

·特邀综述·

基于掺 Er^{3+} 晶体的 1550 nm 波段全固态激光研究进展

陈雨金, 林炎富, 黄建华, 龚兴红, 罗遵度, 黄艺东*

中国科学院福建物质结构研究所中国科学院光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002

摘要 人眼安全 1550 nm 波段激光位于良好的大气传输窗口, 以及室温工作的 Ge 和 InGaAs 探测器的探测灵敏区, 可被广泛应用于激光雷达、激光测距和遥感测量等领域。利用激光二极管泵浦 Er^{3+} 掺杂晶体是一种直接输出 1550 nm 波段紧凑型全固态激光的有效方法。本文主要综述了近年来采用 Er^{3+} 掺杂晶体作为增益介质的 1550 nm 波段全固态激光的研究进展, 并对该波段激光的进一步发展进行了展望。

关键词 激光光学; 铒激光; 1550 nm 波段激光; 人眼安全激光; 铒掺杂晶体

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500018

Research Progress in 1550-nm All-Solid-State Lasers Based on Er^{3+} -Doped Crystals

Chen Yujin, Lin Yanfu, Huang Jianhua, Gong Xinghong, Luo Zundu, Huang Yidong*

Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract Eye-safe 1550-nm laser is located in an excellent atmospheric transmission window and detection-sensitive region of Ge and InGaAs photodiodes operating at room temperature. Therefore, such laser can be widely used in many fields, including lidar, laser ranging, and remote sensing. Diode-pumped Er^{3+} -doped crystals are considered as an effective method for directly obtaining the compact 1550-nm all-solid-state laser. In this paper, recent research progress in 1550-nm all-solid-state lasers based on Er^{3+} -doped crystals is reviewed. Moreover, further development of 1550-nm all-solid-state lasers is discussed.

Key words laser optics; erbium laser; 1550 nm laser; eye-safe laser; erbium-doped crystal

OCIS codes 140.3500; 140.3380; 140.3480; 140.3580

1 引言

激光二极管 (LD) 泵浦的全固态激光器 (all-solid-state lasers) 具有转换效率高、输出光束质量好、性能稳定、器件坚固耐用和紧凑可靠等优点, 在一些工作环境较恶劣和目标距离较远的野外、工业和军事等领域具有重要的应用价值。采用不同的增益介质和技术方案, 研究人员已经研制出了从紫外、可见到红外等众多输出波长的全固态激光器。其中, 1550 nm 波段激光因具有许多独特优势而受到广泛关注: 1) 该波段激光的人眼安全入射能量远高

于其他波段激光, 被认为是最理想的人眼安全激光; 2) 1550 nm 波段位于良好的大气传输窗口, 对烟、雾的穿透能力强, 特别适合应用于野外和战场环境; 3) 该波段也正好位于石英光纤的最低损耗传输窗口, 是光纤通信系统的最佳工作波长; 4) 该波段还对应于室温工作的 Ge 探测器和 InGaAs 探测器的探测灵敏区, 无需低温制冷即可实现信号的探测和收集。因具有上述诸多优点, 1550 nm 波段全固态激光器在激光雷达、激光测距、遥感测量、光通讯及目标识别等民用和军事领域都具有重要的应用价值^[1-2]。

相对于采用 Nd^{3+} 激光器经光学参量振荡或受

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-09-27; 录用日期: 2019-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0701002)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB20000000)

* E-mail: huyd@fjirsm.ac.cn

激拉曼频移技术间接获得 1550 nm 波段激光而言^[3-5],利用 LD 泵浦 Er^{3+} 掺杂晶体可以直接输出 1550 nm 波段全固态激光,而且技术方案更加简单,器件结构也更加紧凑。图 1 所示为 Er^{3+} 掺杂晶体中 1550 nm 波段激光运转机制简图。第一种技术方案考虑到 Yb^{3+} 离子的 $^2\text{F}_{5/2}$ 与 Er^{3+} 离子的 $^4\text{I}_{11/2}$ 在能级位置上有较大程度的重叠,同时 Yb^{3+} 能级结构简单,理论上不存在上转换和激发态吸收,荧光浓度猝灭效应比较弱,因此可以采用高掺杂浓度的 Yb^{3+} 作为敏化离子来充分吸收入射泵浦能量。利用 980 nm 波段 LD 泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体时, Yb^{3+} 吸

收泵浦能量后通过共振能量传递(resonant energy transfer)使 Er^{3+} 由 $^4\text{I}_{15/2}$ 基态能级跃迁到 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级,再经多声子无辐射弛豫(multi-phonon non-radiative relaxation)过程布居到激光上能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 。第二种技术方案采用 Er^{3+} 单掺晶体作为增益介质,利用 980 nm 波段 LD 泵浦将 Er^{3+} 由 $^4\text{I}_{15/2}$ 基态能级激发到 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级,或者利用 1470 nm(或 1530 nm)波段 LD 泵浦将 Er^{3+} 由 $^4\text{I}_{15/2}$ 基态能级直接激发到 $^4\text{I}_{13/2}$ 激光上能级;然后,通过 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁实现 1550 nm 或(1600 nm)波段的固体激光输出。上述技术方案各有其优缺点,本文将结合具体的晶体种类给予分析。

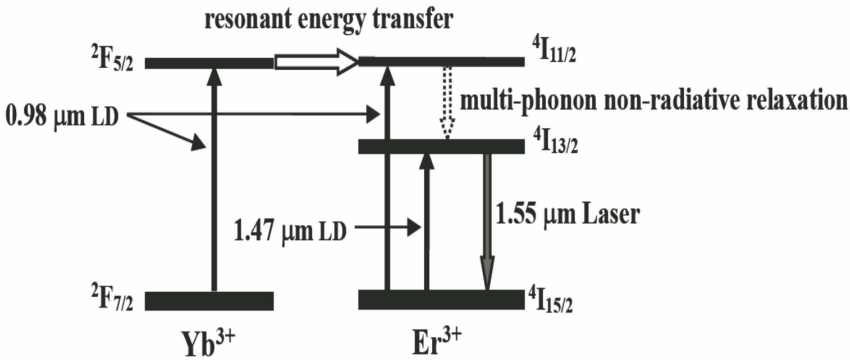


图 1 Er^{3+} 掺杂晶体 1550 nm 波段激光运转机制简图^[2]

Fig. 1 Schematic of 1550 nm laser operation mechanism based on Er^{3+} -doped crystal^[2]

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺磷酸盐玻璃是目前商品化的 1550 nm 波段激光材料。然而,磷酸盐玻璃具有低热导率($\sim 0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)和低激光损伤阈值,难以利用其实现高平均功率输出,最高连续激光输出功率仅为 350 mW^[1, 6]。相对于玻璃而言,晶体一般具有更高的热导率、力学性能和激光损伤阈值,因此采用晶体作为 Er^{3+} 掺杂基质材料是获得高平均功率的 1550 nm 波段激光的一个重要途径。另外,相对于光纤而言,晶体也具有自身独特的优点,比如制备成本低、尺寸小、可实现高浓度的稀土离子掺杂,及高峰值功率激光运转下非线性效应弱等。对于采用 Er^{3+} 单掺和 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体作为增益介质的 1550 nm 波段全固态激光的研究进展,已有一些综述文章对此给予了较为详细的介绍^[1-2, 5-8]。本文将主要介绍近年来在这方面取得的一些重要研究成果,并从材料的角度出发对其存在的问题和发展趋势进行分析和展望。

2 Er^{3+} 掺杂晶体的激光性能

2.1 硼酸盐晶体

根据图 1 所示的激光运转机制简图,在 $\text{Er}^{3+}/$

Yb^{3+} 双掺晶体中,为了实现高效的 1550 nm 波段激光运转,首先必须使处于 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级上的大部分 Er^{3+} 离子能够通过多声子无辐射弛豫快速布居到 $^4\text{I}_{13/2}$ 激光上能级。硼酸盐晶体的最大声子能量约为 1400 cm^{-1} ,在该类晶体中大的多声子无辐射跃迁速率有利于实现 $^4\text{I}_{13/2}$ 激光上能级的高效反转粒子数布居,从而可减弱 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级上粒子的上转换发光,并降低其反向能量传递损耗,有望获得高效的 1550 nm 波段激光运转。

在硼酸盐晶体中特别值得关注的是 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$, $\text{R}=\text{Y}, \text{Gd}$ 和 Lu) 晶体。由于其具有较高的热导率(约 $4.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),以及高的 $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ 能量传递效率(高于 90%)和弱的上转换损耗,该类晶体被认为是目前可同时实现高输出功率($>1.0 \text{ W}$)和高斜率效率($>30\%$)的 1550 nm 波段连续激光运转的一类 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺材料^[9-13]。但是,硼酸盐晶体高的声子能量也导致 Er^{3+} 离子 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 的多声子无辐射跃迁速率较大,同时 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$ 晶体中 Er^{3+} 离子激光上能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 的荧光寿命较短(0.33 ms),荧光量子效率较低(约 7%)^[9-10],再加上 1550 nm 波段激光运转中泵浦光和

基波激光之间存在较大的量子亏损(约 $1 - 976/1550 = 37\%$)等,该类晶体在激光运转过程中会产生较多的热量,导致比较严重的热效应^[14]。因此,在激光运转状态下对上述固体激光器中增益介质内部的温度分布进行实时准确的测量,对优化器件设计进而提升激光运转效果至关重要。

利用 976 nm 的 LD 泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体, Er^{3+} 可以通过上转换过程实现 $^2\text{H}_{11/2}$ 和 $^4\text{S}_{3/2}$ 能级的粒子布居,从而向下跃迁产生上转换绿色可见荧光。本课题组^[15]选择 Er^{3+} 的 $^2\text{H}_{11/2}$ 和 $^4\text{S}_{3/2}$ 能级作为热耦合能级,基于稀土离子热耦合能级的荧光强度比测温原理^[16],提出了一种能够实时测量激光运转状态下增益介质内部温度分布的技术方案,并获得了 1550 nm 波段连续激光运转下 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LuAB}$ 晶体内部沿激光传播方向的温度分布。该测温方案克服了红外相机测温和有限元方法模拟等现有技术无法实时准确地测量增益介质内部温度分布的不足^[17-19]。实验首先利用变温荧光光谱仪测量不同温度下 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LuAB}$ 晶体中热耦合能级跃迁产生的绿色上转换荧光的光谱,获得这两个能级跃迁产生

