



·强激光物理与技术·综述·

高功率掺镱光纤激光器的辐照影响分析及研究进展

郑也, 马梓洋, 朱嘉婧, 于淼, 李思源, 张琳, 王军龙, 王学锋

(北京航天控制仪器研究所, 北京 100094)

摘要: 高功率掺镱光纤激光器在空间环境中的应用日益增多, 但掺镱光纤材料在空间辐照条件下会产生色心效应, 导致损耗增加, 影响光纤器件以及激光器整机的性能, 从而给高功率光纤激光器在空间环境的长期稳定工作带来隐患。从空间辐照对高功率光纤激光器性能的影响机理、抑制方法和研究进展等3个方面进行介绍。首先介绍了空间辐照对高功率掺镱光纤激光器中关键光学器件、放大级热负载、非线性效应等方面的影响分析, 其次介绍了抑制辐照效应的典型方法及其在高功率掺镱光纤激光器中的可行性分析, 最后介绍了国内外典型的高功率掺镱光纤激光器的辐照影响及抑制的研究成果, 并展望了未来发展趋势。

关键词: 光纤激光器; 色心; 辐致衰减; 热负载; 非线性效应

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210414

Influence of space radiation on properties of high power Yb-doped fiber lasers and their recent progress

Zheng Ye, Ma Ziyang, Zhu Jiajing, Yu Miao, Li Siyuan, Zhang Lin, Wang Junlong, Wang Xuefeng

(Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China)

Abstract: High power Yb-doped fiber lasers have gained increasing application in space environment. However, the space radiation will bring color centers in Yb-doped fiber materials, thus increasing the inherent loss of the fiber. As a result, the optical properties of typical fiber-based components and the fiber lasers will be deteriorated, which makes it difficult for high power fiber lasers to achieve long-term stable operation in space environment. In this paper, a detailed introduction from three main aspects is given. Firstly, the influence of space radiation on typical optical components, thermal loading and nonlinear effects in high power fiber laser are introduced. Next, the typical suppressing methods of space radiation and their feasibility in high power fiber laser system are discussed. In the end, the representative research progress on the influence of space radiation on high power Yb-doped fiber lasers and effective suppressing methods at home and abroad are introduced.

Key words: fiber laser, color center, radiation-induced attenuation, thermal loading, nonlinear effects

光纤激光器具有结构紧凑、热管理方便、光束质量好、使用灵活等诸多优势^[1-3], 近年来在军民两用等诸多领域得到了广泛应用。随着人类对太空的不断探索和空间技术的飞速发展, 光纤激光器在空间领域的应用开始逐渐增加, 如光纤陀螺、卫星光通信、激光雷达、光纤传感、空间碎片清除、空间定向能等^[4-9]。

但是, 光纤材料在空间辐照条件下会产生色心效应, 导致损耗增加, 影响光纤器件的光学性能, 进而降低光纤激光器的稳定性和工作寿命^[10-12]。对于高功率光纤激光器, 除了光纤器件性能变化对激光器输出影响之外, 还需要考虑热负载变化的影响, 在量子亏损所致热负荷基础上, 辐照所致的损耗导致热负载进一步增加, 对激光器的稳定工作带来安全隐患。对于多级放大结构的高功率光纤激光器, 辐照会同时导致种子源输出性能和放大器性能的变化, 两者综合影响, 除了导致输出功率下降之外, 还会引起非线性效应阈值、模式不稳定阈值的变化, 进而引起谱线宽度、光束质量、中心波长等性能参数退化, 影响高功率光纤激光器在空间环境的正常工作^[13-14]。可见, 空

* 收稿日期: 2021-09-20; 修订日期: 2021-12-18

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目 (U20B2058)

联系方式: 郑也, zhengye.no1@163.com。

通信作者: 王军龙, wjl_casc@126.com;

王学锋, xuefeng_wang@sina.com。

间辐照在器件、系统层面都对高功率掺镱光纤激光器的输出性能有明显的影响,厘清影响规律,探索有效的解决方法,是实现高功率掺镱光纤激光器在空间环境长期稳定工作的关键。

本文深入分析了空间辐照对高功率掺镱光纤激光器的影响,详细介绍了空间辐照对关键光纤器件、放大级热负载、非线性效应等方面的影响。在此基础上,介绍了典型的抑制辐照方法原理及其应用在高功率光纤激光器的可行性,最后介绍了高功率光纤激光器辐照影响及抑制方面的国内外有代表性的研究工作进展,并对此进行总结与展望。

1 辐照对高功率掺镱光纤激光器性能影响分析

高功率掺镱(Yb)光纤激光器一般指输出功率数 kW 的单模或者近单模光纤激光器,主要有直接振荡和主振荡功率放大(MOPA)两种技术方案。MOPA 结构可实现更高的输出功率,在光谱、线宽、模式控制方面具有更好的设计灵活性,应用更为广泛。本文以基于 MOPA 结构的高功率掺镱光纤激光器作为研究对象,其组成结构如图 1 所示,由种子源和高功率放大器两部分组成,包含增益光纤、光纤光栅、光纤隔离器、光纤合束器、包层光剥离器、输出端帽等光纤光学器件。在此从光纤器件、热效应、非线性效应等方面对辐照影响进行分析。

