

文章编号: 1000-7032(2024)11-1871-12

掺铽氟化物晶体可见光激光器研究进展

刘子琪¹, 徐学森¹, 蒋艳梅¹, 郭永瑞^{1,2*}

(1. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065;

2. 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室博士后科研工作站, 重庆 400065)

摘要: 掺铽氟化物晶体激光器由于可直接产生覆盖500~700 nm可见光波段激光输出, 相对于传统变频可见光激光器, 具有结构紧凑、转换效率高等优势, 因此在科学研究和工业领域具有广阔的应用前景。当前, 掺铽氟化物晶体可见光激光器发展的关键在于提升激光输出功率。本文首先从掺铽氟化物晶体的基质、晶体结构及光谱特性等方面展开介绍; 然后, 重点分析了基于倍频的光泵浦半导体激光器(2 ω -OPSL)和可见激光二极管(LD)泵浦的掺铽氟化物晶体可见光激光器在连续激光、脉冲激光和深紫外激光输出方面的发展历程; 最后, 分析了掺铽氟化物晶体可见光激光器当前存在的问题并展望了该激光器的发展前景。

关键词: 掺铽氟化物晶体; 可见光激光器; 连续激光; 脉冲激光; 深紫外激光

中图分类号: O482.31; TN248

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240206

Research Progress of Terbium-doped Fluoride Crystal
Visible Light LaserLIU Ziqi¹, XU Xuesen¹, JIANG Yanmei¹, GUO Yongrui^{1,2*}

(1. School of Optoelectronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Post Doctoral Research Workstation of Chongqing Key Laboratory of Optoelectronic Information Sensing and

Transmission Technology, Chongqing 400065, China)

*Corresponding Author, E-mail: guoyr@cqupt.edu.cn

Abstract: Terbium-doped fluoride crystal lasers have broad application prospects in the fields of scientific research and industry due to their ability to directly generate laser output covering the visible wavelength band of 500–700 nm, and their advantages of compact structure and high conversion efficiency compared with the traditional frequency conversion visible light lasers. Currently, the key to the development of terbium-doped fluoride crystal visible lasers is to scale up the output power of the laser. In this paper, we firstly introduce terbium-doped fluoride crystal matrix, crystal structure, and spectral properties, and then focus on the development of terbium-doped fluoride crystal visible lasers based on frequency-doubled optically pumped semiconductor lasers (2 ω -OPSLs) and visible laser diode (LD)-pumped lasers for continuous, pulsed, and deep-ultraviolet laser outputs. Finally, the current problems of terbium-doped fluoride crystal visible lasers are analyzed, and the development prospects of these lasers are analyzed.

Key words: terbium-doped fluoride crystal; visible light laser; continuous laser; pulsed laser; deep-ultraviolet laser

收稿日期: 2024-09-09; 修订日期: 2024-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(62205042); 中国博士后面上项目(2023MD734108); 重庆市博士后创新人才支持计划(CQBX202221); 重庆市教委青年项目(KJON202300601); 重庆邮电大学科研项目(X2024106170008, A2024197)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62205042); China Postdoctoral Science Foundation(2023MD734108); Program for the Innovative Talents of Postdoctoral of Chongqing(CQBX202221); Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission(KJQN202300601); Research Project of Chongqing University of Posts and Telecommunications(X2024106170008, A2024197)

1 引 言

掺铽氟化物晶体可见光激光器可直接产生覆盖 500~700 nm 可见光波段激光输出,在量子信息、冷原子物理、医疗、生命科学等科学研究领域^[1-9],激光遥感、激光雷达、激光导星等领域^[10-12]以及激光焊接、激光切割、精密制造等工业领域^[13-14]具有广阔的应用前景。例如,基于掺铽氟化物晶体激光器产生的 592 nm 光源通过被集成到流式细胞仪和细胞分选器中,可有效激发荧光染料 Texas Red 及其光稳定类似物 Alexa Fluor 594^[6]。基于掺铽氟化物晶体可见光激光器的输出波长覆盖碘分子大部分的跃迁吸收线,可用于开展碘分子稳频激光源的研究。此外,钠元素在 589 nm 波长附近表现出较强吸收特性,基于掺铽氟化物晶体 589 nm 激光器可用于天文学中产生人造激光导星以及用于光谱学和工业上钠探测^[15]。高功率可见激光的产生方法主要包括:非线性频率转换(二次谐波倍频和自倍频等)及掺杂稀土离子激光介质的受激辐射^[16]。相比于利用非线性频率转换技术实现的可见光激光器,通过直接泵浦掺杂稀土离子增益介质实现的可见光激光器具有结构简单、光-光转换效率高的优势^[17-22]。Tb³⁺掺杂的掺铽氟化物晶体是一种可通过直接泵浦产生可见光激光的增益介质。基于倍频的光泵浦半导体激光器(Frequency-doubled optically pumped semiconductor laser(2 ω -OPSL))和 LD 泵浦的掺铽氟化物晶体可见光激光器可直接产生覆盖 500~700 nm 可见光波段激光输出。2 ω -OPSL 一般是通过在基于光泵的半导体芯片(Disk 或 1/2 VECSEL)为增益介质的驻波腔内进行倍频来实现的。2 ω -OPSL 泵浦的掺铽氟化物晶体可见光激光器具有转换效率高、输出光束质量好的特征。LD 泵浦的掺铽氟化物晶体可见光激光器具有结构紧凑、寿命长、价格低等优点。二者均在基础科学研究、工业加工、安全防护等领域具有巨大的潜在应用前景。基于掺铽氟化物晶体的可见光激光器成为激光领域的研究热点,目前受到越来越多的关注。从 2014 年开始,国内外对这种激光器进行了广泛的研究,并取得了一定的成果。为此,本文在首先介绍掺铽氟化物晶体的基质、晶体结构及光谱特性的基础上,重点总结了 2 ω -OPSL 和 LD 泵浦的掺铽氟化物晶体可见光激光器在连续激光、脉冲激光和深紫外激光产生方

面的研究进展。最后,分析了掺铽氟化物晶体可见光激光器当前存在的问题并展望了该激光器的发展前景。

2 掺铽氟化物晶体的性质

在三价稀土离子中,除铈离子以外,铽离子的 5d 能级表现出最低的能量。并且,在蓝光激光器的泵浦下,掺铽氟化物晶体对泵浦激光的吸收截面均较低。此外,用于泵浦掺铽氟化物晶体的激光器并未展现出良好的光束质量和较高的功率。由于上述这些原因,铽离子长期以来未被认为是合适的激光离子,该领域也没有取得太大进展^[23-26]。但是,随着 2 ω -OPSL 和 LD 的进一步发展,同时超过一半填充的 4f 壳层的低结合能导致三价金属激发态吸收进入 $^4f^5d_1$ 构型最低状态的高风险^[27]被证明不是低晶体场强氟化物主体材料的限制因素^[20],这使得掺铽氟化物激光晶体的高效泵浦可行性增加,引起了研究人员对掺铽氟化物晶体的重新审视。

2.1 掺铽氟化物晶体的特性与结构

目前,研究人员关注较多的掺铽氟化物晶体的基质主要有同构四方材料 LiYF₄(YLF)、LiLuF₄(LLF)和六方材料 KY₃F₁₀(KYF),以及不太常见的单斜晶体 BaY₂F₈(BYF)、 β -BaLu₂F₈(BLuF)和六方材料 LaF₃(LaF)。其中,YLF、LLF、BYF 和 BLuF 晶体通常采用直拉法生长,而 KYF 晶体通常采用泡生法生长。与此不同,LaF 晶体通常采用熔体缓慢冷却法生长^[20]。此外,可以采用 YF₃晶体与其他晶体混合生长的方法进行 KYF、YLF、BYF 晶体的生长。氟化物晶体在生长过程中都极易受到大气环境影响,生成氟氧化物,降低了晶体质量。例如,YF₃晶体由于其生长过程极易受到大气环境变化而带来的影响,需要在要求严格的大气环境下生长^[28]。YLF 晶体是非一致熔晶体,生长过程中需要配置非化学计量比的原料,生长过程易发生组分偏析,产生包裹体等杂质,降低晶体质量。另外,由于 LLF 晶体是一致熔晶体,按照化学计量比配置,生长更容易且不易产生包裹体等杂质,晶体质量更好。此外,BYF 晶体基于 LuF₃结构,在晶体生长过程中存在相变,该相变会导致晶体生长过程中容易开裂解理,对晶体生长控制要求较高,当 Y 替换为 Lu 时这种倾向更为明显。其中,YLF 晶体是一种基于白钨矿型四方晶系结构的单轴单晶,其中 Tb:YLF 是通过用铽离子取代 YLF 中的