的荧光的强度比值与晶体温度之间的对应关系(即将此对应关系作为温度标尺);然后将该晶体置于激光谐振腔中,在 976 nm 的 LD 端面泵浦下实现 1550 nm 波段激光运转,并用光纤光谱仪探测激光运转状态下晶体内部沿激光传播方向某一位置处的上转换荧光谱;对比预先得到的荧光强度比值与晶体温度的对应关系,即可得出晶体内部该位置处的温度;通过改变光谱仪探头的位置,逐点扫描即可得到晶体内部沿激光传播方向不同位置处的温度。图 2 所示为实验装置简图。图 3 所示为 1550 nm 波段激光运转时,不同入射泵浦功率下晶体内部不同位置 Z 处的温度,图中 Z 表示沿激光传播方向从晶体入射面到待测点的距离。测量结果表明当入射泵浦功率为 5.11 W 时,晶体内部的最高温度约为 710 K,位于距晶体入射面 0.35 mm 处。该测量温度值与山西大学 Li 等^[19]采用有限元分析法,在相似泵浦条件下模拟 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{YAB}$ 晶体得到的最高温度值较为接近(800 K)。上述结果一方面证明了该测量方法的可靠性,另一方面也表明 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$ 晶体在激光运转过程中确实存在比较严重的晶体热效应。

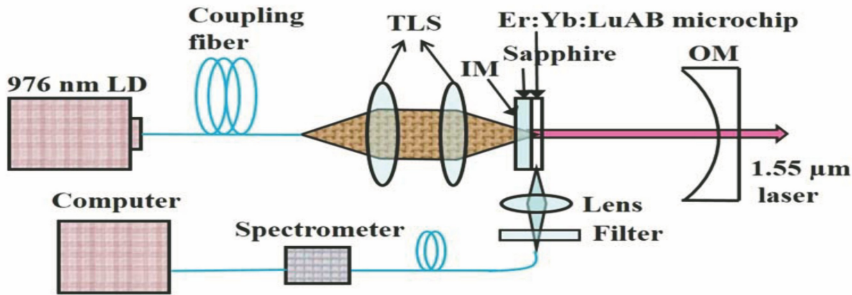


图 2 1550 nm 波段激光运转下, $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LuAB}$ 晶体内部温度分布的测量实验装置简图^[15]

Fig. 2 Experimental setup for measuring the internal temperature distribution of $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LuAB}$ crystal under the operation of 1550 nm laser^[15]

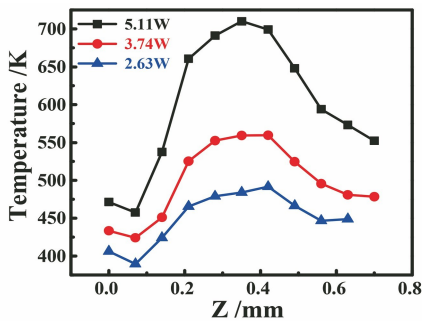


图 3 1550 nm 波段激光运转时,不同入射泵浦功率下 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LuAB}$ 晶体内部不同位置 Z 处的温度^[15]

Fig. 3 Temperatures at different positions Z inside the $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LuAB}$ crystal at different incident pump powers under the operation of 1550 nm laser^[15]

在激光运转过程中,激光晶体一般工作在较高的温度状态下,因此亟需了解晶体在高温区域的光谱性能,进而深入分析其对激光输出性能的影响。以往晶体光谱的研究工作大都集中在室温和低温区域。本课题组^[20]利用中国科学院福建物质结构研究所开发出的新型高温晶体吸收和荧光光谱测试系统,测量了高温区不同温度下 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{YAB}$ 晶体的光谱,发现其吸收和发射特性随温度发生了较大的变化。图 4(a)~(d)分别给出了 300~800 K 温度范围内 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{YAB}$ 晶体 σ 偏振方向的 900~1040 nm 吸收截面谱、1450~1650 nm 发射截面谱、1500~1620 nm 的增益截面谱,以及 Er^{3+} 离子多重态能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 的荧光寿命。当晶体温度从 300 K 增

加到 800 K 时, 976 nm 峰值波长处的吸收截面从 $2.67 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 降低到 $1.26 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 1523 nm 峰值波长处的发射截面从 $1.51 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 降低到 $0.73 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 具有最大增益截面值的发射波长从 1603 nm 蓝移到 1554 nm, Er^{3+} 离子多重态能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 的荧光寿命则从 330 μs 缩短到 247 μs 。另

外随着温度的提高, 晶体光谱发生展宽并变得更加平坦光滑, 比如 976 nm 吸收带的半峰全宽 (FWHM) 从 18 nm 增加到 35 nm。这些实验结果不仅有助于解释在激光实验中观察到的一些现象, 同时也可作为晶体热效应的分析研究和激光器件的优化设计提供帮助。

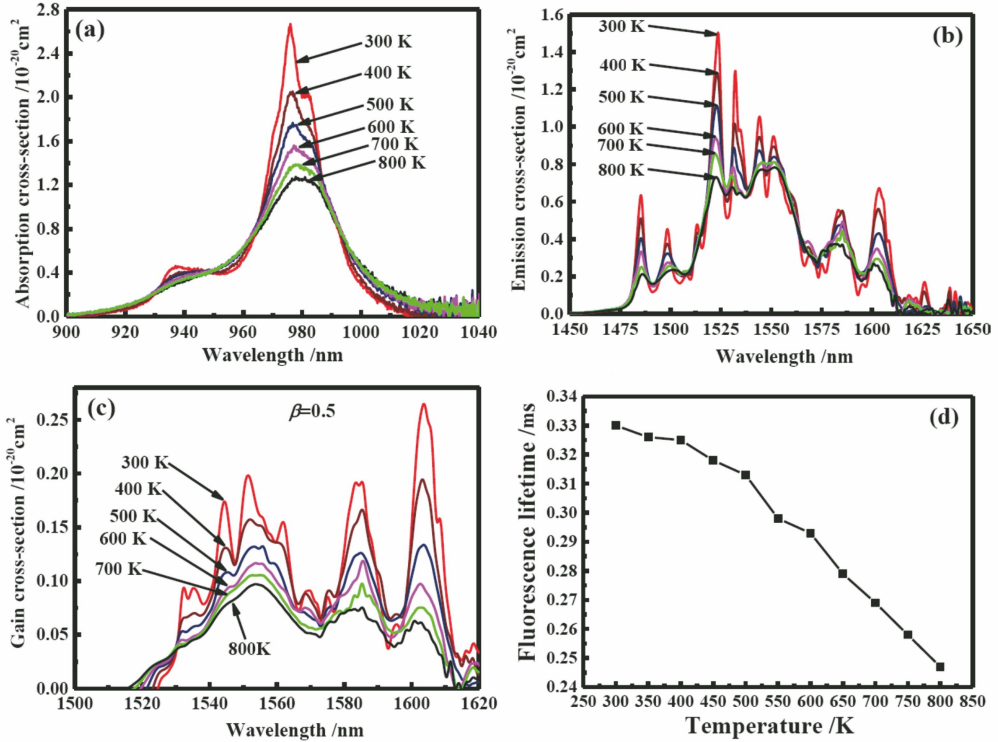


图 4 300~800 K 温度范围内 Er:Yb:YAB 晶体的光谱性质^[20]。(a) σ 偏振方向 900~1040 nm 吸收截面谱; (b) σ 偏振方向 1450~1650 nm 发射截面谱; (c) σ 偏振方向 1500~1620 nm 增益截面谱 (反转参数 $\beta=0.5$); (d) Er^{3+} 离子多重态能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 的荧光寿命

Fig. 4 Spectroscopic properties of the Er:Yb:YAB crystal in 300~800 K^[20]. (a) Absorption cross-section spectra in σ -polarized direction from 900 nm to 1040 nm; (b) emission cross-section spectra in σ -polarized direction from 1450 nm to 1650 nm; (c) gain cross-section spectra in σ -polarized direction from 1500 nm to 1620 nm (inversion parameter $\beta=0.5$); (d) fluorescence lifetime of $^4\text{I}_{13/2}$ of Er^{3+}

将激光晶体与具有更高热导率的同基质甚至异基质空白晶体通过键合方式结合在一起, 是一种能有效减弱晶体热效应的技术手段^[21-22]。基于热扩散键合技术, 一些高光学质量的 1000 nm 波段键合激光晶体, 比如 Nd:YAG/YAG、Nd:YVO₄/YVO₄ 和 Yb:YAG/YAG 等^[21, 23], 已经被研制出来并实现了商品化。为了降低晶体热效应, 提高 1550 nm 波段激光输出性能, 本课题组^[24]在国际上首次制备出了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺键合激光晶体。相对于 Er:Yb:YAB 晶体, 纯的 YAB 基质晶体具有更高的热导率 ($11 \sim 12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)^[25]。本课题组^[24]将一块 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 的 Er(1.1%):Yb(25%):YAB 晶体与一块 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的纯 YAB

晶体通过热扩散方法键合在一起, 如图 5(a) 所示, 其中 1.1% 和 25% 表示原子数分数, 下同。在平凹腔中采用 976 nm 的 LD 端面泵浦 1.4 mm 厚的 Er:Yb:YAB/YAB 键合晶体, 1550 nm 波段连续激光最高输出功率达到 780 mW, 斜率效率为 28%。而对于具有相同稀土离子掺杂浓度的 0.4 mm 厚的 Er:Yb:YAB 晶体, 在同样实验条件下, 连续激光最高输出功率只有 350 mW, 如图 5(b) 所示。为了进一步减弱晶体热效应, 本课题组^[26]还利用具有更高热导率 (约 $42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 的蓝宝石 (sapphire) 晶体作为热沉, 在一块 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的 Er(1.4%):Yb(13%):YAB 晶体和两块 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 的蓝宝石晶体的接触面上分别镀上

SiO₂ 膜,然后通过热扩散方法键合在一起,如图 6 (a)所示。在平凹腔中采用 976 nm 的 LD 端面泵浦 sapphire/Er: Yb: YAB/sapphire 键合晶体, 1550 nm 波段连续激光最高输出功率达到 1.75 W, 斜率效率为 36%。而对于具有相同稀土离子掺杂浓度的 1.5 mm 厚的 Er: Yb: YAB 晶体,在同样实验

