输出,光光转换效率高达 26.4%。这是目前我国 3 μm 波段最大的输出功率,同时也是国际上单端泵浦的最高输出功率。表 1 示出了 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 连续输出激光器的技术研究进展历程。

表 1 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 连续输出激光器研究进展Tab. 1 Research progress of 3 μm band Er^{3+} :ZBLAN CW laser

泵浦波长/nm	泵浦功率/W	掺杂浓度/(mol)	光纤长度/m	光路结构	输出波长/ μm	输出功率/W	转换效率/%	年份	文献
975	20.0,32.0	6	4.00	空间耦合	2.780~2.800	>2.00	10.0	2007	[9]
975	42.8	6	4.00	空间耦合	2.78	9.00	21.3	2007	[10]
980	93.0	6	3.80	空间耦合	2.770~2.800	8.00~11.00	12.2	2010	[12]
975	89.0,77.0	6	4.20	空间耦合	3.000	24.00	20.0	2009	[11]
980	20.5	7	6.42	全光纤	2.824	5.00	32.0	2009	[14]
980	20.2	7	6.60	全光纤	2.940	5.20	26.6	2009	[15]
976	70.0	7	4.60	全光纤	2.825	20.60	35.4	2011	[16]
980	188.0	7	—	全光纤	2.938	30.50	22.0	2015	[17]
980	188.9	6	6.50	全光纤	2.838	35.40	22.9	2019	[18]
980	172.2	7	6.50	全光纤	2.824	41.60	22.9	2018	[19]
976	325.0	7	5.50	空间耦合	2.860	70.00	29.0	2021	[20]
975	25.0	6	4.00	空间耦合	2.786	2.61	11.6	2012	[21]
975	6.3	6	4.80	空间耦合	2.785	0.98	17.0	2014	[22]
975	40.0	6	4.70	空间耦合	2.790	9.20	24.8	2015	[23]
976	140.0	7	6.50	全光纤	2.825	20.30	18.6	2021	[24]
976	128.0	7	8.00	空间耦合	2.870	33.80	26.4	2023	[25]

3 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 脉冲激光器

脉冲激光器可以很短时间内输出大量能量,目前采用可饱和吸收体对光路进行调 Q 和锁模调制是实现脉冲激光器的主要方式。本节介绍了多种饱和吸收体材料及基于饱和吸收体实现的被动调 Q 和锁模激光器。

3.1 饱和吸收体

材料的可饱和吸收特征可用泡利不相容原理来解释:当激光通过可饱和吸收体(SA)时,SA 表

现出非线性效应,即随着激光强度的增加,SA 对光的吸收变小,光的透过率逐渐增加,当激光强度超过阈值时,SA 达到饱和。目前,半导体可饱和吸收体(SESAM)是发展最为成熟的商用可饱和吸收体^[26-29],但其价格昂贵,最长工作范围只能到 3 μm 。近年来,石墨烯、黑磷、 Fe^{2+} :ZnSe、拓扑绝缘体、过渡金属硫化物等新型材料由于其独特的结构特性,已逐渐成为 2.7~3 μm 波段可饱和吸收体热门材料。

Fe^{2+} :ZnSe 具有较高的损伤阈值(2 J/cm²)和较小的饱和性(60 mJ/cm²),在激光器中可以输出更

高的功率和能量^[30-34]。其上能级寿命较短,饱和恢复时间更快,更有利于短脉冲的实现。制备工艺简单,一般采用热扩散和直接掺杂法进行制备,同时也存在掺杂浓度不可控的缺点。

石墨烯属于狄拉克材料^[35-37],具有零带隙结构,对可见光、近红外、中红外的光均有饱和吸收作用,一般采用机械剥离法和气相法、液相法进行制备。在 3 μm 波段,石墨烯具有较低的锁模阈值,使其在很小的泵浦功率下输出锁模脉冲,但材料的损伤阈值和调制深度也偏低,很难实现大功率的输出。

拓扑绝缘体饱和吸收镜可以通过喷墨打印技术在金镜上制备,其内部为绝缘态,带隙 0.2~0.3 eV,对 4~6 μm 的光有重吸收作用;外部是金属态,属零带隙结构,在可见光到中红外均有吸收作用^[38-44]。与石墨烯一样受损伤阈值的限制,难以输出高功率的激光。

用于 3 μm 波段的过渡金属硫化物有 MoS_2 、 WS_2 、 WSe_2 、 MoTe_2 等,其饱和吸收体制备简单,可通过磁控溅射法和气相沉积法制备^[45-48]。假设材料无缺陷模式,其带隙远大于 0.41 eV,理论上无法实现获取 3 μm 波段的脉冲运转;但缺陷模式的存在可以改变过渡金属硫化物的带隙,使其对中红外波段的光也有吸收作用。目前已有的数据

中, MoS_2 和石墨烯异质层已实现调 Q 和锁模输出, MoTe_2 已实现调 Q 输出, WS_2 已实现锁模输出, WSe_2 既能实现调 Q 输出又能实现锁模输出。

黑磷是一种片状结构二维材料,工作范围宽,其带隙可通过材料的层数进行控制,且随层数增加而减小,单层黑磷带隙为 2 eV,多层黑磷带隙为 0.3 eV,对 3 μm 波段的光有吸收作用。制备简单,可大规模生产,一般通过液相剥离法和机械剥离法进行制备和控制层数^[49-51]。但由于黑磷在空气中极易氧化,无法用于商业化推广。

3.2 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 调 Q 激光器研究进展

调 Q 指调节激光器中谐振腔的损耗,在激光器开始运行时,可饱和吸收体具有较大的吸收系数,导致腔内损耗大,反转粒子数大量积累,一段时间后饱和吸收体达到饱和,吸收系数降低,损耗降低,反转粒子数快速消耗,从而在很短的时间内输出很高功率脉冲激光。表 2 示出了 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 激光器在调 Q 方面的技术研究进展历程。