钇离子的方法得到的。铽离子与钇离子具有相同的价电子,这导致在替换时不存在晶体电价不平衡问题,因此掺杂后的晶体结构不易发生改变。YLF 晶体的结构图如图 1 所示。此外,基于白钨矿结构的 LLF 晶体熔点在 825 ℃左右,表现出一致的熔融行为,在加热过程中逐渐熔化,形成均匀的液体。这一特性对其在工业应用中的稳定性至关重要^[29]。

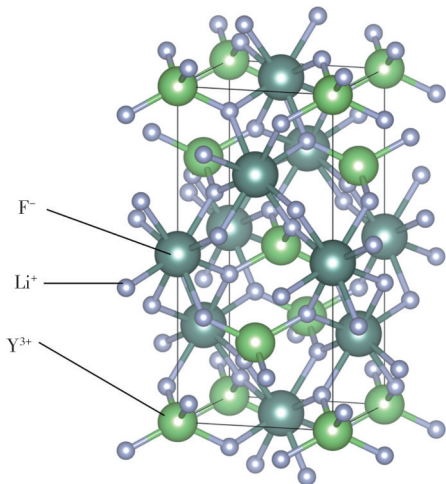


图 1 YLF 晶体结构图

Fig. 1 YLF crystal structure diagram

掺铽氟化物激光晶体综合增益性能主要体现在小信号增益 g_0 上,对应的表达式为^[30]:

$$g_0 = \sigma n, \quad (1)$$

其中, σ 是晶体受激发射截面, n 是激光跃迁上能级反转粒子数, n 与晶体对泵浦激光的吸收截面、晶体的掺杂浓度与掺杂长度、晶体上能级荧光寿命有关。掺铽氟化物晶体是一种在受激辐射时可产生满足高光学质量标准可见激光的掺杂稀土离子氟化物晶体,在光学特性方面表现出许多突出优点。例如,掺铽氟化物晶体具有较高的能带能量,并且对光子的低抵抗力会诱导色心的形成。此外,掺铽氟化物晶体可被用于宽频率调谐绿光激光器的研制。相比于掺镨氟化物晶体,掺铽氟化物材料在绿光光谱区呈现出更宽的发射光谱^[31-32]。在掺铽氟化物晶体的各种基质中,基于 LLF、YLF 基质的掺铽氟化物晶体能承受更高的泵浦值功率^[15]。相比于基于 LLF、YLF 基质的掺铽氟化物晶体激光器,基于 BYF、LaF、KYF、BLuF、TLF 以及 LaF 基质的掺铽氟化物晶体激光器受限于激光晶体较低的光学质量,导致激光输出功率和激光斜效率均低^[33-37]。因此,当前报道的文献中

一般选择采用 Tb:LLF 和 Tb:YLF 晶体作为掺铽氟化物晶体激光器的增益介质来提升激光器的输出功率。

2.2 氟化物晶体中铽离子的光谱特性

铽的原子序数为 65,元素符号为 Tb,属于镧系稀土元素。在 YLF 基质中,铽离子的能级结构图如图 2^[20]所示。实心向上箭头代表吸收,虚线向上箭头代表潜在的电离跃迁放大,向下箭头代表发射。由图 2 可以得出,铽离子的荧光跃迁谱线分别为 485, 540, 585, 620, 640, 670, 680 nm。由于 485 nm 对应的是二级能级系统,铽离子的荧光跃迁不会产生 485 nm 激光。掺铽氟化物晶体对泵浦光的吸收截面较低,一般采用增加铽离子的掺杂离子浓度以及延长掺铽氟化物晶体的长度来提升晶体对泵浦激光的吸收效率。此外,各种掺铽氟化物晶体的受激发射截面均较低。在各种掺铽氟化物晶体中,铽离子所有的可见荧光跃迁都是通过能级 $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$ 之间的自旋禁止跃迁来表征的,对泵浦激光的吸收截面处于 $10^{-22} \sim 10^{-21} \text{ cm}^2$ 数量级^[38]。

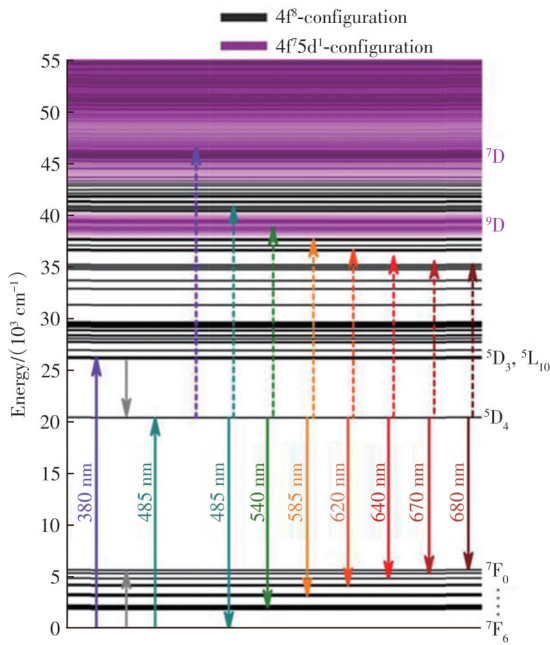


图 2 掺杂到 YLF 基质中的铽离子能级结构图^[20]

Fig. 2 Energy level scheme of the Tb³⁺-ion doped into the YLF matrix^[20]

掺铽氟化物晶体的能级多样性赋予了其丰富的光谱特性^[39],包括多层次光谱线、较长荧光寿命。铽离子在各种氟化物晶体中室温下的吸收光谱,如图 3(a)^[20]所示。需要注意的是,在图 3(a)^[20]中,相比于 400 nm 以上的吸收光谱强度,400 nm

以下的吸收光谱强度较高。为了将掺铽氟化物晶体在宽频范围的吸收光谱特性直观地呈现于单一图形中,图 3(a)^[20]中 400 nm 以下的晶体吸收光谱强度均缩小 10 倍。由图 3(a)^[20]可知,不同掺杂浓度的掺铽氟化物晶体均在 360 nm 以及 485 nm 附近有较强吸收谱线。相比于其他掺铽氟化物晶体,LaF 基质中的铽离子光学跃迁被强烈加宽,类似于玻璃中铽离子的光学跃迁。这归因于铽离子和镧离子的半径差异过大^[20]。在 255 nm 附近的波长范围内,除了 Tb:LaF 的吸收峰之外,在所有掺铽氟化物晶体的吸收光谱中都可以发现一个宽的强吸收峰^[20]。图 3(b)^[20]表明,不同掺杂浓度的掺铽氟化物晶体在 540, 585, 620 nm 波长附近有较强的发射谱线,其中 540 nm 的发射峰最强。另外,485 nm 吸收峰对应⁵D₄和⁷F₆两个能级,485

nm 泵浦源通过将基态铽离子从⁷F₆能级抽运到⁵D₄能级,之后受激离子以辐射跃迁或非辐射跃迁的形式跃迁至⁷F₆能级。由于铽离子激发态⁵D₄和基态⁷F₆能级能量差较大,所以掺铽氟化物的荧光寿命较长。由 J-O 理论计算得出 LiTbF₄(TLF)晶体中铽离子的辐射寿命为 7 ms^[40],该值的准确性需要进一步实验证实。而在掺杂 Sm³⁺杂质的 TLF 和 TbF₃(TbF)晶体中,极高浓度的铽元素捕获光子能量,将能量转移至猝灭中心,从而导致其辐射寿命降低了约两倍,降低至 2 ms^[15]。铽离子的⁵D₄能级荧光寿命都在 5 ms 以上,同时铽离子允许高浓度掺杂,在高浓度掺杂下荧光寿命不会显著降低^[41]。较长的荧光寿命有利于能量存储,因此掺铽氟化物晶体是制备高能量脉冲激光源的潜在激光晶体。