条件下,连续激光最高输出功率只有 1.45 W,斜率效率为 28%,如图 6(b)所示。继续优化键合制备过程的工艺参数,进一步提高 Er: Yb: YAB/YAB 和 sapphire/Er: Yb: YAB/sapphire 键合晶体的键合光学质量,将有助于实现更高输出功率和更高斜率效率的 1550 nm 波段连续激光输出。

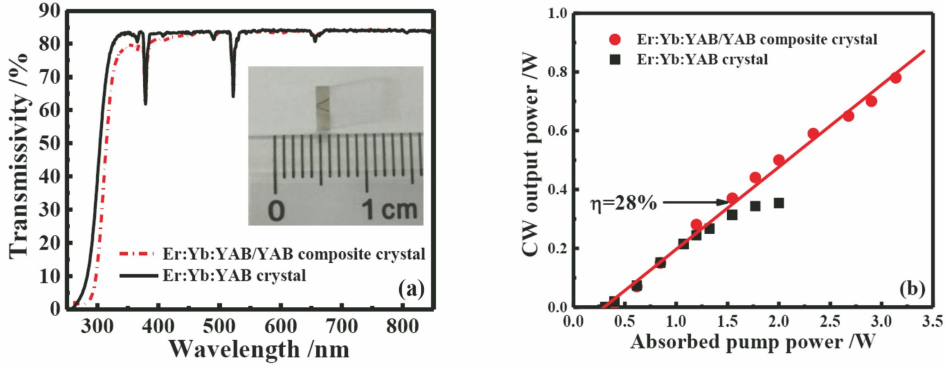


图 5 Er:Yb:YAB/YAB 键合晶体^[24]。(a)键合晶体图片及Er:Yb:YAB/YAB和Er:Yb:YAB晶体在250~850 nm 的透过谱;(b)同样实验条件下Er:Yb:YAB/YAB和Er:Yb:YAB晶体1550 nm 波段连续激光性能
Fig. 5 Diffusion-bonded Er:Yb:YAB/YAB composite crystal^[24]. (a) Picture of the composite crystal, and transmission spectra of Er:Yb:YAB/YAB and Er:Yb:YAB crystals in 250–850 nm; (b) 1550 nm CW laser performances of Er:Yb:YAB/YAB and Er:Yb:YAB crystals under the same experimental condition

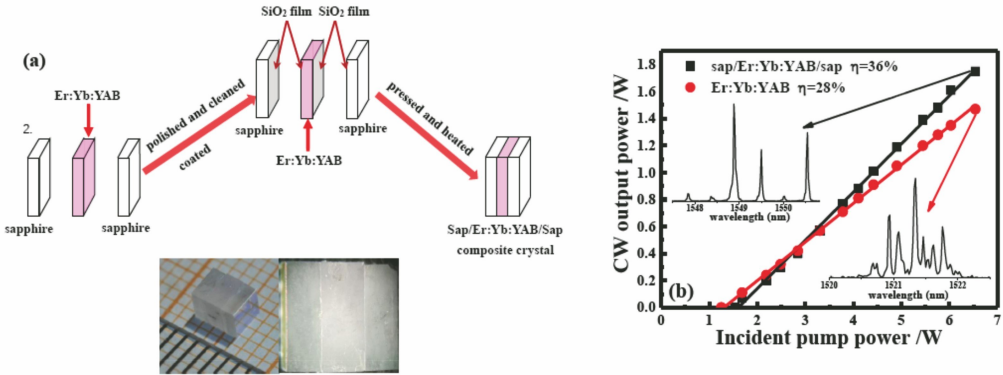


图 6 sapphire/Er:Yb:YAB/sapphire 键合晶体^[26]。(a)键合制备过程及晶体图片;
(b)同样实验条件下 sapphire/Er:Yb:YAB/sapphire 和Er:Yb:YAB 晶体1550 nm 波段连续激光性能
Fig. 6 Diffusion-bonded sapphire/Er:Yb:YAB/sapphire composite crystal^[26]. (a) Bonding preparation process and picture of the composite crystal; (b) 1550 nm CW laser performances of sapphire/Er:Yb:YAB/sapphire and Er:Yb:YAB crystals under the same experimental condition

为了避免复杂的晶体键合工艺,本课题组^[27]仍采用蓝宝石晶体作为热沉,将 Er (1.5%) : Yb(12%):YAB 晶体置于两块蓝宝石晶体中间,利用机械压紧的简便方式直接使这些晶体紧密贴合在一起,研制出类似三明治结构的微型激光器件。在 976 nm 的 LD 端面泵浦下,1550 nm 连续激光最高输出功率达到 2.05 W,斜率效率为 39.8%,如图 7 (a)所示,这是目前文献报道的在 Er³⁺/Yb³⁺ 双掺晶体激光器中获得的最高斜率效率值。相比于

sapphire/Er:Yb:YAB/sapphire 键合晶体,本技术方案获得了更优的激光输出性能,这可能是由键合晶体中的 SiO₂ 膜增加了晶体损耗导致的。在此基础上,将 Co²⁺:MgAl₂O₄ 晶体作为饱和吸收体插入 Er:Yb:YAB 和蓝宝石晶体中间,实现了被动调 Q 的 1520 nm 脉冲微型激光运转,结果如图 7(b)所示,获得的脉冲激光最高平均输出功率为 790 mW,能量约为 10 μJ,脉宽为 7.0 ns,最高重复频率达到 77 kHz^[27]。如果进一步提高泵浦功率,有望实现

百 kHz 量级高重复频率的脉冲激光输出。另外, Er:Yb:YAB 晶体中较短的 $^4I_{13/2}$ 激光上能级荧光寿命(0.33 ms)导致其储能能力较弱,限制了其脉冲激光输出能量。基于一种同步积累(synchronic accumulation)的统计检测技术, Młyńczak 等^[28]利用输出能量约 20 μJ 、重复频率 1~4 kHz、脉宽 10~12 ns 的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺磷酸盐玻璃 1535 nm 被动调 Q 脉冲微型激光作为探测光源,研制出了一台最远测量距离可达 6.7 km 的激光测距仪原型

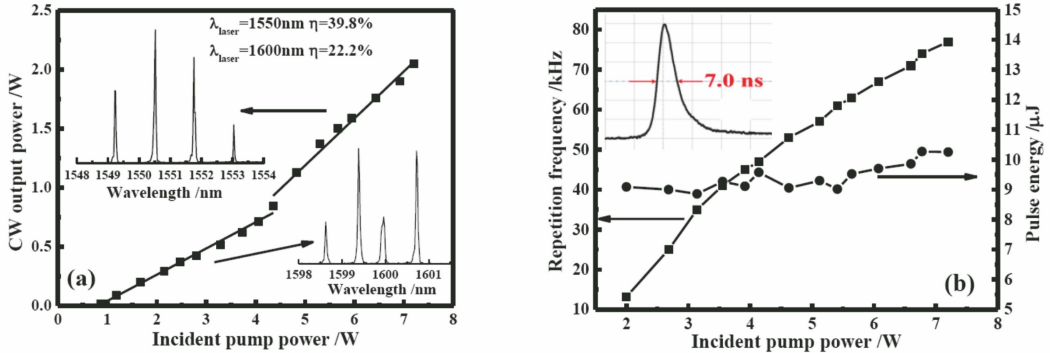


图 7 Er:Yb:YAB 三明治结构微型激光性能^[27]。(a)连续激光;(b)被动调 Q 脉冲激光

Fig. 7 Performance of micro-laser with Er:Yb:YAB of sandwich-structure^[27].

(a) CW laser; (b) passively Q-switched pulse laser

1550 nm 全固态连续单频激光具有窄线宽和低噪音等优点,在量子信息、光频标、光学精密测量以及高分辨率光谱等领域有着广泛的应用需求。山西大学 Li 等^[19]将 0.3 mm 厚的石英片作为标准具插入 Er:Yb:YAB 激光腔中,在国际上率先实现了高输出功率的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺 1550 nm 低噪声连续单频激光,最高输出功率达到 400 mW,线宽为 1 MHz,激光器的强度噪音在分析频率 4 MHz 处达到散粒噪音极限。山西大学朱海瑞等^[30]进一步采用扭摆模腔选模技术,通过设计谐振腔的镀膜参数并调控谐振腔的增益损耗关系,在 Er:Yb:YAB 晶体中获得了输出功率 420 mW 的 1542 nm 连续单频激光,激光器的强度噪音在分析频率 3 MHz 处即达到散粒噪音极限。通过腔内 LiNbO_3 电光晶体和电光标准具调控谐振腔的腔长,他们进一步实现了激光在 1541.959~1542.014 nm 范围内的准连续调谐^[30]。

Gorbachenya 等^[31]也对 Er:Yb:GdAB 晶体的连续激光和被动调 Q 脉冲激光性能开展了研究,利用 976 nm 的 LD 在 Z 型腔中端面泵浦 1.5 mm 厚的 $\text{Er}(1.8\%):\text{Yb}(15\%):\text{GdAB}$ 晶体,实现了最高输出功率为 1.7 W、斜率效率为 36% 的连续激光运

机。因此,如果进一步优化 Er:Yb:YAB 被动调 Q 脉冲微型激光性能,并将其作为测距仪的探测光源,有望提高测距仪的测距性能。另外,本课题组^[29]将 $\text{Er}(1.1\%):\text{Yb}(20.7%):\text{GdAB}$ 晶体与一块蓝宝石晶体通过机械压紧的方式贴合在一起,获得了最高输出功率 750 mW、斜率效率 36% 的 1522 nm 连续激光,以及脉冲能量 136 μJ 、重复频率 1 kHz、脉宽 50 ns 的 1522 nm 声光主动调 Q 脉冲激光。

