

基于阳光泵浦激光技术的空间光通信研究综述*

关 哲, 范迎春, 周必磊, 邓小飞, 张 伟, 楼宇涛
(上海卫星工程研究所 上海 201109)

摘要: 对基于阳光泵浦激光技术的空间光通信研究进行了综述。介绍了阳光泵浦激光技术在空间光通信领域的研究进展, 总结了不同类型阳光泵浦激光技术在系统设计中存在的优缺点。对于阳光泵浦激光技术, 较高能量转换效率潜力是其空间应用的重要优势, 详述了阳光泵浦激光技术中主要的能量转换环节及其影响因素等问题。为提高空间“阳光-激光”转换效率, 提出了一种阳光泵浦光纤激光技术的设计方法, 论述了其研究进展、应用前景及目前存在的问题。最后, 结合该设计方法的仿真结果及效能预期提出未来重点研究的几个方向, 如高效率阳光会聚至光纤、多稀土离子掺杂增益光纤等。

关键词: 空间光通信; 阳光泵浦; 空间激光技术; 光纤激光

中图分类号: TN249;V443+.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0097-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220119001

引用格式: 关哲, 范迎春, 周必磊, 等. 基于阳光泵浦激光技术的空间光通信研究综述[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 97-105.

Review of free space optical communication based on solar-pumped laser technology

GUAN Zhe, FAN Yingchun, ZHOU Bilei, DENG Xiaofei, ZHANG Wei, LOU Yutao
(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: The research on space optical communication based on solar-pumped laser technology is reviewed in this paper. The research progress of solar-pumped laser in the field of space optical communication is introduced, and the advantages and disadvantages of solar-pumped laser with different types in system design are summarized. For solar-pumped laser technology, higher energy conversion efficiency is an important advantage for its space application. The main energy conversion links in solar-pumped laser technology and the influencing factors are detailed. In order to improve the conversion efficiency of “sunlight to laser” in space, a design method of solar-pumped fiber laser technology is proposed, and its research progress, application prospects and current problems are discussed. Finally, combined with the simulation results and performance expectations of the new design method, several key research directions in the future are proposed, such as high-efficiency sunlight converging to the fiber, and multi-rare-earth ion-doped gain fiber.

Key words: Space optical communication; Solar-pumped; Space laser technology; Fiber laser

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220119001

Citation: GUAN Zhe, FAN Yingchun, ZHOU Bilei, et al. Review of free space optical communication based on solar-pumped laser technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 97-105.

引 言

空间光通信具有通信容量大、传输距离远、保密性好等优点, 是建设空间信息高速公路不可替代的手段, 也是当前国际信息领域的前沿科学技术^[1]。随着星间数据链路对光通信距离需求的不断提升, 星载激光通信系统对输出信号载波光功率的要求也持续增加, 与此同时, 系统调制解调模块的规模也将随之扩大, 最终导致激光通信载荷在功耗、重量、体积等方面的资源开销不断增大^[2-4]。卫星系统是典型的资源受限系统, 其功耗、重量等均受到一定程度的约束限制。一般卫星的在轨能源均来自于太阳光, 星载激光通信载荷输出信号载波光能量通常经历了“阳光-星上电能-泵浦激光-信号激光”的多级能量转

*基金项目: 上海市自然科学基金 (19ZR1453400); 上海航天科技创新基金资助项目 (SAST2018-032)

收稿日期: 2022-01-19 收修改稿日期: 2022-01-21

换及传递。为高效利用空间太阳光, 一种能直接实现“太阳光-信号激光”能量转换的激光技术——太阳光泵浦激光技术——被引进至空间光通信系统研究中^[5]。目前, 太阳光泵浦激光技术在激光振荡器实验研究中最高可实现每平方米太阳光会聚面积 32.1 W 连续激光能量输出, 在激光放大器实验研究中, 最高可实现超过 63%的“太阳光-激光”能量转换^[6,7]。利用太阳光泵浦激光技术提升空间激光器件能效, 为卫星在空间资源受限的条件下实现超远距数据传输提供支撑。

太阳光泵浦激光技术是利用受激辐射原理使光在激光增益介质内振荡发射或放大发射的激光技术, 可实现太阳光到激光的直接能量转换。作为开发太阳能运用的一种方式, 从激光器发明伊始, 人们对太阳光泵浦激光技术的研究就从未停止。

20 世纪 60 年代是太阳光泵浦激光技术的起步阶段, 主要研究集中在实现太阳光泵浦激光器的激光输出。1963 年, 美国普林斯顿 RCA 实验室 Z.J.Kiss 等人首次报道了太阳光直接泵浦固体激光增益介质的实验研究, 在实验中获得 2.36 μm 波段连续激光输出^[8]。1966 年, 马萨诸塞州光学公司 C.G.Young 研制出了首例太阳光泵浦 Nd:YAG 固体激光器, 获得了 1 W 连续激光输出^[9]。20 世纪 80 年代到 20 世纪末期, 是太阳光泵浦激光器的发展阶段, 这一时期太阳光泵浦激光器的研究重点为提高激光器输出功率和丰富激光器系统设计等技术^[10-12]。自 21 世纪以来, 太阳光泵浦激光器的研究进入加速阶段, 收集效率成为太阳光泵浦激光器系统设计的重要指标, 研究人员在已经实现太阳光泵浦激光器高功率输出的基础上, 针对激光器的体积、重量、成本、效率和输出特性等开展了一系列探索研究^[13-15]。