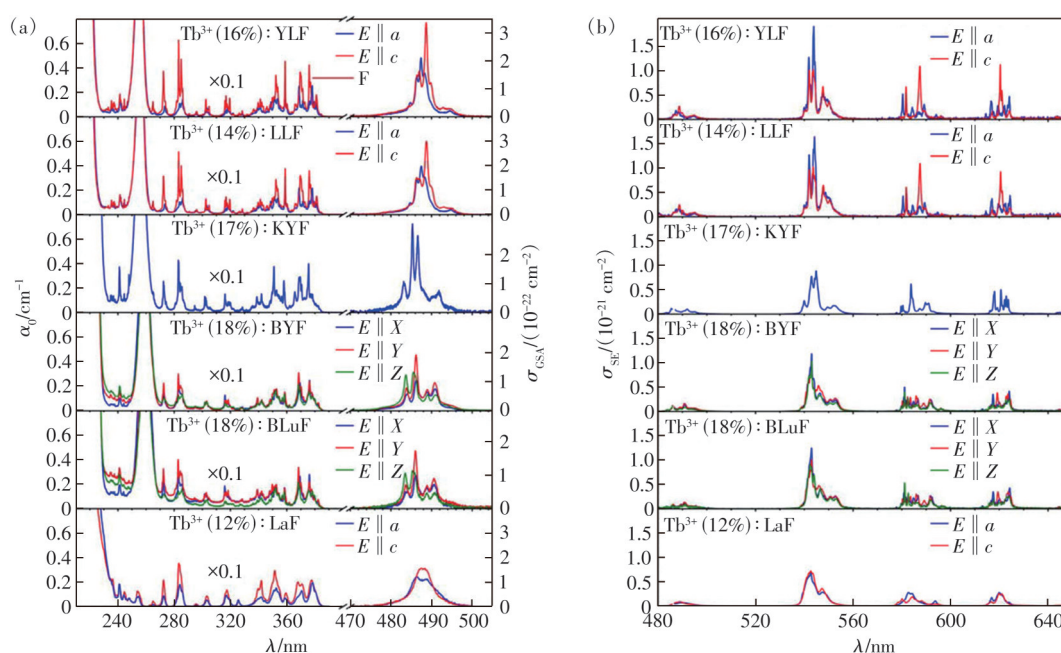


图 3 (a)掺杂铽离子的 YLF、LLF、KYF、BYF、BLuF 和 LaF 单晶的吸收光谱^[20]; (b)掺杂铽离子的 YLF、LLF、KYF、BYF、BLuF 和 LaF 单晶的发射光谱

Fig. 3 (a) Absorption spectra of Tb³⁺-doped YLF, LLF, KYF, BYF, BLuF and LaF single crystals^[20]. (b) Emission spectra of Tb³⁺-doped YLF, LLF, KYF, BYF, BLuF and LaF single crystals

3 掺铽氟化物晶体可见光激光器研究进展

早期,由于泵浦源功率较低,虽然研究人员对掺铽活性材料有浓厚的兴趣,但激光操作局限于功率为毫瓦级的连续激光输出。2008 年以前,关于掺铽材料激光器的文献、报告资料均较少^[20]。由于缺乏合适的泵浦源,几种掺杂稀土离子的可

见光激光器通常使用 Ar 离子激光器作为蓝光泵浦源,虽然可以实现各种激光操作,但效率往往很低^[42]。在 1996 年前,2ω-OPSL 能实现输出功率大于 10 W 的绿光和输出功率大于 5 W 的高光束质量蓝色激光输出^[42]。瓦级铟镓氮激光二极管(In-GaN-LDs)可在 390~530 nm 波段内具有良好光束质量激光输出的同时其商用价格也很低^[42-43]。基于 2ω-OPSL 产生的 488 nm 泵浦激光一般是单横

模甚至是单纵模,最大输出功率约为 3 W。基于 LD 直接产生的 488 nm 泵浦激光通常为单横模,最大输出功率为 200 mW。得益于越来越成熟的蓝光半导体激光器技术,基于掺铽氟化物晶体的可见光激光器于 2014 年之后也得到了快速发展。

3.1 掺铽氟化物晶体可见光连续激光器

2014 年, Bolognesi 等采用最大输出功率为 1.1 W 的 450.1 nm InGaN-LDs 泵浦长度为 19 mm 的 Dy(4%), Tb(1%): LLF 晶体(这里 % 表示原子数分数,下同),实现了最大输出功率为 55 mW 的 574 nm 黄光激光,对应的激光斜效率为 13.4%^[44]。该激光器的泵浦阈值功率为 320 mW,最大输出功率受限于 Dy³⁺ 激光跃迁的 ⁶H_{13/2} 能级的特性。即使利用 Tb³⁺ 共掺杂进行激发,其寿命也较长。另外,在活性介质中获得了大约 68% 的吸收效率。Tb³⁺ 和 Dy³⁺ 之间存在能量共振转移机制 ⁶H_{13/2} → ⁶H_{15/2} 和 ⁷F₆ → ⁷F₄。

2015 年,德国汉堡大学 Metz 等采用 486 nm 的 2 ω -OPSL 泵浦长度为 11 mm、掺杂浓度分别为 14% 和 28% 的 Tb: LLF 晶体。对于 Tb(14%): LLF 和 Tb(28%): LLF 晶体,当入射泵浦功率为 ~2.36 W、输出耦合镜透射率为 1.6% 时,分别实现了 0.61 W 和 0.9 W 的 544 nm 激光输出,对应的光-光转化效率分别为 26% 和 38%。因此,对于 Tb: LLF 晶体激光器,通过提高晶体的掺杂浓度可有效提高泵浦吸收效率,从而提高激光器的光-光转换效率^[45]。同年, Metz 等利用 486.2 nm 2 ω -OPSL 泵浦 Y 轴切割的长度为 5 mm 的掺铽 BLuF 晶体,在平凹腔中采用输出耦合镜透射率为 0.9%、吸收泵浦功率为 625 mW 时,实现了 270 mW 的 543 nm 连续绿光激光输出,对应的激光斜效率 46%^[28]。

2016 年, Metz 等利用 486.2 nm 2 ω -OPSL 泵浦 a 轴切割长度为 21 mm 的 Tb(28%): LLF, a 轴切割长度为 11.4 mm 的 Tb(14%): LLF、 a 轴切割长度为 4.7 mm 的 Tb(16%): YLF、长度为 6.7 mm 的 Tb(17%): KYF、Y 轴切割长度为 5.0 mm 的 Tb(18%): BLuF 和 a 轴切割长度为 4.4 mm 的 Tb(12%): LaF 晶体,研究了不同掺铽氟化物晶体激光器的输出特性。对比发现,长度为 21 mm 的 Tb(28%): LLF 晶体的输出功率最大,在注入泵浦功率 2.56 W、输出耦合镜透射率为 1.6% 时,实现了 1.13 W 的 544 nm 绿光连续激光输出,对应的光-光转化效率为 44%,激光斜效率为 52%。另外,研究发现 Tb(16%): YLF、Tb(17%): KYF 和 Tb: LLF 三种晶体