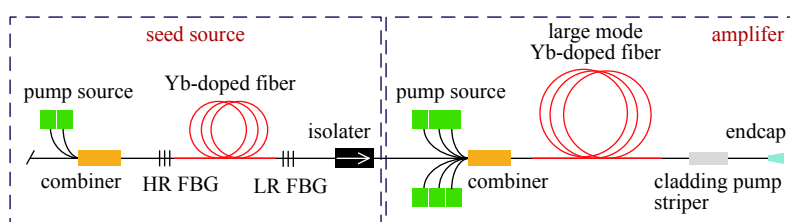


Fig. 1 Construction of high power Yb-doped fiber laser based on MOPA structure

图 1 基于 MOPA 结构的高功率掺镱光纤激光器组成示意图

1.1 辐照对光纤器件性能的影响

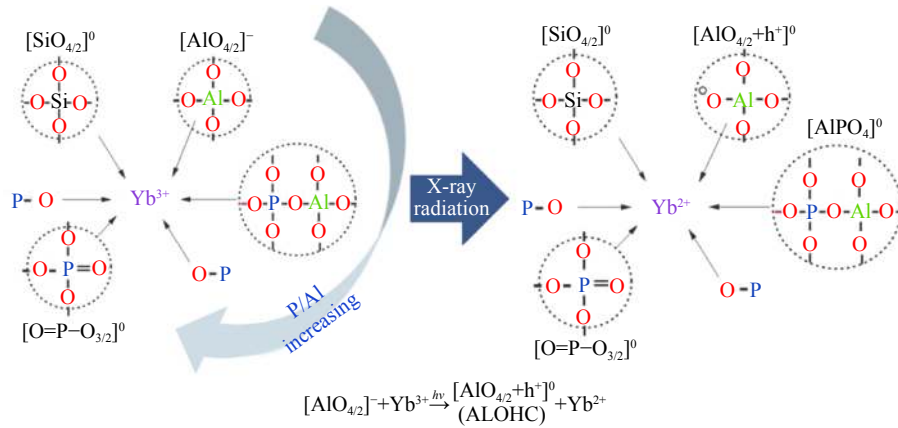
在空间辐射环境中,高能射线通过光电效应、电子对效应和康普顿散射等与光纤材料直接发生相互作用,导致光纤材料中的原子电离出电子-空穴对,随着电子-空穴对被光纤中的本征、杂质和掺杂等缺陷俘获,就会形成一种带有效电荷的特殊点缺陷,它能够束缚电子和空穴,引起光纤材料中的电子或空穴激发,从而产生光吸收。其吸收带通常落在可见光波段,因此称为色心^[15]。

辐照造成光纤材料性能下降的机制主要有 3 类:辐致衰减(光纤对传输光的吸收现象)、辐致发射(辐照光纤时产生其他某些波段的光)、光致密(光纤折射率的变化)。辐致衰减被认为是空间辐照对有源光纤材料损伤最为主要的表现,也是引发光纤性能下降的直接原因。辐致衰减与光纤材料的组分密切相关,通常纯石英纤芯光纤的耐辐照性能最强,稀土离子掺杂光纤较差。

稀土离子掺杂光纤是光纤激光器的增益介质,也是最为核心的组成部件。与石英光纤材料本身相比,稀土离子掺杂光纤引入的共掺剂会破坏石英玻璃的网络结构,并产生新的缺陷中心,极大地降低了光纤的耐辐照性能。因此,稀土离子掺杂增益光纤是高功率光纤激光器系统中对辐照作用最为敏感的器件。对于掺镱光纤,研究表明,Yb²⁺和氧空穴色心(OHC)对是导致掺 Yb³⁺石英光纤辐致暗化效应的最根本原因^[16-17]。中国科学院上海光学精密机械研究所邵冲云等给出了掺镱光纤色心形成模型^[16],如图 2 所示,电负性的 [AlO₄]²⁻ 在辐照过程容易俘获一个空穴(即释放出一个电子)变成 Al-OHC,在此过程中释放出的电子被 Yb³⁺俘获,从而大量 Yb³⁺被还原为 Yb²⁺。辐照条件下,增益光纤的损耗增加,导致激光效率降低,输出功率下降。低功率光纤激光器在辐照条件下,可能仅仅表现出功率的衰减,而随着激光功率的提升,大量废热产生并积累,会引起激光放大过程的一系列变化,严重影响激光器的正常工作。

光纤布拉格光栅(FBG)是高功率光纤激光器的另一个关键器件,用作构成激光谐振腔,实现激光输出并进行波长选择。光纤光栅原理的色心模型认为,掺杂物质与 SiO₂ 混合形成结构缺陷,在外界紫外光场的作用下,掺镱光纤中的缺氧中心对紫外光吸收强烈,电离释放电子陷于缺陷位置,形成色心导致了吸收谱的变化,从而引起折射率变化^[18-21]。哈尔滨工业大学马晶教授等通过理论分析推导出光纤布拉格光栅折射率变化与辐照剂量的关系式^[20]。研究表明,随着辐照剂量的增加,光纤布拉格光栅反射谱的峰值波长出现红移现象,反射光强度越来越小。光栅辐照前反射谱的峰值波长越大,相同吸收剂量下,其折射率变化越大^[21]。

光纤合束器、包层剥离器等无源光纤器件,是实现高功率光纤激光输出不可缺少的功能组件。无源器件的主

Fig. 2 The model of radiation-induced color center of the Yb^{3+} -doped fiber图2 Yb^{3+} 掺杂光纤辐照致色心形成模型

要成分是无源光纤,无源光纤辐照后产生了色心,既包括光纤纤芯色心,又包括光纤包层色心,两者均会降低无源光纤对激光的透过率。虽然相比于有源光纤,同等辐照剂量下,辐照对无源光纤的影响相对较小,但是当总剂量积累到一定程度,无源器件的性能劣化不可忽视,尤其在数千瓦高功率应用中,会对输出激光的性能产生影响,甚至威胁到激光器的安全。

