

半导体激光泵浦的 3 μm 掺铒固体激光研究进展

王飞^{1,3*}, 丁曼曼^{1,2}, 沈德元^{1,2,3**}, 王俊^{1,2}, 唐定远^{1,2}

¹江苏师范大学江苏省先进激光技术与新兴产业协同创新中心, 江苏 徐州 221116;

²江苏师范大学江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116;

³江苏中红外激光应用技术产业研究院, 江苏 徐州 221000

摘要 3 μm 激光在国防安全、生物医疗、光谱分析等领域具有广阔的应用前景。与非线性频率变换、半导体激光技术相比,利用掺 Er 的激光增益介质产生 3 μm 激光是一种比较直接、高效的方法。随着 3 μm 掺 Er 激光器在输出功率和效率方面的突破,半导体激光泵浦的 3 μm 掺铒固体激光已成为热点研究方向。回顾了不同基质材料掺杂 Er 离子产生 3 μm 激光的输出特性和研究进展;从铒离子能级结构出发,分析了铒离子间的能量传递上转换、激发态吸收等跃迁过程对 3 μm 激光输出性能的影响,并对 3 μm 稀土离子掺杂固体激光器的功率提升潜力和发展前景进行了展望。

关键词 激光器; 掺铒固体激光; 3 μm 激光; 高功率; 自终止

中图分类号 O43 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0101008

1 引言

3 μm 激光在医疗、生物学等领域有很多重要的应用,由于这一波段位于水的强吸收带,比 10.6 μm 更易被水、Ca、P 等吸收,可用于人体软组织和硬组织的切除。获得 3 μm 激光的主要手段包括非线性频率变换、半导体激光技术、稀土离子或过渡金属离子掺杂介质直接产生方式等。其中,非线性频率转换技术^[1]是目前最成熟的方案之一,但是,通过这种方式产生 3 μm 波段的激光需要多级装置泵浦,结构较为复杂,成本相对较高。量子级联激光器^[2-3]是中红外激光发展的另一个重要方向,目前输出功率在瓦量级水平,只能工作在连续或准连续状态下,输出脉冲激光的峰值功率较低。相比之下,固体激光增益介质中掺 Er 产生 3 μm 激光是一种比较直接高效的获得 3 μm 中红外激光的方法,适合连续或脉冲运转,能够获得高功率、大脉冲能量的激光输出。

Er³⁺ 离子在近红外和中红外波段有很多重要的发射波长,位于眼安全波段的 1.5~1.6 μm 激光

在通信领域具有重要应用,位于水强吸收带的 3 μm 激光在医疗、科研、工业领域均具有重要应用。掺 Er 激光器通过⁴I_{11/2} 到⁴I_{13/2} 能级的辐射产生 3 μm 激光,由于激光上能级比激光下能级的寿命短(例如:Er:YAG 的激光上能级⁴I_{11/2} 的寿命约为 0.1 ms,而激光下能级⁴I_{13/2} 的寿命为~6.5 ms),根据经典激光理论,受“自终止效应”的影响,很难实现连续激光输出,只能在脉冲模式下工作^[4]。然而,由于掺 Er³⁺ 系统固有的复杂能量传递过程和斯塔克子能级分裂,上下激光能级均分裂为多重斯塔克子能级,斯塔克能级的粒子数由玻尔兹曼分布决定,这样,虽然上下激光能级间的宏观粒子数反转条件没有达到,但两个斯塔克子能级之间的粒子数反转使得连续激光输出成为可能。目前,在 Er:YAG^[5]、Er:YLF^[6]、Er:Y₂O₃^[7] 等多种材料中均实现了高效的 3 μm 激光连续波运转。

利用半导体激光泵浦掺 Er 的激光增益介质产生 3 μm 激光,泵浦波长为 0.97 μm ,发射波长为~3 μm ,量子亏损非常大,理论上激光器的效率仅限于~33%,这意味着三分之二的泵浦功率被浪费,

收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-09-29; 录用日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(62035007,61875078)

通信作者: *wangfei@mirlaser.cn; **shendy@fudan.edu.cn

作为寄生热沉积到增益介质中,导致激光性能的退化。另外,由于上下能级之间的带隙比较窄,非辐射跃迁带来的激光上能级热猝灭效应比较明显,理论上会进一步降低量子效率。尤其对于声子能量较大的 Er:YAG 介质,多声子弛豫效应比较强。事实上,由于 Er^{3+} 离子间合作上转换过程的存在,在掺杂浓度(原子数分数)为 50% 的 Er:YAG 晶体中,已经实现了高于量子极限的 34% 的激光斜效率^[8]。

本文总结了 3 μm 波段掺 Er 固体激光器的研究工作,从 Er^{3+} 离子的能级结构出发,分析了离子间能量传递上转换(ETU)、激发态吸收(ESA)、交叉弛豫(CR)等过程对 3 μm 激光自终止效应和激光效率的影响。回顾了不同基质材料中掺 Er 产生 3 μm 激光的研究进展,分析了影响激光功率提升和输出性能的因素,并对高功率 3 μm 掺 Er 固体激光的发展前景进行了展望。