均可实现在 541.5~550.5 nm 之间的几个波长的激光发射,在这些波长附近均可实现 ± 0.3 nm 的连续调谐范围。其中, Tb: KYF 晶体在 543.5 nm 附近能够实现最宽的连续调谐范围,约为 3 nm^[20]。这表明,掺铽氟化物晶体可被用于频率调谐激光器的研制。同年, Krankel 等研究了基于 Tb, Na: CaF₂ 晶体的可调谐激光器,采用 486 nm 的 2 ω -OPSL 泵浦长度为 17 mm 的 Tb(10%), Na(10%): CaF₂ 晶体。当输出耦合镜透射率为 0.9%、吸收泵浦功率为 264 mW 时,实现了 103 mW 的 541 nm 绿光激光输出,光光转换效率为 38%,激光斜效率为 48%。在激光器采用输出耦合镜透射率为 0.1%、结合在激光谐振腔内插入 2.5 mm 厚的双折射石英滤光片作为波长调谐元件时,实现了在波长 539.5~550 nm 之间 10.5 nm 的平滑连续调谐^[31]。相比于 Tb(10%), Na(10%): CaF₂ 晶体, Tb(14%): LLF 晶体在输出耦合镜透射率为 1% 时,在位于 542 nm、544 nm 和 549 nm 发射峰周围的三个间隔内均可实现连续波长调谐,调谐范围分别约为 1, 1, 4 nm^[32]。

2018 年, Hernandez 等利用 486.2 nm 2 ω -OPSL 泵浦 a 轴切割的长度为 21 mm 的 Tb³⁺(28%): LLF 晶体。当输出耦合镜透射率为 5.5%、吸收泵浦源功率为 2.16 W 时,实现了 0.5 W 的 587.5 nm 黄光激光输出,激光斜效率为 25%^[15]。图 4(a)、(b) 分别为该激光器的实验装置图和输出功率曲线。从图 4(b) 可以看出,该激光器的输出功率曲线并未趋于饱和,可以通过进一步提高注入的泵浦功率结合优化输出耦合镜透射率提升激光器的输出功率。

2020 年, Hernandez 等采用 488 nm InGaN-LDs 泵浦 a 轴切割的长度为 18.5 mm 的 Tb(28%): LLF 晶体,实验装置如图 5(a)^[33] 所示。在绿光波段,当吸收泵浦功率为 ~130 mW 时,采用输出耦合镜透射率为 0.4% 实现了 ~30 mW 的 544 nm 激光输出,对应的激光斜效率为 29%;采用输出耦合镜透射率为 1.3% 和 2.6% 分别实现了 19 mW 和 44 mW 的 542 nm 激光输出,对应的激光斜效率分别为 52% 和 53%。相比于采用输出耦合镜透射率 1.3%,较大输出耦合镜透射率(2.6%)提升了激光器阈值,同时降低了激光器腔内激光强度,导致激光器输出功率较低。在黄光波段,将激光器输出耦合镜透射率在 0~3.3% 范围内变化时,输出激光处于 587 nm 波段。当吸收泵浦功率为 ~130 mW 时,采用输出耦合镜透射率为 1.5% 时

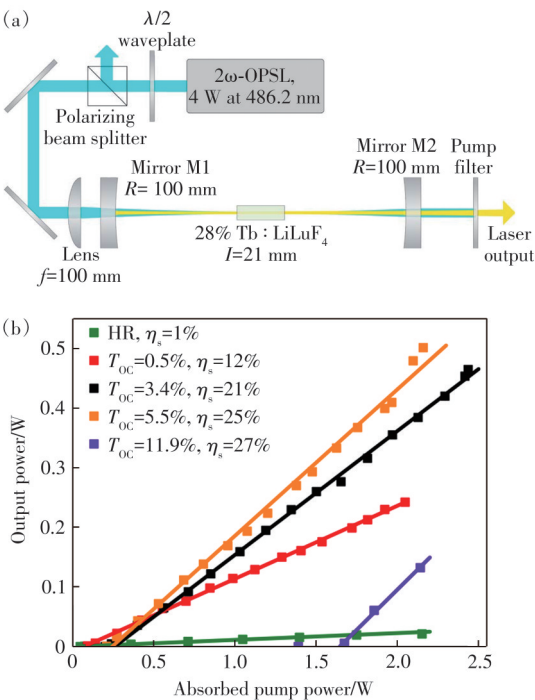


图 4 (a)Tb:YLF 激光器装置图^[15]; (b)利用不同的输出耦合镜,长度为 21 mm 的 *a* 切 Tb:LLF 晶体在 486.2 nm 泵浦源的泵浦下的激光特性

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the Tb:YLF laser experiment^[15]. (b) Laser characteristics of a 21 mm long *a*-cut Tb³⁺:LLF crystal under pumping at 486.2 nm utilizing various output coupling mirrors

实现的 587 nm 激光输出功率最大,为 13.8 mW,对应的激光斜效率为 22%。图 5(b)^[33]展示了 Tb(28%):LLF 晶体分别在 542 nm 和 587 nm 激光最大输出功率时的发射光谱,插图为在最大输出功率下的输出光束的轮廓,表明输出激光以横模 TEM₀₀呈高斯分布。需要注意的是,由 488 nm 蓝光激光二极管泵浦的 Tb(28%):LLF 激光器的输出功率主要受限于激光器二极管的最大输出功率。

2020 年,Chen 等利用 488 nm 2ω-OPSL 泵浦 *c* 轴切割的长度分别为 30 mm 的 Tb(15%):YLF 和 6 mm 的 TLF(15%)晶体,实验装置如图 6(a)所示^[34]。其中,Tb(15%):YLF 晶体表面有抗反射涂层($T>97.5\%$,450~680 nm),TLF 表面没有抗反射涂层。对于 30 mm 的 Tb(15%):YLF 晶体,当输出耦合器的透过率为 1.9%、吸收泵浦功率为 2.13 W 时,实现了 1.17 W 的 544 nm 绿光连续激光输出,光-光转换效率为 55%,激光斜效率为 59%。对于 TLF 晶体,当输出耦合器的透过率为 1.2%、吸收泵浦功率为 2.25 W 时,实现了 315 mW 的 544 nm 激光输出,激光斜效率为 45%。其中,Tb:YLF 和 TLF 晶体在 544 nm 的激光输出特性分别如图 6(b)、(c)所示^[34]。该研究表明,Tb:YLF 和

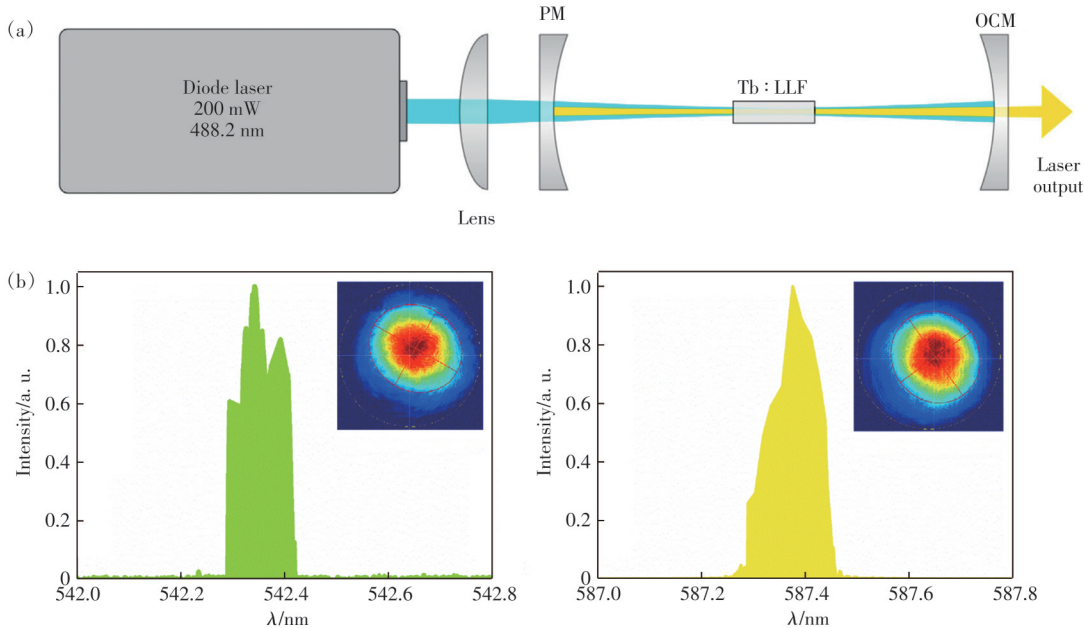


图 5 (a)二极管泵浦的 Tb:LLF 激光器装置图^[33]; (b)在最大输出功率下,以 542.4 nm 为中心的绿光发射的激光发射光谱(左),以 587.4 nm 为中心的黄色发射的激光发射光谱(右)。插图:激光束轮廓

