

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-17

太阳光抽运固体激光放大器研究进展

孙良哲^{1,2,3}, 许乐乐^{3,4}, 闫震⁵, 高乐乐⁵, 张光睿⁵, 周天元^{3,4},
顾叶⁶, 辛潮⁶, 张乐^{3,4*}, 陈浩^{1,2,3*}

- (1. 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏高校智能光电子器件与芯片重点实验室, 江苏 苏州 215009;
2. 苏州科技大学物理科学与技术学院, 太湖光子中心前沿技术研究院, 江苏 苏州 215009;
3. 江苏锡沂新材料产业技术研究院, 江苏 徐州 221400;
4. 江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116;
5. 内蒙古北方稀土新材料技术创新有限公司, 稀土新材料技术创新中心, 内蒙古 包头 014030;
6. 江苏曙光光电有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 面向空间能源传输与空间防御等重大应用需求, 发展高效、轻量化的空间激光系统具有重要战略意义。太阳光直接抽运固体激光技术省去了多级能量转换环节, 在系统效率、热管理和结构复杂度等方面具有显著优势, 但其性能高度依赖于增益介质对宽谱太阳光的能量转化能力。本文系统综述了 Nd:YAG、Ce:Nd:YAG 和 Cr:Nd:YAG 三种典型增益介质的光谱特性、能级结构及能量传递机制, 对比分析了国内外太阳光抽运激光振荡器与放大器的研究进展, 并从输出功率、光-光转换效率及热管理特性等方面评估了不同介质的性能表现。研究表明, Cr:Nd:YAG 陶瓷材料凭借高效能量传递及其高温下增强的交叉弛豫效应, 可在 450 K 附近保持较高的小信号增益和转换效率, 展现出优异的空间应用潜力。在系统层面, 激光放大器结构简单、稳定性高, 可通过多级级联实现功率定标放大, 比振荡器更契合空间应用对高功率、大能量激光输出的需求。结合增益介质特性与放大器构型优势, 本文提出了一种以空间应用为导向的太阳光抽运激光放大器建议方案。

关键词: 太阳光抽运; 增益介质; 激光放大器; 空间应用

中图分类号: O436

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260173

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260173

Progress in Solar-Pumped Solid-State Laser Amplifiers

SUN Liangzhe^{1,2,3}, XU Lele^{3,4}, YAN Zhen⁵, GAO Lele⁵, ZHANG Guangrui⁵, ZHOU Tianyuan^{3,4},
GU Ye⁶, XIN Chao⁶, ZHANG Le^{3,4*}, CHEN Hao^{1,2,3*}

- (1. Key Laboratory of Intelligent Optoelectronic Devices and Chips of Jiangsu Higher Education Institutions, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China;
2. Advanced Technology Research Institute of Taihu Photon Center, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China;
3. Jiangsu Xiyi Advanced Materials Research Institute of Industrial Technology, Xuzhou 221400, China;
4. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronics Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;
5. Rare Earth Advanced Materials Technology Innovation Center, Inner Mongolia Northern Rare Earth Advanced Materials Technology Innovation Co., Ltd, Baotou, 014030, China;
6. Jiangsu Shuguang Optoelectronics Co., Ltd, Yangzhou 225009, China)
* Corresponding Authors, E-mail: chen@usts.edu.cn; zhangle@jsnu.edu.cn

Abstract: In response to the major application demands of space energy transmission and space defense, the devel-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD0617200)、国家自然科学基金(52202135)

Supported by Advanced Materials-National Science and Technology Major Project (No.2025ZD0617200); National Natural Science Foundation of China(52202135)

opment of high-efficiency, lightweight space laser systems holds significant strategic importance. Direct solar-pumped solid-state laser technology eliminates multiple energy conversion stages, offering notable advantages in system efficiency, thermal management, and structural complexity; however, its performance critically depends on the energy conversion capability of gain media for broadband sunlight. This paper systematically reviews the spectral characteristics, energy level structures, and energy transfer mechanisms of three typical gain media—Nd:YAG, Ce: Nd:YAG, and Cr:Nd:YAG—and comparatively analyzes the research progress of solar-pumped laser oscillators and amplifiers both domestically and internationally. The performance of different gain media is evaluated in terms of output power, optical-to-optical conversion efficiency, and thermal management characteristics. The results indicate that Cr:Nd:YAG ceramics, benefiting from efficient energy transfer and the enhanced cross-relaxation effect at elevated temperatures, can maintain high small-signal gain and conversion efficiency around 450 K, demonstrating outstanding potential for space applications. At the system level, laser amplifiers feature simple structures and high stability, enabling power scaling through multi-stage cascading, making them more suitable than oscillators for space applications requiring high-power, high-energy laser output. Based on the combined advantages of gain medium properties and amplifier configurations, this paper proposes a recommended technical scheme for a solar-pumped laser amplifier oriented toward space applications.

Keywords: solar pumping; gain medium; laser amplifier; space application

1 引 言

随着国家战略格局以及能源需求的演变,空间激光技术已成为维护国家利益的关键。《中国科学报》指出^[1],我国计划于2030年与2050年分别建设兆瓦级小型空间太阳能试验电站以及具备建设吉瓦级商业空间太阳能电站的能力。在空-地无线能量传输链路中,微波技术相对成熟,具有大气穿透性强、传输效率高和安全性高等特点;但综合考量系统重量、体积和空间发射成本(低轨发射成本高达2万元~5万元人民币/千克)等全系统因素,激光无线能量传输技术路线仍然具有较大的发展潜力,例如基于超短脉冲激光产生等离子通道以实现高效传能亦存在可能性。在无大气影响的卫星间能源调度、在轨充电等空间装备间的无线能量传输链路中,激光具有高指向性、小发散角等特点,端到端传输效率显著优于微波,更契合航天器对重量和体积的严格限制要求。值得注意的是,2025年12月,美国初创公司Overview Energy走出隐身模式,宣布成功利用近红外激光从5000米高空的移动飞机向地面传输了电力^[2],这是全球首次从移动平台实现高功率无线电力传输。与美国空军研究实验室(AFRL)过去几十年研究的微波传输(RF Microwaves)路线不同,Overview Energy采用近红外激光作为能量载体,可直接射向地面现有的标准光伏太阳能电站。这意味着军事基地或民用电网无需重建复杂的接收天

线,现有的太阳能电池板在夜间或阴天也能“照常发电”,实现全天候供电。同时,美国NASA Langley研究中心报告表明,数十至数百千瓦功率的空间激光武器可对目标形成有效打击,空间中丰富的太阳辐射可为激光系统提供强劲的持续能源,支持全天候响应,成本远低于传统武器系统,是未来空天对抗的重要发展方向之一^[3-4]。

然而,空间装备的发展面临着特殊环境的挑战:高昂的发射成本要求装备系统尽量轻量化;空间真空环境致使装备主要依赖效率较低的辐射散热方式,热管理成为关键瓶颈技术之一。常规空间激光系统通常需先将太阳光转化为电能,再通过抽运系统为增益介质提供能量以实现激光输出,需要经历多次能量转换,导致系统总体能量转换效率较低(约1.5%~4.0%)^[5],集中散热负载较大。采用大面积轻质薄膜聚光系统汇聚太阳光并直接抽运增益介质,则无需复杂的能量转换过程即可实现高效窄带激光发射,具有转换效率高、散热负载小、系统重量轻、空间应用成本低、使用寿命长等特征。相较于激光振荡器,太阳光直接抽运的激光放大器则凭借其结构简单、稳定性好、模块化扩展能力强等特点,更易于实现轻量化和集成化,能够有效满足空间应用对高功率、高能量、高光束质量激光输出的需求,是未来空间能量传输、空间装备安全、空天地防御乃至空间核聚变等重大应用的潜在优选技术方案之一^[6-8]。

由于红宝石、GSGG等基质在太阳光抽运条

件下,性能总体表现不佳,也缺乏关于放大器的系统性研究,所以本文将主要聚焦于太阳光抽运固体激光振荡器/放大器中应用最广泛、性能最突出的YAG基增益介质(Nd:YAG、Ce:Nd:YAG、Cr:Nd:YAG)开展相关分析,详细对比了这三种增益介质的性能参数,总结了太阳光直接抽运激光器、放大器的国内外相关研究进展,并提出了一种以空间应用为导向的太阳光抽运激光放大器建议方案。

2 太阳光抽运激光振荡器与放大器对比分析

太阳光直接抽运激光技术自1966年实现首次激光输出以来,振荡器研究始终占据主导地位。近年来,随着聚光系统和增益介质的不断优化,振荡器输出性能显著提升。在多模输出方面,Wang等(2026)采用单棒Ce:Nd:YAG获得97 W激光输出,光—光转换效率达4.49%,为目前公开报道的最高输出功率^[9];Costa等(2025)采用菲涅尔透镜抽运四根Ce:Nd:YAG棒,实现了22.46 W的多模激光输出,转换效率同样达到4.49%^[10]。在基模(TEM₀₀)输出方面,Costa^[11]等(2025)利用抛物面镜抽运Ce:Nd:YAG实现了6.05 W激光输出,在输出功率上保持领先;Liang等(2024)采用菲涅尔透镜抽运Ce:Nd:YAG获得1.41 W基模输出,光—光转

换效率达2.06%^[12],在转换效率方面表现优异。在太阳光抽运激光放大器方面,相关研究晚于振荡器,系统性报道较少。2009年,Saiki等率先利用Cr:Nd:YAG主动镜结构实现了连续及脉冲种子光的双程放大^[13],验证了太阳光抽运激光放大的可行性。2017年,该团队通过四级主动镜放大系统,在闪光灯模拟太阳光抽运下获得了1.6 kW的峰值功率输出,光—光转换效率达63%^[14]。国内方面,2013年北京理工大学关哲^[15]等人采用板条结构实现了1.64倍光放大;2017年王予^[16]等人对比研究了Nd:YAG与Cr:Nd:YAG板条放大器,分别获得1.50倍和1.58倍的增益。