2 Er^{3+} 的能级结构

Er^{3+} 的能级结构如图 1 所示,其中 ESA 表示激发态吸收(Excited-state absorption),CR 表示交叉弛豫(Cross relaxation),NR 表示非辐射弛豫(Non-emission relaxation),ETU 表示能量传递上转换(Energy-transfer up-conversion)。3 μm 波段的激光跃迁发生在 $^4\text{I}_{11/2}$ 和 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级之间,可用商业化的 0.97 μm 半导体激光直接将 Er^{3+} 离子泵浦到 3 μm 激光上能级。由于 3 μm 激光上下能级之间的带隙较窄,受多声子弛豫效应的影响,激光上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 的寿命较短,下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 的寿命相对较长,这就使得 3 μm 激光存在自终止效应。很多掺铒介质产生 3 μm 激光是在低温条件下实现的。因为在较

低温下,随着晶格振动的减少,多声子跃迁的几率减少,从而上能级荧光寿命增加。而在室温条件下,多声子弛豫效应较强,需要提高铒离子的掺杂浓度,随着掺杂浓度的提高,下能级寿命大幅度降低,而上能级寿命几乎不变,上下能级的寿命差缩短,从而减小自终止效应的影响。

在高掺杂的掺 Er^{3+} 系统中,存在两种主要的能量传递上转换过程。其中一种是图 1 所示的 ETU1 过程($^4\text{I}_{11/2} + ^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2} + ^4\text{I}_{15/2}$),一次 ETU1 会同时消耗 2 个激光上能级粒子,因而该过程会导致 3 μm 激光阈值提高。另一种是 ETU2 过程($^4\text{I}_{13/2} + ^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2} + ^4\text{I}_{15/2}$),一次 ETU2 过程可以消耗 2 个下能级的粒子,上转换至 $^4\text{I}_{9/2}$ 能级的粒子可以通过多声子弛豫过程跃迁到 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级,从而补充 1 个上能级粒子。随着 Er^{3+} 掺杂浓度的提高,ETU1 和 ETU2 过程均会增强,当 ETU2 与 ETU1 过程的参数比 W_{22}/W_{11} (W_{22} 和 W_{11} 分别为激光下能级 $^4\text{I}_{13/2}$ 和上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 的 ETU 参量)达到最大值时,能获得最优的 3 μm 激光效率^[9]。由于不同激光基质材料的声子能量不同,获得最高斜效率所需的 Er^{3+} 掺杂浓度也不同。在低声子能量的基质中,由于上下能级间非辐射跃迁的几率较低,上能级寿命相对较长,自终止效应较弱;而在大声子能量的基质中,由于较高的非辐射跃迁几率,激光上能级寿命远低于下能级寿命,需要通过提高 Er 离子的掺杂浓度来增加 Er 离子间的能量传递几率,并充分利用 ETU 过程缩短上下能级的寿命差。研究显示,当 BaY_2F_8 的 Er^{3+} 掺杂浓度(原子数分数)为 12%~15%^[10-11]、 LiYF_4 的 Er^{3+} 掺杂浓度(原子数分数)为~15%^[12]、 YSGG 的 Er^{3+} 掺杂浓度(原子数分数)为~30%^[13]、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 的 Er^{3+} 掺杂浓度(原子数分数)为~50%^[14]时, W_{22}/W_{11} 达到最大。这表明基质材料的声子能量越大,获得最优 3 μm 激光斜效率所需的 Er^{3+} 掺杂浓度越高。

Georgescu 等^[15]从理论上分析了 Er:YAG 晶体产生 3 μm 激光的效率,由于 ETU 过程的存在,0.97 μm 泵浦产生 3 μm 激光的理论量子效率可以达到 59.8%。到目前为止,实验上在掺 Er^{3+} 增益介质中产生 3 μm 激光的最高斜效率为 50%,这是在掺杂浓度(原子数分数)为 15% 的 Er:LiYF 中获得的^[6]。这一结果证明了在优化的掺杂浓度下,ETU 过程可有效提高 3 μm 连续激光产生效率。有研究人员用 1.5 μm 泵浦光将 Er^{3+} 离子直接泵浦到 $^4\text{I}_{13/2}$

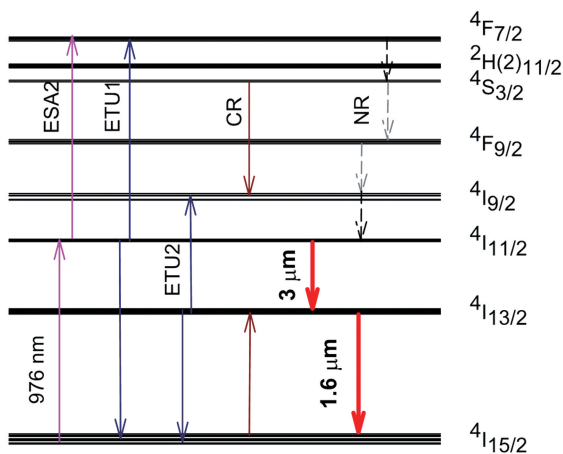


图 1 Er^{3+} 的能级跃迁

Fig. 1 Energy-level transition of Er^{3+}

能级,随后利用 ETU 过程将其激发到 $^4I_{11/2}$ 激光上能级,在 YLF、YAG、SrF₂、CaF₂ 等多种基质材料中也产生了 3 μm 激光输出^[16],更是直接证明了 ETU 过程的作用。但是在准连续波输出模式下,3 μm 激光斜率效率大大降低^[17],这是因为激光下能级的粒子数比连续泵浦模式下少得多,而 ETU 速率正比于激光下能级粒子数密度的平方,因而 ETU 速率也明显弱于连续波输出模式^[18-19]。