Fig. 5 (a) Schematic of the diode-pumped Tb:LLF laser cavity^[33]. (b) Laser emission spectra for green emission centered at 542.4 nm at maximum output power(left), and yellow emission centered at 587.4 nm at maximum output power(right). Insets: beam profiles of the lasers under the same conditions

TLF 晶体均适用于研制可见光激光器。此外, TLF 晶体由于具有高活性离子浓度 ($136 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 和相对较长的寿命 (3.3 ms), 同样适用于高能量脉冲激光器的制备^[34]。

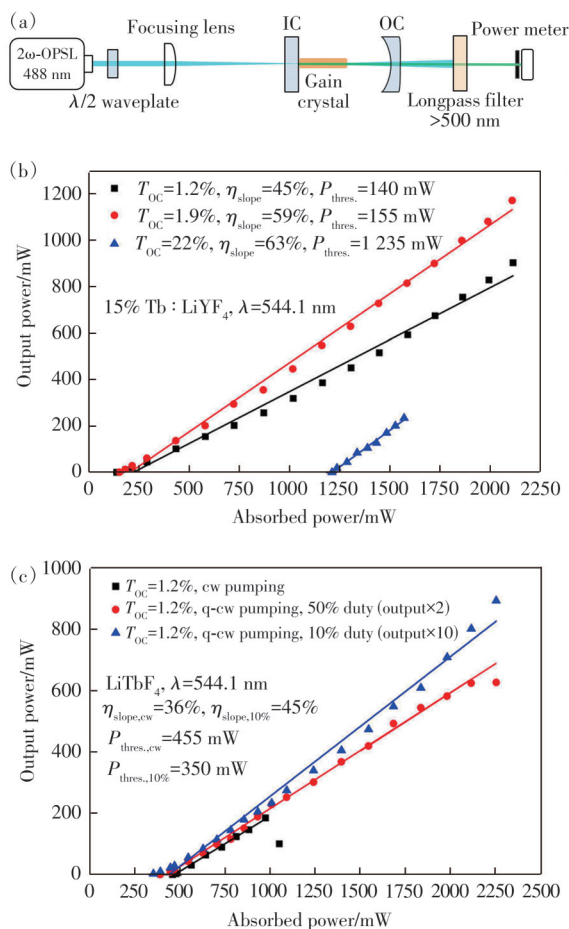


图 6 (a) Tb:YLF 和 TLF 激光操作实验装置^[34]; (b) Tb:YLF 在 544 nm 左右的激光输出特性; (c) LiTbF₄ 在 544 nm 左右的激光输出特性

Fig. 6 (a) Experimental setup for Tb:YLF and TLF laser operation^[34]. (b) Laser output characteristics of Tb:YLF at around 544 nm. (c) Laser output characteristics of LiTbF₄ at around 544 nm

2020 年, 德国莱布尼茨研究所 Kalusniak 等研究了掺铽氟化物可见光激光器在紫外(Ultraviolet, UV)泵浦方式时的输出特性。首先, 研究团队对 718 nm 掺钛蓝宝石连续激光器进行倍频, 并将倍频激光的波长调谐到 Tb:LLF 晶体在紫外波段内最强吸收激光波段 359 nm 处。然后, 利用 359 nm 激光抽运 *a* 轴切割的长度为 11 mm 的 Tb(14%):LLF 晶体, 分别实现了 15 mW 和 24 mW 的 542 nm 绿光激光和 587 nm 黄色激光输出, 对应的激光斜效率分别为 41% 和 20%。与采用 486 nm 泵浦源泵浦方案相比, 紫外泵浦由于 Tb:

LLF 晶体对泵浦光的吸收截面高出五倍以上, 对应的泵浦吸收效率较高。紫外光泵浦 Tb:LLF 激光的光-光转换效率是在相同条件下采用蓝光泵浦的两倍^[35-36]。

2023 年, Badtke 等比较了采用紫外激光二极管和 2ω-Ti:Sa 泵浦长度为 3 mm 的 Tb(28%):LLF 晶体时激光器的输出特性。长度为 3 mm 的 Tb(28%):LLF 对 376 nm 2ω-Ti:Sa 泵浦光的单次吸收效率高达 89%^[37]。采用 376 nm 2ω-Ti:Sa 泵浦时, 当吸收泵浦功率为 1.54 W、输出耦合镜的透射率为 2% 时, 可实现 615 mW 的 542/544 nm 激光输出, 光-光转换效率为 40%, 激光斜效率为 43%。采用 381 nm 2ω-Ti:Sa 泵浦时, 当吸收泵浦功率为 1.1 W、输出耦合镜的透射率为 3.4% 时, 可实现约为 180 mW 的 587 nm 激光输出, 激光斜效率为 17%。采用 378.5 nm 紫外二极管泵浦时, 当吸收泵浦功率为 70 mW、输出耦合镜透射率为 0.9%, 可实现 15 mW 的 542/544 nm 激光输出, 激光斜效率为 36%。同样, 采用 378.5 nm 紫外二极管泵浦时, 当吸收泵浦功率为 70 mW、输出耦合镜透射率为 0.5% 时, 可实现 7 mW 的 587 nm 激光输出, 激光斜效率为 17%。在上述紫外二极管泵浦 Tb(28%):LLF 激光器的输出功率为 10 mW 时, 输出激光的光束质量 *M*² 因子优于 1.5^[37]。这意味着未来在进一步提高掺铽氟化物晶体可见光激光器的输出功率时, 需要注入更高的泵浦功率。此时, 必须考虑掺铽氟化物晶体热效应对激光器输出激光光束质量的影响。

基于掺铽氟化物晶体可见光连续激光器研究进展如表 1 所示。由表 1 可知, 基于掺铽氟化物晶体可见光连续激光器的泵浦波长通常为 486.2 nm。同时, 当前基于 2ω-OPSL 泵浦的掺铽氟化物晶体可见光连续激光器能达到的最大输出功率为 1.17 W, 对应的激光斜效率为 59%。激光器的输出功率主要受当前泵浦功率的限制。目前, 掺铽氟化物晶体的最高掺杂浓度为 28%, 最大吸收效率为 89%。相比于蓝光泵浦掺铽氟化物晶体激光器, 紫外激光泵浦掺铽氟化物晶体激光器对紫外光较大的吸收截面对于较低激光晶体掺杂浓度以及较短激光晶体长度仍能够实现较高的泵浦吸收效率。然而, 紫外激光泵浦掺铽氟化物晶体激光器在激发态吸收、晶体热效应以及潜在的色心生成等问题方面仍需要开展进一步的探索与研究^[36-37]。

表 1 掺铽氟化物晶体可见光连续激光器研究进展

Tab. 1 Research progress of visible light continuous lasers based on terbium-doped fluoride crystals