此外,对于某些特殊应用,如光束合成、相干探测、频率转换等,要求激光的谱线宽度在GHz量级,此时在高功率窄线宽光纤激光器系统中,除了常规的光纤器件之外,还需要铌酸锂电光相位调制器用于光谱宽度精密调控^[22-25]。铌酸锂晶体存在固有缺陷,在辐照条件下也会产生色心,影响透过率、吸收光谱、折射率等光学性质,进而对调制后的光信号产生影响^[26]。由于铌酸锂相位调制器用于产生窄线宽种子源,对于后续的激光放大非常关键。因此,设计应用于空间环境的高功率窄线宽光纤激光器时,相位调制器的辐照影响也需要考虑。

1.2 辐照对激光器热负载的影响

热效应是影响高功率光纤激光器性能的关键因素,在激光产生过程中,会伴随着大量的废热产生。以976 nm作为泵浦光的掺镜光纤激光器,输出激光中心波长约1070 nm,量子亏损大约为10%,即大约10%的泵浦功率转换成热量^[27]。在辐照条件下,增益光纤的辐照损耗会导致转换效率下降,使得未被吸收的泵浦光沉积到了光纤激光器中(主要是在增益光纤内),沉积的泵浦光能量经过一系列复杂的转移过程,最终通过无辐射跃迁过程转变成热能。辐照产热成为光纤激光器的新热量来源,并且随着辐射剂量的累加,越来越多的泵浦能量通过辐照产热过程转换成热能,甚至会远远超过量子亏损产生的热能,从而导致严重的热效应。

热效应对高功率光纤激光器的影响较大,首先会对光纤本身造成损伤,如烧毁光纤、产生热透镜效应。常见的双包层光纤低折射率聚合物层对于热沉积非常敏感,当热量沉积使光纤温度达到150~200℃时,高热负载会导致光纤聚合层的热损伤,光纤聚合层的温度应该控制在80℃以下,才能保证光纤的安全稳定工作^[28]。光纤温升引起的热透镜效应,会降低模场面积,可能导致产生多模现象。

热效应还能够对光纤激光器输出性能造成直接影响,尤其是近年来研究发现的热致模式不稳定现象,已经成为限制高功率光纤激光器性能进一步提升的重要因素^[29-31]。从文献资料报道的研究来看,模式不稳定的出现与热致折射率光栅、光子暗化、受激热瑞利散射、热透镜有关,归根结底都是源于光纤中的热效应。尤其是光子暗化与模式不稳定阈值变化的相关性,德国耶拿大学Otto等^[30]通过理论计算得出在将光暗化效应考虑在内后,模式不稳定阈值功率至少下降了50%。辐照损耗与光子暗化有着较大的共同之处,也可认为是高功率光纤激光器中一个新热源,对模式不稳定产生明显影响。

1.3 辐照对激光放大过程的非线性效应阈值影响

非线性效应是限制高功率光纤激光器输出性能的关键因素,主要有受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)、四波混频(FWM)等^[32]。对于MOPA结构的光纤激光器,非线性效应阈值会受到种子源和放大级性能两个方面的综合影响。在辐照条件下,种子源和放大级性能都会发生变化,进而引起非线性效应阈值的变化。

种子源的性能对激光放大会产生直接影响,在辐照条件下,由于增益光纤损耗增加以及FBG反射谱和反射强度的变化,种子源的中心波长、输出功率、线宽、时域稳定度等性能参数都可能发生退化,对放大过程的SBS, SRS,

FWM 等非线性效应阈值也会产生影响,影响激光器正常工作。尤其是高功率窄线宽光纤激光器,对种子源性能十分敏感,种子源的功率衰减会导致放大过程的信噪比下降,种子源的线宽变化则会直接影响 SBS 阈值,而种子源的时域稳定性,则会影响激光放大过程的光谱展宽速率和 SRS 阈值^[33-35]。

对于放大级而言,上一节提到了辐照会对高功率光纤放大器的热负载产生影响,增益光纤中的温度梯度变化,从而影响非线性效应阈值。光纤中受到热因素影响较大的非线性效应主要是 SBS 效应,参与 SBS 过程的是声学声子,光纤中 SBS 效应的中心频移与纤芯内的声速相关,会随位置的不同发生改变。纤芯中的声速与光纤密度有关,通过在光纤上施加一定的温度控制,可以改变纤芯内的密度分布,进而改变其中的 SBS 中心频移,影响 SBS 增益,进而影响 SBS 阈值^[36-38]。

综上所述,空间辐照对高功率光纤激光器的影响显著,会诱导光纤产生色心,导致传输性能退化,影响光纤器件的光学性能,进而影响激光器稳定性和寿命。此外,基于 MOPA 结构的高功率光纤激光器的光纤器件较多,非线性效应十分显著,对空间辐照更为敏感。空间辐照条件下,高功率光纤激光器的多个光纤器件性能和放大级光纤的热力学状态都会发生变化,导致输出性能的辐照影响较为复杂。

2 辐照抑制方法

一般而言,辐照抑制有被动防护技术和主动辐照抑制技术。被动防护技术是通过外壳的重金属屏蔽来提高其抗辐照性能,但是这样会造成大量无用的额外质量,而飞行器对载荷的质量要求极其苛刻,载荷质量每增加 1 kg,发射系统相应就要付出增加上百千克的巨大代价,因此通过主动辐照抑制技术来提高光纤器件本身的抗辐射能力是更为理想的方法。主动辐照抑制一般可以从两个角度入手:主动阻止色心形成或者对已形成的色心进行主动恢复,包含光纤组分控制、预处理、后处理、系统参数优化等典型方法^[39-41]。