总体而言,当前太阳光抽运激光振荡器技术相对成熟,对系统设计稳定性要求较高,在高功率、大能量输出方面受到自身光学谐振腔结构和散热结构等方面的限制,目前输出功率停留在百瓦级水平。相比之下,放大器的研究起步较晚、成果较少,但其无需谐振腔,结构简单,模块化扩展能力强,可通过多级级联实现千瓦级峰值功率输出;同时,放大器可灵活采用板条、碟片等构型,温度场分布均匀,散热设计多样,尤其适合空间场景中对高功率、大能量激光的需求。表1中对比了振荡器与放大器在太阳光抽运条件下的核心差异。

表1 太阳光抽运激光振荡器与放大器对比

Tab. 1 Comparison between solar-pumped laser oscillator and amplifier

振荡器		放大器
光学结构复杂度	谐振腔结构,系统稳定性较脆弱	无需谐振腔,结构相对简单,稳定性高
模块化扩展能力	受限于腔结构和热效应,定标困难	可通过多级级联实现功率定标
高功率/大能量潜力	受限,目前百瓦级	已实现kW级峰值功率输出
热管理便捷性	增益介质热积累集中,需主动冷却	可采用板条、碟片等构型,热分布均匀,散热设计灵活

3 太阳光抽运激光增益介质

激光增益介质是太阳光抽运激光器与放大器的核心组成部分之一,由固体基质与掺杂激活离子构成,是实现高质量激光输出的关键。优质的激光增益介质,需满足与太阳光光谱的高度匹配,以实现太阳光能量的高效率转化;也需要拥有良好的热管理性能,以保障激光器或者放大器的稳定运行。在固体基质中,稀土掺杂的晶体、玻璃、陶瓷等块体材料是当前最主要的基质材料类别。以YAG为代表的晶体,光学质量高、散射损耗低、导热率高,但生长周期长、制造成本高、尺寸与掺杂浓度受限^[17]。玻璃介质也具备良好的光学性

能,且制备工艺相对简单、易大尺寸成型、掺杂均匀性好,但热导率低、热稳定性差,易出现热致畸变。透明陶瓷(如YAG陶瓷)具有高导热率、高损伤阈值以及短制备周期等优势,可实现高浓度均匀掺杂、大尺寸和复杂复合结构制备,通常具有较好的机械韧性和较少的残余应力,被视为最具发展潜力的激光材料之一^[18]。三类基质材料关键性能对比如表2中所示。

太阳光抽运的增益光纤则因其表面积体积比大、便于冷却等特点也受到一定的关注^[19-23],但受限于其复杂的制造工艺、远低于单晶或透明陶瓷材料的增益系数等自身性能因素,以及太阳光抽

Nd^{3+} 离子的 5 个吸收过程并不都能直接形成上下激光能级的粒子数反转, 反而会通过无辐射跃迁过程在激光系统中形成大量的热积累, 对激光系统的稳定性产生严重影响, 劣化激光的光束质量。

自 1966 年 C. G. Young^[29] 首次利用直径 61 cm

抛物面镜汇聚太阳光抽运 Nd:YAG 实现 1 W 的 1064 nm 连续激光输出以来, 科研人员对太阳光抽运 Nd:YAG 进行了大量探索性研究, 在提高太阳光收集效率、提升激光输出功率和光束质量等方面取得了丰硕的成果。表 3 给出了部分代表性成果。

表 3 太阳光抽运 Nd:YAG 激光输出特性总结

Tab. 3 Summary of solar-pumped Nd:YAG laser output performance

Year	Authors	Type of concentrator	Mode	Output laser power/W	Collection Efficiency/(W/m ²)	SLCE
1966	C. G. Young et al. ^[29]	Parabolic mirror		1.0	—	0.57%
1988	M. Weksler et al. ^[30]	Parabolic mirror		60.0	—	—
2003	Lando et al. ^[31]	Parabolic mirror	Multimode	46.0	6.70	—
2011	Liang et al. ^[32]	Fresnel lens		12.3	19.33	2.17%
2012	Dinh et al. ^[33]	Fresnel lens		120.0	30.00	3.26%
2013	Liang et al. ^[34]	Fresnel lens		2.3	2.93	0.33%
2015	Liang et al. ^[35]	Parabolic mirror		4.4	1.91	0.23%
2015	Almeida et al. ^[36]	Parabolic mirror	TEM ₀₀	5.5	2.84	0.30%
2015	Vistas et al. ^[37]	Parabolic mirror		4.0	3.64	0.40%
2016	Liang et al. ^[38]	Parabolic mirror		4.5	3.98	0.44%
2017	Liang et al. ^[39]	Parabolic mirror		9.3	7.88	0.79%
2017	Liang et al. ^[39]	Parabolic mirror		37.2	31.53	3.15%
2018	Guan et al. ^[40]	Fresnel lens	Multimode	33.1	32.14	3.28%
2019	Liang et al. ^[41]	Parabolic mirror		15.3	17.00	2.43%
2020	Liang et al. ^[42]	Parabolic mirror		18.3	18.30	2.20%

SLCE: Solar-Laser conversion efficiency

3.2 Ce:Nd:YAG 光谱、能级特性

Nd:YAG 材料的吸收光谱与太阳光光谱匹配度不高, 可以通过共掺三价 Ce^{3+} 离子提升增益介质的吸收效率。在 YAG 基质中, Ce^{3+} 离子对 315 nm~510 nm 的可见光具有强吸收, 对应基态 $^2\text{F}_{5/2}$ 向 $5d_2$ (中心波长 339 nm) 和 $5d_1$ 激发态能带 (中心波长 460 nm) 的跃迁; 处于 $5d_1$ 激发态能带的粒子向 $^2\text{F}_{7/2}$ 和 $^2\text{F}_{5/2}$ 跃迁时, 则释放出中心波长约为 530

nm 的宽带黄绿光, 与 Nd^{3+} 离子从 $^4\text{I}_{9/2}$ 基态能级到 $^4\text{G}_{7/2} + ^2\text{G}_{9/2} + ^2\text{K}_{13/2}$ (510 nm 至 540 nm) 和 $^4\text{G}_{5/2} + ^2\text{G}_{7/2}$ (566 nm 至 595 nm) 的吸收峰重叠。Ce:Nd:YAG 的吸收光谱涵盖了 Ce^{3+} 离子优异的吸收特性以及 Nd^{3+} 离子在 525 nm~900 nm 之间的特征吸收带, 显著增强了对太阳光的利用率。

在 Ce:Nd:YAG 材料中, Ce^{3+} 与 Nd^{3+} 离子之间的能量传递主要通过辐射转移和非辐射转移两种方式进行^[43-46], 如图 2 所示。路径 (1) 为辐射能量转

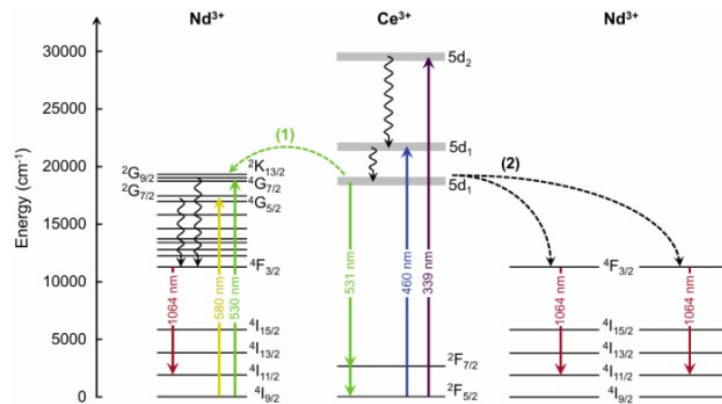


图 2 Ce^{3+} 离子与 Nd^{3+} 离子之间的能量转移机制^[27]

Fig. 2 Energy transfer mechanism between Ce^{3+} and Nd^{3+} ions^[27]

移, Ce^{3+} 离子从 5d 跃迁至 4f 能级, 释放出宽带黄绿色光, 部分被 Nd^{3+} 离子吸收, 激发其 $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{G}_{7/2} + ^2\text{G}_{9/2} + ^2\text{K}_{13/2}$ (中心波长约 530 nm) 和 $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{G}_{5/2} + ^2\text{G}_{7/2}$ (中心波长约 580 nm) 的吸收跃迁, 随后通过无辐射跃迁弛豫到 $^4\text{F}_{3/2}$ 能级, 实现 $^4\text{F}_{3/2}$ 和 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级之间的粒子数反转, 理论量子效率为 1。 Ce^{3+} 离子的能量也可以通过非辐射方式转移到 Nd^{3+} 离子, 例如通过偶极—偶极耦合的共振能量传递方式,

该方式可由福斯特方程进行定量描述^[43,47], 传递效率与 Ce^{3+} 和 Nd^{3+} 离子之间距离的 6 次方成反比, 理论量子效率为 1。

路径(2)为另一种被称为协同下转换的非辐射能量转移方式^[48], 可将吸收的 1 个可见光光子转换为 2 个 1064 nm 近红外光子, 即 $\text{Ce}^{3+}: ^5\text{d}_1 \rightarrow \text{Nd}^{3+}: ^4\text{F}_{3/2} + \text{Nd}^{3+}: ^4\text{F}_{3/2}$, 理论量子效率为 2。表 4 系统总结了太阳光抽运 Ce:Nd:YAG 代表性实验成果。