早在 1996 年,Frerichs^[52]在 GaAs 衬底上制备了厚度为 0.4 μm 的外延 InAs 层,首次搭建出 2.7 μm 被动调 Q 光纤激光器,该激光器平均功率为 1.4 mW,脉冲持续时间 1.1 μs ,最大峰值功率

表 2 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 调 Q 激光器研究进展

Tab. 2 Research progress of 3 μm band Er^{3+} :ZBLAN Q -switched laser

饱和吸收体	中心波长/ μm	平均功率/ W	峰值功率/ W	脉冲宽度/ μs	脉冲能量/ μJ	脉冲频率/ kHz	年份	文献
InAs	2.700	0.001 4	1.040	1.200	1.25	1.10	1996	[52]
Fe^{2+} :ZnSe	2.780	0.318 0	5.340	0.370	>2.00	161.00	2012	[30]
Fe^{2+} :ZnSe	2.780	0.822 0	10.760	0.742	7.98	102.94	2016	[31]
Fe^{2+} :ZnSe	2.760 ~ 2.850	>4.000 0	5.160	1.890 ~ 0.400	27.70	43.80 ~ 243.20	2017	[32]
Fe^{2+} :ZnSe	2.780	0.486 0	7.300	0.520	3.81	127.46	2018	[33]
SESAM	2.786	4.200 0	25.700	2.290	58.87	71.73	2016	[26]
Graphene	2.800	0.380 0	16.000	0.400	6.40	59.00	2013	[35]
Graphene	2.790	1.000 0	11.400	2.100	24.30	41.20	2013	[36]
Bi_2Te_3	2.791	—	0.856	1.300	9.30	92.00	2016	[38]
Bi_2Te_3	2.762 ~ 2.824	—	0.260	0.950	2.00	50.00	2017	[39]
MXene	2.800	—	0.181	1.100	2.10	88.30	2019	[40]
Ti_2CT_x	2.798	—	0.080	0.730	0.81	99.50	2019	[41]
Ta_2NiS_5	2.800	—	0.168	1.200	1.64	102.00	2021	[42]
TiCN	2.778	25.830 0	—	5.400	—	32.57	2023	[43]
Graphene/ MoS_2	2.800	—	—	1.900	2.20	45.00	2018	[45]
MoS_2	2.754	—	0.140	0.806	2.00	70.00	2019	[46]
InSe	2.791	—	0.712	0.423	—	253.00	2021	[47]
Black phosphorus	2.800	0.585 0	6.500	1.180	7.70	63.00	2015	[49]
Black phosphorus	2.772	—	0.018	3.320	0.82	22.20	2018	[51]

1.04 W, 脉冲能量 1.25 mJ。

2012 年, Wei^[30] 使用 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体做饱和吸收体, 在泵浦功率为 2.8 W 时, 得到了波长 2.78 μm 、脉宽 370 ns、输出功率 300 mW 的调 Q 激光器, 脉冲能量大于 2.0 μJ , 对应的峰值功率 5.34 W。后续他们^[32] 在光路中引入光栅作波长选择器, 得到了平均功率大于 4 W、波长调谐范围为 2 762.5~2 852.5 nm 的被动调 Q 光纤激光器。Zhang 等^[31] 基于脉冲激光沉积 (PLD) 技术, 制备了中红外 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 薄膜, 与 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体相比, $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 薄膜更易集成在光学元件上, 使激光器结构更加紧凑, 在 11.77 W 泵浦功率下, 获得了稳定的调 Q 脉冲, 脉冲能量为 7.98 μJ , 脉冲持续时间为 0.742 μs , 峰值功率为 10.76 W, 平均输出功率为 822 mW。Ning^[33] 使用气相热扩散法和飞秒激光烧蚀法制备出 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 胶体 (NCs) 可饱和吸收体, 所采用的实验装置如图 5(a) 所示, 将光纤末端与饱和吸收镜紧贴, 实验获得了峰值功率为 7.30 W、脉冲宽度为 0.52 μs 、脉冲能量为 3.81 μJ 的 2.8 μm 调 Q 输出。此后几年, 研究人员相继报道出一系列基于二维材料饱和吸收体的激光器。

作为带隙可调控的商用饱和吸收体, SESAM 可同时作为饱和吸收体和色散补偿镜使用。Luo^[26] 将 SESAM 置于光纤尾端构成 MO 系统, 采取的结构装置见图 5(e), 后面连接一个用 976 nm 泵浦的掺铒氟化光纤做一级放大器, 得到输出光的最大平均输出功率为 4.2 W, 脉冲能量为 58.87 μJ 。

石墨烯与拓扑绝缘体同属狄拉克材料, 具有超宽的非线性响应波段, 是制备可饱和吸收体的重要材料。2013 年, Wei^[35] 使用石墨烯在长度分别为 10 m 和 2 m 的 ZBLAN 光纤中均实现了稳定的调 Q 输出。当光纤长度为 10 m 时, 泵浦最大功率可用 828 mW, 平均输出功率为 62 mW, 脉宽为 2.9 μs ; 当光纤长度缩短到 2 m 时, 泵浦最大功率 420 mW, 平均输出功率为 65 mW, 脉冲宽度 1 μs 。同年, Tokita^[36] 在 59 kHz 的重复频率下也实现了平均输出功率为 380 mW 的石墨烯调 Q 输出。Tang^[38] 采用水热法制备出的 $\text{Ti}:\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-SA}$, 在泵浦功率 5.9 W 的条件下, 获得的调 Q 脉冲最大平均功率为 856 mW, 对应的脉冲能量为 9.3 μJ , 脉冲宽度为 1.3 μs , 重复频率为 92 kHz。Liu^[39] 在