2.1 光纤组分控制

提升有源光纤自身的抗辐照性能是解决有源光纤在太空中应用难题的有效途径。在光纤制备时可以对组分进行控制,改变光纤掺杂元素或者优化掺杂物的掺杂比例,来减少光纤中色心和缺陷的形成,进而提高光纤的抗辐照能力。

2.1.1 优化共掺剂比例

由于稀土元素在纯 SiO₂ 基质中很难溶解,因此为了增加稀土离子在光纤中的含量和提高增益光纤的光学性能,需要加入一系列共掺剂,如 Al, P, Ge 等^[41]。然而,单独掺杂某一种共掺剂时,上述每种共掺剂在辐照之后都会形成相应的点缺陷,有可能成为导致辐照损耗的因素,进而影响增益光纤的光学性能^[42-44]。一系列研究证明了将多种共掺剂同时掺杂有利于提升有源光纤的抗辐照性能^[45-46],但是多种共掺剂之间也存在着互相影响,掺杂量过多还会导致拉丝难度提高、光纤热负载上升、折射率剖面凹陷等一系列问题。更重要的是,现有的掺杂工艺难以精准控制各掺杂组分的含量,仅能在一定范围内进行调节。所以,想要通过优化掺杂元素组分提高光纤的抗辐照性能不仅需要合理分配掺杂含量,还需要提升掺杂技术成熟度,从而在提高有源光纤抗辐照性能的同时保证其光学性能不变。

2.1.2 掺变价离子

含有金属杂质的石英光纤具有较差的抗辐照性,在高功率激光作用下或者高能射线环境辐照过程中,玻璃光纤材料因多价金属离子的存在一般会出现新的吸收色心,引起基质玻璃更多的吸收损耗,使其具有较差的抗辐照性能。但是并非所有的多价金属离子在玻璃光纤中都会降低玻璃光纤的抗辐照性能,某些多价金属离子在辐照过程中,能够跟辐照诱导电离的电荷反应进行价态转换,从而给玻璃光纤的辐照反应提供缓冲空间,消除部分色心,提高基质玻璃的抗辐照性能。

能够提高掺杂光纤抗辐照性能的变价离子有很多,其中 Ce, Ti 和 Pb 对无源玻璃的抗辐照能力的增强已经被众多实验所证实^[47]。不同变价离子的抗辐照性能与其氧化还原势有关,研究发现 Ce 离子在玻璃中的抗辐照性能最佳^[48-50]。这是因为 Ce 是变价离子,在玻璃网络结构中能同时存在 Ce³⁺和 Ce⁴⁺,这一特性使 Ce 离子可以给电子或接受电子。一般认为, Ce³⁺能俘获空穴,使硅酸盐玻璃中由于缺陷与空穴结合而形成的色心消失并形成 Ce³⁺⁽⁺⁾; Ce⁴⁺能俘获电子形成 Ce⁴⁺⁽⁻⁾,使得电子与缺陷结合而成的色心消除,所以在有源光纤中掺入 Ce 元素可以在光纤受到辐照时有效减少色心的产生,提高增益光纤的抗辐照能力。此外, Ce³⁺和 Ce⁴⁺本身的吸收带主要位于紫外区域,它的价态变化不影响长波段的透过率,适量掺杂对 Er³⁺和 Yb³⁺的发光性能无明显影响。但是掺 Ce 会导致纤芯数值

孔径上升,降低转换效率,这对于高功率掺镱光纤激光器是不利的。同时掺 Ce 还会导致光纤内部温度升高,影响光纤的传输性能,因此应该对 Ce 的掺杂量进行优化,探索出平衡抗辐照能力和光纤固有性质的最优掺杂比例。

除了 Ce 离子之外,研究人员还对掺杂碱金属离子(Na, Li 等)抑制光子暗化损耗的效果进行研究^[51],旨在有效解决上述掺 Ce 离子所致的掺镱光纤激光性能下降问题。结果表明,Na⁺,Li⁺具有良好的延缓掺镱光纤达到平衡态暗化附加损耗的作用,且不会对光纤激光性能产生明显影响,可作为加强掺镱光纤抗光子暗化能力的有效方法。掺杂碱金属离子抑制光子暗化效应的机理在于其可与镱离子形成稳定的局部电荷环境,进而稳定镱离子的价态,减少因电荷转移形成的空穴或者电子色心缺陷,从而降低光子暗化效应或者辐致衰减效应。

2.2 光纤预处理

预处理是指在有源光纤应用于光纤激光器系统之前,对其进行特殊处理,提高辐照敏感度,包含预辐照、特殊气体加载等方法。

2.2.1 预辐照

对掺杂光纤预辐照,经过一段时间后,等光纤性能基本恢复后,光纤再受到辐照作用时的敏感性降低,即辐照硬化现象。预辐照与未预辐照处理的光纤同时受到同剂量同速率的辐照,其辐致损耗后者比前者高 2~3 倍^[52-53]。这是因为辐照会与玻璃基质中最为活泼的格点反应,产生较稳定的晶体结构,从而降低俘获电子-空穴对的能力,抑制色心的产生。虽然预辐照让光纤初始损耗和固有损耗有所增加,不过该方法能改善光纤在辐照环境下的损耗,可在对激光器效率没有严苛要求的条件下,作为一种有效的抗辐照手段。