2017 年, 国内北京理工大学赵长明课题组报道了国际领先指标的太阳光泵浦固体激光器^[6], 以图 1 (a) 所示菲涅耳透镜为初级聚光装置, 配合图 1 (b) 所示液体光波导透镜与镀金锥形腔为次级聚光装置, 实验获得 32.1W/m² 的收集效率指标, 系统斜效率约 5.4%, 如图 1 (c) 所示。

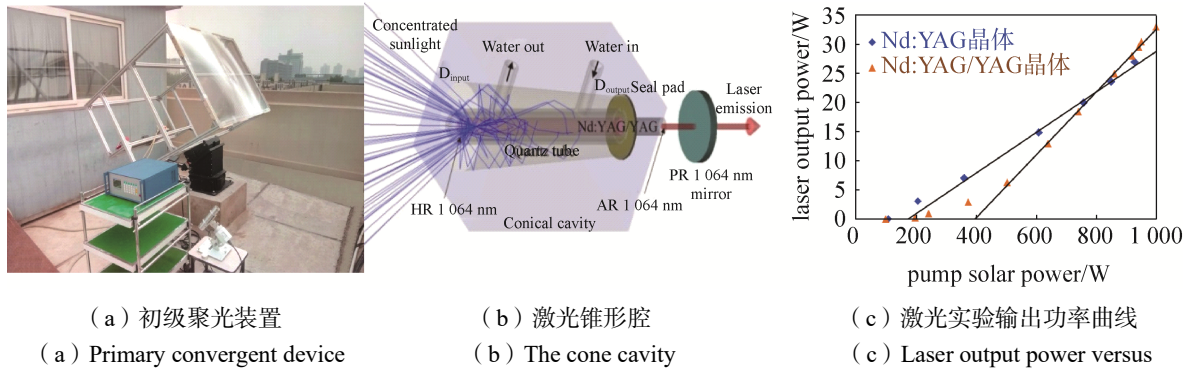


图 1 太阳光泵浦固体激光器
Fig. 1 Solar-pumped solid state laser

2017 年, 日本关西大学 T. Saikia 等人报道了利用闪光灯模拟太阳光泵浦 Cr,Nd:YAG 陶瓷激光增益介质的研究^[7], 在泵浦激光功率为 340 W/cm² 时, 获得了峰值功率为 1.6 kW 的脉冲激光输出, 实现了有效体积激光介质 63%的“光-光”转换效率, 实验系统如图 2 所示。

太阳光泵浦激光技术“光-光”能量转换环节少的优点, 使其在以太阳光为主要能源的空间系统中具有一定应用优势。随着空间光通信技术的快速发展, 基于太阳光泵浦激

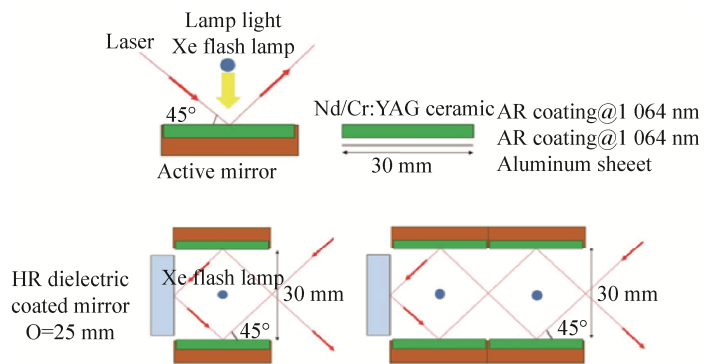


图 2 太阳光泵浦固体激光放大器
Fig. 2 Solar-pumped solid state laser amplifier

光技术的空间光通信系统概念被提出。2012年,上海卫星工程研究所牵头开展了基于太阳光泵浦激光技术的通信系统原理研究和关键技术攻关工作。2016年,国内首套基于太阳光泵浦激光技术的空间光通信原理样机系统,在地面实验中通过高清视频的传输验证了系统方案可行性^[16]。

1 太阳光泵浦激光技术研究

太阳光泵浦激光器是利用受激辐射原理使光在激光增益介质内振荡发射或放大发射的装置。太阳光泵浦激光器一般由三部分组成:太阳光会聚装置、激光增益介质和温控装置。太阳光会聚装置将低功率密度的太阳光耦合至激光增益介质,是整个太阳光泵浦激光器能量转换效率研究的重要环节。激光增益介质材料的选择和参数的设计,直接与激光器的热特性、机械特性和输出特性等相关,是太阳光泵浦激光器设计的中心部分。温控装置作为激光器稳定高效输出的保障条件,是太阳光泵浦激光器设计的必要环节。太阳光泵浦激光器的发展,是会聚系统效率不断提高、激光增益介质材料持续优化、温控系统控制效果逐步改良的过程。太阳光泵浦激光器系统的能量转换效率和激光输出特性也在各项关键技术的进步中不断提高。