图 1 中的 CR 过程代表相邻 Er³⁺ 离子之间的交叉弛豫过程,CR 过程会同时补充一个上能级和一个下能级粒子。此外,在 $^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{7/2}$ 能级之间还存在激发态吸收过程(ESA2),即处于激光上能级 $^4I_{11/2}$ 的粒子会再吸收一个泵浦光子的能量,跃迁至更高的 $^4F_{7/2}$ 能级上,该过程不仅会消耗激光上能级的粒子,同时跃迁上去的粒子会以热弛豫或荧光辐射的形式向下跃迁,在激光运转时产生额外的热量,因而激发态吸收过程不利于 3 μm 激光的产生,应尽量减小该过程的影响。2012 年,科研人员在实验上测量了 Er:Lu₂O₃ 单晶在 0.97 μm 附近的激发态

吸收光谱,测得 Er:Lu₂O₃ 单晶的最佳泵浦波长为 0.971,0.974,0.980 μm ,且需要窄线宽的泵浦源才能获得高的光光转换效率,在优化的泵浦波长下,获得了 36% 的激光斜率效率^[20]。实验表明,选择泵浦波长时,在保证较高的基态吸收(GSA)的前提下,尽量避开激发态吸收波长,可有效提高 3 μm 激光斜率效率。

3 掺铒 3 μm 激光的研究进展

不同的基质材料掺杂 Er³⁺ 离子后会产生不同的发射波长,例如:Er:YAG 发射波长为 2.94 μm ,Er:Y₂O₃ 的发射波长位于 2.7 μm 附近。近些年,研究人员在激光增益介质中掺 Er 产生 $\sim 3 \mu\text{m}$ 中红外激光输出方面开展了大量工作,包括连续波输出^[8,21]、调 Q 脉冲输出^[22]、锁模脉冲输出^[23] 以及 1.6 μm 和 $\sim 3 \mu\text{m}$ 级联输出^[24] 等。表 1 汇总了半导体激光泵浦的 3 μm 掺铒固体激光的性能,其中 CW 为连续波,RT 为室温,LNT 为液氮温度(77 K)。

表 1 半导体激光泵浦的 3 μm 掺铒固体激光的性能汇总

Table 1 Performances of LD pumped 3 μm Er-doped solid-state laser

Active medium	Doping concentration (atomic fraction) / %	Laser regime	Laser wavelength / μm	Output power / W	Slope efficiency / %	Cooling temperature	Year
Er:YAG	—	Pulse	2.94	50	—	RT	2015
Er:YAG	50	CW	2.94	1.15	34	RT	1999
Er:YSGG	35	Pulse	2.8	34.9	13.7	RT	2019
Er:YAP	5	CW	2.92	6.9	30.6	RT	2020
Er:YLF	15	CW	2.8	0.123	50	RT	1997
Er:Y ₂ O ₃	2	CW	2.7	14	26	LNT	2011
Er:Y ₂ O ₃	—	CW	2.74	24	24	LNT	2016
Er:Lu ₂ O ₃	7	CW	2.85	1.4/5.9	36/27	RT	2012

3.1 掺 Er 石榴石介质产生 3 μm 激光的研究进展

Er:YAG 是最常见的掺铒 3 μm 激光增益介质,其高的声子能量(约为 860 cm^{-1})和强的多声子猝灭效应导致激光上下能级寿命之比约为 1:50,需要提高掺杂浓度降低上下能级寿命之比,获得高效的 3 μm 激光输出。1999 年,Chen 等^[8] 利用半导体激光器作为泵浦源(泵浦波长为 963.7 nm 和 964.2 nm),在掺杂浓度(原子数分数)为 50% 的 Er:YAG 晶体中,获得了最大功率为 1.15 W、波长为 2.94 μm 的激光输出,激光斜率效率(34%)略高于量子极限效率(32.7%)。2016 年,Pantec 公司推出了适合医疗和工业应用的 DPM-40 模块^[25](图 2),

采用半导体侧面泵浦技术,在 Er:YAG 晶体中获得了波长为 2.94 μm 、平均功率为 50 W、单脉冲能量高于 300 mJ(脉冲宽度为 400 μs)的脉冲激光输出,峰值功率为 1 kW。Yang 等^[26] 在 Er:YAG 晶体中获得了脉冲能量为 226 mJ、脉冲宽度为 62 ns、重复频率为 3 Hz 的 3 μm 激光,相应的峰值功率达到 3.6 MW。

Arbabzadah 等^[27] 研究了掺杂浓度(原子数分数)均为 50% 的 Er:YAG 和 Er:YSGG 晶体的 3 μm 激光准连续输出特性。在 Er:YAG 晶体中获得了波长为 2.936 μm 、单脉冲能量为 31 mJ、斜率效率为 12.6% 的激光输出;在 Er:YSGG 晶体中获得了波长为 2.797 μm 、单脉冲能量为 55 mJ、斜率效率为 20.5%