转,以及最高输出峰值功率为 3.5 W、斜率效率为 36% 的准连续 1550 nm 激光运转。利用 Er:Yb:GdAB/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 键合晶体, Gorbachenya 等^[32]还研制出了非常紧凑(腔长 2~3 mm)的 1550 nm 波段被动调 Q 微型激光器。在 976 nm 的 LD 连续泵浦下,获得了 15 μJ 能量、4 ns 脉宽和 21 kHz 重复频率的 1522 nm 脉冲激光;而在准连续 LD 泵浦下,脉冲激光能量达到 27 μJ ,脉宽为 2.8 ns,峰值输出功率约 10 kW,这也是目前文献报道的在 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体激光器中获得的最高被动调 Q 脉冲峰值功率^[32]。在同样泵浦条件下, Gorbachenya 等^[32]也比较了 Er:Yb:GdAB/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 和 Er:Yb:glass/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 这两种微型激光器的脉冲性能,发现:两者的脉冲能量和宽度基本相似,但 Er:Yb:GdAB/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 可以实现更高重复频率和平均输出功率的脉冲激光;然而,Er:Yb:glass/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 激光器的脉冲能量更容易随着泵浦光斑直径的增大而提高,比如当泵浦光斑直径为 350 μm 时,在准连续 976 nm 的 LD 泵浦下,Er:Yb:GdAB/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 无法实现脉冲激光运转,而 Er:Yb:glass/ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 则可实现 150 μJ 能量和 2.9 ns 脉宽的单脉冲激光

运转。

除 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体外, Gorbachenya 等^[33-34]还分别采用单层石墨烯和单壁碳纳米管薄膜作为饱和吸收体,对 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{GdAB}$ 晶体的被动调 Q 脉冲激光性能开展了研究。利用这些新型饱和吸收体,可以实现 400~500 kHz 高重复频率的 1550 nm 脉冲激光,但目前获得的激光能量还较低,只有 0.8~0.9 μJ 。另外,他们还利用通过分子束外延技术获得的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 薄膜作为饱和吸收体,实现了 9.2 μJ 能量、8 ns 脉宽和 42 kHz 重复频率的 1522 nm 脉冲激光^[35]。

除了 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$ 晶体外,还有其他一些新型的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺硼酸盐晶体被开发出来。中科院福建物质结构研究所 Huang 等^[36-37]采用熔盐法生长获得了一类具有较高热导率 (4.4~5.0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) 的 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RMgB}_5\text{O}_{10}$ ($\text{Er}:\text{Yb}:\text{RMB}$, $R=\text{La}$ 和 Gd) 晶体。 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LaMB}$ 晶体属于单斜晶系,空间群为 $\text{P}2_1/\text{c}$,在 977 nm 峰值吸收波长处 $\mathbf{E}\parallel\text{X}$ 、 $\mathbf{E}\parallel\text{Y}$ 和 $\mathbf{E}\parallel\text{Z}$ (\mathbf{E} 为光的电场矢量) 偏振方向的吸收截面分别为 1.48×10^{-20} , 1.6×10^{-20} , 1.68×10^{-20} cm^2 ,在 1518 nm 峰值荧光波长处 $\mathbf{E}\parallel\text{X}$ 、 $\mathbf{E}\parallel\text{Y}$ 和 $\mathbf{E}\parallel\text{Z}$ 偏振方向的发射截面分别为 0.63×10^{-20} , 0.72×10^{-20} , 0.88×10^{-20} cm^2 。上述参数值尽管低于 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$ 晶体,但与 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{磷酸盐玻璃}$ 基本相当。 $\text{Er}(0.68\%):\text{Yb}(7.51\%):\text{LaMB}$ 晶体中 Er^{3+} 离子多重态能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 的荧光寿命为 538 μs ,高于 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$ 晶体的寿命值 330 μs ,显示出更强的能量储存能力。然而,目前该晶体中的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂浓度还未经优化,导致其 $\text{Yb}^{3+}\rightarrow\text{Er}^{3+}$ 的能量传递效率仅为 82%。本课题组^[38-39]利用 976 nm 的 LD 在平凹腔中端面泵浦 2.0 mm 厚 X 切片该晶体,分别实现了 610 mW 输出功率、23% 斜率效率的 1566 nm 连续激光,以及 168 μJ 能量、270 ns 脉宽、0.5 kHz 重复频率的 1556 nm 声光主动调 Q 脉冲激光。通过进一步优化该晶体中的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂浓度,有望提高其激光输出性能。

在 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$ 、 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ 、 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{Sr}_3\text{R}_2(\text{BO}_3)_4$ ($R=\text{Y}$ 、 Gd 和 Lu)、 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{Ca}_3\text{R}_2(\text{BO}_3)_4$ 和 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ ($R=\text{Y}$ 和 Gd) 等晶体中也实现了 1550 nm 波段的激光运转^[7-8,40]。然而,这些晶体的热导率较低且各向异性比较明显,在激光运转过程中热效应比较严重,目前还仅能用于实现准连续或低功率连续激光运转。

2.2 硅酸盐晶体

硅酸盐晶体具有高的物化稳定性,而且力学性能良好,是一类被广泛研究的激光基质材料^[41]。该类晶体的最高声子能量为 1000~1100 cm^{-1} ,接近磷酸盐玻璃的最高声子能量 (1200~1300 cm^{-1}),因此其 Er^{3+} 相邻能级间的多声子无辐射跃迁概率、 $\text{Yb}^{3+}\rightarrow\text{Er}^{3+}$ 能量传递效率,以及相应能级的上转换发光等光谱性能参数也与磷酸盐玻璃比较接近,是一类值得关注的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺 1550 nm 波段激光材料。

$\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (LPS) 晶体属于单斜晶系,空间群为 $\text{C}2/\text{m}$,具有高的热导率 (约为 14 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)^[42],是一种被广泛研究的闪烁体材料和激光基质材料^[43-44]。本课题组^[45]采用提拉法生长获得了 $\text{Er}(0.5\%):\text{Yb}(5%):\text{LPS}$ 晶体。该晶体在 977 nm 峰值吸收波长处 $\mathbf{E}\parallel\text{X}$ 、 $\mathbf{E}\parallel\text{Y}$ 和 $\mathbf{E}\parallel\text{Z}$ 偏振方向的吸收截面分别为 1.32×10^{-20} , 0.77×10^{-20} , 1.57×10^{-20} cm^2 ,在 1537 nm 峰值荧光波长处 $\mathbf{E}\parallel\text{X}$ 、 $\mathbf{E}\parallel\text{Y}$ 和 $\mathbf{E}\parallel\text{Z}$ 偏振方向的发射截面分别为 0.85×10^{-20} , 1.2×10^{-20} , 0.81×10^{-20} cm^2 。晶体中 Er^{3+} 离子多重态能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 和 $^4\text{I}_{13/2}$ 的荧光寿命分别为 8.33 μs 和 8.68 ms, $\text{Yb}^{3+}\rightarrow\text{Er}^{3+}$ 的能量传递效率可达到 85%。表 1 列出了 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LPS}$ 晶体和商品化的 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{磷酸盐玻璃}$ 的一些光谱参数,可以看出这两种材料中与 1550 nm 波段激光运转密切相关的一些光谱参数非常相近,但 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LPS}$ 晶体的热导率比磷酸盐玻璃高了一个数量级。本课题组^[46]将 1.2 mm 厚的 Y 切片 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LPS}$ 晶体置于两块蓝宝石晶体中间,研制出了三明治结构的微型激光器件,利用 976 nm 的 LD 端面泵浦,实现了最高输出功率 940 mW 和斜率效率 20% 的 1564 nm 多纵模连续激光,如图 8(a) 所示。另外,基于 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LPS}$ 晶体具有窄的 1537 nm 增益带宽 (FWHM 为 1.6 nm) 的特点,利用该晶体自身的标准具效应,还在高的输出镜透过率下 (6%) 实现了最高输出功率 440 mW 和斜率效率 12% 的 1537 nm 单纵模连续激光运转^[46],如图 8(b) 所示。 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{磷酸盐玻璃}$ 具有长的激光上能级荧光寿命,储能能力较强,可用于实现高能量的脉冲激光输出,但其较低的热导率和激光损伤阈值严重限制了其脉冲激光运转性能,一般只在低重复频率下工作。 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{LPS}$ 晶体的热导率高,获得的连续激光输出功率远高于 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{磷酸盐玻璃}$,是目前文献报道的在具有大于 1.0 ms 激光上能级荧光寿命的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体中获得的最高

输出功率值。由于具有长的激光上能级荧光寿命、高的热导率和良好的激光运转效果,Er:Yb:LPS晶

体应该是一种能够实现高能量1550 nm波段脉冲激光输出的优秀增益介质。

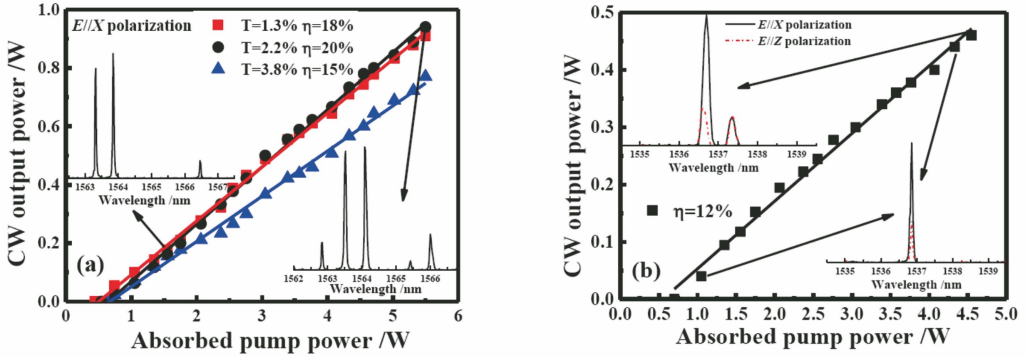


图 8 Er:Yb:LPS 晶体的激光性能^[46]。(a) 1564 nm 多纵模连续激光;(b) 1537 nm 单纵模连续激光
Fig. 8 Laser performances of Er:Yb:LPS crystal^[46]. (a) 1564 nm multi-longitudinal-mode CW laser;
(b) 1537 nm single-longitudinal-mode CW laser

表 1 Er:Yb:LPS 晶体和Er:Yb:磷酸盐玻璃的一些光谱参数

Table 1 Some spectroscopic parameters of Er:Yb:LPS crystal and Er:Yb:phosphate glass