表 4 太阳光抽运 Ce:Nd:YAG 激光输出特性总结

Tab. 4 Summary of solar-pumped Ce:Nd:YAG laser output performance

Year	Authors	Type of concentrator	Mode	Output laser power/W	Collection Efficiency/(W/m ²)	SLCE
2020	Vistas et al. ^[49]	Parabolic mirror	Multimode	6.00	4.90	1.90%
2021	Vistas et al. ^[50]	Parabolic mirror		16.50	23.57	2.75%
2022	Garcia et al. ^[51]	Parabolic mirror		11.20	38.22	4.50%
2022	Liang et al. ^[52]	Parabolic mirror		16.50	41.25	4.64%
2023	Cai et al. ^[53]	Fresnel lens		26.93	38.81	3.88%
2023	Garcia et al. ^[54]	Parabolic mirror	TEM_{00}	1.56	4.70	0.63%
2024	Liang et al. ^[12]	Fresnel lens		1.41	16.49	2.06%
2025	Costa et al. ^[10]	Fresnel lens	Multimode	22.46	36.40	4.49%
2025	Wang et al. ^[55]	Fresnel lens		89.29	32.71	3.96%
2025	Costa et al. ^[11]	Parabolic mirror	TEM_{00}	6.05	8.77	0.90%
2026	Wang et al. ^[9]	Fresnel lens	Multimode	97	36.03	4.49%

3.3 Cr:Nd:YAG 光谱、能级特性

除了 Ce^{3+} 离子, 还可以共掺杂引入三价 Cr^{3+} 离子作为敏化剂, 改善激光材料的增益特性。Cr:Nd:YAG 在可见光波段具有较宽、较强的吸收, Cr^{3+} 与 Nd^{3+} 离子之间可以实现高效率的能量传递; 此外, 高温下增强的交叉弛豫效应(理论量子效率为 2), 可使 Cr^{3+} 与 Nd^{3+} 离子之间的能量传递效率得到进一步提升; 相较于单掺 Nd^{3+} 而言, 其具有较高的寿命, 有利于实现高能脉冲激光放大。

T. Saiki 等^[56]研究发现 Cr:Nd:YAG 陶瓷中 Nd 的有效受激发射截面和寿命得到了显著改善, 发射截面约为传统 Nd:YAG 的 3 倍, 有效寿命从 0.23 ms 增加至约 1 ms, 这取决于 Cr^{3+} 离子浓度、抽运条件和温度^[57]。在 77 K 低温下, Cr^{3+} 吸收抽运光跃迁至寿命较长的 ^2E 能级, 并向 $^4\text{A}_2$ 基态跃迁实现中心波长约 690 nm 荧光发射, 因此观察到较长的荧光寿命。随着温度升高, 根据玻尔兹曼分布规律可知, 更多的 Cr^{3+} 离子将通过声子辅助跃迁至 $^4\text{T}_2$ 能级, 此时 $^4\text{T}_2 \rightarrow ^4\text{A}_2$ 能级跃迁参与荧光发射, 因此有效荧光寿命降低。如表 5 所示, 采用宽光谱的氙闪光灯白光激发时, 由于 Cr^{3+} 吸收了更多波长范围的光子, 有更多能级参与了发光过程, 因此其有效寿命显著长于采用 440 nm 或 590 nm

等单一特征波长激发时的情况。

2022 年, Yoshiyuki Honda 等^[61]通过研究室温下 Cr:Nd:YAG 陶瓷能级间的能量转移过程, 发现位于 $^4\text{T}_1$ 能级的能量主要通过非辐射跃迁至 Cr^{3+} 的热耦合 $^2\text{E} - ^4\text{T}_2$ 能级后, 再转移给 Nd^{3+} , 而不经过热耦合能级 $^2\text{E} - ^4\text{T}_2$ 的能量转移(如 $^4\text{T}_1$ 直接转移到 Nd^{3+})可以忽略不计, 揭示了室温下能量传递的详细过程。同时, 他们利用偶极—偶极作用模型解释 Cr^{3+} 离子与 Nd^{3+} 离子之间能量传递, 并利用浓度猝灭模型发现: 在室温下, 随着 Cr^{3+} 掺杂浓度增加, 即使考虑浓度猝灭效应的影响, Cr^{3+} 离子向 Nd^{3+} 离子的能量传递效率也高达 70%^[62]。

2010 年, Taku Saiki 等^[63]研究了 Cr^{3+} 与 Nd^{3+} 离子间能量传递以及交叉弛豫的机制。如图 3 所示, Cr^{3+} 吸收中心波长为 440 nm 和 600 nm 的抽运光, 从基态 $^4\text{A}_2$ 分别跃迁到 $^4\text{T}_1$ 与 $^4\text{T}_2$ 能级后, 通过非辐射跃迁至 ^2E 能级; 少数 ^2E 能级上的电子通过荧光发射 650 ~ 850 nm 的光子返回至基态, 多数 ^2E 能级上的 Cr^{3+} 通过热激发从 ^2E 能级跃迁至 $^4\text{T}_1$ 与 $^4\text{T}_2$ 能级; Cr^{3+} 的 $^4\text{T}_1$ 和 $^4\text{T}_2$ 能级通过声子耦合的电子—电子偶极相互作用将能量转移至 Nd^{3+} 。其中, A1 过程与激光介质温度无关, 由于多声子弛豫, Nd^{3+} 在从 $^4\text{P}_{1/2}$ 与 $^4\text{I}_{9/2}$ 能级到 $^4\text{F}_{3/2}$ 能级

表 5 不同实验条件下 Cr:Nd:YAG 有效荧光寿命 @1064nm^[27]
Tab. 5 Effective fluorescence lifetime of Cr:Nd:YAG at 1064 nm under various experimental conditions^[27]

Cr ³⁺ ions concentration	Excitation/nm	Temperature/K	Effective lifetimes/ μ s	references
0.1 at. %	440	300	732	[58]
	590	300	228	
	White light	292	1100	[59]
		400	570	
0.7 at. %	440	300	459	[58]
	590	300	306	
2.0 at. %	610	77	890	[60]
		450	520	
3.0 at. %	440	300	390	[58]
	590	300	365	
	White light	292	1000	[59]
		400	500	

的跃迁中发生了交叉弛豫；由于⁴G_{3/2}能级与基态能级间的能隙为 20700 cm⁻¹，而 1064 nm 的光子能量为 9400 cm⁻¹，因此在从⁴G_{3/2}和⁴I_{11/2}能级到⁴F_{3/2}能级的跃迁过程中发生了交叉弛豫现象，如 A2 过程所示。A2 过程比较依赖激光介质的温度，热抽运可使大量处于基态的 Nd³⁺激发到⁴I_{11/2}，减少了 Nd³⁺上下能级间的能量差，增加了交叉弛豫发生概率，从而实现高效的粒子数反转；但这个过程同时激发了⁴T₁和⁴T₂能级之间的跃迁，因此无法详细研究⁴T₁能级到⁴P_{1/2}和⁴G_{3/2}的能量转移过程。

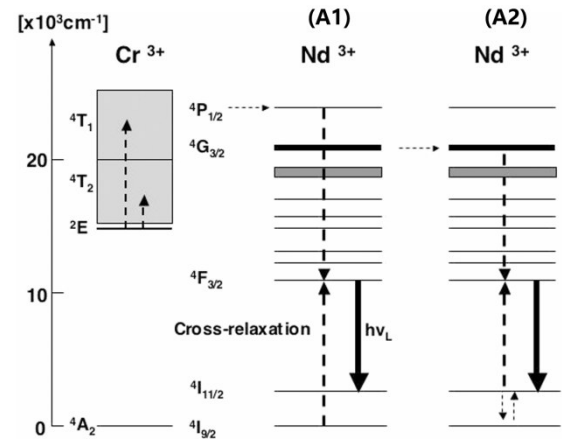


图 3 Cr:Nd:YAG 能级图及能量传递与交叉弛豫路径^[59]
Fig. 3 Energy level diagram of Cr:Nd:YAG and the pathways for energy transfer and cross-relaxation^[59]

T. Saiki 等^[64]研究表明，在高温环境下，白光抽运的 Cr:Nd:YAG 陶瓷在 1064 nm 处表现出显著的光谱展宽效应，在 0.1% 和 3% Cr³⁺掺杂时，带宽分别达到 1.2 nm 和 1.9 nm，远高于传统 Nd:YAG 的

0.45 nm。Nd:YAG 材料在温度升高时小信号增益显著降低，与其相比，Cr:Nd:YAG 更宽的吸收和发射带宽使小信号增益在 610 nm 激发时在 300 ~ 500 K 内随着温度升高而增加^[65]。如图 4(a)所示，小信号增益系数随温度升高从 300 K 时的约 0.042 cm⁻¹持续增加至 500 K 时的约 0.052 cm⁻¹，提升幅度约为 23.81%。

他们利用白光抽运的 Cr:Nd:YAG 陶瓷多级放大系统获得了 kW 级激光放大输出，如图 4(b)所示，随着温度的升高，四程放大结构下 Cr:Nd:YAG 的小信号增益 g₀L=3.2 (300 K) 增长到 g₀L=3.6 (475 K)，其理论输出增加约 49%；受限于 ASE 效应，实际输出功率由 1.4 kW 提升到 1.6 kW^[14]，增长幅度约 14.31%，光—光转换效率为 63%，远高于室温附近最高的约 40%，证实了高温下交叉弛豫效应可有效提高光转换效率；当使用金属卤化物灯抽运时，小信号增益在温度高达 473K 时仍能保持不变^[66]。研究表明，Cr:Nd:YAG 陶瓷的饱和功率密度可以降低到 Nd:YAG 的 10%，更加适合宽光谱、低功率密度的太阳光直接抽运激光系统。Cr:Nd:YAG 在 350~500 K 温度区间表现出明确的小信号增益提升，最佳工作温度约为 450 K。其小信号增益系数在高温下保持不变甚至有所提升的特性，将更加有利于减轻散热系统压力。太阳光抽运 Cr:Nd:YAG 实现激光输出的相关进展如表 6 所示。