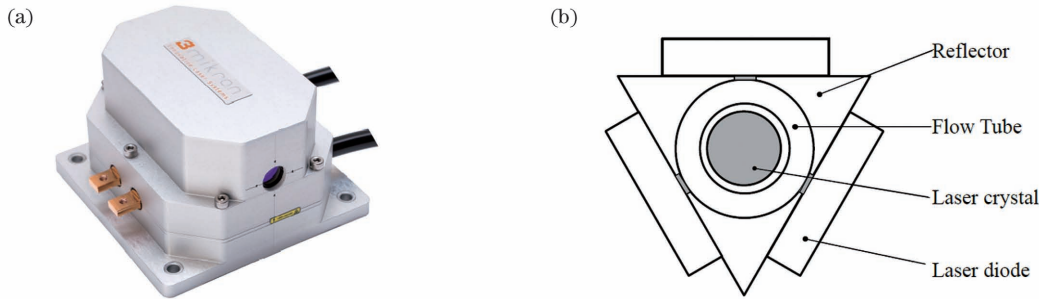


图 2 Pantec 公司的 DPM-40 模块^[25]。(a)DPM-40 模块;(b)侧面泵浦的激光装置图

Fig. 2 DPM-40 module of Pantec company^[25]. (a) DPM-40 module; (b) laser design with side pump

的激光输出。相比 Er:YAG, Er:YSGG 拥有更长的上能级寿命,同时,上能级的能量传递上转换(图 1)速率更低($W_{11} = 7.3 \times 10^{-22} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ @ Er:YSGG, $W_{11} = 3.7 \times 10^{-21} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ @ Er:YAG),从这个角度看,0.97 μm 半导体激光泵浦的 Er:YSGG 晶体比 Er:YAG 更适合作为 3 μm 激光增益介质,并且 Er:YSGG 晶体也具有更大的储能潜力,更适合调 Q 脉冲输出。2019 年, Ye 等^[28] 利用掺杂浓度(原子数分数)为 35% 的 Er:YSGG 作为激光增益介质,用 0.97 μm 半导体激光作为泵浦源,在室温条件下,获得了平均功率为 34.9 W 的 2.8 μm 脉冲激光输出,重复频率为 120 Hz,脉冲宽度为 500 μs ,相应的斜效率和光光转换效率分别为 13.7% 和 12.7%。

3.2 Er:YAP 和 Er:YLF 产生 3 μm 激光的研究进展

铝酸钇(YALO₃, YAP)是一种优良的激光基质材料,具有与钇铝石榴石(Y₃Al₅O₁₂, YAG)相似的优良热力学及力学性能^[29],如较高的热导率、相似的莫氏硬度(8.5)、更低的声子能量(550 cm^{-1})^[30]。并且 YAP 具有比倍半氧化物更低的熔点(YAP 的熔点约为 1875 $^{\circ}\text{C}$,倍半氧化物的熔点 >2400 $^{\circ}\text{C}$),这使得 YAP 单晶的制备更为容易。YAP 晶体属正交晶系,是双折射率较高的晶体,三价稀土离子 Er³⁺ 掺杂的 YAP 晶体可以直接产生线偏振激光。Yao 等^[21] 用 0.976 μm 波长锁定的激光二极管(LD)作为泵浦源,在掺杂浓度(原子数分数)为 5% 的 Er:YAP 晶体中产生了输出功率为 6.9 W、波长为 2.92 μm 的激光输出,斜效率为 30.6%,接近量子极限效率。

与石榴石相比,氟化钇锂(LiYF₄, YLF)同样具有较低的声子能量($<650 \text{ cm}^{-1}$),激光上下能级间的无辐射跃迁概率较低,因而具有相对较高的上能级寿命。YLF 是白钨矿型四方晶系结构的晶体,具有负折射率温度系数,热透镜效应较小,具有良好的

热稳定性和高的激光损伤阈值。在掺杂浓度(原子数分数)为 15% 的 Er:YLF 中也已经获得了平均功率大于 10 W 的 2.81 μm 激光输出,单脉冲能量大于 100 mJ,斜效率约为 18.7%^[31]。Jensen 等^[32] 和 Wyss 等^[6] 分别开展了 Er:YLF 晶体产生 3 μm 激光的实验,斜效率分别达到 35% 和 50%,再一次证明 0.97 μm 泵浦掺 Er 介质产生 3 μm 激光可以获得高于量子极限的激光效率。

3.3 掺 Er 倍半氧化物介质中产生 3 μm 激光的研究进展

倍半氧化物作为一种优秀的激光增益介质,通过掺杂 Yb^[33-34]、Tm^[35] 和 Ho^[36] 等离子,均已获得了良好的激光输出性能。与 YAG 相比,倍半氧化物(Lu₂O₃、Sc₂O₃ 和 Y₂O₃)具有更高的热导率和更低的声子能量。倍半氧化物材料的熔点很高(>2400 $^{\circ}\text{C}$),难以通过单晶生长工艺制备,但其相变点远低于熔点温度,通过陶瓷制备工艺在较低的温度(1500~1700 $^{\circ}\text{C}$)下就可以实现倍半氧化物透明陶瓷的制备。

基态吸收($^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$)的主要波段范围位于 0.96 μm 到 0.99 μm 之间,并不是所有波长都适合作为泵浦波长。Li 等^[20] 测量了 Er:Lu₂O₃ 晶体的基态吸收和激发态吸收光谱,提出泵浦波长的选择应尽量避开激发态吸收峰,这有利于提高 3 μm 激光效率,如图 3 所示,其中 $\Delta I/I$ 光谱是通过泵浦-探测技术^[37] 测量得到的, I 为探测光束的强度, ΔI 为通过泵浦和未泵浦晶体后的探测光束强度差。对于 Er:Lu₂O₃ 晶体,最佳泵浦波长($^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$)为 $\sim 0.971 \mu\text{m}$ 、 $\sim 0.974 \mu\text{m}$ 和 $\sim 0.980 \mu\text{m}$,在这几个波长处,Er:Lu₂O₃ 晶体具有较大的基态吸收和较小的激发态吸收截面。研究者利用波长可调谐的半导体激光器(955 ~ 982 nm 可调谐,光谱宽度为 0.3 nm)作为泵浦源,获得了波长为 2.85 μm 、功率为 1.4 W 的激光输出,斜效率达到 36%;利用 0.971 μm