2.2.2 特殊气体加载

特殊气体加载预处理是指在高温或者高压条件下,促使某种气体扩散进光纤中,所用气体可以是 H₂, D₂ 和 O₂^[54-63]。

对于掺镱光纤,气体加载处理抑制光子暗化的机理如图 3 所示,Yb³⁺离子在电荷转移吸收带作用下与氧配位发生电子传递,进而形成 O⁺空穴相关色心和二价 Yb²⁺离子,诱发光子暗化附加损耗,载氢/载氘引入的 H₂/D₂ 会与这些色心反应生成—OH/—OD,它比辐致色心的化学键更加稳定,因此通过载氢处理,可以消除 O⁺空穴相关色心,从而减少点缺陷的数量。上述载氢抑制机理证明了掺镱光纤中的光子暗化效应与镱离子和氧配位体之间的电荷转移过程相关,通过在光纤制备过程中创造还原反应气氛或者对掺镱光纤进行载氢处理,能够消除 O⁺空穴相关色心,进而抑制光子暗化效应或者辐致损耗的产生,提高光纤的抗辐照特性。

由于操作较为简单而受到广泛研究,载氢和载氘可以消除硅基光纤辐照后产生的大量点缺陷与色心,是目前较为有效的抗辐照手段之一。早在 1987 年,美国贝尔实验室的 Stone 就对光纤载氢及载氘的影响进行了分析总结,提出载氢和载氘虽然可以优化光纤的抗辐照性能但会引入其他的缺陷,并详细阐述了载氢和载氘的优缺点及相关机理^[54]。

载氘与载氢优化光纤抗辐照特性的机理较为相近。首先,辐照后的光纤中具有大量辐致色心,由于—OH/—OD 比辐致色心的化学键更加稳定,载氢/载氘引入的 H₂/D₂ 会与这些色心反应生成更稳定的—OH/—OD,从而减少了点缺陷的数量,提高了光纤的抗辐照特性。关于载氧对光纤抗辐照的影响,2007 年南安普敦大学的 Yoo 等人提出载氧技术可以抑制掺镱光纤的光子暗化效果,其原因是载氧抑制了 Yb 相关氧空位的形成,从而改善了光子暗化性能^[61]。2014 年圣埃蒂安大学的 Francesca 等人通过实验研究证明了载氧技术的持续时间要高于载氢和载氘^[62-63]。

载气处理也有不足之处:①H₂ 或 D₂ 在大气环境中容易从光纤中逸出,从而光纤失去抗辐射性能。为防止气体外溢还需在表面涂覆密封碳涂层或碳化硅涂层,工艺较复杂,难度较大。②如果光纤中的加载气体浓度太高,H₂ (1.24 μm) 或 D₂ (1.71 μm) 分子在近红外区域的强吸收会明显降低斜率效率。③对于载氧处理,为了获得较好的抗辐照效果,要平衡好产生的缺氧缺陷和过氧缺陷。④高温载气会极大破坏涂覆层的力学性能。因此,需要对气体类型、载气时间、载气浓度、载气压力等参数进行优化,在抗辐照效果与光纤固有参数之间找到平衡点,从而使得特殊气体加载方法真正成为满足空间实际应用的抗辐照方法。

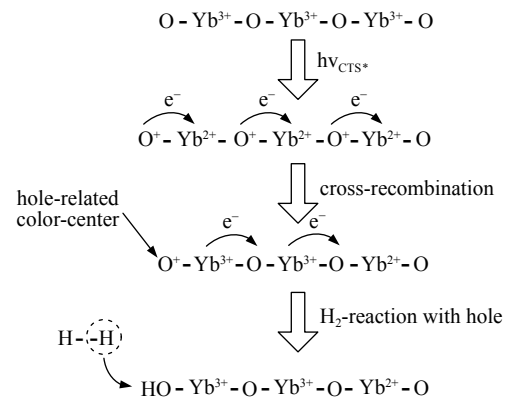


Fig. 3 Illustration of suppressing the hole-related color center by H₂ loading treatment

图 3 载氢处理抑制光子暗化空穴相关色心的原理示意图

2.3 光纤后处理——光漂白

除了提高有源光纤自身的抗辐照能力之外,还可以采用后处理方法对光纤中已经形成的色心进行恢复,从而降低损耗。RIA 的恢复主要是由电子和空穴对复合使得色心减少引起的。在一定条件下,RIA 会随时间的推移部分恢复,而这一恢复过程可以用气氛漂白、热漂白或者光漂白来加速^[64-69]。

对辐照后的光纤进行高压载气处理,称为气氛漂白,相关研究表明,漂白后光纤的损耗谱和激光斜率效率与未辐照光纤的损耗谱和激光斜率效率相差不大;且随辐射剂量的增加,漂白效果并没有明显变差,但是对于空间应用的高功率光纤激光器,气氛漂白法很难实施,无法作为空间辐照抑制的有效手段。

在一定温度范围内,升高温度会使光纤 RIA 下降,甚至回到辐射前的水平,这种现象称为热漂白。热漂白效果与温度成正比关系,将温度升高到 600 °C 以上时,具备彻底漂白 Yb³⁺光纤的能力^[64]。然而,高温漂白将对有源光纤涂覆层有损伤,而在实际应用时有源光纤所处的环境温度受到严格控制,因此,热漂白仅具有一定的实验意义,难以实际应用。