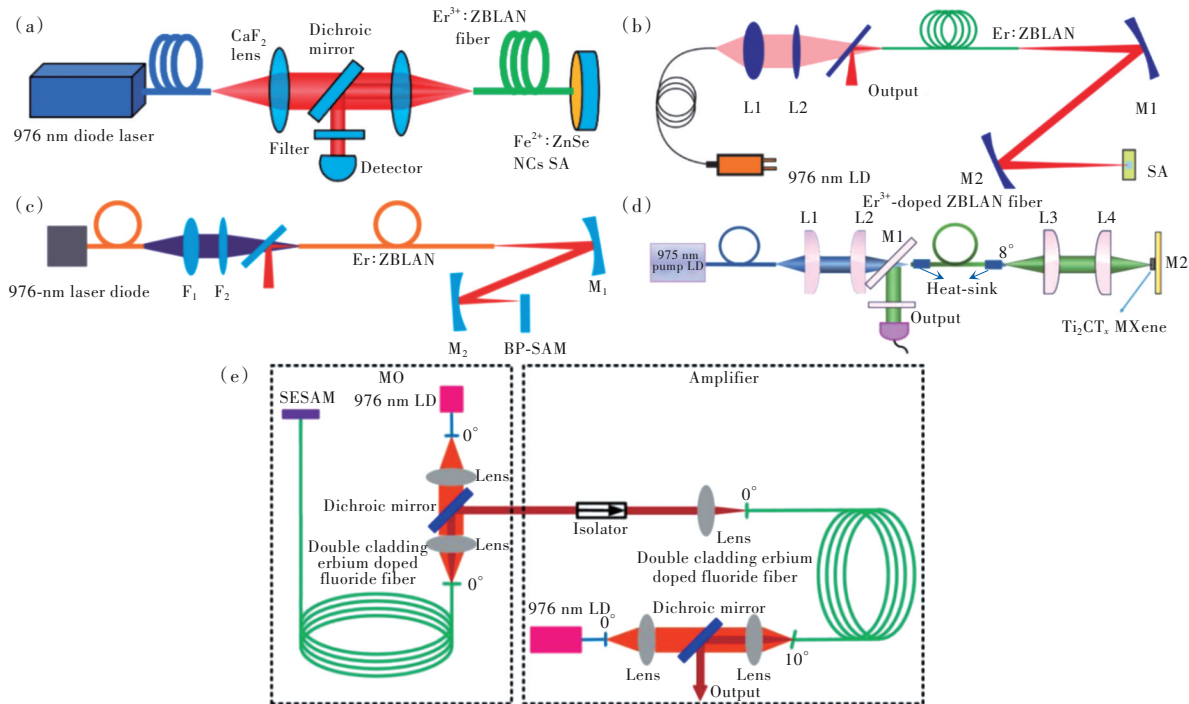


图 5 3 μm 波段 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 调 Q 激光器结构示意图。(a) $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ NCs-SA 调 Q 激光器结构图^[33]; (b) MoS_2 -SA 调 Q 激光器结构图^[46]; (c) BP-SA 调 Q 激光器结构图^[49]; (d) Ti_2CT_x -SA 调 Q 激光器结构图^[41]; (e) SESAM-SA 激光器 MO 系统结构图^[26]

Fig.5 Schematic diagram of the structure of a 3 μm band $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ Q-switched laser. (a) $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ NCs-SA Q-switched laser structure diagram^[33]. (b) MoS_2 -SA Q-switched laser structure diagram^[46]. (c) BP-SA Q-switched laser structure diagram^[49]. (d) Ti_2CT_x -SA Q-switched laser structure diagram^[41]. (e) SESAM-SA MO system structure diagram^[26]

Bi_2Te_3 -SA 的激光器中插入光栅,实现了 2 762~2 824 nm 范围内的可调谐调 Q 输出。Jiang^[40]将 MXene 纳米片直接喷墨打印在空间耦合的激光谐振腔中,得到的脉冲持续时间可达 100 fs。同年, Yi^[41]以 Ti_2AlC 为原料,采用 Al 选择性蚀刻法合成了 Ti_2CT_x 膜,利用图 5(d) 所示结构图,在 2.8 μm 激光器中获得输出功率 80 mW、重复频率 99.5 kHz、脉宽 730 ns 的调 Q 脉冲。Duan^[42]使用 Ta_2NiS_5 可饱和吸收体,在 860 mW 的入射泵浦功率下,得到了脉冲持续时间 1.2 μs 、重复频率 102 kHz 的稳定调 Q 脉冲。2023 年,叶珊珊^[43]采用 TiCN -SA 在 650 mW 泵浦下得到了平均功率 25.83 mW 调 Q 输出。

狄拉克材料的成功打开了研究二维材料的大门,让更多新型二维材料(如黑磷和过渡金属硫化物)走入研究者的视野。Tang^[45]采用水热法制备了石墨烯/ MoS_2 异质结构,在 2.8 μm 处可以产生高达 2.2 μJ 的脉冲能量,对应的脉冲宽度和重复频率分别为 1.9 μs 和 45 kHz,表明了石墨烯/ MoS_2 异质结构可以成为中红外波段脉冲激光器的光学调制器件。Wang^[46]制成了四层 MoS_2 饱和吸收体,搭建出如图 5(b) 所示“Z”型腔结构,得到的输出脉冲最大平均功率为 140 mW,峰值功率为 2.48 W,该功率下对应的重复频率和脉冲持续时间分

别为 70 kHz 和 806 ns。Chen^[47]使用新型材料制备出 In_2Se_3 -SA,在 2.8 μm 处得到的调 Q 脉宽 423.2 ns,对应的最大脉冲能量和峰值功率分别为 2.81 mJ 和 5.71 W。2015 年, Qin^[49]采用液相法制成黑磷可饱和吸收镜(BP-SA),同样采取如图 5(c) 所示“Z”型腔结构,在 63 kHz 的重复频率下,得到的调 Q 脉冲平均功率为 485 mW,脉宽为 1.18 μs 。2018 年,该团队^[51]又设计了全光纤结构,将黑磷薄片黏附在增益光纤和多模氟化物光纤之间,再采用光纤连接器和适配器固定,得到平均功率 18.4 mW、持续时间 3.32 μs 的调 Q 输出。但由于黑磷的不稳定性,该材料无法实现长时间优良的输出。