波长锁定的半导体激光器(光谱宽度为 3 nm)作为泵浦源,获得了功率为 5.9 W 的激光输出,斜效率为 27%。36% 的斜效率超过了量子极限效率(34%),得益于优化的泵浦波长和窄化的光谱宽度,激发态吸收的影响减小。

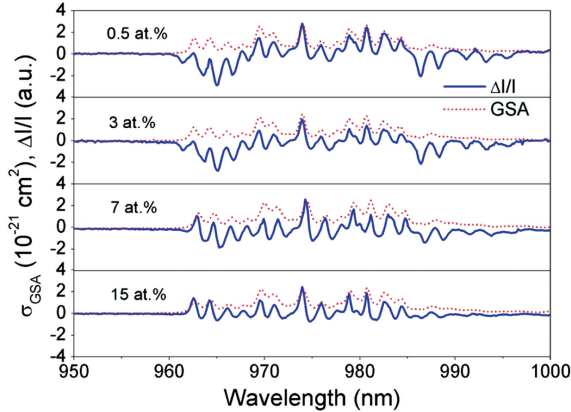


图 3 Er:Lu₂O₃ 的基态吸收和 $\Delta I/I$ 光谱^[20]

Fig. 3 GSA and $\Delta I/I$ spectra of Er:Lu₂O₃^[20]

2011 年,研究者在 77 K 的低温环境下,利用 Er:Y₂O₃ 陶瓷作为激光增益介质,在 2.8 μm 处获得了功率为 14 W 的连续波输出^[38]。2016 年,研究者在液氮制冷条件下,利用 Er:Y₂O₃ 陶瓷将连续波输出功率进一步提升至 24 W,斜效率为 24%^[7]。

江苏师范大学课题组基于自制的倍半氧化物陶瓷,在 3 μm 激光产生方面开展了一系列研究工作^[39-41]。在室温条件下用 0.976 μm 半导体激光器泵浦 Er:Y₂O₃ 陶瓷,在 2.7 μm 处获得了 3.8 W 的激光功率输出,斜效率为 14.4%^[41]。最近,通过对半导体激光器输出的泵浦光斑进行整形并对系统热

管理进行进一步优化,在室温条件下已经获得了波长为 2.8 μm 、功率大于 10 W 的激光输出,斜效率超过 20%。

3.4 1.6 μm 和 3 μm 激光级联输出的研究进展

在固体激光器中,级联 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 两个或多个跃迁有着重要的意义,能够提高激光输出的整体效率,有利于热管理。1993 年, Schmaul 等^[42]采用 0.647 μm 氮离子激光泵浦掺杂浓度(原子数分数)为 1% 的 Er:LiYF₄ 晶体,首次实现室温条件下 2.81 μm 和 1.62 μm 的连续波级联激光输出,总的激光斜效率为 1.3%,输出功率仅为毫瓦量级。

研究者在液氮冷却的低温条件下,开展了 Er:Y₂O₃ 产生 3 μm 激光的实验(图 4)^[7],并且研究了 Er:Y₂O₃ 陶瓷在低温条件下的激光级联输出特性^[38,43-45]。用 0.974 μm 窄带半导体激光泵浦掺杂浓度(原子数分数)为 0.5% 的 Er:Y₂O₃ 陶瓷,分别在 1.6 μm 和 2.7 μm 波长处获得了 24 W 和 13 W 的激光输出,斜效率分别为 38% 和 24%。实验表明,在多波长级联模式下,1.6 μm 和 2.7 μm 激光的输出功率和效率比在单波长“非级联”工作模式下都有所提高,级联方式使 3 μm 激光的输出功率提高了约 30%。2016 年,研究者研究了 Er:YAG 的级联输出特性^[24],1.6 μm 激光的最大输出功率为 45 W,斜率效率为 55%,2.7 μm 激光的最大输出功率略低于 10 W,斜率效率为 $\sim 16\%$ 。YAG 基质中 $^4I_{11/2}$ 到 $^4I_{13/2}$ 的多声子跃迁具有更高的概率,导致级联 Er:YAG 中的 3 μm 激光输出斜率效率比级联 Er:Y₂O₃ 激光器低 $\sim 10\%$ 。

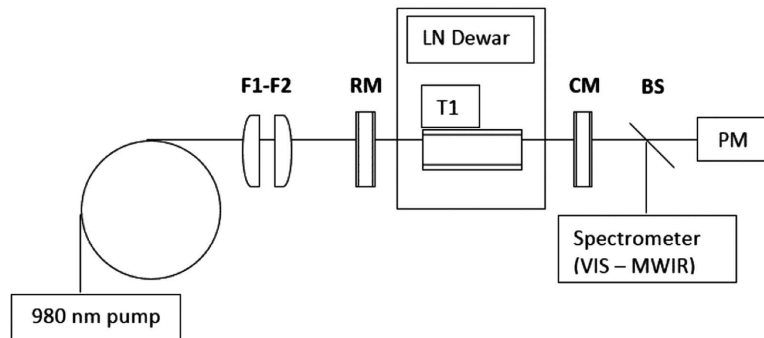


图 4 液氮冷却的 Er:Y₂O₃ 激光实验装置图^[7]