1.1 激光增益介质

阳光泵浦激光增益介质是激光器系统的基本组成部分之一,其作用是提供产生激光所需的能级结构,实现粒子数反转并产生光的受激辐射放大。激光器的增益介质必须具有较宽较强的吸收光谱、尖锐的荧光谱线和相当高的针对所需荧光跃迁的量子效率。

激光增益介质的吸收光谱、泵浦阈值功率都直接影响着阳光泵浦激光器的工作性能。各种激光材料之间的吸收光谱不同,其与太阳光谱的匹配程度也不同。从选择适合太阳光泵浦激光增益介质的角度来说,要选择对太阳光谱能量吸收多的材料才可能得到较高的能量转换效率。以常用的激光材料 Nd:YAG、Yb:YAG、红宝石、Nd:YVO₄、Cr:Nd:GSGG、Cr:Nd:YAG 和掺 Yb³⁺ 的石英光纤等为例,分析它们的光谱匹配度(材料吸收光谱与太阳辐射光谱的匹配程度)、阈值泵浦功率、材料热特性等参数,选取适用于太阳光泵浦固体激光器的增益介质,见表 1^[17]。在红宝石、Cr:Nd:GSGG、Cr:Nd:YAG 等激光材料中, Cr³⁺ 离子的存在使激光增益介质对太阳光辐射的吸收能力大大增强。

1.2 激光器能量转换研究

太阳光泵浦激光装置中的能量转换流程和这一过程涉及到的设计问题主要由六个环节决定,如图 3 所示^[5]。太阳光到激光的能量转化效率可分为光谱重叠效率、传输效率、吸收效率、上能级效率、光束交叠率和提取效率等^[18]。

表 1 激光增益介质吸收谱与太阳光谱匹配分析
Table 1 The match analysis table of absorption spectrum of gain medium and solar spectrum

增益介质	掺杂离子	吸收光谱 (nm)	吸收能量 (W/m ²)	太阳光谱 占比
Nd:YAG	1.0% Nd ³⁺	515~540	218.39	15.98%
		565~595		
		735~765		
		795~825		
Yb:YAG	0.5% Yb ³⁺	855~885	32.09	2.35%
		910~920		
		935~945		
		965~973		
红宝石	0.05% Cr ³⁺	1 024~1 033	335.12	24.51%
		354~454		
Nd:YVO ₄	1.0% Nd ³⁺	504~604	88.3	6.46%
		570~590		
Cr:Nd:GSGG	2.5% Cr ³⁺ 1.5% Nd ³⁺	740~760	600.25	43.91%
		798~818		
		400~530		
		570~700		
Cr:Nd:YAG	0.1% Cr ³⁺ 1.0% Nd ³⁺	735~765	655.86	47.99%
		795~825		
		855~885		
		400~540		
掺 Yb ³⁺ 光纤	0.5% Yb ³⁺	570~700	104.34	7.63%
		735~765		

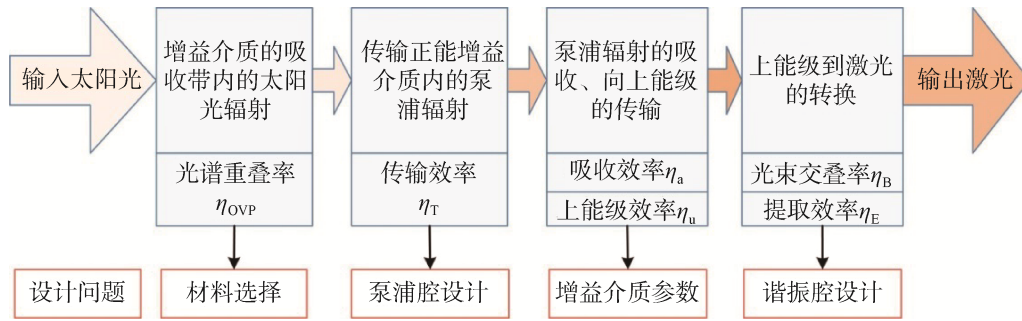


图 3 阳光泵浦激光装置能量转换流程图

Fig. 3 The flow chart of energy conversion in solar-pumped laser system

太阳光泵浦激光装置内能量转换过程中, 各能量转换环节定义可描述如下:

- ① 光谱重叠率。太阳光经会聚装置以宽光谱太阳辐射为泵浦源, 其中波长处于激光增益介质吸收带内的部分定义为有效泵浦辐射;
- ② 传输效率。太阳光经会聚装置传递至激光增益介质, 定义太阳光泵浦激光装置的传输效率为传输到激光增益介质上的有效太阳辐射与太阳光谱中处于激光增益介质吸收带内的有效太阳辐射之比;
- ③ 吸收效率。在太阳光泵浦激光装置中, 吸收效率为激光增益介质吸收的泵浦太阳光功率与入射至激光增益介质内的泵浦太阳光功率之比;
- ④ 上能级效率。太阳光泵浦激光装置中的上能级效率是激光跃迁时发射的光子功率与吸收泵浦太阳光的有效辐射功率之比, 上能级效率可表示为量子效率与斯托克斯因子的乘积;
- ⑤ 光束交叠效率。光束交叠效率可定义为激光谐振腔的模式体积与激光增益介质的泵浦体积之比;
- ⑥ 提取效率。提取效率表示激光输出时激光上能级可用能量与总能量之比, 且激光器系统总效率与系统的提取效率成正比。