综合上述研究，Cr:Nd:YAG 陶瓷激光材料展现出以下特点：①基于交叉弛豫效应，Cr:Nd:YAG 在高温下的高增益特性是其他两种材料所不具备的^[14,63-66]，这将极大减少激光放大系统散热负担，

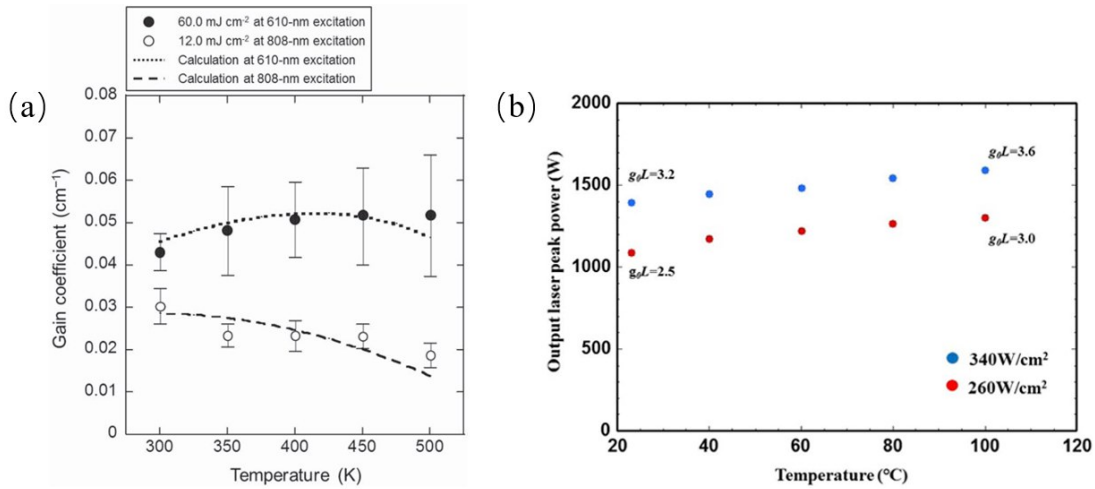


图 4 Cr:Nd:YAG 陶瓷 (Nd:1.0%, Cr:2.0%) 在 (a) 808 nm 和 610 nm 激发下的增益系数随温度的变化^[65] 和 (b) 四程放大系统下输出激光峰值功率随温度变化^[14]

Fig. 4 For the Cr:Nd:YAG ceramic (Nd: 1.0%, Cr: 2.0%), (a) Gain coefficient as a function of temperature excited at 808 nm; 610 nm^[65] and (b) Output laser peak power with temperature dependence of four-stage amplifier system^[14]

表 6 太阳光抽运 Cr:Nd:YAG 激光输出特性总结

Tab. 6 Summary of solar-pumped Cr:Nd:YAG laser output performance

Year	Authors	Type of concentrator	Mode	Output laser power/W	Collection Efficiency/(W/m ²)	SLCE
2007	T. Yabe et al. ^[67]	Fresnel lens	Multimode	24.4	18.7	1.93%
2013	Liang et al. ^[68]	Parabolic mirror		33.6	33.6	3.26%
2018	Liang et al. ^[69]	Parabolic mirror		32.5	32.5	3.74%

可有效减少系统整体体积与重量,易于模块化、小型化和轻量化,极为有利于空间应用;②Cr:Nd:YAG 相较于 Ce:Nd:YAG 更容易实现高浓度、均匀的 Cr³⁺ 离子掺杂^[24],有利于实现 Cr³⁺ 与 Nd³⁺ 之间高效能量传递;③Cr³⁺ 可实现高浓度掺杂,有利于在较短的材料长度下达到理论饱和吸收,实现抽运光高效吸收和转化^[70]。此外, Cr:Nd:YAG 具有卓越的抗辐照性能^[71],在空间太阳光抽运放大器系统中,将是一种值得期待、性能优异的增益介质。

4 太阳光抽运固体激光放大器研究进展

太阳光抽运激光(放大)系统实现高转换效率与高功率激光输出的关键在于增益介质对宽谱太阳光能量的高效吸收和转换,增益介质吸收谱线需高度匹配太阳光光谱以提升太阳光能量利用率。ASTM 给出了大气层外太阳光谱辐照度标准 AM0 和地面太阳辐照度标准 AM1.5 光谱数据库,张佳等^[70]结合 3 种材料吸收光谱(图 5)计算了吸收光谱与太阳光光谱的重叠效率,结果见表 7。

通过分析发现,在 AM0 和 AM1.5 模型下, Cr:Nd:YAG 所吸收的太阳光功率最高, Cr:Nd:YAG、Ce:Nd:YAG 的重叠效率相差不大,约为 Nd:YAG 的 2 倍;它们吸收光谱所覆盖的波长范围不同。

其中 P_{λ} 为太阳光单位波长的辐射功率, $\lambda_i \sim \lambda_j$ 覆盖表 7 各增益介质全部吸收起止波长。

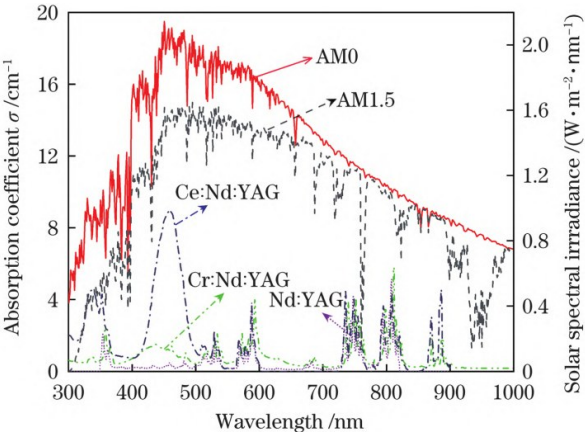


图 5 美国材料与试验协会 G159 标准太阳光谱与激光材料吸收光谱^[70]

Fig. 5 ASTM G159 standard solar spectrum and absorption spectra of the laser materials^[70]

表7 激光材料吸收光谱与太阳光谱的重叠效率计算^[70]

Tab. 7 Calculated spectral overlap efficiency between the laser materials and the solar spectrum^[70]

Laser material	Absorption Band/nm	AM1.5 spectral analysis				AM0 spectral analysis			
		$\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} P_A d\lambda /$ (W · m ⁻²)	$\sum \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} P_A d\lambda /$ (W · m ⁻²)	$\eta_p / \%$		$\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} P_A d\lambda /$ (W · m ⁻²)	$\sum \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} P_A d\lambda /$ (W · m ⁻²)	$\eta_p / \%$	
Nd:YAG	515–540	37.955							
	565–595	44.434							
	735–765	32.438	173.378	17.34	46.355	56.491	37.941	33.297	29.037
	795–825	29.934							
	855–885	28.617							
	400–490	123.894							
Cr:Nd:YAG	515–540	37.955							
	560–630	102.839	355.677	35.55	166.711	46.355	124.171	37.941	33.297
	735–765	32.438							
	795–825	29.934							
	855–885	28.617							
	315–365	21.245							
Ce:Nd:YAG	400–500	139.579							
	515–540	37.955							
	565–595	44.434	334.202	33.41	44.731	186.222	46.355	56.491	37.941
	735–765	32.438							
	795–825	29.934							
	855–885	28.617							

受限于太阳光较低的直接抽运功率密度、增益介质对太阳光谱的吸收效率不足以及系统光路设计等技术问题,太阳光直接抽运固体激光放大器的研究发展历程相对较短,国内外可追溯的系统性研究也较为有限。2009年,日本关西大学的T. Saikia等^[13]开始探索太阳光抽运固体激光放大器的相关研究,利用人造灯光源模拟太阳光直接抽运主动镜结构 Cr:Nd:YAG 激光增益介质(图6),实现了种子光在介质内两级双程光放大。当种子激光功率为300 mW、有效抽运光功率为9 W时,实现2.06倍激光放大输出,光—光能量转化效率为33%。同年,该团队利用太阳光抽运 Cr:Nd:YAG 主动镜结构对脉冲种子激光进行光放大,获得了约3倍的能量放大,成为首次实现对太阳光抽运下激光脉冲放大的研究^[72]。

2009年,N. Fujiwaraa等利用弧光灯模拟太阳光抽运相同主动镜,对20~100 kHz的种子光进行了放大研究,在80 W/cm²低抽运功率密度、100 kHz的重复频率下实现1.57倍激光脉冲放大,功率提取效率高达85%^[73]。2011年,该团队联合日本大阪大学就白光抽运下 Cr:Nd:YAG 激光放大器的温度特性进行了研究^[64],通过研究种子激光峰值波长与增益系数之间、温度与增益曲线之间的关系,证明激光介质在交叉弛豫过程中发生了荧