当光纤中存在一定功率的激光时也有助于辐致损耗的恢复,即光漂白。光漂白法可以实现全光纤化,具备在线实时操作的能力,是一种最为可行的后处理方法。早在 1981 年,美国海军实验室的 Friebele 等就发现 γ 射线辐射过的光纤经过 850 nm 半导体激光器泵浦后,光纤 RIA 会随时间推移而逐渐降低,证明了光漂白法的恢复能力^[65]。目前公开报道的对掺镱光纤光子暗化具有良好漂白效果的波长包括 355, 405, 532, 543, 550 和 633 nm 等^[66-69]。但其激光光源功率均停留在 mW 量级,对于千瓦级高功率光纤激光器,辐照所致暗化效应表现更为明显,这种情况下, mW 级的光漂白作用则显得微不足道。

研究表明,掺镱光纤原材料中含有一定量的 Tm³⁺杂质,是导致光子暗化效应相关色心形成的直接原因^[70]。当掺镱光纤在 976 nm 波长泵浦作用下, Yb³⁺离子的发射能级非常接近 Tm³⁺所处的能级,因此可以不断接收来自离子传递的能量进而发生级联能级跃迁。当向上跃迁至最高能级时便可向下能级跃迁并辐射出一系列紫外光,对掺镱光纤产生辐照并诱发色心。793 nm 处于 Tm³⁺吸收峰,吸收系数高达 5.2 dB/m,相比于其他波长(如 808, 1080 nm),对 Tm³⁺相关色心具有更好的恢复作用,而且 793 nm 半导体激光器输出功率可高达几十 W 甚至 100 W 量级,具有各种尾纤输出形式,非常适合用作掺镱光纤激光器辐致损耗的漂白光源。

需要指出的是,光漂白法的效率相对较低,所需时间较长,并且所引起的恢复不足以弥补辐照产生的损耗,总体表现仍然是辐致损耗渐渐增加,同时大功率漂白光源的引入可能会破坏某些光纤系统的正常工作。此外,对有源光纤进行长时间高功率激光泵浦,很可能造成光暗化效应,由此产生的色心会导致有源光纤的背景损耗增加,降低光纤输出功率。因此,需要探索出最优化的光漂白参数,如漂白光波长、功率、通光时间等,在实现最佳漂白效果的同时避免对原有光纤激光系统的破坏。

2.4 激光器参数优化

上述辐照抑制方法均是从光纤器件角度出发,提高器件自身的抗辐照能力,在实际应用中,应综合考虑空间环境 and 应用参数等对高功率光纤激光器性能的影响,从系统层面来提升抗辐照能力。

增益光纤参数是高功率光纤激光器系统中最为重要的设计参数,直接决定着泵浦吸收率、增益特性以及热负载分布等。理论和实验研究均表明,增益光纤长度越长,辐照影响越显著,这主要由于光纤越长,总辐致损耗越大,而激光器输出功率是损耗与增益等各因素综合平衡的结果。此外,研究表明,随着辐照剂量增加,增益光纤的最优长度随之缩短。

泵浦方式对空间环境下的光纤激光器输出功率也有显著的影响^[71-73]。高功率光纤激光器常用的泵浦方式有 3 种:前向泵浦、后向泵浦和双向泵浦。在未受辐射作用时 3 种泵浦方式下光纤激光器的输出功率差异并不大,但受到辐射作用后,采用不同泵浦方式的激光器的输出功率出现了较大的差异。

法国里昂大学的研究团队最早提出从系统优化角度出发,全面提升光纤激光器或放大器的抗辐照特性^[74-76],并且通过理论和实验,证明了掺杂光纤长度和泵浦结构对掺镱光纤放大器辐照性能的影响规律,如图 4 所示。当采用 6 m 最优光纤长度和双向泵浦方式时,在 300 krad 总辐照剂量下,增益衰减不足 3 dB,而对于未经优化的系统(8 m 光纤长度、同向泵浦),相同条件下增益衰减要超过 10 dB,证明了该优化系统具有显著提高的抗辐照能力。

因此,在对应用于空间环境的光纤激光器进行设计时,应考虑整个任务周期辐射剂量进而对系统参数优化,在设计层面降低掺镱光纤激光器整机的辐照敏感度,同时与各种抗辐照方法相结合,可以有效提高光纤激光器的抗辐照性能,增加其在空间环境的使用寿命。对于增益光纤长度,在辐照环境下,选择稍短的增益光纤最终能实现相

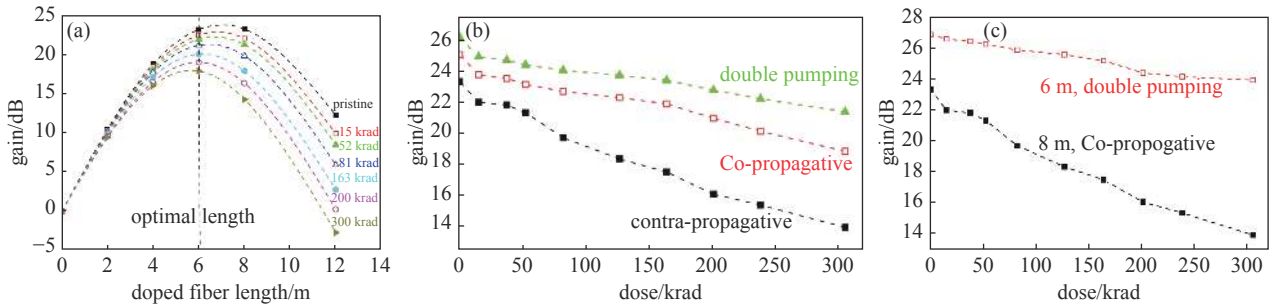


Fig. 4 Influence of (a) doped fiber length and (b) pump structure on the EDFA's radiation properties; (c) comparison of the EDFA's radiation properties with and without the optimized parameters