2 基于太阳光泵浦激光技术的空间光通信系统

太阳光泵浦激光技术以其结构简单、能量转换环节少、可实现太阳光到激光的高效能量转换等特点在空间光通信领域具有潜在应用优势。该技术在成熟星载光通信系统的设计基础上, 探索以太阳光泵浦激光装置替代传统电泵浦激光器件, 开展空间光通信系统研究。太阳光泵浦激光器可分为两类, 即太阳光泵浦激光振荡器和太阳光泵浦激光放大器。在基于太阳光泵浦激光技术的空间光通信系统工作中, 分别开展了以太阳光泵浦固体激光器、太阳光泵浦固体激光放大器和太阳光泵浦光纤激光放大器等装置替代传统电泵浦激光器件的相关研究。

2.1 基于太阳光泵浦固体激光器的光通信系统

基于太阳光泵浦固体激光器的空间光通信系统主要由太阳光泵浦固体激光器、通信发射/接收机和光学天线等组成, 如图 4 所示^[16]。其中, 太阳光泵浦固体激光器作为通信信号载波源, 主要由太阳光会聚装置、激光谐振腔、温控装置和空间光光纤耦合装置组成。

由于激光通信系统的载波信号是以

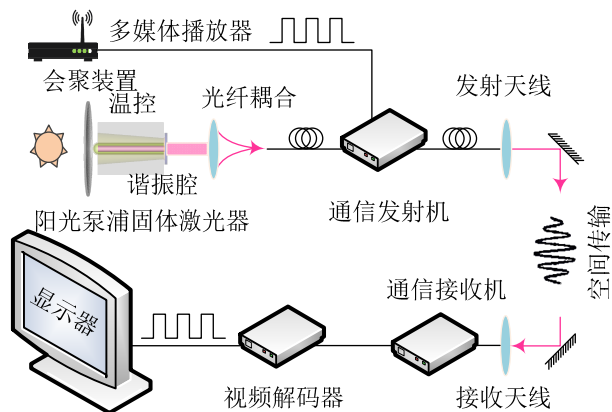


图 4 基于阳光泵浦固体激光器的空间光通信系统示意图
Fig. 4 The scheme of the free-space laser communication system based on solar-pumped solid state laser

FC/APC 光纤接口的方式进入通信发射机，因此需配置光纤耦合装置，这对激光器输出光束质量提出了较高的要求。实验研究中，激光器获得斜效率 3.9% 的连续激光输出，经空间光光纤耦合装置后，在光纤输出端测得不低于 20 mW 的激光输出，满足通信系统需求。

通信发射/接收机采用成熟星载激光通信终端架构设计，系统组成如图 5 所示。通信发射机由电光调制器及其驱动、调制器、偏置点控制器（偏压控制器）和视频编码器等组成。多媒体播放器作为信源，提供高清视频传输数据，视频编码器对高清视频进行压缩处理，电光调制器把编码后的信号调制到激光载波上。偏压控制电路闭环控制电光调制器偏置点电压，实现对光调制信号的整形。光学天线把光纤输出光信号经扩束、准直光路发射到自由空间。通信接收机是反映激光通信系统综合性能的重要组成部分，其功能是对通信发射机的原始信号进行接收和恢复。通信接收机主要由光电探测器、前置放大器、主放大器和均衡滤波器等组成。载波激光信号经接收天线进入光电探测器完成光电信号转换，微弱电信号进入前置放大器和主放大器进行能量放大和信噪比提升。通信接收机通过自动增益控制（AGC）电路允许入射激光信号的能量值有一定的浮动。

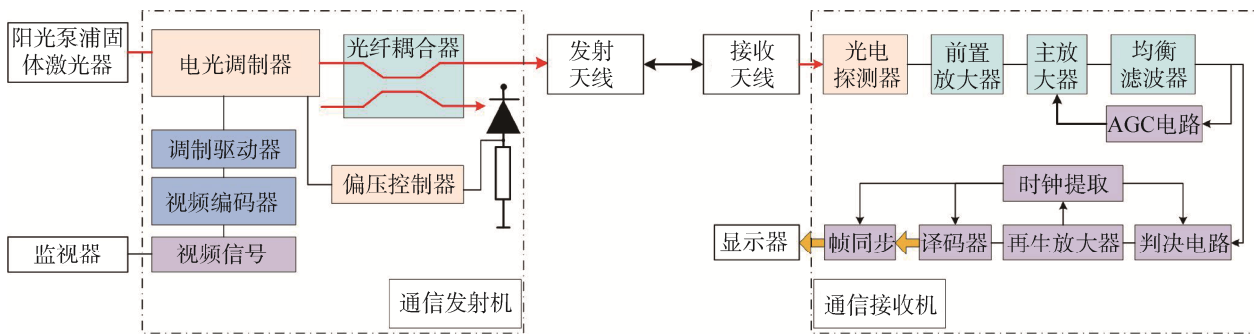
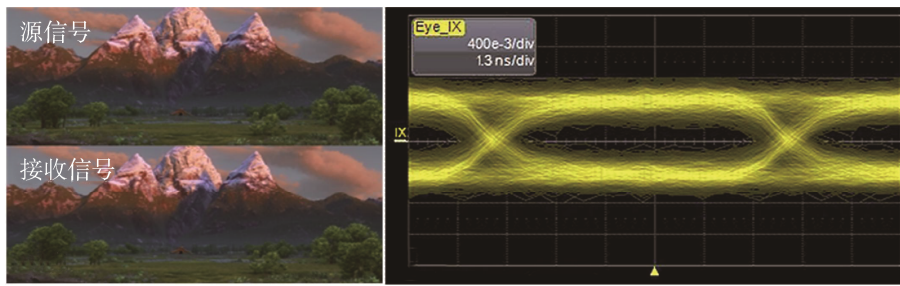