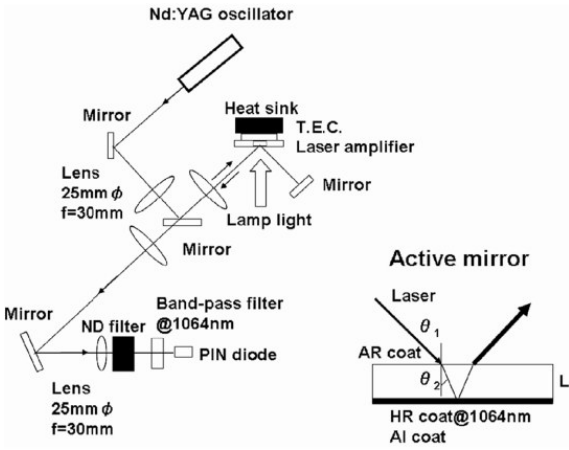


图6 双程放大光学布局示意图^[13]
Fig. 6 Schematic of the double-pass amplification optical layout^[13]

光带宽展宽,并证实 Cr:Nd:YAG 在高温下仍能保持较高的小信号增益,为激光放大器在600 K高温下的应用提供理论支撑。2014年,T. Nakamachi等^[74]利用闪光灯模拟太阳光进行了激光放大器实验研究,观察到当激光增益介质温度升高时,交叉弛豫效应使得 Cr:Nd:YAG 陶瓷放大器的输出功率显著增加。2017年,日本关西大学和大阪大学利用闪光灯模拟太阳光抽运 Cr:Nd:YAG 陶瓷,基于高温下的增益提升原理;当激光介质温度为100℃时,12 W种子激光通过四级放大系统获得

了峰值功率为 1.6 kW 的脉冲放大激光输出,有效光—光转换效率达 63%^[14]。放大器结构如图 7 所示。这表明在抽运功率密度足够高的条件下,Cr:

Nd:YAG 陶瓷放大器可通过多级级联实现较高的增益倍率(单级增益超 30 倍,四级总增益达 133 倍),展现出优异的功率放大潜力。

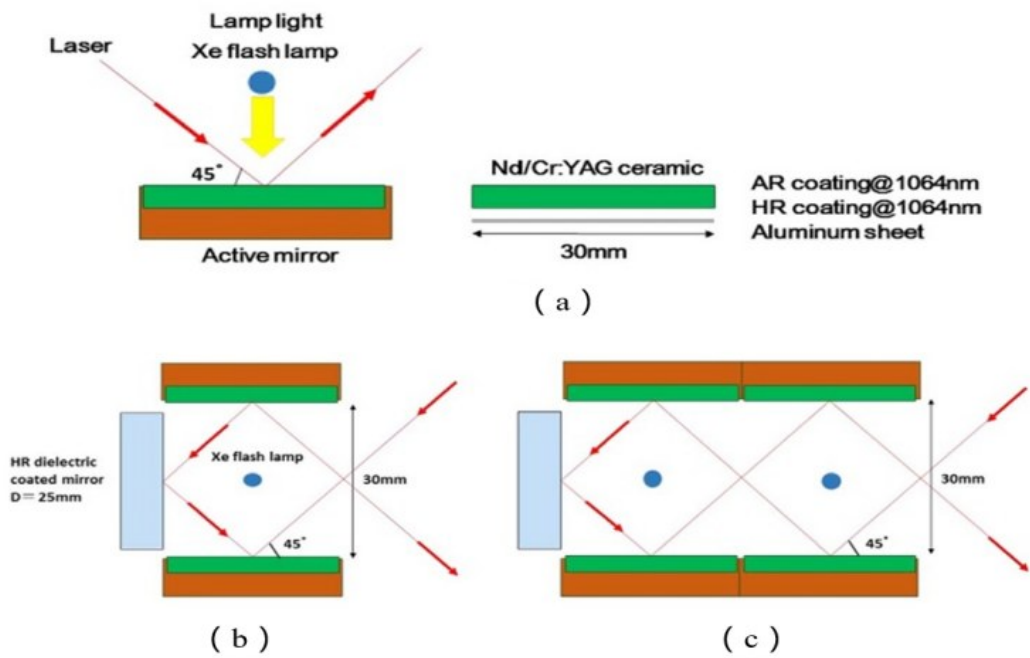


图 7 氙灯抽运主动镜激光放大器结构图^[14](a)单级主动镜放大器结构;(b)两级主动镜放大器系统;(c)四级主动镜放大器系统

Fig. 7 Schematic diagrams of the Xe lamp-pumped active-mirror laser amplifier^[14]. (a) Structure of a single-stage active-mirror amplifier; (b) System of a two-stage active-mirror amplifier; (c) System of a four-stage active-mirror amplifier

我国对太阳光抽运激光放大器也开展了相关研究,2013年北京理工大学关哲等^[15]采用板条激光放大器结构,首次实现了对种子激光的 1.64 倍光放大。2017 年,王予等^[16]利用仿真软件进行了理论分析与仿真验证,对比了 Nd:YAG 和 Cr:Nd:YAG 两种不同增益材料;采用二次锥形腔改善了

抽运结构,如图 8(a)所示,实现抽运功率密度的大幅提升,在有效光程较小情况下获得了 1.58 倍光放大。同年,该团队采用键合式 YAG/Nd:YAG/YAG 结构,获得了对种子激光 1.46 倍的功率放大^[75]。表 8 为太阳光抽运激光放大器相关研究成果总结。

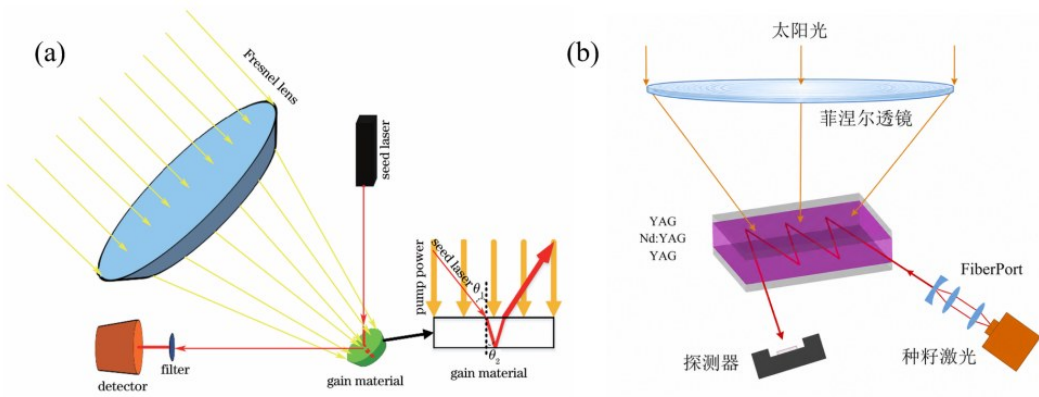


图 8 太阳光抽运激光放大器实验结构与基本光路图。(a)圆盘状增益介质激光放大器^[16];(b)键合式 YAG/Nd:YAG/YAG 激光放大器

Fig. 8 Experimental setup and basic optical path diagram of the solar-pumped laser amplifier. (a) Laser amplifier with a disk-shaped gain medium^[16]; (b) Bonded YAG/Nd:YAG/YAG laser amplifier.

表 8 太阳光抽运激光放大器研究成果总结

Tab. 8 Summary of research achievements for solar-pumped laser amplifiers

Year	Authors	Material	CW/Pules	I_{in}	I_{out}	Gain Factor I_{out}/I_{in}
2009	T. Saiki et al. ^[13]	Cr:Nd:YAG	CW	300 mW	3.0 W	10.00
2009	T. Saiki et al. ^[72]	Cr:Nd:YAG	Pules	140 mJ	180.0 mJ	1.28
2009	T. Saiki et al. ^[73]	Cr:Nd:YAG	Pules	70 mW	110.0 mW	1.57
2014	T. Nakamachi et al. ^[74]	Cr:Nd:YAG	Pules	9 W	293.0 W	32.50
2017	T. Saiki et al. ^[14]	Cr:Nd:YAG	Pules	12 W	1.6 kW	133.00
2013	Guan et al. ^[15]	Nd:YAG	CW	296 mW	484.0 mW	1.64
2017	Wang et al. ^[16]	Nd:YAG	CW	300 mW	450.5 mW	1.50
		Cr:Nd:YAG	CW	300 mW	475.1 mW	1.58
2017	Guan ^[75]	Nd:YAG	CW	19 mW	27.8 mW	1.46

5 放大器优化路径

面向空间应用的太阳光直接抽运激光放大器,需在有限抽运功率密度下实现高增益、高光束

质量及良好的热管理。为明确不同放大器构型在太阳光抽运场景下的适用性,表9对比了放大器典型构型的结构特点、功率范围及热管理便捷性。

表 9 典型激光放大器构型对比

Tab. 9 Comparison of typical laser amplifier configurations

放大器构型	结构优点	结构缺点	适用功率区间	热管理便捷性
主动镜	结构紧凑、单程增益高、易于多级串联	种子光单程通过,提取效率较低	大功率	一般
棒状放大器	成本低,技术成熟	热透镜效应严重、功率定标受限	中小功率	一般
板条放大器	热畸变效应弱、功率扩展能力强、可大尺寸	成本较高	大功率	优良
光纤放大器	散热面积大	耦合损耗大、太阳光耦合效率极低	小功率	优良
碟片放大器	高表面体积比、散热好	抽运光路复杂、稳定性较低	高功率	优良