Paramter	Er:Yb:LPS crystal	Er:Yb:phosphate glass
Peak absorption wavelength λ_p /nm	978	976
Absorption cross-section at $\lambda_p/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	1.32 (E//X), 0.77 (E//Y), 1.57 (E//Z)	1.0
FWHM at λ_p /nm	6	10
Peak fluorescence wavelength λ_1 /nm	1537	1535
Emission cross-section at $\lambda_1/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	0.85(E//X), 1.2 (E//Y), 0.81 (E//Z)	0.8
Fluorescence lifetime of $^4I_{11/2}/\mu\text{s}$	8.33	2-3
Fluorescence lifetime of $^4I_{13/2}/\text{ms}$	8.68	7-8
$\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ energy transfer efficiency /%	85	>90
Refractive index at λ_1	1.75(E//X), 1.73(E//Y), 1.7(E//Z)	1.54
Thermal conductivity $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	14.28 (E//X), 9.39 (E//Y), 10.98(E//Z)	0.8

Ca₃NbGa₃Si₂O₁₄ (CNGS) 晶体属于三方晶系,为单轴晶,空间群为 P321。尽管该晶体的热导率仅约为 $1.82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,但其三个晶轴方向的热膨胀系数几乎相同,为 $5.49 \times 10^{-6} \sim 5.92 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,且具有较高的比热 ($0.83 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),因此稀土离子(如 Nd³⁺、Yb³⁺ 或 Tm³⁺)掺杂的 CNGS 晶体可用于实现高功率的连续激光运转^[47-48]。另外,相关研究表明在 Er³⁺ 掺杂晶体中共掺入 Ce³⁺,可通过声子辅助能量传递 $\text{Er}^{3+} (^4I_{11/2}) + \text{Ce}^{3+} (^2F_{5/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} (^4I_{13/2}) + \text{Ce}^{3+} (^2F_{7/2})$ 来增大 Er³⁺ 离子 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 的能级跃迁概率,缩短多重态能级 $^4I_{11/2}$ 的荧光寿命,从而明显减弱多重态能级 $^4I_{11/2}$ 的上转换发光和 $\text{Er}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的反向能量传递损耗,实现 $^4I_{13/2}$ 激光上能级的高效反转粒子数布居,提高 1550 nm 波段激光输出性能^[49]。本课题组^[50]采用提拉法生长获得了 Er (0.73%) : Yb (1.29%) : Ce (3.04%) : CNGS 晶体。该晶体在 978 nm 峰值吸收波长处 σ 和 π 偏振方向的吸收截面分别为 $3.28 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和

$2.08 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,在 1533 nm 峰值荧光波长处 α 、 σ 和 π 偏振方向的发射截面分别为 0.79×10^{-20} , 0.76×10^{-20} , $0.67 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。晶体中 Er³⁺ 离子多重态能级 $^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 的荧光寿命分别为 23.2 μs 和 5.76 ms, $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ 的能量传递效率可达到 79%。尽管该晶体的光谱性能参数略逊于 Er:Yb:LPS 晶体,但其生长温度(约 1345 $^{\circ}\text{C}$)远低于 Er:Yb:LPS 晶体(约 1900 $^{\circ}\text{C}$),可有效降低晶体生长难度和成本,因此也是一种具有潜在应用价值的 1550 nm 波段激光材料。利用 976 nm 的 LD 端面泵浦 2.5 mm 厚 c 切片 Er:Yb:Ce:CNGS 晶体,实现了最高输出功率 202 mW 和斜率效率 11.4% 的 1556 nm 连续激光^[50]。由于该晶体中较低的 Yb³⁺ 掺杂浓度限制了 $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ 的能量传递效率和晶体对入射泵浦功率的吸收效率,因此目前所实现的激光运转性能还较差。如果进一步优化该晶体中的稀土离子掺杂浓度,有望实现更优性能的 1550 nm 波段激光输出。

Jaffrès 等^[51]采用提拉法生长获得了Er:Yb:Ce:Ca₂Al₂SiO₇(Er:Yb:Ce:CAS)晶体。该晶体属于四方晶系,单轴晶,空间群为P-42₁m,热导率约为2.2 W·m⁻¹·K⁻¹。该晶体在978 nm 峰值吸收波长处σ和π偏振方向的吸收截面分别为2.75×10⁻²⁰ cm²和1.74×10⁻²⁰ cm²,在1535 nm 峰值荧光波长处σ和π偏振方向的发射截面分别为0.8×10⁻²⁰ cm²和1.25×10⁻²⁰ cm²,Er³⁺离子⁴I_{11/2}和⁴I_{13/2}能级的荧光寿命分别为41 μs和8 ms,Yb³⁺→Er³⁺的能量传递效率可达到75%^[51]。利用980 nm的LD泵浦2.8 mm厚c切片Er:Yb:Ce:CAS晶体,实现了最高输出功率275 mW和斜率效率9.8%的1555 nm连续激光输出^[51],并采用声光主动调Q技术,实现了能量1.5 mJ和脉宽40 ns的单脉冲激光输出^[52],这是目前文献报道的Er³⁺/Yb³⁺双掺晶体激光器的声光调Q最高脉冲能量。

另外,在其他Er³⁺/Yb³⁺双掺硅酸盐晶体中,比如Y₂SiO₅、SrY₄(SiO₄)₃O和Sc₂SiO₅,也实现了1550 nm波段激光运转,但目前输出功率和斜率效率还都较低^[7]。总体而言,由于硅酸盐晶体中Er³⁺离子⁴I_{13/2}激光上能级的荧光寿命均较长,因此Er³⁺/Yb³⁺双掺硅酸盐晶体具有较强的能量储存能力,有利于实现高能量的1550 nm波段脉冲激光输出。然而,Er³⁺/Yb³⁺双掺硅酸盐晶体较大的上转换损耗也导致其激光运转效率低于Er³⁺/Yb³⁺双掺硼酸盐晶体和磷酸盐玻璃。

2.3 钨酸盐、钒酸盐和YAG晶体

钨酸盐、钒酸盐和YAG晶体的最高声子能量较低,仅为700~900 cm⁻¹。在Er³⁺/Yb³⁺双掺晶体中,处于⁴I_{11/2}能级的大部分Er³⁺离子无法通过多声子弛豫快速布居到⁴I_{13/2}能级,导致了低的Yb³⁺→Er³⁺能量传递效率和高的上转换损耗,极大降低了这类双掺晶体的1550 nm波段激光输出性能。例如在Er:Yb:KR(WO₄)₂(R=Y和Lu)晶体中,1550 nm波段连续激光的最高斜率效率只有1.6%,最高输出功率仅约为80 mW^[53];Er³⁺/Yb³⁺双掺YAG和YVO₄晶体1550 nm波段连续激光的最高输出功率也分别仅有30 mW和125 mW,斜率效率分别仅为7%和5.4%^[54-55]。为了提高这些具有低声子能量的Er³⁺/Yb³⁺双掺晶体的1550 nm波段激光性能,采用在双掺晶体中再掺入Ce³⁺的技术方案,通过声子辅助能量传递Er³⁺(⁴I_{11/2})+Ce³⁺(²F_{5/2})→Er³⁺(⁴I_{13/2})+Ce³⁺(²F_{7/2})来增大Er³⁺离子⁴I_{11/2}→⁴I_{13/2}的跃迁概率,从而可实现激光上能

级⁴I_{13/2}反转粒子数的高效布居^[49]。

本课题组^[49,56]采用提拉法生长了Er:Yb:Ce:NaR(WO₄)₂(Er:Yb:Ce:NRW,R=Y和Gd)晶体。研究表明,当将原子数分数43%的Ce³⁺掺杂进Er(1.0%):Yb(10.7%):NGdW晶体后:多重态能级⁴I_{11/2}的荧光寿命从130 μs大幅降低到7 μs,而多重态能级⁴I_{13/2}的荧光寿命降低的幅度相对较小,从4.07 ms变为3.05 ms;Er:Yb:Ce:NGdW晶体的上转换发光相比Er:Yb:NGdW晶体明显减弱,Yb³⁺→Er³⁺的能量传递效率从Er:Yb:NGdW晶体中的36%增加到Er:Yb:Ce:NGdW晶体中的93%^[49]。利用970 nm的LD端面泵浦1.7 mm厚c切片Er:Yb:Ce:NGdW晶体,实现了最高输出功率为2.0 W、斜率效率为19%的1590 nm准连续激光输出,以及能量22 μJ、脉宽76 ns、重复频率21 kHz的1532 nm被动调Q脉冲激光输出^[49,57]。实验结果证实了在Er³⁺/Yb³⁺双掺低声子能量晶体中共掺入Ce³⁺可以大幅提高其1550 nm波段激光性能的理想,为实现Er³⁺/Yb³⁺双掺低声子能量晶体的高效激光运转提供了新的技术思路。Tsang等^[58]研究了Ce³⁺掺杂对Er(0.69%):Yb(3%):YVO₄晶体1550 nm波段激光性能的影响。尽管掺杂原子数分数1.0%的Ce³⁺后,该晶体上转换发光明显减弱,Yb³⁺→Er³⁺的能量传递效率也从Er:Yb:YVO₄晶体中的56%增加到78%。然而,Er:Yb:Ce:YVO₄晶体1550 nm波段准连续激光运转的斜率效率却从不掺杂Ce³⁺时的6.7%降低到1.2%。激光运转效率降低的原因可能是掺杂Ce³⁺后晶体中的生长缺陷增加,以及晶体中一些离子(如Ce³⁺和V⁵⁺)发生变价(如Ce⁴⁺和V³⁺)。

为了避免低的Yb³⁺→Er³⁺能量传递效率,以及Yb³⁺高浓度掺杂导致晶体热导率降低等因素对1550 nm波段激光性能的影响,研究人员也利用980 nm波段LD直接泵浦具有低声子能量的Er³⁺单掺晶体,Er³⁺被激发到⁴I_{11/2}能级后通过无辐射弛豫布居到激光上能级⁴I_{13/2},然后通过⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}跃迁实现1550 nm波段的激光输出。目前,采用这种技术方案实现1550 nm波段激光输出的晶体主要有Er:YVO₄、Er:GdVO₄和Er:KLu(WO₄)₂^[59-61]。Šulc等^[59]采用977 nm的LD端面泵浦3.1 mm厚的a切片Er(0.5%):YVO₄晶体,实现了输出功率380 mW和斜率效率24%的1602 nm连续激光输出。Newburgh等^[60]采用976 nm的LD泵浦10 mm厚的a切片Er(0.5%):YVO₄晶体,实现了