图 5 激光通信发射/接收机工作原理框图

Fig. 5 The schematic diagram of transmitter and receiver of laser communication system

在自由空间光通信系统的测试实验中，选用高清视频影像数据为源信号，通过 LiNbO₃-MZM 对载波激光进行强度调制。实验中，从光学发射天线输出激光信号发散角为 40 μrad，光学接收天线将收集到的激光信号会聚于光电探测器 APD 内。利用示波器实时监测通信系统，获得了大于 125 Mbps 的视频通信速率，系统误码率低于 10⁻⁶。视频信息传输前后对比如图 6 (a) 所示，示波器中观察到的眼图如图 6 (b) 所示。



(a) 视频源信号与传输信号对比

(b) 解调信号眼图

(a) The original and transmitted video snapshot (b) The eye diagram of demodulated signals

图 6 空间光通信演示验证实验

Fig. 6 The demonstration experiment of free-space laser communication system

2.2 基于太阳光泵浦固体激光放大器的光通信系统

基于太阳光泵浦固体激光放大器的空间光通信系统主要由太阳光泵浦固体激光放大器、光纤准直/耦合组件、通信发射/接收机、波分复用/解复用器和光学天线等组成，如图 7 所示。

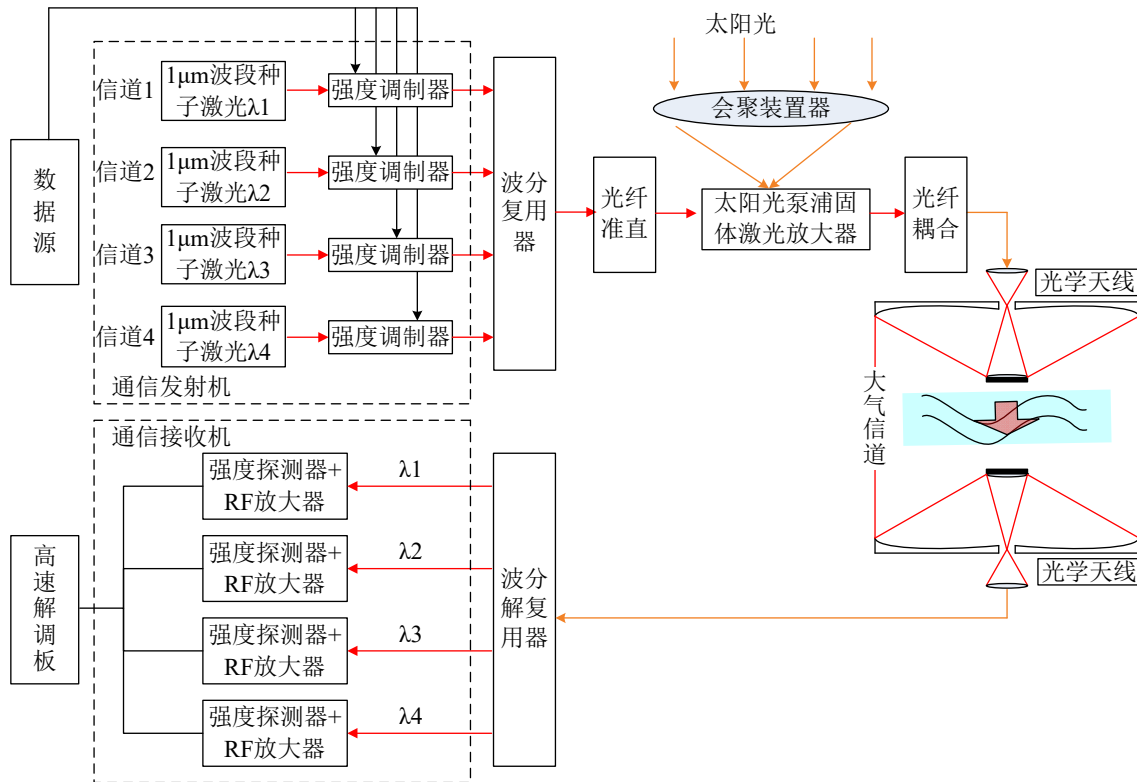


图 7 基于太阳光泵浦固体激光放大器的空间光通信系统示意图

Fig. 7 The scheme of the free-space laser communication system based on solar-pumped solid laser amplifier