主动镜结构用于早期验证和多级级联,但由于其种子激光单程通过,提取效率较低。棒状放大器虽成本较低,在中小功率激光输出中占据主导地位,但热透镜效应、热退偏效应及热致双折射效应严重影响其性能,因此不太适用于高功率激光输出。光纤放大器虽散热好,但抽运耦合效率极低,非线性效应同样限制了其高功率输出的能力。碟片激光放大器因其高的表面体积比,有助于提升晶体的冷却效果,减少晶体内部的热应力并降低晶体的热透镜效应,从而获得较高的光束质量;但复杂的抽运光路降低了碟片激光器的稳定性。相比而言,板条放大器凭借热致畸变自补偿、大冷却面积、可适配Cr:Nd:YAG高温高增益特性,能够利用较小的散热系统实现激光输出。需要指出的是,Cr:Nd:YAG双掺陶瓷相较于单晶虽存在残余散射和浓度不均匀等不足,但在板条放大器构型中,Zig-Zag光路可对散射缺陷产生平均效应,且散射累积路径比振荡器中的棒状介质更短,从而降低散射损耗对总效率的影响,使该构型成为空间高功率太阳光抽运放大的优选结构。

基于上述特性分析与国内外研究进展,本文提出一种采用侧面抽运板条状增益介质的放大器

设计方案,如图9所示,重点围绕材料浓度优化及其热适应性、抽运吸收效率与均匀性、模式匹配等方面展开论述。

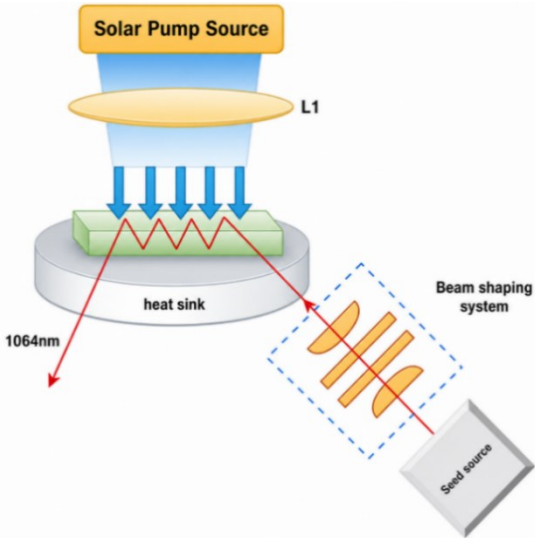


图 9 放大器系统结构图

Fig. 9 Structural diagram of the amplifier system

① 激光材料优选

太阳光抽运功率密度较低(经二级聚光系统汇聚后功率密度仅达17 W/mm²),这要求增益介质须具备低抽运阈值、高吸收效率以及在低激发

密度下仍能维持有效增益的能力。 Cr^{3+} 与 Nd^{3+} 之间高效能量传递使 Cr:Nd:YAG 有效受激发射截面高于 Nd:YAG 和 Ce:Nd:YAG ,从而降低了其抽运阈值,使其尤其适用于太阳光这类低抽运功率密度的抽运条件。表10基于太阳光谱及材料吸收光谱重叠积分方法,对三种增益介质在1个太阳常数抽运功率下的理论连续激光输出功率、热负载等进行了估算。计算模型如下:

$$P_{\text{laser}} = \int_{\lambda} A(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{\text{laser}}} d\lambda \quad (1)$$

其中, $A(\lambda)$ 为材料在波长 λ 处的吸收率(0~1); $I(\lambda)$ 为太阳光谱辐照度($\text{W} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$),采用AM1.5标准光谱; $\lambda_{\text{laser}}=1064 \text{ nm}$

为避免不同掺杂浓度下吸收率差异带来的不确定性,并突出材料本征光谱匹配能力的上限,我们假设在材料的各吸收带内吸收率均达到饱和,此时 $A(\lambda)=1$,则公式简化为:

$$P_{\text{laser}} = \sum_j \int_{\lambda_{j,\min}}^{\lambda_{j,\max}} I(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{\text{laser}}} d\lambda \quad (2)$$

λ_j 覆盖表7各增益介质全部吸收起止波长。

热功率负载则按照下式进行计算:

$$P_{\text{heat}} = P_{\text{absorbed}} - P_{\text{laser}} \quad (3)$$

其中, P_{absorbed} 已由表7激光材料吸收光谱与太阳光谱的重叠效率计算所确定。

表10 1个太阳常数抽运功率下, Nd:YAG 、 Ce:Nd:YAG 与 Cr:Nd:YAG 的理论连续激光输出功率及热负载估算

Tab. 10 Theoretical continuous-wave laser output power and thermal load of Nd:YAG , Ce:Nd:YAG and Cr:Nd:YAG under one solar constant pump power

Material	Theoretical output	Thermal load
	power/W	power/W
Nd:YAG	101	72
Cr:Nd:YAG	174	181
Ce:Nd:YAG	155	179

其中, Cr:Nd:YAG 理论输出功率最高; Cr:Nd:YAG 的绝对热负载虽高于 Nd:YAG ,但其交叉弛豫效应使其在高温下保持高增益,即,允许放大器工作在更高的工作温度。具体而言, Nd:YAG 需主动冷却至300 K才能维持有效增益^[31-33],而 Cr:Nd:YAG 允许放大器工作在约450 K的高温环境且仍保持高增益^[60]。这可以使用更为轻便的散热系统实现高效热管理,极大减小散热系统的体积、面积和重量。在空间应用中,这种“热适应性”有

可能比“低热耗”更加重要,可以减少火箭发射成本。例如,放大器工作在473 K时,辐射散热所需面积比工作在273 K缩小到约1/9。

需要指出的是,激光介质的最优掺杂浓度需结合具体抽运条件、几何构型及热管理等因素综合优化,本文以0.5%(掺杂原子分数) Cr:1% Nd:YAG 为例,给出供参考的浓度选择。该浓度选择的主要定量依据如下: Honda等人^[56]在0.1~6.0 mol% Cr^{3+} 浓度范围内系统研究了 Cr:Nd:YAG 中的能量传递过程,结果表明,对于无明显浓度猝灭的高质量陶瓷, $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$ 能量传递效率随 Cr^{3+} 浓度增加而提高;0.5 at% Cr^{3+} 处于该递增曲线的中低段,虽然并非能量传递效率的最高点,但可在保证较高能量传递效率的前提下,有效抑制因过高 Cr^{3+} 浓度(如 $\geq 3 \text{ at\%}$)导致的浓度猝灭效应。此外,该浓度对应的抽运吸收长度及模式匹配设计优化详见本节以下两点的论述。因此,0.5% Cr:1% Nd:YAG 在兼顾能量传递效率、抽运吸收需求及模式匹配等条件下,是太阳光抽运激光放大器的优选增益介质之一。

② 抽运吸收优化

对于0.5% Cr:1% Nd:YAG 而言,根据太阳光谱匹配效率随吸收长度的模拟计算,约8 mm吸收长度即可吸收99%的太阳光抽运能量。若在板条底面镀对抽运波段高反的反射膜,则未被单程吸收的抽运光经反射后二次通过介质,使得仅需5 mm厚度即可达到相同的总吸收率。镀膜减薄设计将抽运光吸收的纵向分布由指数衰减型转化为更为平缓的双程叠加型,显著改善抽运均匀性,并有效抑制表面热积累与热梯度。板条厚度从8 mm缩减至5 mm后,抽运光斑尺寸更易于与种子激光的光斑半径相匹配,从而提升模式交叠效率。种子激光采用Zig-Zag传播路径(具体优势见下文结构设计优化),以充分利用板条构型在热管理与模式匹配方面的协同增益。综上,底面镀膜、薄板条与Zig-Zag光路的协同设计,使放大器在低抽运功率密度下仍能实现高效、高光束质量的激光放大。

③ 结构设计优化

Zig-Zag板条结构通过激光光束在两冷却面之间以反射方式折返传播,有效平均了板条厚度方向上的温度梯度,几乎完全消除一阶热透镜效应,避免了棒状介质中热透镜对功率定标的根本性限制。同时,板条几何结构提供了厚度与宽度

两个独立设计自由度,通过增大长宽比(如减小厚度并增加长度)可成倍降低中心至边缘的温差与热应力,实现远高于棒状介质的功率扩展能力。此外,Zig-Zag光路使种子光在板条内部多次通过,延长了有效相互作用长度,实现增益分布均匀化、提高储能提取效率。板条具有大的表面积体积比,配合侧面抽运与面冷却方式,可显著抑制热致波前畸变与退偏损耗。Zig-Zag板条结构是解决高功率激光放大器中热致光束退化问题、实现高平均功率与高光束质量输出的优选技术构型。

综合而言,采用侧面抽运板条0.5% Cr:1% Nd:YAG增益介质,并结合Zig-Zag种子光路,有利于实现抽运光的均匀吸收、降低热效应影响、提高能量提取效率,是实现高效、高光束质量且空间环境适应性强的太阳光抽运激光放大器的优选技术方案。

6 总结与展望

本文系统总结了以Nd:YAG、Cr:Nd:YAG和Ce:Nd:YAG为代表的激光增益介质在太阳光抽运下的光谱特性、能级结构及其在振荡器和放大器系统中的表现。研究证明,通过共掺杂敏化离子可显著拓宽吸收带、增强与太阳光谱的匹配度;敏化离子 Cr^{3+} 与 Nd^{3+} 离子之间可以实现高效的能量传递,交叉弛豫机制有助于提升能量转移效率,为实现高功率、高能量、高光束质量的激光输出提供了重要的材料基础。在太阳光抽运激光放大器方面,国内外研究团队通过主动镜结构、板条放大器等多级放大方案,成功实现了种子激光的高增益放大;证明Cr:Nd:YAG陶瓷得益于交叉弛豫效应,