3.3 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 锁模激光器研究进展

激光器中振荡的光有多种不同的相位,锁模是指将谐振腔中光的相位锁定,使有相位关系的光经过叠加后光强更强,没有相位关系的光叠加后光强变弱,饱和吸收体主要吸收弱光,对强光吸收能力小,从而输出稳定的大功率光模式。由于器件的限制,3 μm 波段锁模技术较调 Q 起步较晚,技术成果也较少,表 3 示出了 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 激光器在锁模方面的技术研究进展历程。

表 3 3 μm 波段 Er^{3+} :ZBLAN 锁模激光器研究进展

Tab. 3 Research progress of 3 μm band Er^{3+} :ZBLAN mode-locked laser

饱和吸收体	中心波长/ μm	平均功率/ mW	峰值功率/ kW	脉冲宽 度/ps	脉冲能 量/nJ	重复频率/ MHz	年份	文献
InAs	2.700	22.0	—	<0.25	—	84.00	1996	[52]
Fe^{2+} :ZnSe	2.780	51.4	0.049	19.00	0.93	50.00	2012	[34]
SESAM	2.797	440.0	0.140	60.00	8.50	51.75	2014	[27]
SESAM	2.800	1 000.0	1.860	25.00	44.30	22.56	2015	[28]
SESAM	2.710 ~ 2.820	203.0	1.100	6.40	7.02	—	2017	[29]
Black phosphorus	2.800	613.0	0.608	42.00	25.50	24.00	2016	[50]
Black phosphorus	2.771	6.2	—	—	—	27.40	2018	[51]
Graphene	2.784	18.0	0.017	42.00	0.70	25.40	2015	[37]
WSe_2	2.790	360.0	0.400	21.00	8.40	42.43	2019	[48]
MXene	2.796	603.0	—	11.40	—	37.00	2021	[44]

1996 年,Frerichs^[52]使用 InAs 作为可饱和吸收体首次获得锁模脉冲。该实验对于多模光纤,当采用 792 nm、162 mW 的泵浦时,获得 16 mW 输出功率;对于单模光纤,当采用 450 mW、647 nm 的泵浦时,得到 22 mW 输出脉冲。受中红外器件的限制,3 μm 波段锁模激光器的研究在后续一段时间内并没有新的进展。

直到 2012 年,Wei^[34]制备出 Fe^{2+} :ZnSe 晶体饱和吸收体,成功搭建出输出功率为 51.4 mW、脉冲宽度为 19 ps 的锁模激光器。 Fe^{2+} :ZnSe-SA 锁模激光器的成功运转,正式拉开了新型材料饱和吸收体研究的帷幕,图 6 为几种材料锁模激光器结构示意图。

作为应用研究最深入的饱和吸收体,SESAM

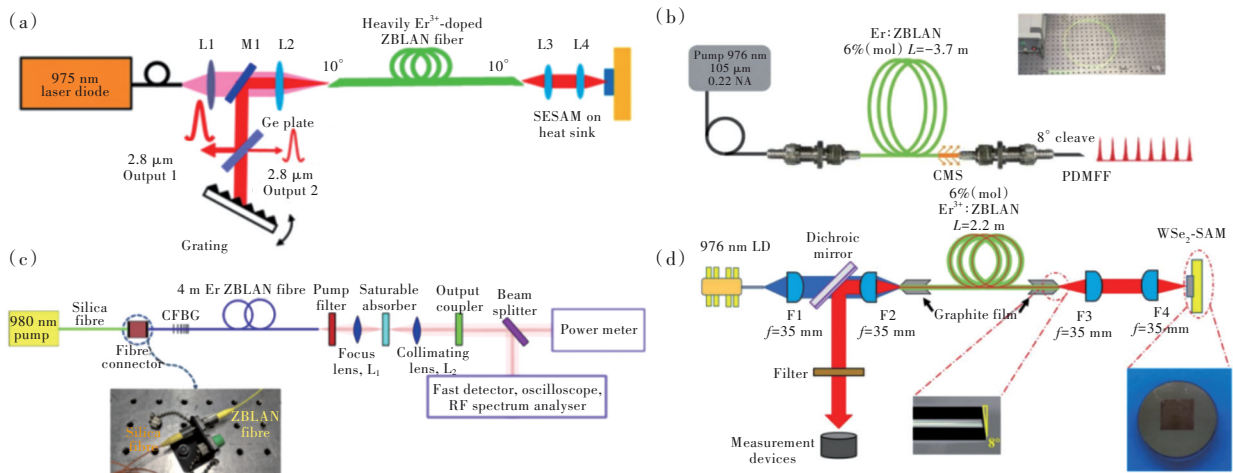


图 6 3 μm 波段 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 锁模激光器结构示意图。(a)SESAM-SA 锁模激光器结构图^[29];(b)BP-SA 锁模激光器结构图^[51];(c)MXene-SA 锁模激光器结构图^[44];(d)WSe₂-SA 锁模激光器结构图^[48]

Fig.6 Schematic diagram of the structure of a 3 μm band $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ mode-locked laser. (a)SESAM-SA mode-locked laser structure diagram^[29]. (b)BP-SA mode-locked laser structure diagram^[51]. (c)MXene-SA mode-locked laser structure diagram^[44]. (d)WSe₂-SA mode-locked laser structure diagram^[48]