太阳光泵浦激光放大器是基于行波放大理论的连续激光放大装置，种子激光通过处于粒子数反转状态的激光增益介质发生受激辐射实现激光功率放大^[5]。采用太阳光泵浦固体激光放大装置替代传统电泵浦激光放大器件，充分利用太阳光泵浦激光放大器高效率能量转换的技术潜力和扩展通信系统多波长复用通信能力。系统中采用激光种子光源输出高品质单频激光，经高速调制模块进行数据加载，多路 1 μm 波段不同波长的载波光信号经波分复用器汇聚后，再通过光纤准直组件进入太阳光泵浦激光放大装置。该设计与传统空间光通信系统内所采用的激光主振荡功率放大器构型相似，贴合太阳光泵浦激光技术在远距离空间光通信系统内的应用需求。与此同时，充分利用太阳光泵浦激光放大器内增益介质荧光光谱可适应多个波长能级跃迁的特性，可实现多波长载波共用功率放大装置，简化系统硬件设计。

太阳光泵浦固体激光放大器是空间光通信演示验证系统的功率放大器件，主要由太阳光会聚装置、固体激光增益介质和空间光耦合装置组成，如图 8 所示^[19]。种子光源输出单频激光经高速调制，准直输出直径 2 mm 的载波信号光斑，碟状激光增益介质上表面镀 1 μm 波段增透膜，下表面镀 1 μm 波段高反膜。载波信号光以 45° 角入射至激光增益介质表面，增益介质内激光折射角满足折射定律，折射角为 22.9°，在经介质下表面反射后，再次以 45° 角出射。在自然太阳光泵浦条件下，太阳光泵浦固体激光放大器获得有效增益。

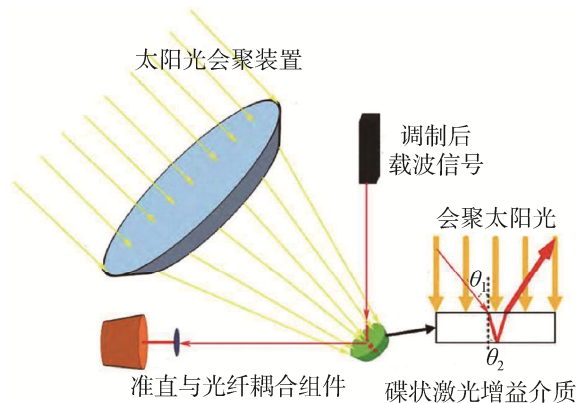


图 8 太阳光泵浦固体激光放大器结构示意图
Fig. 8 The structure diagram of solar-pumped solid laser amplifier

2.3 基于太阳光泵浦光纤激光放大器的光通信系统设计

在空间光通信系统内，将太阳光泵浦激光放大器的激光材料由固体增益介质优化改进设计为掺杂稀土离子的增益光纤，通信系统中其它单机保持不变，实现太阳光泵浦激光放大器与上级通信发射波分复用器和下级光学天线的光纤接口匹配，以解决系统内模块间光纤准直/耦合过程中出现的能量传输损耗，提升系统空间适应性。太阳光泵浦光纤激光放大器是主控振荡器的功率放大结构的改进设计，其系统由太阳光会聚装置、隔离器、光纤增益介质及耦合系统部分组成，如图 9 所示。

2017 年，日本丰田公司前沿研究中心 Masuda 等人致力于大幅降低太阳光泵浦激光器的泵浦阈值，其采用低聚光比太阳光会聚系统，垂直横向泵浦盘绕的低掺杂浓度光纤激光增益介质，成功获得激光输出，实验装置如图 10 所示。该方案中采用的光纤增益介质为长度 40 m，纤芯掺杂 Nd^{3+} 离子的 SiO_2 光纤，光纤增益介质沿腔体盘绕于浸满下转能级敏化剂的溶液。试验中激光器的泵浦功率阈值低于普通太阳光泵浦激光器泵浦阈值两个数量级，但激光器系统的激光输出斜率效率也仅有 $3.6 \times 10^{-5}\%$ ，低于普通太阳光泵浦激光器五个数量级^[20]。

太阳光泵浦光纤激光器的研究结果虽未达到理论的能量转换效率，但该研究首次将光纤增益介质引入太阳光泵浦激光技术，实验验证了基于光纤增益介质的太阳光泵浦激光技术的可行性。在太阳光泵浦光纤激光放大器的研究中，最大的挑战之一便是如何将尽可能多的泵浦太阳光耦合进入光纤增益介质。因为对于光纤来说，其直径一般远小于会聚光学系统对太阳所成像的直径，尽可能地提高泵浦太阳光耦合效率是关键。基于此问题提出两种太阳光泵浦光纤耦合方案，分别是侧面泵浦耦合和端面泵浦耦合。