输出功率为 9 W 的 π 偏振 1603 nm 准连续激光, 获得的斜率效率 39% 为目前文献报道的该技术方案的最高值。对于这种技术方案, Er^{3+} 单掺低声子能量晶体中处于 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级的大部分 Er^{3+} 离子, 同样无法通过多声子无辐射弛豫快速布居到激光上能级 $^4\text{I}_{13/2}$, 上转换损耗在很大程度上限制了其 1550 nm 波段激光的运转效率。

利用 1470 nm 或 1530 nm 波段 LD 泵浦 Er^{3+} 单掺晶体, 可以将 Er^{3+} 从 $^4\text{I}_{15/2}$ 基态能级直接激发到 $^4\text{I}_{13/2}$ 激光上能级, 即所谓的共振泵浦方案 (resonant pumping 或 in-band pumping)^[2,62], 然后通过 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁实现 1600 nm 波段的固体激光输出。这种泵浦方案可以简化激光运转机制, 避免 $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ 能量传递过程和 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级的上转换损耗, 同时由于泵浦波长和激光发射波长非常接近, 量子亏损低, 可以有效降低晶体的热效应, 实现高效和高功率激光输出。目前, 这方面的研究报道主要集中在 $\text{Er}:\text{YAG}$ 、 $\text{Er}:\text{YLuAG}$ 和 $\text{Er}:\text{YVO}_4$ 晶体中, 相关的一些研究进展可见参考文献[2,7]。利用窄线宽(约 1 nm)1532 nm 光纤耦合 LD 的发射带与 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体吸收带更加匹配的优点, 中国科学院上海光学精密机械研究所的 Zhu 等^[63] 在 40 mm 长的 $\text{Er}(0.25\%):\text{YAG}$ 晶体中获得了输出功率 10.2 W 和斜率效率 83% 的 1645 nm 连续激光输出, 效率值接近 Stokes 量子效率(93%)。为了进一步提高 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体的输出激光性能, 研究人员也采用具有高光束质量和窄线宽(<1 nm)的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺光纤 1532 nm 激光器作为泵浦源, 有效提高了晶体对泵浦光的吸收效率, 并且在长晶体中实现了泵浦光和基波激光之间良好的模式匹配^[62,64]。例如, Shen 等^[65] 利用 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺光纤 1532 nm 激光器泵浦 29 mm 长的 $\text{Er}(0.5\%):\text{YAG}$ 晶体, 获得了 60.3 W 输出功率和 80.7% 斜率效率(对于入射泵浦功率)的 1645 nm 连续激光输出。然而, 这种光纤激光器泵浦方案增加了整个激光器系统的复杂性和成本。

基于 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体具有长的 $^4\text{I}_{13/2}$ 激光上能级荧光寿命(5~7 ms), 及储能能力强的优点, 研究人员采用声光调 Q 技术实现了高能量的 1600 nm 波段脉冲激光输出。中科院上海光机所的 Yu 等^[66] 在 U 型腔中采用两台准连续 1470 nm 的光纤耦合 LD 各自端面泵浦一 40 mm 长的 $\text{Er}(0.25\%):\text{YAG}$ 晶体, 实现了能量 20.5 mJ、脉宽 52 ns、重复频率 50 Hz 的 1617 nm 偏振脉冲激光输出。北京理工大

学的 Shi 等^[67] 采用相似的双晶体端面泵浦架构方案(double-crystals-end-pumping architecture), 实现了更高性能的 1645 nm 脉冲激光, 200 Hz 重复频率下的脉冲能量和脉冲宽度分别为 22.3 mJ 和 109 ns。在此技术方案的基础上, 他们还进一步采用注入 1645.278 nm 单频种子光的方法, 获得了能量 20.3 mJ、脉宽 110 ns、重复频率 200 Hz 和线宽 4.59 MHz 的单频脉冲激光输出, 这是目前文献报道的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体单频脉冲激光的最高输出能量值^[67]。北京理工大学的 Zhang 等^[68] 同时采用“ramp-fire”种子光注入和光学反馈技术, 首次获得了能量 5.52 mJ、脉宽 500 ns 和线宽 1.47 MHz 的 1 kHz 高重复频率的 1645 nm 单频脉冲激光。此外, Larat 等^[69] 利用两级光放大的技术方案, 将能量 55 mJ、脉宽 100 ns 和重复频率 30 Hz 的 1645 nm 脉冲种子激光放大到了 120 mJ。在电光调 Q 脉冲激光方面, Harris 等^[70] 采用腔倒空技术, 实现了能量 10 mJ、脉宽 4.5 ns 和重复频率 12 Hz 的 1645 nm 脉冲激光, 获得的峰值输出功率超过 2 MW, 是目前文献报道的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 脉冲激光器的最高输出功率值。复旦大学的 Zhu 等^[71] 也采用腔倒空技术, 实现了 kHz 量级高重复频率的 1645 nm 电光调 Q 脉冲激光, 在 3 kHz 重复频率下获得的最高脉冲能量为 1.6 mJ, 脉宽为 10 ns。

采用 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 作为可饱和吸收体, 也可实现高性能的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 被动调 Q 脉冲激光输出。湘潭大学的 Tang 等^[72] 利用 1532 nm 光纤耦合 LD 端面泵浦 40 mm 长的 $\text{Er}(0.25\%):\text{YAG}$ 晶体, 分别实现了能量 0.23 mJ、脉宽 286 ns、重复频率 1.57 kHz 的 1645 nm 脉冲激光, 以及能量 0.3 mJ、脉宽 330 ns、重复频率 1.656 kHz 的 1617 nm 脉冲激光。Aubourg 等^[73] 则利用长度 30 mm 和直径 750 μm 的光纤状 $\text{Er}(0.5\%):\text{YAG}$ 晶体作为增益介质, 分别实现了能量 0.329 mJ、脉宽 61 ns、重复频率 1.46 kHz 的 1645 nm 脉冲激光, 以及能量 0.512 mJ、脉宽 41 ns、重复频率 0.82 kHz 的 1617 nm 脉冲激光。另外, 由于具有宽带可饱和吸收和恢复时间快等特点, 二维材料作为一类优秀的可饱和吸收体已被广泛研究^[74]。基于石墨烯、 Bi_2Te_3 、黑磷、 TiS_2 、 WS_2 和 MoS_2 等二维可饱和吸收材料, 利用 1532 nm 光纤耦合 LD 端面泵浦 40 mm 长的 $\text{Er}(0.25\%):\text{YAG}$ 晶体, 也实现了波长 1617 nm 和 1645 nm 的被动调 Q 脉冲激光运转^[75-81]。在这些二维材料中, 目前采用石墨烯作为可饱和材料实现

的被动调 Q 脉冲激光的性能最好。湖南大学的 Tang 等^[75]采用双层石墨烯,获得了能量 97 μJ 、脉宽 28 μs 和重复频率 12.5 kHz 的 1645 nm 脉冲激光。中科院上海光机所的 Yu 等^[76]采用多层石墨烯,获得了能量 58.8 μJ 、脉宽 4.21 μs 和重复频率

53.2 kHz 的 1645 nm 脉冲偏振激光。

表 2 总结了 LD 泵浦下掺 Er^{3+} 晶体 1550 nm 波段连续激光的一些性能参数,包括掺杂离子及原子数分数、晶体厚度、泵浦波长、最高连续激光输出功率、斜率效率以及激光输出波长。

表 2 LD 泵浦下掺 Er^{3+} 晶体 1550 nm 波段连续激光性能

Table 2 LD-pumped 1550 nm CW laser performances based on Er^{3+} -doped crystals

Host crystal	Concentration of doping ions	Thickness / mm	Pump wavelength / nm	Maximum output power / W	Slope efficiency / %	Laser wavelength / nm	Ref.
$\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$	Er^{3+} (1.5%) / Yb^{3+} (12%)	1.5	976	2.05	39.8	1550	[27]
$\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$	Er^{3+} (1.8%) / Yb^{3+} (15%)	1.5	976	1.7	36	1550	[31]
$\text{LuAl}_3(\text{BO}_3)_4$	Er^{3+} (1.1%) / Yb^{3+} (24.1%)	0.7	976	1.17	33	1543	[82]
$\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}$	Er^{3+} (0.68%) / Yb^{3+} (7.51%)	2.0	976	0.61	23	1566	[38]
$\text{GdMgB}_5\text{O}_{10}$	Er^{3+} (2.12%) / Yb^{3+} (12.65%)	2.0	976	0.14	17.8	1569	[37]
$\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$	Er^{3+} (1.4%) / Yb^{3+} (30%)	2.0	976	0.255	26.8	1550	[83]
$\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$	Er^{3+} (2.5%) / Yb^{3+} (38.5%)	2.4	976	0.08	7	1540	[84]
$\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$	Er^{3+} (0.5%) / Yb^{3+} (5.0%)	1.2	976	0.94	20	1564	[46]
$\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$	Er^{3+} (0.73%) / Yb^{3+} (1.29%) / Ce^{3+} (3.04%)	2.5	976	0.2	11.4	1556	[50]
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Er^{3+} (1.0%) / Yb^{3+} (4.5%) / Ce^{3+} (5.0%)	2.8	980	0.275	9.8	1555	[51]
Y_2SiO_5	Er^{3+} (0.36%) / Yb^{3+} (3.6%)	2.9	965	0.021	5.6	1617	[54]
Sc_2SiO_5	Er^{3+} (0.27%) / Yb^{3+} (6.97%)	2.0	968	0.024	2.4	1551	[85]
$\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$	Er^{3+} (0.09%) / Yb^{3+} (8.5%)	2.5	980	0.0016	0.4	1554	[86]
$\text{KY}(\text{WO}_4)_2$	Er^{3+} (0.5%) / Yb^{3+} (2.5%)	2.0	980	0.08	1.6	1590	[53]
$\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$	Er^{3+} (1.5%) / Yb^{3+} (5.0%)	3.2	980	0.152	1.2	1600	[53]
YAG	Er^{3+} (0.5%) / Yb^{3+} (5.0%)	3.0	965	0.031	7	1645	[54]
YVO_4	Er^{3+} (0.5%) / Yb^{3+} (5.0%)	1.75	980	0.125	5.4	1604	[55]
YVO_4	Er^{3+} (0.5%)	3.1	977	0.38	24	1602	[59]
GdVO_4	Er^{3+} (0.7%)	4.0	977	0.42	17	1597	[59]
$\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$	Er^{3+} (1.0%)	3.0	978	0.268	30	1610	[61]
YAG	Er^{3+} (0.25%)	40	1532	10.2	83	1645	[63]
YLuAG	Er^{3+} (0.5%)	30	1532	7.2	78	1645	[87]