Fig. 4 Experimental setup for liquid-nitrogen-cooled Er:Y₂O₃ laser^[7]

4 结束语

3 μm 激光在医疗、国防、科研等领域具有重要应用。利用掺 Er 介质产生 3 μm 激光是一种比较

直接高效的方法,并且在 YAG、YLF、Y₂O₃、Lu₂O₃ 等多种基质材料中均获得了良好的激光输出性能。由于 Er³⁺ 离子的能级结构比较复杂,不同基质材料的声子寿命也不同,需要综合考虑 ETU、ESA、CR

等跃迁过程的影响。随着高质量低声子能量激光增益介质制备技术的提高,特别是陶瓷增益介质的的发展,通过对泵浦波长、泵浦光线宽、掺 Er 激光增益介质的掺杂浓度、激光谐振腔参数等进行优化设计,3 μm 激光的输出功率水平和激光效率有望得到进一步提升,像其他波长体系一样实现高功率运转。另外,基于低声子能量增益介质的中红外固体激光相比光纤激光技术路径,在高峰值功率、大脉冲能量运转情况下更有优势。总之,与半导体激光技术或非线性频率变换相比,使用掺 Er 介质直接产生 3 μm 激光是一种极具竞争力的方法。

参 考 文 献

- [1] Wang F F, Nie H K, Liu J T, et al. Miniaturized widely tunable MgO : PPLN nanosecond optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501015.
王菲菲, 聂鸿坤, 刘俊亭, 等. 小型化宽调谐 MgO : PPLN 中红外纳秒光参量振荡器 [J]. 中国激光, 2021, 48(5): 207-215.
- [2] Zhang Y, Yang C A, Shang J M, et al. Research progress of semiconductor interband cascade lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114004.
张一, 杨成奥, 尚金铭, 等. 半导体带间级联激光器研究进展 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114004.
- [3] Li S S, Wang B Y, Zhou G J, et al. 1 W quantum cascade laser with fiber coupled output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1116001.
李森森, 王毕艺, 周冠军, 等. 1 W 中红外光纤输出量子级联激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1116001.
- [4] Pollack S A, Chang D B. Upconversion-pumped population kinetics for $^4\text{I}_{13/2}$ and $^4\text{I}_{11/2}$ laser states of Er^{3+} ion in several host crystals [J]. Optical and Quantum Electronics, 1990, 22(1): S75-S93.
- [5] Pollack S A, Chang D B. Ion-pair upconversion pumped laser emission in Er^{3+} ions in YAG, YLF, SrF_2 , and CaF_2 crystals [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(6): 2885-2893.
- [6] Wyss C, Lüthy W, Weber H P, et al. Emission properties of an optimised 2.8 μm Er^{3+} : YLF laser [J]. Optics Communications, 1997, 139(4/5/6): 215-218.
- [7] Fleischman Z D, Sanamyan T. Spectroscopic analysis of Er^{3+} : Y_2O_3 relevant to 2.7 μm mid-IR laser [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(10): 3109-3118.
- [8] Chen D W, Fincher C L, Rose T S, et al. Diode-pumped 1-W continuous-wave Er : YAG 3- μm laser [J]. Optics Letters, 1999, 24(6): 385-387.
- [9] Pollnan M, Jackson S D. Erbium 3 μm fiber lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(1): 30-40.
- [10] Pollnau M, Lüthy W, Weber H P, et al. Investigation of diode-pumped 2.8 μm laser performance in Er : BaY_2F_8 [J]. Optics Letters, 1996, 21(1): 48-50.
- [11] Eichler H J, Findeisen J, Liu B N, et al. Highly efficient diode-pumped 3 μm Er : BaY_2F_8 laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(1): 90-94.
- [12] Jensen T, Chai B H T, Diening A, et al. Investigation of diode-pumped 2.8- μm Er : LiYF_4 lasers with various doping levels [J]. Optics Letters, 1996, 21(8): 585-587.
- [13] Jensen T, Ostroumov V G, Huber G. Upconversion processes in Er : YSGG and diode pumped laser experiments at 2.8 μm [C] // Advanced Solid State Lasers 1995, January 30, 1995, Memphis, Tennessee, United States. Washington, D. C. : OSA, 1995: 366-370.
- [14] Richard S, Jan S, Helena J. Er-doped crystalline active media for ~ 3 μm diode-pumped lasers [J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 74: 100276.
- [15] Georgescu S, Toma O, Totia H. Intrinsic limits of the efficiency of 3- μm Er : YAG laser [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5581: 98-113.
- [16] Pollack S A, Chang D B. Ion-pair upconversion pumped laser emission in Er^{3+} ions in YAG, YLF, SrF_2 , and CaF_2 crystals [J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(6): 2885-2893.
- [17] Jensen T, Huber G, Petermann K. Quasi-cw diode pumped 2.8 μm laser operation of Er^{3+} -doped garnets [C] // Advanced Solid State Lasers, January 31, 1996, San Francisco, California. Washington, D.C. : OSA, 1996: IL5.
- [18] Prokhorov A M, Zhekov V I, Murina T M, et al. Pulsed YAG : Er laser efficiency (analysis of model equations) [J]. Laser Physics, 1993, 3(1): 79-83.
- [19] Pollnau M, Spring R, Wittwer S, et al. Investigations on the slope efficiency of a pulsed 2.8- μm Er^{3+} : LiYF_4 laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(4): 974-978.
- [20] Li T, Beil K, Kränkel C, et al. Efficient high-power continuous wave Er : Lu_2O_3 laser at 2.85 μm [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2568-2570.
- [21] Yao W, Uehara H, Kawase H, et al. Highly efficient Er : YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm [J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19000-19007.
- [22] Arbabzadah E A, Phillips C C, Damzen M J. Free-