在中红外锁模方面有着优异的输出结果。2014年,加拿大 Haboucha^[27]采用线性直型腔结构,使用 SESAM 做可饱和吸收体,得到的输出脉冲序列的重复频率为 51.75 MHz,脉冲持续时间为 60 ps,平均功率为 440 mW。2015年,Tang^[28]在光纤尾端使用两个凹面高反镜组成 Z 型腔结构以避免腔内反馈的产生,得到重复频率 22.56 MHz、峰值功率 1.86 kW、脉宽 25 ps 锁模脉冲。闪耀光栅在光路中可以起到锁模和调谐波长的作用,2017年,Shen^[29]将其引入光路中,实验装置如图 6(a)所示,得到的激光器波长调谐范围为 2 710~2 820 nm,锁模脉冲宽度 6.4 ps,峰值功率 1.1 kW,重复频率 28.9 MHz。

对黑磷研究较为深入的是上海交通大学。2015年,Qin^[50]将黑磷薄片放置在反射率为 99% 镀金镜上制成 BP SAM,采用“Z 型腔”结构,获得了峰值功率 608 W、脉冲宽度 42 ps 的锁模脉冲。2018年,该课题组^[51]又设计了全光纤实验装置,对应的激光器结构如图 6(b)所示,采用光纤连接器和适配器将泵浦尾纤、增益光纤和黑磷薄片相连,在 2 771.1 nm 波长处获得平均功率为 6.2 mW、重复频率为 27.4 MHz 的锁模脉冲。

2016年,Zhu^[37]将多层石墨烯涂敷在金镜上制成石墨烯饱和吸收体,为了降低腔内损耗,SA 放置位置与光纤尾端成 4° 夹角,实验获得了 2.78 μm 的锁模脉冲,平均输出功率为 18 mW,脉冲宽度为 42 ps,重复频率为 25.4 MHz。

2019年,Guo^[48]使用 CVD 技术制得 WSe₂-SAM,实验装置如图 6(d)所示。光纤两端放置铜质热沉进行散热,激光器输出的脉冲持续时间为 21 ps,重复频率为 42.43 MHz,平均输出功率高达 360 mW。

2021年,Bharathan^[44]使用光纤连接器将泵浦光纤与 ZBLAN 光纤连接起来,光纤输入端刻入高功率啁啾布拉格光栅,通过喷墨打印技术将 12 层 MXene 直接沉积在 50% 输出耦合器上,实现了真正的中红外全光纤结构。如图 6(c)所示,输出的锁模脉冲重复频率 37 MHz,平均功率 603 mW,这是目前唯一实现稳定锁模的拓扑绝缘体材料。

4 3 μm 波段激光的应用

4.1 光通信

光通信是以光波为载体在自由空间内进行传输的通信方式。3 μm 波段处于中短红外大气窗口,对 H₂O 和 CO₂ 具有更强吸收作用,且受恶劣天气的影响比近红外波段要小,具有更小的闪烁效应和更高的抗噪性,可以穿透雾、霾、烟甚至长距离的大气^[53-54]。

4.2 军事应用

我国红外导弹的响应波段大多位于 1~5 μm ,而中红外波段对应较高的峰值辐射温度,更适合热源的监测。应用在军事航天方面的中红外激光具有红外检测、自动目标识别、图像实时处理等功能,能够在高对抗环境下,辅助飞机进行空中侦察

反击。此外,红外探测器技术还可用于欺骗与损坏敌方导弹的发射源^[55-56]。

4.3 气体监测

激光传感器目前广泛应用在管道监测、工业过程和气体分析中,通过激光诱导荧光光谱、激光诱导击穿光谱、吸收测量和倏逝场光谱来实现。由于H₂O、CO、NO₂、NO、CO₂、SO₂、H₂S等分子在中红外波段都有基本跃迁,3 μm波段对这些气体的吸收性比近红外波段强大约100倍,因此中红外激光更适用于多种微量气体监测^[57]。

4.4 生物医学

人体组织的主要成分是水分子,而3 μm波段处于水分子吸收峰,可以选择性地激励水分子,以热交换和冲击波形式更快地切割肌肉组织,具有远程操控、微创操作的优点。医学方面要求“手术刀”要在期望的位置进行清洁、精确的切割,同时对相邻组织的损伤最小,因此激光辐射必须被吸收在非常薄的组织层中。1989年,Esterowitz研究发现2.7 μm、2.3 μm和1.9 μm的光在组织中的吸收系数分别约为1 000 cm⁻¹、80 cm⁻¹和30 cm⁻¹,证实了2.7 μm的激光可以提供很大的消融速率,同时对邻近组织的损伤很小^[58]。

4.5 做泵浦光源

近几年来,研究者使用3 μm激光做泵浦源,通过光参量振荡技术或对Fe²⁺:ZnSe晶体进行激发,可以得到更长波段的输出光。近期,俄罗斯Pushkin^[59]使用3 μm光纤激光器做光学泵浦,Fe²⁺:ZnSe做增益介质,产生了中心波长在4 012~4 198 nm之间可调谐的输出光,输出功率为2.1 W。目前,产生远红外波段光纤激光器的输出均不高,主要原因还是氟化物光纤的光热性能与机械性能较差,优化氟化物光纤的制备工艺与器件基础是提高输出功率最有效的途径之一。

5 结论及展望

中红外3 μm激光独有的光学特性使其在各领域均有极大的应用价值。尽管近年来中红外脉冲激光器发展迅速,但仍存在一些未攻克的技术难题。增强光纤材料本身的物化性质、提高中红外器件的制备工艺、提高饱和吸收体的损伤阈值都是进一步增加激光器输出功率的有效措施,下面总结了未来中红外激光器主要的发展方向:

提高泵浦转化效率。产生3 μm激光最直接的方式就是采用976 nm商用InGaAs激光器直接

泵浦,但受能级寿命的影响,泵浦与输出激光的转换效率无法超过35%。通过优化泵浦源,可以减少光子损耗,从而提高光光转化效率。2017年,Aydin^[60]采用2.8 μm和1.7 μm双端泵浦,通过级联处的钪离子的相邻跃迁,可以减少2.8 μm跃迁时低能级粒子数,这种对激发态有效的吸收过程可以将光子循环到激光上能级,在2.8 μm处输出斜率效率达到50%,超过斯托克斯转换极限15%。目前采用1.7 μm做辅助泵浦时得到的输出功率很低,如何在提高其转换效率的同时实现高功率输出,是未来研究的一大难点。

全光纤工艺的商业化。激光输出可以通过空间耦合和全光纤两种结构来实现,空间耦合是最常用的方法,但容易造成端热损伤,目前最大输出功率只有33.8 W,而全光纤结构最高输出功率可达41.6 W。实现全光纤结构有两大难点,一是采用先进的CO₂激光熔接技术将氟化物光纤与泵浦尾纤相连;二是在光纤两端刻入光纤光栅来取代两端的高反镜,从而减少谐振腔的损耗。这两种工艺需要很高端的设备和技术^[61]。目前,加拿大拉瓦尔大学^[16-19]对ZBLAN光纤光栅的研究最为成熟;此外,澳大利亚麦考瑞大学^[62]和悉尼大学^[63]、日本大阪大学^[64]也有相关研究成果。目前,我国只有深圳大学^[24]完成了全光纤的搭建,成功地在Er³⁺:ZBLAN光纤中刻入光栅,输出功率为20.3 W。总体而言,我国在全光纤工艺方面相比国际水平还有一定的差距,而中红外全光纤技术与器件的商业化推广必将是未来高功率中红外激光器的发展方向。

ZBLAN光纤材料的拉制。ZBLAN玻璃是一种相对成熟的基质材料^[65],由于氟化物玻璃机械性能差,光纤在拉制成型过程中困难重重。目前报道的3 μm光纤激光器使用的氟化物光纤多为法国Le Verre Fluore公司和日本Fiberlabs公司所生产,生产工艺已十分成熟。近年来,我国在氟化物玻璃基质方面也开展了一系列研究,如中国科学院上海光机所制备了Er³⁺/Tm³⁺共掺的ZBLAN玻璃和光纤^[66],在793 nm和980 nm激光激发下,产生了1 390~1 580 nm、1 800~1 980 nm、2 625~2 750 nm的荧光光谱,取得了很好的发光效果。然而,该技术目前只能在实验室条件下完成,尚不能满足商业化生产需求。国内目前并没有氟化物光纤拉制技术成熟的机构,短期内对氟化物光纤的使用仍会受到限制。

光纤端面处理。当氟化物光纤的尖端暴露于环境空气中时,水蒸气与光纤组分发生反应,主要的反应产物为羟基氟化锆和氟氧化合物,根据菲克定律,这些反应产物会吸收 3 μm 的激光,导致大量的热量沉积在光纤尖端。2001年,Frischat^[67]报道了 AlF₃基玻璃在水中的稳定性大约是 ZrF₄基玻璃的 10 倍,证明 AlF₃可以作端帽熔接在 ZBLAN 光纤端面,从而提高尖端的损伤阈值。除了熔接端帽这一方法,还可以通过水冷的方式来减少端面热积累,或鼓吹氮气来减少端面与空气中水分的接触等方式来减少热损伤。

饱和吸收体的优化。饱和吸收体是最常用的锁模调制器件,由于材料本身的物化性质,现阶段研究人员并未找到适用于 3 μm 波段的完美的可

饱和吸收体材料。从近红外波段的经验可以得知,混合材料具有比单一材料更大的调制深度和更高的损伤阈值,更易输出高质量脉冲。此外,提高饱和吸收体的合成工艺,在制备过程中对材料的饱和吸收系数进行精确的控制,可以有效提高激光器本身的脉冲性能。

与其他激光器相比,光纤激光器更加紧凑高效,更适用于军事和医疗领域。随着国家对 3 μm 激光器需求的增加,中红外光纤激光器在未来有望实现高功率、低成本、商业化发展。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230258>.

参 考 文 献:

- [1] 韩旭. 光通信材料—红外光纤及其发展 [J]. 玻璃与搪瓷, 2012, 40(4): 30-34.
HAN X. All-optical communication material—infrared optical fiber and its development [J]. *Glass Enamel*, 2012, 40(4): 30-34. (in Chinese)
- [2] 王鹏飞, 刘墨, 张集权, 等. 基于氟化铝基玻璃光纤的瓦级 3 μm 激光 [J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 111001.
WANG P F, LIU M, ZHANG J Q, et al. Watt-level ~3 μm laser in AlF₃-based glass fiber [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2021, 33(11): 111001. (in Chinese)
- [3] 王英剑, 林凤英, 胡和方. 氟化铟基玻璃中 Er³⁺离子光谱性质的研究 [J]. 光学学报, 1997, 17(2): 155-160.
WANG Y J, LIN F Y, HU H F. Luminescence of Er³⁺-doped ions in fluoroindate glasses [J]. *Acta Opt. Sinica*, 1997, 17(2): 155-160. (in Chinese)
- [4] GAN H T, XIA K L, GUI Y M, et al. High content Er³⁺ doped ZBLAN glass: the spectral characteristics and high slope efficiency MIR laser investigation [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 865: 158170.
- [5] SCHEIFE H, HUBER G, HEUMANN E, et al. Advances in up-conversion lasers based on Er³⁺ and Pr³⁺ [J]. *Opt. Mater.*, 2004, 26(4): 365-374.
- [6] 罗鸿禹. 2~4 微米中红外脉冲光纤激光器研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LUO H Y. *Research on Pulsed Mid-infrared Fiber Laser Operating at 2-4 μm* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [7] ROBINSON M, DEVOR D P. Thermal switching of laser emission of Er³⁺ at 2.69 μ and Tm³⁺ at 1.86 μ in mixed crystals of CaF₂:ErF₃:TmF₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 10(5): 167-170.
- [8] ALLAIN J Y, MONERIE M, POIGNANT H. Erbium-doped fluorozirconate single-mode fibre lasing at 2.71 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1989, 25(1): 28-29.
- [9] ZHU X S, JAIN R. Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(16): 2381-2383.
- [10] ZHU X S, JAIN R. 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(1): 26-28.
- [11] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, et al. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(20): 3062-3064.
- [12] TOKITA S, HIROKANE M, MURAKAMI M, et al. Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71-2.88 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(23): 3943-3945.