泵浦源	泵浦波长/ nm	激光晶体	泵浦功率/ W	输出功率/ W	输出波长/ nm	斜效率/%	年份
InGaN-LDs	450.1	Dy(4%), Tb(1%):LLF	1.1	0.055	544	13.4	2014 ^[44]
2ω-OPSL	486	Tb(14%):LLF	2.36	0.61	544	58	2015 ^[45]
		Tb(28%):LLF		0.9		53	
2ω-OPSL	486.2	Tb:BLuF	0.625	0.27	543	46	2015 ^[28]
2ω-OPSL	486.2	Tb(28%):LLF	2.56	1.13	544	52	2016 ^[20]
2ω-OPSL	486	Tb(10%), Na(10%):CaF ₂	0.264	0.103	541	48	2016 ^[31]
2ω-OPSL	486.2	Tb ³⁺ (28%):LLF	2.16	0.5	587.5	25	2018 ^[15]
				0.03	544	29	
InGaN-LDs	488	Tb(28%):LLF	0.13	0.019	542	52	2020 ^[33]
				0.044	542	53	
				0.0138	587	22	
2ω-OPSL	488	Tb(15%):YLF	2.13	1.17	544	59	2020 ^[34]
		TLF(15%)	2.25	0.315		45	
2ω-Ti:Sa	359	Tb(14%):LLF	0.3	0.015	542	41	2020 ^[35]
			0.3	0.024	587	20	
2ω-Ti:Sa	376	Tb(28%):LLF	1.54	0.615	544/542	43	
			1.1	0.18	587	17	
			0.07	0.015	544/542	36	2023 ^[37]
LD	378.5	Tb(28%):LLF	0.07	0.007	587	17	

3.2 掺铽氟化物晶体可见光脉冲激光器

随着半导体激光技术的显著进步,蓝光半导体激光器已经实现了对铽离子的高效泵浦。上述报道的 Tb:YLF 激光器中掺铽氟化物晶体良好的光学特性使其应用于高能量脉冲激光器的研究,并取得了一定研究成果。

2020 年,Chen 等利用 488 nm 2ω-OPSL 泵浦 *c* 轴切割的长度为 30 mm 的 Tb(15%):YLF 晶体。结合在由两个曲率半径为 75 mm 平凹镜构成的谐振腔中插入单层石墨烯作为可饱和吸收体,实现脉冲激光输出。当吸收泵浦功率为 2.13 W、输出耦合镜透射率为 1.9% 时,544 nm 连续激光的输出功率为 744 mW,激光斜效率为 41%。在脉冲激光输出时,当重复频率为 38.7 kHz,在最大平均输出功率 744 mW 处对应的激光脉冲宽度为 2.9 μs,脉冲能量为 19.2 μJ,峰值功率 6.6 W^[46]。

2021 年,Yang 等采用 488 nm 2ω-OPSL 泵浦 *a* 轴切割的长度为 30 mm 的 Tb(10%):YLF 晶体,通过在基于平凹腔镜组成的驻波腔内引入 KD₂PO₄ 电光调 *Q* 开关,实现脉冲激光输出,实验装置图如图 7(a)所示^[47]。当泵浦功率为 1.6 W、输出耦合镜透射率为 5% 时,在 544 nm 绿光波段实现了 178 mW 的连续激光输出,对应的激光斜效率为 20%。对应于脉冲激光输出时,当重复频率为 200 Hz 时,获得了脉冲宽度 248 ns,脉冲能量 198 μJ,峰值功率 797 W。图 7(b)为输出脉冲激

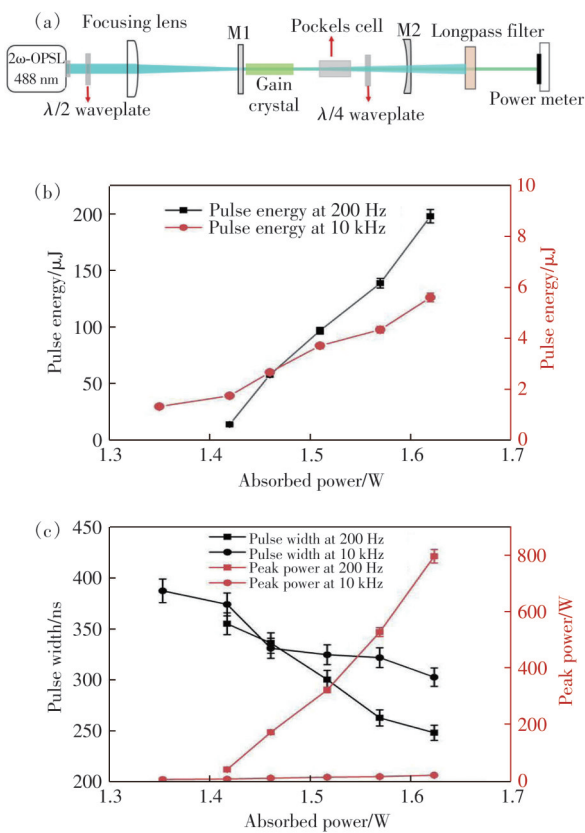


图 7 (a)Tb:YLF 调 Q 激光器装置^[47]; (b)脉冲能量; (c)不同重复频率下的峰值功率和脉冲宽度随吸收泵浦功率绘制

Fig. 7 (a)Schematic diagram of the Tb:YLF Q-switched laser^[47]. (b) Pulse energy. (c) Peak power and pulse width plotted with the absorbed pump power under different repetition rates

光的能量与吸收泵浦功率之间的关系曲线。图 7(c)为不同重复频率下 Tb:YLF 激光器输出激光的峰值功率和脉冲宽度随吸收泵浦功率变化的趋势。在不同的重复频率下,峰值功率均随吸收泵浦功率的增加呈线性增加,而脉宽则是逐渐减小。其中,最短脉冲宽度为 248 ns,最大的峰值功率为 797 W^[47]。

2021 年,Chen 等采用 488 nm 2 ω -OPSL 泵浦 *c* 轴切割的 Tb(15%):YLF 晶体,结合在平凹谐振腔内引入声光调制器作为主动调 *Q* 元件,实现脉冲激光输出^[48]。在吸收的泵浦功率为 1.8 W 以及重复频率为 10 kHz 时,采用的输出耦合镜透射率分别为 2%、5% 和 10% 时,平均输出功率为 480, 675, 615 mW,对应的激光斜效率分别为 28%、47%、51%。在激光器的输出透射率为 10% 时,将声光调制器的重复频率设置为 3 kHz,可实现 445 mW 的平均功率,激光脉冲能量和脉冲持续时间分别为 148 μ J 和 190 ns,表明脉冲峰值功率为 580 W。

该主动调 *Q* 的 Tb:YLF 激光器具备较长的激发态寿命,可在低脉冲重复频率下表现出良好工作特性和储能特性。该研究同时发现,当降低脉冲重复频率时,所需的吸收泵浦提升,表明掺铽氟化物晶体激光器在低脉冲重复频率状态下具有潜在的高效调 *Q* 效应。该研究还发现,掺铽氟化物晶体脉冲激光器在低脉冲重复频率下运转时激光会对掺铽氟化物晶体造成损伤。未来在低脉冲重复频率掺铽氟化物晶体激光器的研究中,需要进一步对掺铽氟化物晶体的损伤机制和提高掺铽氟化物晶体的损伤阈值展开研究^[48]。

掺铽氟化物晶体可见光脉冲激光器研究进展如表 2 所示。从表 2 中可以清楚地看出,基于掺铽氟化物晶体可见光脉冲激光器采用的泵浦源波长通常为 488 nm。此外,目前基于掺铽氟化物晶体可见光脉冲激光器的最大峰值功率为 797 W,最大平均输出功率为 744 mW,最高斜效率为 51%。

表 2 掺铽氟化物晶体可见光脉冲激光器研究进展

Tab. 2 Research progress of visible light pulsed lasers based on terbium-doped fluoride crystals

泵浦源	泵浦 波长/nm	激光 晶体	泵浦 功率/W	平均 功率/W	峰值 功率/W	输出 波长/nm	斜效率/ %	脉冲 宽度/ns	脉冲 能量/ μ J	年份
2 ω -OPSL	488	Tb(15%):YLF	2.13	0.744	6.6	544	41	2 900	19.2	2020 ^[46]
2 ω -OPSL	488	Tb(10%):YLF	1.6	0.178	797	544	20	248	198	2021 ^[47]
2 ω -OPSL	488	Tb(15%):YLF	1.8	0.445	580	544	51	190	148	2021 ^[48]