针对侧面泵浦方式，提出封闭式环形腔泵浦结构设计思路，如图 11 所示^[21]。结构件外部为立方体，内部为圆柱环形结构，内表面抛光并镀膜，侧面留通光斜孔，增益光纤盘绕在内部的圆柱环上。太阳光从斜孔进入，在结构件内表面不断反射，最终被增益光纤吸收。基于封闭式环形腔内镜面反射机制，实现泵浦太阳光高效率侧面耦合进入无涂覆层单包层增益光纤。

基于太阳光侧面泵浦光纤激光放大设计思路，封闭式环形腔内部为光学镀金工艺，在 800 nm~1 600 nm 波段具有良好的镜面反射效果。剥离涂覆层的单包层掺杂稀土离子增益光纤在环形腔中沿内壁结构呈环状缠绕，当泵浦太阳光经入射端口进入环形腔体内部后，在腔体内壁遵循反射定律往复传播。泵浦太阳光被封闭于环形腔内，太阳光线在不断经过腔体内壁反射与光纤包层折射后，耦合进入增益光纤的概率有效提升。封闭式环形腔内的太阳光线在不断被腔壁镜面反射的过程中，持续被增益光纤吸收，而每一次

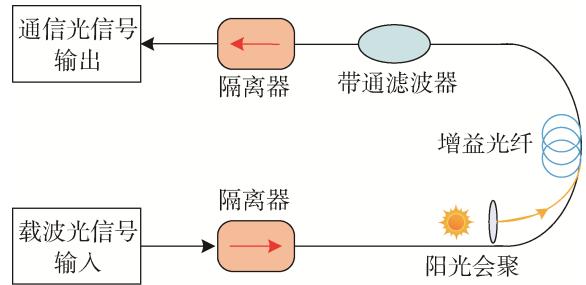


图 9 太阳光泵浦光纤激光放大器结构示意图
Fig. 9 The structure diagram of solar-pumped fiber laser amplifier

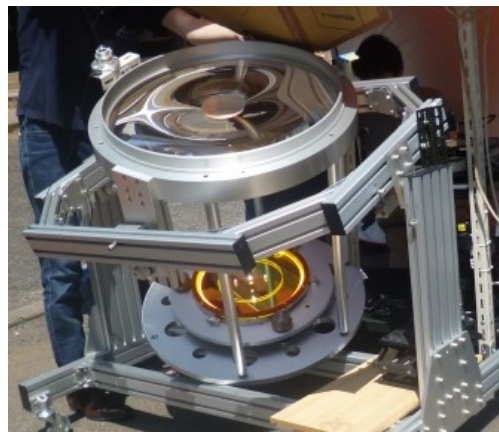


图 10 太阳光泵浦光纤激光器实验装置
Fig. 10 The experimental set-up of solar pumped fiber laser

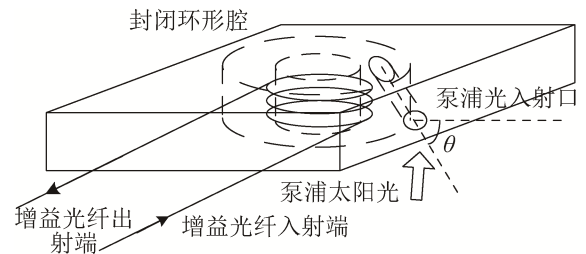


图 11 侧面泵浦式太阳光泵浦光纤激光放大器结构示意图

Fig. 11 The structure diagram of solar-pumped fiber laser amplifier with side pumping

太阳光线穿过增益光纤, 太阳光就会被部分吸收, 最终能够从环形腔入射端口溢出的太阳光线微乎其微。借助太阳光入射端口的滤光装置, 筛选可被增益光纤有效吸收的太阳光谱进入环形腔内, 确保入射至腔体内的绝大部分泵浦太阳辐射可被增益光纤吸收, 提升系统效能, 降低装置热控要求。

针对端面泵浦方式, 提出一种太阳光-光纤耦合合束器结构设计思路, 如图 12 所示。首先, 利用初级太阳光会聚装置, 实现太阳光束整形准直, 获取高聚光比太阳光斑。然后, 采用熔融拉锥耦合技术制备光纤合束器锥体, 将聚焦后的太阳光通过紧密堆积的多模光纤合束到大芯径多模光纤中, 从而实现太阳光到光纤的耦合输入。大芯径多模光纤内泵浦太阳光经光纤合束器进入光纤增益介质与通信载波信号光合束, 最终实现通信光信号功率增益。

多根阳光传导光纤的尾纤经紧密堆积与熔融拉锥热处理后形成面板状光纤合束器入射端面, 光纤束可设计为玻璃材质, 具备耐高温和抗空间辐照特性。为进一步提高光纤合束器耦合效率, 在合束器入射端面可镀与增益光纤吸收谱段匹配的阳光光谱增透膜。阳光光纤合束器实现了太阳光到光纤的直接会聚耦合, 且具备多层级光纤级联合束接口扩展能力和适应前后双向泵浦方式, 可有效提高太阳光泵浦光纤激光放大器的总入射泵浦光功率。