- [13] ASHOORI V, MALAKZADEH A. Explicit exact three-dimensional analytical temperature distribution in passively and actively cooled high-power fibre lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, 44(35): 355103.
- [14] BERNIER M, FAUCHER D, CARON N, *et al.* Highly stable and efficient erbium-doped 2.8 μm all fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(19): 16941-16946.
- [15] FAUCHER D, BERNIER M, CARON N, *et al.* Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(21): 3313-3315.
- [16] FAUCHER D, BERNIER M, ANDROZ G, *et al.* 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(7): 1104-1106.
- [17] FORTIN V, BERNIER M, BAH S T, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [18] GOYA K, UEHARA H, KONISHI D, *et al.* Stable 35-W Er:ZBLAN fiber laser with CaF_2 end caps [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(10): 102007.
- [19] AYDIN Y O, FORTIN V, VALLÉE R, *et al.* Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [20] NEWBURGH G A, DUBINSKII M. Power and efficiency scaling of Er:ZBLAN fiber laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2021, 18(9): 095102.
- [21] 黄园芳, 彭跃峰, 魏星斌, 等. 瓦级连续波 2.8 μm 中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502007.
HUANG Y F, PENG Y F, WEI X B, *et al.* Watt-scale continuous wave 2.8 μm mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2012, 39(5): 0502007. (in Chinese)
- [22] 沈炎龙, 黄珂, 朱峰, 等. LD 泵浦瓦级单模高掺铒中红外光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2014, 43(3): 0314002.
SHEN Y L, HUANG K, ZHU F, *et al.* Laser diode-pumped watt-level single mode heavily erbium-doped mid-infrared fiber laser [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2014, 43(3): 0314002. (in Chinese)
- [23] 沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高效率单模中红外 2.8 μm 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502008.
SHEN Y L, HUANG K, ZHOU S Q, *et al.* 10 W-level high efficiency single-mode mid-infrared 2.8 μm fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2015, 42(5): 0502008. (in Chinese)
- [24] 郭春雨, 董繁龙, 沈鹏生, 等. 20 W 中红外 2.8 μm 全光纤激光器研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1416001.
GUO C Y, DONG F L, SHEN P S, *et al.* Research on 20 W mid-infrared 2.8 μm all-fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(14): 1416001. (in Chinese)
- [25] 张钧翔, 付士杰, 盛泉, 等. 33.8 W 高效率中红外 2.8 μm 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2023, 50(7): 0715001.
ZHANG J X, FU S J, SHENG Q, *et al.* Efficient 33.8 W mid-infrared fiber laser operating at 2.8 μm [J]. *Chin. J. Lasers*, 2023, 50(7): 0715001. (in Chinese)
- [26] LUO H Y, LI J, XIE J T, *et al.* High average power and energy microsecond pulse generation from an erbium-doped fluoride fiber MOPA system [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(25): 29022-29032.
- [27] HABOUCHA A, FORTIN V, BERNIER M, *et al.* Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked 2.8 μm Er^{3+} : fluoride glass fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(11): 3294-3297.
- [28] TANG P H, QIN Z P, LIU J, *et al.* Watt-level passively mode-locked Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(21): 4855-4858.
- [29] SHEN Y L, WANG Y S, CHEN H W, *et al.* Wavelength-tunable passively mode-locked mid-infrared Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 14913.
- [30] WEI C, ZHU X S, NORWOOD R A, *et al.* Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser Q-switched by Fe:ZnSe [C]. *Proceedings of the 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, CA, USA*, 2012: 1-2.
- [31] ZHANG T, FENG G Y, ZHANG H, *et al.* 2.78 μm passively Q-switched Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser based on PLD- Fe^{2+} :ZnSe film [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2016, 13(7): 075102.
- [32] WEI C, ZHANG H, SHI H, *et al.* Over 5-W passively Q-switched mid-infrared fiber laser with a wide continuous wavelength tuning range [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2017, 29(11): 881-884.
- [33] NING S G, FENG G Y, ZHANG H, *et al.* Fabrication of Fe^{2+} :ZnSe nanocrystals and application for a passively Q-