- running and Q-switched operation of a diode pumped Er:YSGG laser at the 3 μm transition [J]. Applied Physics B, 2013, 111(2): 333-339.
- [23] Švejkar R, Šulc J, Jelinková H. Er:Y₂O₃ high-repetition rate picosecond 2.7 μm laser [J]. Laser Physics Letters, 2019, 16(7): 075802.
- [24] Sanamyan T. Efficient cryogenic mid-IR and eye-safe Er:YAG laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(11): D1-D6.
- [25] Messner M, Heinrich A, Hagen C, et al. High brightness diode pumped Er:YAG laser system at 2.94 μm with nearly 1 kW peak power [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9726: 972602.
- [26] Yang J W, Wang L, Wu X Y, et al. High peak power Q-switched Er:YAG laser with two polarizers and its ablation performance for hard dental tissues [J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15686-15696.
- [27] Arbabzadah E, Chard S, Amrania H, et al. Comparison of a diode pumped Er:YSGG and Er:YAG laser in the bounce geometry at the 3 μm transition [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 25860-25865.
- [28] Ye X L, Xu X F, Ren H J, et al. Enhanced high-slope-efficiency and high-power LD side-pumped Er:YSGG laser [J]. Applied Optics, 2019, 58(36): 9949-9954.
- [29] Weber M J, Bass M, Andringa K, et al. Czochralski growth and properties of YAlO₃ laser crystals [J]. Applied Physics Letters, 1969, 15(10): 342-345.
- [30] Kawase H, Yasuhara R. 2.92- μm high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er:YAP crystal at room temperature [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12213-12220.
- [31] Messner M, Heinrich A, Unterrainer K. High-energy diode side-pumped Er:LiYF₄ laser [J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1497-1503.
- [32] Jensen T, Chai B H T, Diening A, et al. Investigation of diode-pumped 2.8- μm Er:LiYF₄ lasers with various doping levels [J]. Optics Letters, 1996, 21(8): 585-587.
- [33] Peters R, Kränkel C, Friedrich-Thornton S T, et al. Thermal analysis and efficient high power continuous-wave and mode-locked thin disk laser operation of Yb-doped sesquioxides [J]. Applied Physics B, 2011, 102(3): 509-514.
- [34] Baer C R E, Kränkel C, Saraceno C J, et al. Femtosecond thin-disk laser with 141 W of average power [J]. Optics Letters, 2010, 35(13): 2302-2304.
- [35] Koopmann P, Lamrini S, Scholle K, et al. Efficient diode-pumped laser operation of Tm:Lu₂O₃ around 2 μm [J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 948-950.
- [36] Koopmann P, Lamrini S, Scholle K, et al. Multi-watt laser operation and laser parameters of Ho-doped Lu₂O₃ at 2.12 μm [J]. Optical Materials Express, 2011, 1(8): 1447-1556.
- [37] Koetke D, Huber D. Infrared excited-state absorption and stimulated-emission cross sections of Er³⁺-doped crystals [J]. Applied Physics B, 1995, 61: 151-158.
- [38] Sanamyan T, Kanskar M, Xiao Y, et al. High power diode-pumped 2.7- μm Er³⁺:Y₂O₃ laser with nearly quantum defect-limited efficiency [J]. Optics Express, 2011, 19(5): A1082-A1087.
- [39] Ren X J, Wang Y, Fan X L, et al. High-peak-power acousto-optically Q-switched Er:Y₂O₃ ceramic laser at \sim 2.7 μm [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1-6.
- [40] Wang L, Huang H, Shen D, et al. Room temperature continuous-wave laser performance of LD pumped Er:Lu₂O₃ and Er:Y₂O₃ ceramic at 2.7 μm [J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19495-19503.
- [41] Li E H. Research on sesquioxide-based ceramic lasers at mid-infrared band [D]. Shanghai: Fudan University, 2020: 55-58.
李恩昊. 基于倍半氧化物基质的中红外波段陶瓷激光技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2020: 55-58.
- [42] Schmaul B, Huber G, Clausen R, et al. Er³⁺:YLiF₄ continuous wave cascade laser operation at 1620 nm and 2810 nm at room temperature [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(6): 541-543.
- [43] Sanamyan T, Simmons J, Dubinskii M. Efficient cryo-cooled 2.7- μm Er³⁺:Y₂O₃ ceramic laser with direct diode pumping of the upper laser level [J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(8): 569-572.
- [44] Sanamyan T, Simmons J, Dubinskii M. Efficient cryo-cooled 2.7- μm Er³⁺:Y₂O₃ ceramic laser with direct diode pumping of the upper laser level [J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(8): 569-572.
- [45] Sanamyan T. Diode pumped cascade Er:Y₂O₃ laser [J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(12): 125804.