3.3 基于掺铽氟化物晶体的深紫外激光器

传统深紫外光源(Deep ultraviolet, DUV)主要是利用 1 μ m 的掺钕激光器经四次谐波产生来制备。基于该种方式生产的深紫外光源具有高光子能量的特性,目前在科学研究和光通信领域中得到了广泛应用^[49-53]。DUV 的产生通常涉及多步频率转换,这导致激光输出时损耗严重。相比于采用经多次谐波产生的 DUV 方案,基于腔内掺铽氟化物晶体可见光激光器产生的 DUV 光源具有结构紧凑简化、光-光转化效率高的特征。因此,研究人员开展了腔内倍频掺铽氟化物晶体激光器产生 DUV 光源的研究工作,并取得一定的研究成果。

2022 年,Chen 等采用 488 nm 2 ω -OPSL 泵浦 *c* 轴切割长度为 30 mm 的 Tb(15%):YLF 晶体,结合在“V”字形折叠腔内引入可饱和吸收体 Co²⁺:MgAl₂O₄作为脉冲激光产生元件,进一步结合在谐振腔内引入 I 类相位匹配的 β -BaB₂O₄作为非线性倍频晶体实现深紫外激光。在吸收泵浦功率

为 1.44 W 时,实现了 127 mW 的 272 nm 连续 DUV 激光输出。在同样的吸收泵浦功率下,当饱和吸收体对基频光的透射率为 99% 时,可实现最大脉冲激光能量为 7.2 μ J、峰值功率 6.1 W 的 272 nm DUV 脉冲激光;当饱和吸收体对基频光的透射率为 94.7% 时,可实现最大脉冲激光能量为 100 μ J、峰值功率 320 W 的 272 nm DUV 脉冲激光(图 8)^[54]。该研究表明,基于掺铽氟化物激光器倍

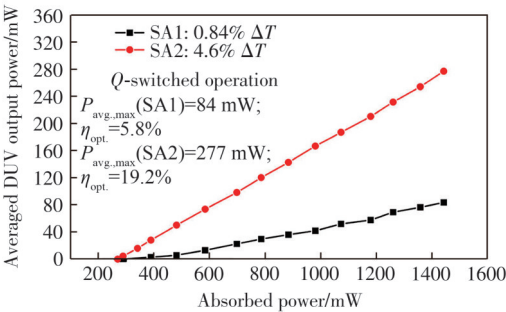


图 8 调 *Q* 倍频 Tb:YLF 激光器的平均输出功率^[54]

Fig. 8 Averaged output power of the *Q*-switched frequency-doubled Tb:YLF lasers^[54]

频产生的 DUV 激光系统不仅具有良好的储能能力,同时具有向高能量和高峰值功率发展的巨大潜力。

4 总结与展望

铽稀土矿作为掺铽氟化物晶体可见光激光器增益介质的原材料,在国内外均有分布,但是即使在含铽最高的高钇离子型重稀土矿中,铽的含量也仅仅占总稀土的 1.1%~1.2%,其昂贵的成本是造成掺铽氟化物晶体以及掺铽氟化物晶体可见光激光器现阶段无法实现商业化和得到实际应用的重要原因。但是,掺铽氟化物晶体可见光激光器具有广泛的应用场景和极高的应用价值,预计其未来的市场需求将会持续增长。这意味着需要深入开展更多有关掺铽氟化物晶体可见光激光器的研究。在掺铽氟化物晶体可见光激光器的众多研究方向中,输出功率的提升是重点研究方向。掺铽氟化物晶体可见光激光器输出功率的进一步提升依赖于增加注入的 488 nm 泵浦激光的功率。

随着掺铽氟化物晶体可见光激光器更高泵浦功率的注入,需要进一步开展激光器谐振腔结构的优化设计。同时,需要对掺铽氟化物晶体的热力学、硬度、机械强度以及热损伤极限等方面展开研究。

目前,用来有效提升掺铽氟化物晶体激光器输出功率的方法有提高泵浦源的输出功率、优化掺铽氟化物晶体的选择及晶体表面的抛光和抗反射涂层、设计新型有效的谐振腔等。随着 488 nm 泵浦源输出功率的进一步提高,掺铽氟化物晶体激光器输出功率将进一步提升,这就不可避免地需要对晶体的热效应进行研究。未来,掺铽氟化物晶体可见光激光器将会继续朝着紧凑、高功率、高光束质量的方向发展。相信随着掺铽氟化物可见光激光器的发展,其有望在科学研究和工业领域得到实际应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240206>

参 考 文 献:

- [1] KIMBLE H J. The quantum internet [J]. *Nature*, 2008, 453(7198): 1023-1030.
- [2] DUERING M, KOLEV V, LUTHER-DAVIES B. Generation of tuneable 589 nm radiation as a Na guide star source using an optical parametric amplifier [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(2): 437-446.
- [3] GAUNT A L, SCHMIDT T F, GOTLIBOVYCH I, *et al.* Bose-Einstein condensation of atoms in a uniform potential [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110(20): 200406.
- [4] AZADGOLI B, BAKER R Y. Laser applications in surgery [J]. *Ann. Transl. Med.*, 2016, 4(23): 452-452.
- [5] WALSH L J. The current status of laser applications in dentistry [J]. *Aust. Dent. J.*, 2003, 48(3): 146-155.
- [6] KAPOOR V, KARPOV V, LINTON C, *et al.* Solid state yellow and orange lasers for flow cytometry [J]. *Cytometry Part A*, 2008, 73A(6): 570-577.
- [7] MAINSTER M A. Wavelength selection in macular photocoagulation: tissue optics, thermal effects, and laser systems [J]. *Ophthalmology*, 1986, 93(7): 952-958.
- [8] PANDYA S, YU J H, PARKER D. Engineering emissive europium and terbium complexes for molecular imaging and sensing [J]. *Dalton Trans.*, 2006, (23): 2757-2766.
- [9] JUNCAR P, PINARD J, HAMON J, *et al.* Absolute determination of the wavelengths of the sodium D₁ and D₂ lines by using a CW tunable dye laser stabilized on iodine [J]. *Metrologia*, 1981, 17(3): 77-79.
- [10] ZANG E J, CAO J P, LI Y, *et al.* Realization of four-pass I₂ absorption cell in 532-nm optical frequency standard [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2007, 56(2): 673-676.
- [11] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, *et al.* Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116(6): 061102.
- [12] VAHLBRUCH H, MEHMET M, DANZMANN K, *et al.* Detection of 15 dB squeezed states of light and their application for the absolute calibration of photoelectric quantum efficiency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117(11): 110801.
- [13] MASUI S, MIYOSHI T, YANAMOTO T, *et al.* Blue and green laser diodes for large laser display [C]. *Proceedings of 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, Kyoto, 2013: 1-2.
- [14] BOVATSEK J, TAMHANKAR A, PATEL R S, *et al.* Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(10): 2897-2904.