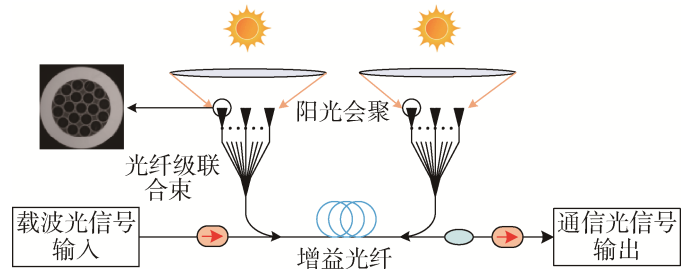


图 12 端面泵浦式太阳光泵浦光纤激光放大器结构示意图

Fig. 12 The structure diagram of solar-pumped fiber laser amplifier with end pumping

3 结束语

星间光通信系统已成为天基信息网络架构的重要组成, 面对日趋成熟的星载光通信系统, 发展高效率、高可靠空间激光技术是对空间激光应用需求持续增长的积极响应和技术储备。太阳光泵浦激光技术具有实现“太阳光-激光”能量直接转换的技术特点, 在空间应用中不仅可提高星上能源利用效率, 还具有优化系统硬件组成和降低单机功耗热耗的技术优势。随着激光技术的持续发展, 当前空间光通信技术也在不断完善和提升, 基于太阳光泵浦激光技术的空间光通信系统研究作为新体制星载激光通信载荷的技术探索, 是对空间光通信未来发展的有益补充和技术储备。

参考文献

- [1] HEMANI K, JAIN V K, SUBRAT K. 自由空间光通信技术[M]. 刘阳, 余林佳, 邓小飞 译. 北京: 国防工业出版社, 2021.
- [2] 董明昶. 通信用高功率半导体激光调制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [3] 陈怀新, 隋展, 陈祯培, 等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1107-1111.
CHEN Huaixin, SUI Zhan, CHEN Zhenpei, et al. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1107-1111.
- [4] 丁德强, 柯熙政. 大气激光通信 PPM 调制解调系统设计与仿真研究[J]. 光通信技术, 2005, 29(1): 50-52.
DING Deqiang, KE Xizheng. Design of PPM for laser communication in atmosphere[J]. Optical Communication Technology, 2005, 29(1): 50-52.
- [5] 赵长明. 太阳光泵浦激光器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [6] GUAN Zhe, ZHAO Changming, LI Jinhua, et al. 32.1 W/m² continuous wave solar-pumped laser with a bonding Nd:YAG/YAG rod and a Fresnel lens[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 107: 158-161.
- [7] 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]. Optics Communications, 2017, 387: 316-321.
- [8] KISS Z J, LWEIS H R, DUNCAN JR R C. Sun pumped continuous optical maser[J]. Applied Physics Letters, 1963, 2(2):

- 93–94.
- [9] YOUNG C G. A sun-pumped CW One-Watt laser[J]. Applied Optics, 1966, 5(6): 993–997.
- [10] INSUIK R J, CHRISTIANSEN W H. Blackbody-pumped CO₂ laser experiment[J]. Aiaa Journal, 2015, 22(9): 1271–1274.
- [11] WEKSLER M, SHWARTZ J. Solar-pumped solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 1222–1228.
- [12] LANDO M, SHIMONY Y, BENMAIR R M J, et al. Visible solar-pumped lasers[J]. Optical Materials, 1999, 13(1): 111–115.
- [13] 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]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2670.
- [14] LIANG D, ALMEIDA J. Solar-pumped TEM₀₀ mode Nd: YAG laser[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25107–25112.
- [15] XU Peng, YANG Suhui, ZHAO Changming, et al. High-efficiency solar-pumped laser with a grooved Nd: YAG rod. [J]. Applied Optics, 2014, 53(18): 3941–3944.
- [16] GUAN Zhe, ZHAO Changming, YANG Suhui, et al. Demonstration of a free-space optical communication system using a solar-pumped laser as signal transmitter [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14: 055804.
- [17] 赵彬, 赵长明, 何建伟, 等. 太阳光抽运固体激光增益介质的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1797–1801.
ZHAO Bin, ZHAO Changming, HE Jianwei, et al. The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1797–1801.
- [18] WALTER K. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [19] 王子, 赵长明, 杨苏辉, 等. 太阳光直接抽运 1 064 nm 激光放大器[J]. 中国激光, 2017(3): 26–31.
WANG Yu, ZHAO Changming, YANG Suhui, et al. Solar directly pumped 1 064 nm laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017(3): 26–31.
- [20] MASUDA T, IYODA M, YASUMATSU Y, et al. Low-concentrated solar-pumped laser via transverse excitation fiber-laser geometry. [J]. Optics Letters, 2017, 42(17): 3427.
- [21] 关哲, 汪少林, 张伟, 等. 基于封闭式环形腔的侧面泵浦激光放大系统及构造方法: 202011138730.X[P]. (2021-08-24)[2022-01-19].

[作者简介]

关 哲 1988 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为空间激光技术和空间光通信系统技术。

范迎春 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间通信系统工程技术。

周必磊 1984 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为通信系统技术。

邓小飞 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间通信系统技术。

张 伟 1971 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间飞行器系统技术。

楼宇涛 1988 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为空间系统工程技术。

(本文编辑: 杨秀丽)