3 结论与展望

由于采用高掺杂浓度的 Yb^{3+} 作为敏化离子,毫米级厚度的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体即可有效吸收入射泵浦功率。因此,采用 980 nm 波段 LD 泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体是一种直接获得 1550 nm 全固态微型激光的有效方法。 $\text{Er}:\text{Yb}:\text{RAB}$ 晶体的综合性能优于现有的其他 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺晶体。基于该类晶体实现的百 kHz 量级高重复频率和 ns 级短脉宽被动调 Q 脉冲微型激光,有望作为短探测距离(300~500 m)的车载紧凑型激光雷达用光源^[88]。另外,为了克服 $\text{Er}:\text{Yb}$:磷酸盐玻璃的低热导率和低激光损伤阈值的缺点,研制出能够同时实现高脉冲能量和较高重复频率的 1550 nm 波段激光光源,应进一步探索和开发具有长激光上能级荧光寿命、高热导率

和有效激光运转性能的新型 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺激光晶体。

为了避免 Er^{3+} 的自吸收、荧光浓度猝灭和上转换损耗等的影响,晶体中 Er^{3+} 掺杂浓度一般比较低,导致 Er^{3+} 单掺晶体在近红外泵浦波段处的吸收系数较小。为了有效吸收入射泵浦功率,从而实现高的输出功率,在大多数情况下需采用长度为几厘米的 Er^{3+} 单掺晶体作为增益介质。采用共振泵浦技术方案,目前在厘米级长度的 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体中已经实现了高输出功率和高斜率效率的连续激光输出,输出功率和效率均高于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺激光器。但是,这种技术方案对晶体尺寸和光学质量均匀性的要求较高,目前能够实现有效激光运转的晶体种类还较少,大部分研究工作主要集中在 $\text{Er}:\text{YAG}$ 晶体中,激光输出波长也主要是 1617 nm 和 1645 nm。

因此,研发出在 1470 nm 和 1530 nm 泵浦波段具有较大吸收截面的新型 Er^{3+} 单掺晶体,并生长获得高光学质量的大尺寸单晶,将有助于进一步提高 Er^{3+} 单掺 1550 nm 波段固体激光器的性能和拓展其应用领域。

参 考 文 献

- [1] Denker B I, Galagan B I, Sverchkov S E, et al. Erbium (Er) glass lasers[M]//Denker B, Shklovsky E. Handbook of solid-state lasers. UK: Woodhead Publishing, 2013: 341-358.
- [2] Setzler S D, Francis M P, Young Y E, et al. Resonantly pumped eyesafe erbium lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 645-657.
- [3] Piper J A, Pask H M. Crystalline Raman lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 692-704.
- [4] Zhu H Y, Zhang G, Chen H B, et al. High-efficiency intracavity Nd : YVO_4 \ \text{KTA} optical parametric oscillator with 3.6 W output power at 1.53 μm [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20669-20674.
- [5] Feng Y T, Meng J Q, Chen W B. Research development of eye-safe all-solid-state lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(10): 33-38.
冯宇彤, 孟俊清, 陈卫标. 人眼安全全固态激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(10): 33-38.
- [6] Laporta P, Taccheo S, Longhi S, et al. Erbium-ytterbium microlasers: optical properties and lasing characteristics[J]. Optical Materials, 1999, 11(2/3): 269-288.
- [7] Xu J. Rare earth laser crystals and their applications [M]. Beijing: Science Press, 2016: 55-89.
徐军. 稀土激光晶体材料及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 55-89.
- [8] Chen Y J, Huang J H, Lin Y F, et al. Progress of 1.5-1.6 μm laser crystals[J]. Chinese Journal of Structural Chemistry, 2009, 28(11): 1359-1366.
- [9] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Spectroscopic and laser properties of $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+} : \text{LuAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal at 1.5-1.6 μm [J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13700-13707.
- [10] Tolstik N A, Kisel V E, Kuleshov N V, et al. Er, Yb: $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ -efficient 1.5 μm laser crystal[J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 357.
- [11] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Comparative study on the acousto-optic Q-switched pulse performances of 1520 and 1560 nm lasers in Er: Yb: $\text{RAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ($R = \text{Y}$ and Lu) crystals [J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18919-18926.
- [12] Kisel V E, Gorbachenya K N, Yasukevich A S, et al. Passively Q-switched microchip Er, Yb: $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ diode-pumped laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2745-2747.
- [13] Lagatsky A A, Kisel V E, Troshin A E, et al. Diode-pumped passively mode-locked Er, Yb: $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser at 1.5-1.6 μm [J]. Optics Letters, 2008, 33(1): 83-85.
- [14] Gan Q J, Jiang B X, Zhang P D, et al. Research progress of high average power solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010003.
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010003.
- [15] Xu C C, Huang Y D, Lin Y F, et al. Real-time measurement of temperature distribution inside a gain medium of a diode-pumped $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 1.55 μm laser [J]. Optics Letters, 2017, 42(17): 3383-3386.
- [16] Wang X F, Liu Q, Bu Y Y, et al. Optical temperature sensing of rare-earth ion doped phosphors [J]. RSC Advances, 2015, 5(105): 86219-86236.
- [17] Chénais S, Forget S, Druon F, et al. Direct and absolute temperature mapping and heat transfer measurements in diode-end-pumped Yb: YAG [J]. Applied Physics B, 2004, 79(2): 221-224.
- [18] Zhang K, Yu D Y, He Y, et al. Analysis on cooling performance of compact mid-infrared solid state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301002.
张阔, 于德洋, 何洋, 等. 紧凑型中红外固体激光器散热性能分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301002.
- [19] Li Y J, Feng J X, Li P, et al. 400 mW low noise continuous-wave single-frequency Er, Yb: $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser at 1.55 μm [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6082-6090.
- [20] Chen Y J, Lin F L, Yang H Y, et al. Temperature dependence of the spectroscopic properties of Er: Yb: $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal between 300-800 K [J]. OSA Continuum, 2019, 2(3): 615-620.
- [21] Huang Y J, Huang Y P, Liang H C, et al. Comparative study between conventional and diffusion-bonded Nd-doped vanadate crystals in the passively mode-locked operation[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9518-9524.
- [22] Mlynczak J, Belghachem N. High peak power

- generation in thermally bonded Er^{3+} , Yb^{3+} : glass/ Co^{2+} : MgAl_2O_3 microchip laser for telemetry application[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(4): 045803.
- [23] Xia K G, Li J L. Recent development in radially polarized solid-state laser with composite laser crystal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080015.
夏克贵, 李建郎. 基于键合晶体的径向偏振固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080015.
- [24] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Fabrication and diode-pumped 1.55 μm continuous-wave laser performance of a diffusion-bonded Er : Yb : $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4/\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ composite crystal [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17128-17133.
- [25] Liu H, Li J, Fang S H, et al. Growth of $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystals with tungstate based flux[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(2): 102-106.
- [26] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Efficient continuous-wave and passively Q-switched pulse laser operations in a diffusion-bonded sapphire/ Er : Yb : $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4/\text{sapphire}$ composite crystal around 1.55 μm [J]. Optics Express, 2018, 26(1): 419-427.
- [27] Chen Y J, Lin Y F, Yang Z M, et al. Eye-safe 1.55 μm Er : Yb : $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ microchip laser [J]. OSA Continuum, 2019, 2(1): 142-150.
- [28] Młyńczak J, Kopczyński K, Mierczyk Z, et al. Practical application of pulsed “eye-safe” microchip laser to laser rangefinders [J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(3): 332-337.
- [29] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Efficient diode-pumped acousto-optic Q-switched Er : Yb : $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ pulse laser at 1522 nm [J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4927-4930.
- [30] Zhu H R, Yan L H, Li Y J, et al. 420 mW all solid-state continuous wave single frequency tunable laser at 1542 nm [J]. Journal of Quantum Optics, 2019, 25(1): 94-99.
朱海瑞, 闫丽华, 李渊曩, 等. 420 mW 全固态连续单频可调谐 1542 nm 激光器 [J]. 量子光学学报, 2019, 25(1): 94-99.
- [31] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er , Yb : $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ diode-pumped laser [J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 918-921.
- [32] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Monolithic 1.5 μm Er , Yb : $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ eye-safe laser [J]. Optical Materials, 2019, 88: 60-66.
- [33] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Graphene Q-switched Er , Yb : $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser at 1550 nm [J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4745-4749.
- [34] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Passively Q-switched Er , Yb : $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser with single-walled carbon nanotube based saturable absorber [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(3): 035802.
- [35] Gorbachenya K N, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Er , Yb : $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser passively Q-switched by MBE-grown Cr : ZnS thin films [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE, 2017: 17314576.
- [36] Huang Y S, Sun S J, Yuan F F, et al. Spectroscopic properties and continuous-wave laser operation of Er^{3+} : Yb^{3+} : $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}$ crystal [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 215-220.
- [37] Huang Y S, Yuan F F, Sun S J, et al. Thermal, spectral and laser properties of Er^{3+} : Yb^{3+} : $\text{GdMgB}_5\text{O}_{10}$: a new crystal for 1.5 μm lasers [J]. Materials, 2017, 11(1): 25.
- [38] Chen Y J, Hou Q, Huang Y S, et al. Efficient continuous-wave diode-pumped Er^{3+} : Yb^{3+} : $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}$ laser with sapphire cooling at 1.57 μm [J]. Optics Express, 2017, 25(16): 19320-19325.
- [39] Chen Y J, Huang Y S, Lin Z B, et al. Polarization switching realized in the continuous-wave and acousto-optic Q-switched pulse Er : Yb : $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}$ lasers at 1556 and 1568 nm [J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19037-19042.
- [40] Gorbachenya K N, Deineka R V, Kisel V E, et al. Er , Yb : $\text{Ca}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{RE} = \text{Y}, \text{Gd}$)-novel 1.5 μm laser crystals [J]. Devices and Methods of Measurements, 2019, 10(1): 14-22.
- [41] Xu J. Rare earth laser crystals and their applications [M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-13.
徐军. 稀土激光晶体材料及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-13.
- [42] Huang J H, Chen Y J, Huang J H, et al. Spectroscopic investigation of Dy^{3+} : $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ single crystal: a potential 589 nm laser medium [J]. Optical Materials, 2017, 72: 156-160.
- [43] Pídel L, Kahn-Harari A, Viana B, et al. Scintillation properties of $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$: Ce^{3+} , a fast and efficient scintillator crystal [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2003, 15(12): 2091-2102.
- [44] Xu C W, Tang D Y, Xu X D, et al. Diode-pumped femtosecond passively mode-locked Yb : LPS laser