- [15] CASTELLANO-HERNÁNDEZ E, METZ P W, DEMESH M, *et al.* Efficient directly emitting high-power $\text{Tb}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ laser operating at 587.5 nm in the yellow range [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(19): 4791-4794.
- [16] 张怀金, 张玉霞, 于浩海, 等. 掺镨激光晶体及其全固态脉冲可见激光研究 [J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(10): 1392-1401.
ZHANG H J, ZHANG Y X, YU H H, *et al.* Pr^{3+} -doped laser crystals and their all-solid-state pulse visible lasers [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2017, 45(10): 1392-1401. (in Chinese)
- [17] KRÄNKEL C, MARZAH L D T, MOGLIA F, *et al.* Out of the blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2016, 10(4): 548-568.
- [18] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S, *et al.* High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q -switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(2): 105-107.
- [19] CZERANOWSKY C, HEUMANN E, HUBER G. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(6): 432-434.
- [20] METZ P W, MARZAH L D T, MAJID A, *et al.* Efficient continuous wave laser operation of Tb^{3+} -doped fluoride crystals in the green and yellow spectral regions [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2016, 10(2): 335-344.
- [21] ZHANG H L, LIU X M, LI D J, *et al.* A compact 532-nm source by frequency doubling of a diode stack end-pumped Nd:YAG slab laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, 24(10): 2846-2848.
- [22] TANAKA H, KALUSNIAK S, BADTKE M, *et al.* Visible solid-state lasers based on Pr^{3+} and Tb^{3+} [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2022, 84: 100411.
- [23] BJORKLUND S, KELLERMEYER G, HURT C R, *et al.* Laser action from terbium trifluoroacetylacetonate in p -dioxane and acetonitrile at room temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 10(5): 160-162.
- [24] KARAPETYAN G O, LUNTER S G. The luminescence of glasses activated with terbium [J]. *J. Appl. Spectrosc.*, 1966, 5(3): 232-236.
- [25] JENSSEN H, CASTLEBERRY D, GABBE D, *et al.* Stimulated emission at 5445 Å in $\text{Tb}^{3+}:\text{YLF}$ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, 9(6): 665.
- [26] YAMASHITA T, QIN G S, SUZUKI T, *et al.* A new green fiber laser using terbium-doped fluoride fiber [C]. *Proceedings of 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego*, 2008: 1-3.
- [27] DORENBOS P, KRUMPEL A H, VAN DER KOLK E, *et al.* Lanthanide level location in transition metal complex compounds [J]. *Opt. Mater.*, 2010, 32(12): 1681-1685.
- [28] METZ P W, MARZAH L D T, MAJID A, *et al.* Monoclinic 20at. % Tb^{3+} -doped $\beta\text{-BaLu}_2\text{F}_8$ single crystals: growth and efficient green laser operation [C]. *Proceedings of the 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Busan*, 2015: 26A1_4.
- [29] FANG L Z, ZHOU X, ZHANG J L, *et al.* Control of white light emission via co-doping of Dy^{3+} and Tb^{3+} ions in LiLuF_4 single crystals under UV excitation [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2020, 31(4): 3405-3414.
- [30] SIEGMAN A E. *Lasers* [M]. Mill Valley: University Science Books, 1986.
- [31] KRÄNKEL C, METZ P W, HUBER G. Continuous wave and wavelength tunable green $\text{Tb}^{3+}:\text{CaF}_2$ laser [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers Conference 2016, Boston*, 2016: AM3A.2.
- [32] METZ P W, MARZAH L D T, HUBER G, *et al.* Performance and wavelength tuning of green emitting terbium lasers [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(5): 5716-5724.
- [33] CASTELLANO-HERNÁNDEZ E, KALUSNIAK S, METZ P W, *et al.* Diode-pumped laser operation of $\text{Tb}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ in the green and yellow spectral range [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2020, 14(2): 1900229.
- [34] CHEN H, UEHARA H, KAWASE H, *et al.* Efficient visible laser operation of $\text{Tb}:\text{LiYF}_4$ and LiTbF_4 [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(8): 10951-10959.
- [35] KALUSNIAK S, TANAKA H, CASTELLANO-HERNÁNDEZ E, *et al.* UV-pumped visible Tb^{3+} -lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(22): 6170-6173.
- [36] KALUSNIAK S, TANAKA H, CASTELLANO-HERNÁNDEZ E, *et al.* Enhanced absorption efficiency in UV-pumped $\text{Tb}^{3+}:\text{LLF}$ [C]. *Proceedings of the 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, Munich*, 2021: ca_1_2.
- [37] BADTKE M, KALUSNIAK S, TANAKA H, *et al.* UV-laser-diode-pumped visible $\text{Tb}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2023, 48(13): 3379-3382.

- [38] DIEKE G H, SATTEN R A. Spectra and energy levels of rare earth ions in crystals [J]. *Am. J. Phys.*, 1970, 38(3): 399-400.
- [39] DUTTA D P, WARRIER S, GHILDAYAL R, *et al.* Sonochemical synthesis of lanthanide ions doped CeF₃ nanoparticles: potential materials for solid state lighting devices [J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2009, 9(8): 4715-4720.
- [40] VASYLIEV V, VÍLLORA E G, SUGAHARA Y, *et al.* Judd-Ofelt analysis and emission quantum efficiency of Tb-fluoride single crystals: LiTbF₄ and Tb_{0.81}Ca_{0.19}F_{2.81} [J]. *J. Appl. Phys.*, 2013, 113(20): 203508.
- [41] 刘坚, 王无敌, 宋青松, 等. Tb³⁺离子掺杂CaF₂晶体的生长和发光性能 [J]. *发光学报*, 2022, 43(11): 1750-1757.
LIU J, WANG W D, SONG Q S, *et al.* Growth and luminescence properties of Tb³⁺ ions doped CaF₂ crystals [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(11): 1750-1757. (in Chinese)
- [42] KRÄNKEL C, MARZAH D T, METZ P W. Novel lasers in the visible spectral range [C]. *Proceedings of the 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Busan*, 2015: 28G1_1.
- [43] NAKAMURA S, SENOH M, NAGAHAMA S I, *et al.* InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, 35(1B): L74-L76.
- [44] BOLOGNESI G, PARISI D, CALONICO D, *et al.* Yellow laser performance of Dy³⁺ in co-doped Dy, Tb: LiLuF₄ [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(23): 6628-6631.
- [45] METZ P W, MARZAH D T, MAJID A, *et al.* High power continuous wave visible Tb³⁺: LiLuF₄ laser [C]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers Conference 2015, Berlin*, 2015: ATu1A. 1.
- [46] CHEN H, YAO W, UEHARA H, *et al.* Graphene Q-switched Tb: LiYF₄ green laser [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(9): 2596-2599.
- [47] YANG H, CHEN H, LI E, *et al.* Electro-optically Q-switched operation of a high-peak-power Tb: LiYF₄ green laser [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(20): 31706-31713.
- [48] CHEN H J, YAO W C, UEHARA H, *et al.* Actively Q-switched Tb: LiYF₄ green lasers [J]. *Appl. Phys. Express*, 2021, 14(6): 062002.
- [49] 郭春辉, 孙雪娇, 郭凯, 等. 紫外光通信用日盲型LED研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1849-1861.
GUO C H, SUN X J, GUO K, *et al.* Recent progress of solar blind light emitting diodes for ultraviolet optical wireless communication use [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1849-1861. (in Chinese)
- [50] 褚明辉, 郭建强, 高殿昆, 等. 用新的紫外荧光光源对维生素D₂的最佳光合成 [J]. *发光学报*, 2000, 21(1): 64-67.
ZHU M H, GUO J Q, GAO D K, *et al.* The optimum photochemical synthesis of vitamin-D₂ by new ultraviolet fluorescence light source [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2000, 21(1): 64-67. (in Chinese)
- [51] 李帅朋, 向群, 秦楠, 等. 超长氧化锌纳米线的制备及其气敏性能和紫外传感应用研究 [J]. *发光学报*, 2014, 35(5): 608-612.
LI S P, XIANG Q, QIN N, *et al.* Preparation of ultra-long ZnO nanowires and its gas sensing properties and UV sensing application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(5): 608-612. (in Chinese)
- [52] 梁延杰, 刘景伟, 闫劭, 等. 蓝光LED激发深紫外上转换发光材料的光学定位与追踪应用 [J]. *发光学报*, 2022, 43(9): 1436-1445.
LIANG Y J, LIU J W, YAN S, *et al.* Blue LED-excitable deep ultraviolet upconversion phosphor for optical locating and tracking application [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(9): 1436-1445. (in Chinese)
- [53] XUAN H W, IGARASHI H, ITO S, *et al.* High-power, solid-state, deep ultraviolet laser generation [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(2): 233.
- [54] CHEN H J, UEHARA H, YASUHARA R. Compact deep ultraviolet frequency-doubled Tb: LiYF₄ lasers at 272 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(19): 5558-5561.



刘子琪(2004-),男,山西吕梁人,在读本科生,主要从事激光技术方面的科研创新训练。
E-mail: 2179238772@qq.com



郭永瑞(1989-),男,山西吕梁人,博士,副教授,2020年于山西大学获得博士学位,主要从事激光技术及量子光学方面的研究。
E-mail: guoyr@cqupt.edu.cn