Research Progress of LD-Pumped 3 μm Er-Doped Solid-State Lasers

Wang Fei^{1,3*}, Ding Manman^{1,2}, Shen Deyuan^{1,2,3*}, Wang Jun^{1,2}, Tang Dingyuan^{1,2}

¹ Jiangsu Collaborative Innovation Center of Advanced Laser Technology and Emerging Industry,
Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

² Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Normal University, Xuzhou,
Jiangsu 221116, China;

³ Jiangsu Institute of Mid Infrared Laser Applied Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, China

Abstract

Significance 3 μm laser sources have a broad application prospect in the fields of national defense and security, biomedicine, spectral analysis, and so on. Compared with the nonlinear frequency conversion and semiconductor laser technologies, laser-diode pumping for Er-doped lasers to emit 3 μm wavelength is a more direct and efficient method. The radiation from energy level $^4\text{I}_{11/2}$ to $^4\text{I}_{13/2}$ of Er^{3+} ions produces 3 μm lasing. Since the lifetime of the upper level is shorter than that of the lower level, it is difficult to realize a continuous laser operation due to the “self-termination effect” from the classic laser theory. However, due to the inherent complex energy transfer process and Stark sub-level splitting of the Er^{3+} doped system, an efficient 3 μm laser continuous wave operation has been realized in many Er-doped matrices such as Er:YAG, Er:YLF, and Er:Y₂O₃.

The main known problems linked with Er-doped 3 μm lasers are self-termination and large quantum losses. If the Er^{3+} ions are doped into low phonon matrix, the probability of non-radiative transition is reduced and the fluorescence decay time at the upper laser level $^4\text{I}_{11/2}$ is prolonged. This fact results in a low probability of self-termination. To reduce the self-termination effect in high phonon matrix, a high Er-doping level is required. With the increase of doping level, the spacing between Er^{3+} ions is shortened, which is beneficial to ion-ion energy transfer. However, using the high doped active medium affects thermal conductivity, which makes the thermal management of the laser system more difficult. The Er-doped laser gain medium is pumped by a semiconductor laser of 0.97 μm to produce a 3 μm laser with a large quantum loss. Theoretically, the laser efficiency is limited to $\sim 33\%$, which means that two-thirds of the pump power is wasted and deposited into the gain medium as parasitic heat, resulting in degradation of laser performance. Researchers have established a mathematical model to estimate the theoretical limit of the emission efficiency of 3 μm Er:YAG laser, and they have found a simple analytical expression for the emission efficiency, which shows that the theoretical quantum efficiency can reach 59.8% due to the existence of an ETU process. So far, the maximum efficiency of 3 μm lasers with Er^{3+} -doped gain media in experiments has reached to 50% in Er:LiYF with doping concentration (atomic fraction) of 15%. This result proves that with an optimized doping concentration, the 3 μm laser efficiency can be effectively improved due to the ETU process.

Using laser materials with a low Er^{3+} doping concentration and cascading two transitions ($^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$), where the first $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ transition corresponds to the mid-IR $\sim 3 \mu\text{m}$ laser and the second $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ corresponds to the eye-safe 1.6 μm spectral region, respectively, provide a number of important benefits, including the increased overall efficiency of optical output and thermal management. In addition, the second eye-safe transition ($^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$) effectively depletes the lower laser level and sustains a positive inversion, as required for a CW operation.

Progress The 3 μm laser performance in various Er-doped host materials is summarized (Table 1), including continuous wave output, Q-switched pulse output, mode-locked pulse output, and 1.6 μm and $\sim 3 \mu\text{m}$ cascading outputs, etc. At present, the 3 μm laser products are commercially available with Er:YAG and Er:YLF as gain media. Due to the strong heat generation inside Er:YAG with 50% atomic fraction, the side-pumping design is carried out, which results in a poor beam quality. Sesquioxides, which have a low phonon energy and high thermal conductivity, have emerged as a promising laser host material for $\sim 3 \mu\text{m}$ laser operation in recent years. An efficient laser operation could be obtained with the sesquioxides at a low Er^{3+} concentration. With 2% (atomic fraction) Er:Y₂O₃ ceramics as laser gain media, researchers have obtained a 14 W laser output at 2.8 μm and cryogenically cooled temperature of 77 K (Fig. 4). In 2016, the output power is further increased to 24 W with a

slope efficiency of 24% under the liquid nitrogen cooled condition. Research group from Jiangsu Normal University has obtained a 3.8 W laser output at 2.7 μm at room temperature with 7% (atomic fraction) Er:Y₂O₃ ceramic, and the output power has been increased to more than 10 W.

Conclusion and Prospects With its recent breakthrough in terms of output power and laser efficiency, the erbium-doped 3 μm laser has become an object of intense scientific research. With the improvement of high-quality low phonon energy laser gain media, especially the development of ceramic gain media, the 3 μm laser performance can be further improved by optimizing the wavelength and spectral linewidth of pump sources, doping concentration of Er-doped laser gain media, and laser cavity parameters. Compared with semiconductor laser and nonlinear frequency conversion technologies, the laser-diode pumped Er-doped laser emitting 3 μm wavelength is very promising, especially in the pulsed laser operation for producing high peak power and large pulse energy.

Key words lasers; Er-doped solid state laser; 3 μm laser; high power; self-termination