- [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 726-729.
- [45] Huang J H, Chen Y J, Wang H, et al. Efficient 1620 nm continuous-wave laser operation of Czochralski grown Er: Yb: Lu₂Si₂O₇ crystal [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24001-24006.
- [46] Huang J H, Chen Y J, Lin Y F, et al. 940 mW 1564 nm multi-longitudinal-mode and 440 mW 1537 nm single-longitudinal-mode continuous-wave Er: Yb: Lu₂Si₂O₇ microchip lasers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1643-1646.
- [47] Zhang X Z, Zhou Y, Ren J Y, et al. Growth, thermal and laser properties of a new self-frequency-doubling Yb: CNGS crystal [J]. *CrystEngComm*, 2016, 18(28): 5338-5343.
- [48] Ma C Y, Wang Y M, Gao C Y, et al. Growth, thermal and spectral properties, and laser performance of Tm³⁺: CNGS crystal [J]. *CrystEngComm*, 2019, 21(5): 866-875.
- [49] Huang J H, Chen Y J, Lin Y F, et al. Enhanced efficiency of Er: Yb: Ce: NaGd(WO₄)₂ laser at 15-16 μm by the introduction of high-doping Ce³⁺ ions [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(21): 2548-2550.
- [50] Gong G L, Chen Y J, Lin Y F, et al. Spectral and laser properties of Er³⁺/Yb³⁺/Ce³⁺ tri-doped Ca₃NbGa₃Si₂O₁₄ crystal at 1.55 μm [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(4): 045805.
- [51] Jaffrès A, Loiseau P, Aka G, et al. CW diode pumped Er, Yb, Ce: CAS single crystal 1.5 μm laser [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(12): 125801.
- [52] Jaffrès A, Viana B, Loiseau P, et al. Actively Q-switch operation of diode-pumped Er³⁺, Yb³⁺, Ce³⁺: Ca₂Al₂SiO₇ single crystal laser at 1.5-1.6 μm [C] // 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC, May 12-16, 2013, Munich, Germany. New York: IEEE, 2013: 14252858.
- [53] Bjurshagen S, Brynolfsson P, Pasiskevicius V, et al. Crystal growth, spectroscopic characterization, and eye-safe laser operation of erbium- and ytterbium-codoped KLu(WO₄)₂ [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(5): 656-665.
- [54] Schweizer T, Jensen T, Heumann E, et al. Spectroscopic properties and diode pumped 1.6 μm laser performance in Yb-codoped Er: Y₃Al₅O₁₂ and Er: Y₂SiO₅ [J]. *Optics Communications*, 1995, 118(5/6): 557-561.
- [55] Tolstik N A, Troshin A E, Kurilchik S V, et al. Spectroscopy, continuous-wave and Q-switched diode-pumped laser operation of Er³⁺, Yb³⁺: YVO₄ crystal [J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(2): 275-278.
- [56] Huang J H, Chen Y J, Gong X H, et al. Effect of Ce³⁺ doping on the spectroscopic properties and 1.55 μm laser operation of Er: Yb: Ce: NaY(WO₄)₂ crystal [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(12): 2605-2611.
- [57] Chen Y J, Huang J H, Zou Y Q, et al. Diode-pumped Er³⁺: Yb³⁺: NaCe_{0.43}Gd_{0.57}(WO₄)₂ pulse laser passively Q-switched with a Co²⁺: Mg_{0.4}Al_{2.4}O₄ saturable absorber at 1.53 μm [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(4): 045810.
- [58] Tsang Y H, Binks D J, Richards B D O, et al. Spectroscopic and lasing studies of Ce³⁺: Er³⁺: Yb³⁺: YVO₄ crystals [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(10): 729-735.
- [59] Šulc J, Němec M, Jelinkova H, et al. Comparison of CW diode pumped Er: YVO₄ and Er: GdVO₄ lasers [C] // 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim Incorporating the Australasian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy and the Australian Conference on Optical Fibre Technology, August 28-September 1, 2011, Sydney, Australia. New York: IEEE, 2011: 1575-1577.
- [60] Newburgh G A, Dubinskii M. High power eye-safe Er³⁺: YVO₄ laser diode-pumped at 976 nm [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(10): 855-857.
- [61] Serres J M, Loiko P, Jambunathan V, et al. Efficient diode-pumped Er: KLu(WO₄)₂ laser at ~ 161 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 218-221.
- [62] Ter-Gabrielyan N, Fromzel V, Ryba-Romanowski W, et al. Spectroscopic and laser properties of resonantly (in-band) pumped Er: YVO₄ and Er: GdVO₄ crystals: a comparative study [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(8): 1040-1049.
- [63] Zhu L, Wang M J, Zhou J, et al. Efficient 1645 nm continuous-wave and Q-switched Er: YAG laser pumped by 1532 nm narrow-band laser diode [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26810-26815.
- [64] Kim J W, Shen D Y, Sahu J K, et al. Fiber-laser-pumped Er: YAG lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 361-371.
- [65] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. Highly efficient in-band pumped Er: YAG laser with 60 W of output at 1645 nm [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 754-756.
- [66] Yu Z Z, Wang M J, Hou X, et al. High-energy resonantly diode-pumped Q-switched Er: YAG laser at 1617 nm [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4):

84.

- [67] Shi Y, Gao C Q, Wang S, et al. High-energy, single-frequency, Q-switched Er: YAG laser with a double-crystals-end-pumping architecture[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2671-2680.
- [68] Zhang Y, Gao C, Wang Q, et al. 1 kHz single-frequency, injection-seeded Er: YAG laser with an optical feedback[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(3): 031402.
- [69] Larat C, Schwarz M, Lallier E, et al. 120 mJ Q-switched Er: YAG laser at 1645 nm [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 4861-4866.
- [70] Harris L, Clark M, Veitch P, et al. Compact cavity-dumped Q-switched Er: YAG laser [J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4309-4311.
- [71] Zhu H L, Zhou W, Fan S Z, et al. Kilohertz 1645 nm cavity-dumped Er: YAG laser pumped by a broadband 1470 nm laser diode[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1504808.
- [72] Tang P H, Zhang F J, Wu M, et al. Stable Q-switched operation of a resonantly diode pumped Er: YAG laser at 1617 and 1645 nm by Cr²⁺: ZnSe crystal[J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2017, 26(4): 1750047.
- [73] Aubourg A, Didierjean J, Aubry N, et al. Passively Q-switched diode-pumped Er: YAG solid-state laser [J]. Optics Letters, 2013, 38(6): 938-940.
- [74] Ma Z J, Wei R F, Hu Z L, et al. 2D materials and quasi-2D materials: nonlinear optical properties and corresponding applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703002.
马志军, 魏荣妃, 胡忠亮, 等. 2D材料和准2D材料的非线性光学特性及应用[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703002.
- [75] Tang P H, Zhou R, Zhao C J, et al. Stable high-energy Q-switched resonantly diode-pumped Er: YAG laser at 1645 nm[J]. Applied Optics, 2014, 53(32): 7773-7777.
- [76] Yu Z Z, Wang M J, Hou X, et al. Diode-pumped, narrow-linewidth, linearly polarized, passively Q-switched 1645 nm Er: YAG laser[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(7): 071403.
- [77] Huang B, Tang P H, Yi J, et al. Resonantly pumped Er: YAG laser Q-switched by topological insulator nanosheets at 1617 nm [J]. Optical Materials, 2017, 71: 74-77.
- [78] Guo L, Li T, Zhang S Y, et al. Black phosphorus saturable absorber for Q-switched Er: YAG laser at 1645 nm [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 225-229.
- [79] Li G Q, Wu C, Yan Z Y, et al. TiS₂ as a novel saturable absorber for a 1645 nm passively Q-switched laser [J]. Laser Physics, 2019, 29(5): 055801.
- [80] Guo L, Li M, Li T, et al. Inband pumped passively Q-switched Er: YAG laser at 1645 nm using WS₂ [J]. Optics Communications, 2018, 406: 230-233.
- [81] Xia H W, Li M, Li T, et al. Few-layered MoS₂ as a saturable absorber for a passively Q-switched Er: YAG laser at 1.6 μm [J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2766-2770.
- [82] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Enhanced performances of diode-pumped sapphire/Er³⁺: Yb³⁺: LuAl₃(BO₃)₄/sapphire micro-laser at 1.5-1.6 μm [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12401-12406.
- [83] Burns P A, Dawes J M, Dekker P, et al. Optimization of Er, Yb: YCOB for CW laser operation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(11): 1575-1582.
- [84] Denker B, Galagan B, Ivleva L, et al. Luminescent and laser properties of Yb-Er: GdCa₄O(BO₃)₃: a new crystal for eye-safe 1.5-μm lasers [J]. Applied Physics B, 2004, 79(5): 577-581.
- [85] Fornasiero L, Petermann K, Heumann E, et al. Spectroscopic properties and laser emission of Er³⁺ in scandium silicates near 1.5 μm [J]. Optical Materials, 1998, 10(1): 9-17.
- [86] Souriau J C, Romero R, Borel C, et al. Room-temperature diode-pumped continuous-wave SrY₄(SiO₄)₃O: Yb³⁺, Er³⁺ crystal laser at 1554 nm [J]. Applied physics letters, 1994, 64(10): 1189-1191.
- [87] Li J, Yang S H, He T. Diode laser in-band pumped, efficient 1645 nm continuous-wave and Q-switched Er: YLuAG lasers with near-diffraction-limited beam quality [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(1): 015005.
- [88] Williams G M, Jr. Optimization of eyesafe avalanche photodiode lidar for automobile safety and autonomous navigation systems [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031224.