在高温环境下仍保持较高的小信号增益和转换效率,为太阳光抽运Cr:Nd:YAG陶瓷激光放大器在空间系统中的应用提供了理论和技术支撑。

尽管上述研究取得了重要进展,但面向空间实际应用,太阳光抽运固体激光器/放大器在核心器件和结构层面仍面临诸多问题与难点。在核心器件层面:一是空间极端环境(强紫外辐照、高能粒子轰击、极端冷热交变、超高真空)可能导致透明陶瓷发生表面侵蚀、微裂纹扩展及掺杂离子价态转变,从而劣化增益介质的激光性能;二是真空环境下散热仅依赖辐射,效率极低,即使Cr:Nd:YAG具有优异的高温适应性,整个系统的热平衡设计仍十分复杂。在结构层面:空间应用要求放大器系统在实现高功率输出的同时,必须满足大尺寸聚光与小型化器件的矛盾——高功率输出需要大面积聚光系统,但高昂的发射成本要求收纳体积小、展开后质量轻,且增益模块、种子源、耦合光学等需高度集成。

针对上述问题,提出以下发展建议:一是开展增益介质在模拟空间环境下的缺陷产生及湮灭规律研究,通过抗辐照加固提升材料性能;二是充分利用Cr:Nd:YAG的高温增益特性,简化散热系统设计,减小体积和重量,降低发射成本。未来,利用太阳光薄膜聚光伞抽运板条Cr:Nd:YAG陶瓷,采用Zig-Zag结构实现高功率、高能脉冲激光放大,是值得探索的潜在方案之一。该方向有望推动空地激光无线传能、空天对抗等技术的发展,在未来空间领域具有潜在应用价值和战略意义,建议在地面模拟空间热真空环境中进行全系统功能验证。

参 考 文 献:

- [1] GE C C. 我国应积极建设空间太阳能电站[EB/OL]. (2021-05-11) [2026-01-06]. https://www.cas.cn/zjs/202105/t20210511_4787565.shtml. GE C C. China Should Actively Build Space Solar Power Station [EB/OL]. (2021-05-11) [2026-01-06]. https://www.cas.cn/zjs/202105/t20210511_4787565.shtml. (in Chinese)
- [2] Our Airborne Demo Makes Space Solar Energy a Reality[EB/OL]. (2025-12-09)[2026-06-09]. <https://www.overviewenergy.com/updates/airborne>
- [3] GRAHAM-ROWE D. Solar-powered lasers [J]. *Nat. Photonics.*, 2010, 4(2): 64-65.
- [4] CHEN J, YU J. Theoretical analysis on a new direct expansion solar assisted ejector-compression heat pump cycle for water heater [J]. *Sol. Energy.*, 2017, 142: 299-307.
- [5] 赵长明, 赵彬, 何建伟. 太阳光泵浦固体激光器及其空间应用 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S3): 95-99. ZHAO C M, ZHAO B, HE J W. Solar pumped solid state lasers and its space applications [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2006, 35(S3): 95-99. (in Chinese)

- [6] MASUDA T, IYODA M, YASUMATSU Y, *et al.* A fully planar solar pumped laser based on a luminescent solar collector [J]. *Commun. Phys.*, 2020, 3(1).
- [7] HISATOMI T, DOMEN K. Reaction systems for solar hydrogen production via water splitting with particulate semiconductor photocatalysts [J]. *Nat. Catal.*, 2019, 2(5): 387-399.
- [8] 戚伟佳. 太阳光泵浦Nd:YAG激光器的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
QI W J. *Research of Solar-pumped Nd:YAG Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] WANG L, ZHANG H Y, XU W C, *et al.* Design and thermal evaluation of a 97 W solar-pumped Ce:Nd:YAG laser with 4.49% solar-to-laser conversion efficiency[J]. *Opt. Express.*, 34, 10117-10131 (2026)
- [10] COSTA H, LIANG D, ALMEIDA J, *et al.* Four-Ce:Nd:YAG-rod solar laser with 4.49% conversion efficiency through Fresnel lens [J]. *Sci. Rep.*, 2025, 15(1).
- [11] COSTA H, LIANG D, GOMES S, *et al.* Simultaneous emission of four TEM₀₀-mode solar-pumped lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2025, 64(33): 9925-9932.
- [12] LIANG D, ALMEIDA J, CATELA M, *et al.* Lowest threshold solar-pumped Ce:Nd:YAG laser with 2.06% solar-to-TEM₀₀ mode laser conversion efficiency [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2024, 270: 112817.
- [13] SAIKI T, MOTOKOSHI S, IMASAKI K, *et al.* Two-pass amplification of CW laser by Nd/Cr:YAG ceramic active mirror under lamp light pumping [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(5): 936-939.
- [14] SAIKI T, FUJIWARA N, MATSUOKA N, *et al.* Amplification properties of kW Nd/Cr:YAG ceramic multi-stage active-mirror laser using white-light pump source at high temperatures [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 387: 316-321.
- [15] GUAN Z, ZHAO C M, ZHOU H Y, *et al.* Solar pumped total reflection slab laser amplifier [J]. *J. Beijing Inst. Technol.*, 2013, 22(SUPPL.1): 132-135.
- [16] 王予, 赵长明, 杨苏辉, 等. 太阳光直接抽运 1064 nm 激光放大器 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 6.
WANG Y, ZHAO C M, YANG S H, *et al.* Solar-pumped 1064 nm laser amplifier [J]. *Chin. J. Lasers*, 2017, 44(3): 6. (in Chinese)
- [17] MAITRE A, SALLE C, BOULESTEIX R, *et al.* Effect of silica on the reactive sintering of polycrystalline Nd:YAG ceramics [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2008, 91(2): 406-413.
- [18] IKESUE A, AUNG Y L. Ceramic laser materials [J]. *Nat. Photonics.*, 2008, 2: 721-727.
- [19] 陈柏, 陈兰荣, 林尊琪, 等. LD抽运的掺Yb³⁺双包层光纤激光器 [J]. 中国激光, 2000, 27(2): 6-9.
CHEN B, CHEN L R, LIN Z Q, *et al.* LD-pumped Yb³⁺-doped double-cladding fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers.*, 2000, 27(2): 6-9. (in Chinese)
- [20] 张冬燕, 王戎瑞. 高功率中红外激光器的进展 [J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 487-491.
ZHANG D Y, WANG R R. Advances in high-power mid-infrared lasers [J]. *Laser Infrared.*, 2011, 41(5): 487-491. (in Chinese)
- [21] MIZUNO S, ITO H, HASEGAWA K, *et al.* Laser emission from a solar-pumped fiber [J]. *Opt. Express.*, 2012, 20(6): 5891-5895.
- [22] SUZUKI T, TSUMOTO N, OHISHI Y, *et al.* Solar pumped lasing of Nd-doped ZBLAN double-clad fiber with silica fiber Bragg gratings [C]. *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California*, 2016, pp. 1-2
- [23] MASUDA T, IYODA M, YASUMATSU Y, *et al.* Low-concentrated solar-pumped laser via transverse excitation fiber-laser geometry [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(17): 3427-3430.
- [24] MESSING G L, STEVENSON A J. Toward pore-free ceramics [J]. *Science.*, 2008, 322(5900): 383-384.
- [25] SHAN Y S, ZHANG L, ZHOU T Y, *et al.* One-order-higher Cr⁴⁺ conversion efficiency in Cr⁴⁺:YAG transparent ceramics for a high-frequency passively Q-switched laser [J]. *Photonics Res.*, 2019(8).
- [26] ZHOU Z H, ZHOU T Y, CHEN D S, *et al.* Synergetic effect of oxygen vacancy and Cr triggered super-long persistent luminescence in green Ce, Cr:YAGG transparent ceramics [J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2025, 45(10).
- [27] LIANG D, ALMEIDA J, VISTAS C, *et al.* *Solar-Pumped Lasers with Examples of Numerical Analysis of Solid-State Lasers* [M]. Springer, 2023.
- [28] 袁明星, 周天元, 周伟, 等. 太阳光直接泵浦固体激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2021, 42(1): 10-27.