图4 (a) 光纤长度及(b) 泵浦结构对EDFA辐照性能的影响; (c) 采用优化的光纤长度和泵浦结构与非优化参数的EDFA辐照性能对比

对较高的功率输出。对于掺镱光纤激光器而言, 相比于915 nm泵浦, 采用976 nm泵浦所需的增益光纤长度更短, 有益于空间应用。关于泵浦结构的优化选择, 前面提到的EDFA, 双向泵浦最优, 同向泵浦次之, 后向泵浦效果最差。不过, 对于高功率掺镱光纤激光器, 从目前报道的研究成果来看, 采用反向泵浦具有更好的抗辐照能力^[76], 还需要结合充分的实验进行验证, 探索出最适合的泵浦结构。

3 高功率掺镱光纤激光器辐照研究进展

近年来, 随着高功率掺镱光纤激光器的不断发展, 空间应用需求日益迫切, 国内外关于辐照对掺镱光纤影响的研究逐渐增多, 对辐照暗化机理、掺镱光纤抗辐照特性影响因素和提升抗辐照特性的方法都进行了探索。

3.1 国外研究情况

国外对掺杂光纤的辐照影响及抑制方面的研究起步相对较早, 尤其是空间通信应用所需的掺镱光纤, 取得了比较全面的研究成果, 为掺镱光纤系统的抗辐照设计提供了重要支撑。近年来, 随着掺镱共掺光纤、掺镱光纤的广泛应用, 研究人员开始研究镱离子掺杂对光纤抗辐照性能的影响, 并探索适用于高功率掺镱光纤系统的抗辐照方法。

自2007年以来, 美国亚利桑那大学Fox研究团队对掺镱光纤的辐照影响进行了一系列研究^[77-79], 通过测量光纤在不同辐照剂量或者剂量率下的透射光谱研究光纤的抗光子暗化性能, 研究发现对于掺镱光纤, 在相同辐照情况下, 激光波长越长辐照导致的损耗越小, 辐照剂量越大, 剂量率越高, 有源光纤损耗越明显。

2014年, 美国空军技术学院Singleton等人对多种单模掺镱光纤的辐照退化特性进行研究^[80], 发现掺镱光纤的辐照损耗与是否被泵浦没有关系, 只取决于它的总辐照剂量。对于激光放大情况, 研究发现相比于信号激光, 放大自发辐射(ASE)强度下降更为缓慢, 这对辐照条件下的激光放大以及噪声分析具有重要意义。对于传能光纤, 信号激光和泵浦光的辐照损耗均较小, 不会对激光器性能产生明显影响。

2014年, 法国尼斯大学Duchez等人研究了掺镱光纤的光子暗化和辐照暗化对光纤损耗的相互作用规律^[81], 给出了泵浦功率、辐照剂量、剂量率等参数对相互作用的影响, 发现976 nm泵浦光对辐照损耗有一定的漂白作用, 同时研究发现, 抗光子暗化的光纤具有抗辐照暗化能力, 该研究成果对辐照损耗抑制和抗辐照掺镱光纤设计具有一定指导意义。

2018年, 法国里昂大学Ladaci等人研究了不同掺杂的掺镱共掺光纤放大器的辐照响应, 验证掺镱离子对光纤抗辐照性能的影响^[82]。3种光纤分别为不掺镱、低掺镱和高掺镱, 测试结果如图5所示。在总累积辐照剂量约为100 krad、剂量率为3.4 rad/s时, 无论是现场测试还是非现场测试条件, 高掺镱的光纤放大器均表现出最低水平的增益退化量(低于6%), 证明其具有优异的抗辐照性能。

2019年, 意大利巴里理工大学的Campanella等人建立了在空间应用约束条件下掺镱共掺光纤放大器增益和热效应的关系模型^[83]。数值模拟仿真了辐照条件下光纤长度、涂覆层厚度、纤芯直径对光纤增益和温度分布轮廓的影响规律, 结果如图6所示, 较大的涂覆层能够抑制光纤内的最高温度, 同时可以实现更为均匀的温度分布。此外, 随辐照剂量增加, 纤芯直径对放大器增益有明显影响, 较大的纤芯直径可以实现更高的增益和更短的光纤。该模型可用于追迹高功率光纤放大器的热效应, 并且有助于满足空间应用光纤激光器的设计。

3.2 国内研究情况

近年来, 国内众多研究人员和机构对掺镱光纤激光器的辐照影响及抑制方面开展了广泛的研究, 取得了一定的研究成果。

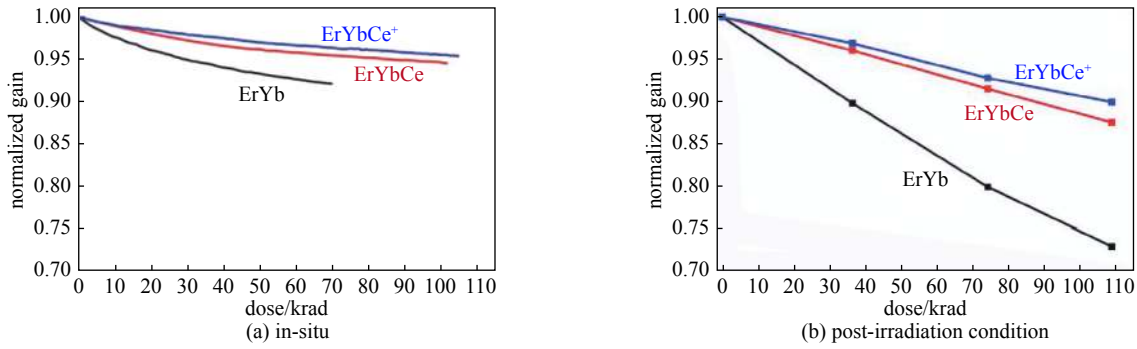


Fig. 5 Variation of gain versus total radiation dose of three different doping fibers