- switched fiber laser [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(4): 865-874.
- [34] WEI C, ZHU X S, NORWOOD R A, *et al.* Passively continuous-wave mode-locked Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(18): 3849-3851.
- [35] WEI C, ZHU X S, WANG F, *et al.* Graphene Q -switched 2.78 μm Er^{3+} -doped fluoride fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(17): 3233-3236.
- [36] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, *et al.* Graphene Q -switching of a 3 μm Er :ZBLAN fiber laser [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers 2013, Paris*, 2013: AF2A. 9.
- [37] ZHU G W, ZHU X S, WANG F Q, *et al.* Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, 28(1): 7-10.
- [38] TANG P H, WU M, WANG Q K, *et al.* 2.8- μm pulsed Er^{3+} :ZBLAN fiber laser modulated by topological insulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, 28(14): 1573-1576.
- [39] LIU J, WU M, HUANG B, *et al.* Widely wavelength-tunable mid-infrared fluoride fiber lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2018, 24(3): 0900507.
- [40] JIANG X T, LI W J, HAI T, *et al.* Inkjet-printed MXene micro-scale devices for integrated broadband ultrafast photonics [J]. *npj 2D Mater. Appl.*, 2019, 3(1): 34.
- [41] YI J, DU L, LI J, *et al.* Unleashing the potential of Ti_2CT_x MXene as a pulse modulator for mid-infrared fiber lasers [J]. *2D Mater.*, 2019, 6(4): 045038.
- [42] DUAN Q W, YANG L L, HE Y, *et al.* Layered Ta_2NiS_5 Q -switcher for mid-infrared fluoride fiber laser [J]. *IEEE Photon. J.*, 2021, 13(4): 1500404.
- [43] 叶珊珊, 黄海波, 陈颂元, 等. TiCN 作为可饱和吸收体的 2.8 μm 被动调 Q 锁模光纤激光器 [J]. *光电工程*, 2023, 50(7): 230107.
- YE S S, HUANG H B, CHEN S Y, *et al.* 2.8 μm passively Q -switched mode-locked fiber laser using TiCN as saturable absorber [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2023, 50(7): 230107. (in Chinese)
- [44] BHARATHAN G, XU L Y, JIANG X T, *et al.* MXene and PtSe_2 saturable absorbers for all-fibre ultrafast mid-infrared lasers [J]. *Opt. Mater. Express*, 2021, 11(7): 1898-1906.
- [45] TANG P H, TAO Y, MAO Y L, *et al.* Graphene/ MoS_2 heterostructure: a robust mid-infrared optical modulator for Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2018, 16(2): 020012.
- [46] WANG S W, TANG Y L, YANG J L, *et al.* MoS_2 Q -switched 2.8 μm Er :ZBLAN fiber laser [J]. *Laser Phys.*, 2019, 29(2): 025101.
- [47] CHEN T H, LI Z J, ZHANG C X, *et al.* Indium selenide for Q -switched pulse generation in a mid-infrared fiber laser [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(18): 5893-5898.
- [48] GUO C Y, WEI J C, YAN P G, *et al.* Mode-locked fiber laser at 2.8 μm using a chemical-vapor-deposited WSe_2 saturable absorber mirror [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 13(1): 012013
- [49] QIN Z P, XIE G Q, ZHANG H, *et al.* Black phosphorus as saturable absorber for the Q -switched Er :ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(19): 24713-24718.
- [50] QIN Z P, XIE G Q, ZHAO C J, *et al.* Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(1): 56-59.
- [51] QIN Z P, XIE G Q, MA J G, *et al.* 2.8 μm all-fiber Q -switched and mode-locked lasers with black phosphorus [J]. *Photonics Res.*, 2018, 6(11): 1074-1078.
- [52] FRERICHS C, UNRAU U B. Passive Q -switching and mode-locking of erbium-doped fluoride fiber lasers at 2.7 μm [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1996, 2(4): 358-366.
- [53] ELDER T, STRONG J. The infrared transmission of atmospheric windows [J]. *J. Franklin Inst.*, 1953, 255(3): 189-208.
- [54] TAYLOR J H, YATES H W. Atmospheric transmission in the infrared [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, 47(3): 223-226.
- [55] MAHULIKAR S P, SONAWANE H R, RAO G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2007, 43(7-8): 218-245.
- [56] BEKMAN H H P T, VAN DEN HEUVEL J C, VAN PUTTEN F J M, *et al.* Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques [C]. *Proceedings of SPIE 5615, Technologies for Optical Countermeasures*,

- London, 2004: 27-38.
- [57] KALDOR A, WOODIN R L. Applications of lasers to chemical processing [J]. *Proc. IEEE*, 1982, 70(6): 565-578.
- [58] ESTEROWITZ L, ALLEN R. Rare earth doped IR fiber lasers for medical applications [C]. *Proceedings of SPIE 1048, Infrared Fiber Optics, Los Angeles*, 1989: 129-132.
- [59] PUSHKIN A V, MIGAL E A, UEHARA H, *et al.* Compact, highly efficient, 2.1-W continuous-wave mid-infrared Fe:ZnSe coherent source, pumped by an Er:ZBLAN fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(24): 5941-5944.
- [60] AYDIN Y O, FORTIN V, MAES F, *et al.* Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency [J]. *Optica*, 2017, 4(2): 235-238.
- [61] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [62] BHARATHAN G, WOODWARD R I, AMS M, *et al.* Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(24): 30013-30019.
- [63] HUDSON D D, WILLIAMS R J, WITHFORD M J, *et al.* Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [64] GOYA K, MATSUKUMA H, UEHARA H, *et al.* Plane-by-plane femtosecond laser inscription of first-order fiber Bragg gratings in fluoride glass fiber for *in situ* monitoring of lasing evolution [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(25): 33305-33313.
- [65] 窦京涛, 侯延冰. ZBLAN:Yb³⁺, Tm³⁺双频共激发的上转换发光 [J]. *发光学报*, 2008, 29(1): 85-88.
DOU J T, HOU Y B. Upconversion luminescence of ZBLAN:Yb³⁺, Tm³⁺ co-excited by double-frequency with both 808 and 980 nm lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2008, 29(1): 85-88. (in Chinese)
- [66] LIAO X L, JIANG X B, YANG Q H, *et al.* Spectral properties of Er³⁺/Tm³⁺ co-doped ZBLAN glasses and fibers [J]. *Materials*, 2017, 10(5): 486.
- [67] FRISCHAT G H, HUEBER B, RAMDOHR B. Chemical stability of ZrF₄- and AlF₃-based heavy metal fluoride glasses in water [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2001, 284(1-3): 105-109.



刘永岩(1998-),女,河北邢台人,硕士研究生,2021年于河北工程大学获得学士学位,主要从事中红外激光器的研究。

E-mail: L15531010785@163.com



田颖(1984-),女,山东济南人,博士,教授,2012年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事红外光学玻璃、红外光纤器件应用基础和关键技术的研究。

E-mail: tianying@cjlu.edu.cn