- YUAN M X, ZHOU T Y, ZHOU W, *et al.* Research progress of solar directly pumped solid-state laser [J]. *Chin. J. Lumines.*, 2021, 42(1): 10-27. (in Chinese)
- [29] YOUNG C G. A sun-pumped cw one-watt laser [J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(6): 993-997.
- [30] WEKSLER M, SHWARTZ J. Solar-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, 24(6): 1222-1228.
- [31] LANDO M, KAGAN J, LINYEKIN B, *et al.* A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime [J]. *Opt. Commun.*, 2003, 222(1-6): 371-381.
- [32] LIANG D, ALMEIDA J. Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt. Express.*, 2011, 19: 26399.
- [33] DINH T H, OHKUBO T, YABE T, *et al.* 120 watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and an Nd:YAG rod [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37: 2670.
- [34] LIANG D, ALMEIDA J. Solar-pumped TEM₀₀-mode Nd:YAG laser [J]. *Opt. Express.*, 2013, 21: 25107.
- [35] LIANG D, ALMEIDA J, VISTAS C R, *et al.* Solar-pumped TEM₀₀-mode Nd:YAG laser by a heliostat-parabolic mirror system [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2015, 134: 305-308.
- [36] ALMEIDA J, LIANG D, VISTAS C R, *et al.* 5.5 W continuous-wave TEM₀₀-mode Nd:YAG solar laser by a light-guide/2V-shaped pump cavity [J]. *Appl. Phys. B.*, 2015, 121: 473-482.
- [37] VISTAS C R, LIANG D, ALMEIDA J. Solar-pumped TEM₀₀-mode laser simple design with a grooved Nd:YAG rod [J]. *Sol. Energy.*, 2015, 122: 1325-1333.
- [38] LIANG D, ALMEIDA J, VISTAS C R, *et al.* High-efficiency solar-pumped TEM₀₀-mode Nd:YAG laser [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2016, 145: 397-402.
- [39] LIANG D, ALMEIDA J, VISTAS C R, *et al.* Solar-pumped Nd:YAG laser with 31.5 W/m² multimode and 7.9 W/m² TEM₀₀-mode collection efficiencies [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2017, 159: 435-439.
- [40] GUAN Z, ZHAO C M, LI J, *et al.* 32.1 W/m² continuous wave solar-pumped laser with a bonding Nd:YAG/YAG rod and a Fresnel lens [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 107: 158-161.
- [41] LIANG D, VISTAS C R, ALMEIDA J, *et al.* Side-pumped continuous-wave Nd:YAG solar laser with 5.4% slope efficiency [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2019, 192: 147-153.
- [42] LIANG D, ALMEIDA J, GARCIA D, *et al.* Simultaneous solar laser emissions from three Nd:YAG rods within a single pump cavity [J]. *Sol. Energy.*, 2020, 199: 192-197.
- [43] LI Y K, ZHOU S M, LIN H, *et al.* Intense 1064 nm emission by the efficient energy transfer from Ce³⁺ to Nd³⁺ in Ce/Nd co-doped YAG transparent ceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2010, 32(9): 1223-1226.
- [44] SAMUEL P, YANAGITANI T, YAGI H, *et al.* Efficient energy transfer between Ce³⁺ and Nd³⁺ in cerium codoped Nd:YAG laser quality transparent ceramics [J]. *J. Alloys Compd.*, 2010, 507(2): 475-478.
- [45] YAGI H, YANAGITANI T, YOSHIDA H, *et al.* Highly efficient flashlamp-pumped Cr³⁺ and Nd³⁺ codoped Y₃Al₅O₁₂ ceramic laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, 45(1A): 133-135.
- [46] YAMAGA M, ODA Y, UNO H, *et al.* Energy transfer from Ce to Nd in Y₃Al₅O₁₂ ceramics [J]. *Phys. Status Solidi C.*, 2012, 9(12): 2300-2303.
- [47] WANG Q, QIU J B, SONG Z G, *et al.* Optical properties of Ce³⁺-Nd³⁺ co-doped YAG nanoparticles for visual and near-infrared biological imaging [J]. *Spectrochim. Acta, Part A.*, 2015, 149: 898-903.
- [48] TAI Y P, ZHENG G J, WANG H, *et al.* Near-infrared quantum cutting of Ce³⁺ - Nd³⁺ co-doped Y₃Al₅O₁₂ crystal for crystalline silicon solar cells [J]. *J. Photochem. Photobiol. A.*, 2015, 303-304: 80-85.
- [49] VISTAS C R, LIANG D, GARCIA D, *et al.* Ce:Nd:YAG continuous-wave solar-pumped laser [J]. *Optik.*, 2020, 207: 163795.
- [50] VISTAS C R, LIANG D, ALMEIDA J, *et al.* Ce:Nd:YAG side-pumped solar laser [J]. *J. Photonics Energy.*, 2021, 11(1): 018001-1-018001-9.
- [51] GARCIA D, LIANG D, VISTAS C R, *et al.* Ce:Nd:YAG solar laser with 4.5% solar-to-laser conversion efficiency [J]. *Energies.*, 2022, 15.
- [52] LIANG D, VISTAS C R, GARCIA D, *et al.* Most efficient simultaneous solar laser emissions from three Ce:Nd:YAG rods within a single pump cavity [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2022, 246: 111921.

-
- [53] CAI Z T, ZHAO C M, ZHAO Z Y, *et al.* Efficient 38.8 W/m² solar pumped laser with a Ce:Nd:YAG crystal and a Fresnel lens [J]. *Opt. Express.*, 2023, 31(2): 14.
- [54] GARCIA D, LIANG D, ALMEIDA J, *et al.* Efficient production of doughnut-shaped Ce:Nd:YAG solar laser beam [J]. *Sustainability.*, 2023, 15(18): 13761.
- [55] WANG L, ZHANG H Y, XU W C, *et al.* 89.29 W solar-pumped Ce:Nd:YAG lasers with a solar-to-laser conversion efficiency of 3.96% [J]. *Opt. Express.*, 2025, 33(19): 41181-41193.
- [56] SAIKI T, NAKATSUKA M, FUJIOKA K, *et al.* Effective fluorescence lifetime and stimulated emission cross-section of Nd/Cr:YAG ceramics under CW lamplight pumping [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, 47(10): 7896-7896.
- [57] HONG P, ZHANG X X, STRUCK C W, *et al.* Luminescence of Cr³⁺ and energy transfer between Cr³⁺ and Nd³⁺ ions in yttrium aluminum garnet [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, 78(7): 4659-4667.
- [58] YAGI H, YANAGITANI T, YOSHIDA H, *et al.* The optical properties and laser characteristics of Cr³⁺ and Nd³⁺ co-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, 39(6): 1295-1300.
- [59] SAIKI T, NAKATSUKA M, FUJIOKA K, *et al.* Increase in effective fluorescence lifetime by cross-relaxation effect depending on temperature of Nd/Cr:YAG ceramic using white-light pump source [J]. *Opt. Photonics Lett.*, 2013: 1350003.
- [60] HONDA Y, MOTOKOSHI S, JITSUNO T, *et al.* Temperature dependence of optical properties in Nd/Cr:YAG materials [J]. *J. Lumin.*, 2014, 148: 342-346.
- [61] HONDA Y, MOTOKOSHI S, JITSUNO T, *et al.* Analyses of energy transfer of Cr³⁺ and Nd³⁺ co-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramic powders at the ⁴T₁ level of Cr³⁺ ion excitation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2022, 61(2).
- [62] HONDA Y, MOTOKOSHI S, JITSUNO T, *et al.* Concentration-dependent fluorescence decay and energy transfer in Cr³⁺ and Nd³⁺ co-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramic powder [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2021, 60(3): 032001.
- [63] SAIKI T, NAKATSUKA M, IMASAKI K. Highly efficient lasing action of Nd³⁺- and Cr³⁺-doped yttrium aluminum garnet ceramics based on phonon-assisted cross-relaxation using solar light source [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, 49(8): 547-569.
- [64] SAIKI T, NAKATSUKA M, FUJIOKA K, *et al.* Cross-relaxation and spectral broadening of gain for Nd/Cr:YAG ceramic lasers with white-light pump source under high-temperature operation [J]. *Opt. Commun.*, 2011, 284(12): 5.
- [65] HONDA Y, MOTOKOSHI S, JITSUNO T, *et al.* Temperature dependence of the small-signal gain of a Cr³⁺ and Nd³⁺ co-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramic [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2021, 60(7).
- [66] SAIKI T, FUNAHASHI K, MOTOKOSHI S, *et al.* Temperature characteristics of small signal gain for Nd/Cr:YAG ceramic lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(4): 614-616.
- [67] YABE T, OHKUBO T, UCHIDA S, *et al.* High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(26): 261107.
- [68] LIANG D, ALMEIDA J, GUILLOT E. Side-pumped continuous-wave Cr:Nd:YAG ceramic solar laser [J]. *Appl. Phys. B.*, 2013, 111(2): 305-311.
- [69] LIANG D, VISTAS C R, TIBÚRCIO B D, *et al.* Solar-pumped Cr:Nd:YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2018, 185: 75-79.
- [70] 张佳, 赵长明, 蔡子韬, 等. Nd:YAG、Cr:Nd:YAG及Ce:Nd:YAG在太阳光泵浦下光谱匹配研究 [J]. *中国激光*, 2023, 50(13): 1301002.
- ZHANG J, ZHAO C M, CAI Z T, *et al.* Spectral matching of Nd:YAG, Cr:Nd:YAG and Ce:Nd:YAG laser materials under solar pumping [J]. *Chin. J. Lasers.*, 2023, 50(13): 1301002. (in Chinese)
- [71] XU L L, ZHOU T Y, MENG X, *et al.* Charge compensation strategy for mitigating the solarization induced color centers in highly transparent Cr,Nd:YAG ceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2026, 169: 117628.
- [72] SAIKI T, MOTOKOSHI S, IMASAKI K, *et al.* Laser pulses amplified by Nd/Cr:YAG ceramic amplifier using lamp and solar light sources [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(7): 1358-1362.
- [73] SAIKI T, MOTOKOSHI S, IMASAKI K, *et al.* High repetition rate laser pulses amplified by Nd/Cr:YAG ceramic amplifier under CW arc-lamp-light pumping [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(13): 2556-2559.
- [74] NAKAMACHI T, MATUOKA N, SAIKI T, *et al.* Enhancement of output laser power in high-power Nd/Cr:YAG ceramic

amplifiers based on cross-relaxation effect under solar-pumping [C]. *Proceedings of the IEEE Conference*, 2014.

[75] 关哲. 太阳光泵浦固体激光器及应用的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.

GUAN Z. *Research on Solar-Pumped Solid-State Lasers and Their Applications* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)



孙良哲(2000-),男,山东菏泽人,硕士研究生,2024年于常州工学院获得学士学位,主要从事激光放大系统方面的研究。

E-mail: slzusts@163.com



陈浩(1976-),男,江苏徐州人,博士,教授,硕士研究生导师,2013年于复旦大学获得博士学位,主要从事激光技术、激光照明及光学材料方面的研究。

E-mail: chen@usts.edu.cn



张乐(1988-),男,山东新泰人,博士,教授,2013年于南京工业大学获得博士学位,主要从事光功能陶瓷材料的研究。

E-mail: zhangle@jsnu.edu.cn