图 5 不同掺杂光纤的增益随辐照总剂量的变化规律

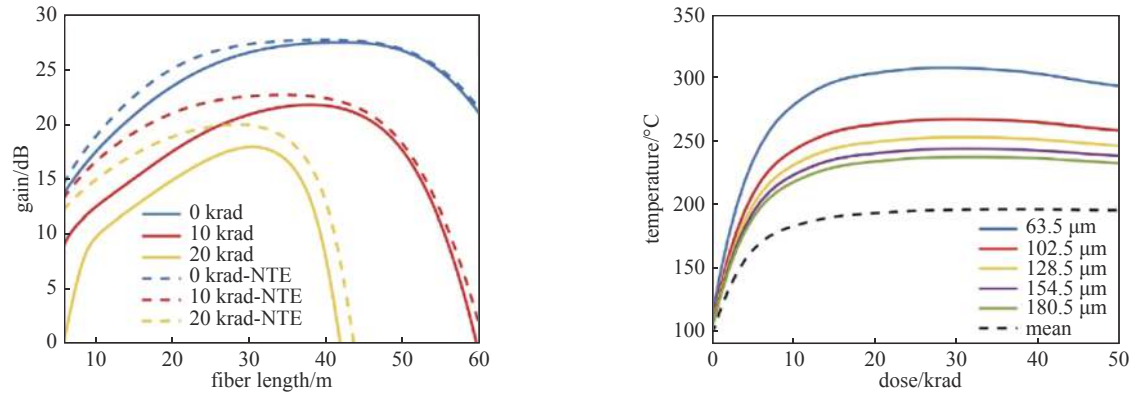


Fig. 6 Variation trend of the amplifier under different dose and different system parameters

图 6 不同辐照剂量、不同系统参数下放大器性能变化规律

2018年,北京航天控制仪器研究所对高功率掺镱光纤激光器的辐照特性进行了实验研究^[84],分别对976 nm和915 nm泵浦的光纤激光器进行辐照实验,采用的有源光纤均为20/400 μm掺镱光纤,总辐照剂量达到12.4 krad。研究结果如图7所示,976 nm泵浦光纤激光器的抗辐照性能优于915 nm泵浦光纤激光器,原因在于相比于976 nm泵浦使用更短的增益光纤长度(21 m@915 nm, 7 m@976 nm)。另外,还对光纤合束器和包层光剥离器等无源器件进行辐照实验,实验结果如图8所示,辐照后光纤合束器的耦合效率降低,包层光剥离器的剥离度增大。该研究成果对空间应用的光纤激光器的设计具有一定指导意义。

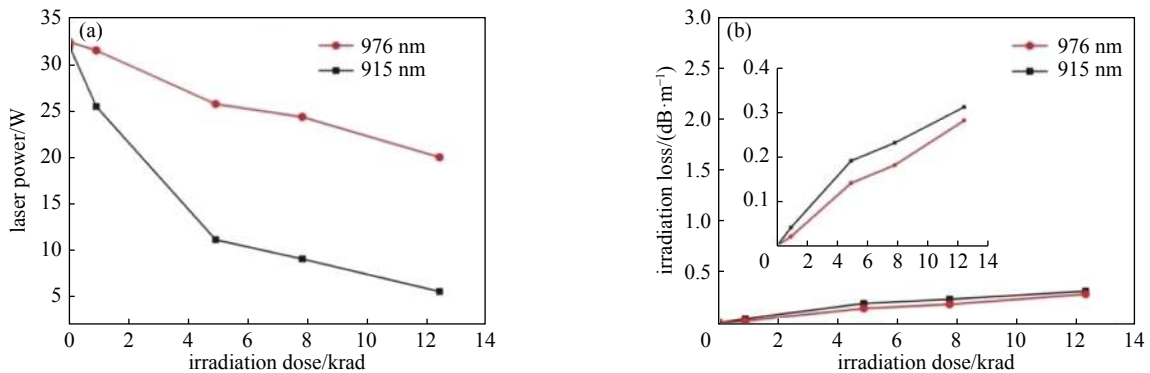


Fig. 7 (a) Output power and (b) irradiation loss vs irradiation dose under 915 nm and 976 nm pump

图 7 915 nm 与 976 nm 泵浦下(a)输出激光功率及(b)单位长度光纤的辐致损耗随辐照剂量变化规律

中国科学院上海光学精密机械研究所在高功率掺镱光纤的光子暗化、辐照暗化性能和抑制方法等方面进行了深入研究。2018年,该团队的Xie等人研究了不同掺杂物的掺镱光纤在不同辐照剂量率条件下的光子暗化、辐致暗化和光子-辐照暗化的影响规律^[85],研究结果显示在8.5 krad辐照剂量条件下,970 nm泵浦时Yb³⁺/Al³⁺/P⁵⁺掺杂光纤的激光斜率下降6%,而Yb³⁺/Al³⁺掺杂光纤则下降18%,表明掺杂P能够提高掺镱光纤的抗辐照能力,并且指出原因在于掺P阻止了Al-OHC缺陷的形成。

2020年,邵冲云等人通过载气和退火预处理相结合的方法研制了抗辐照大模场掺镱光纤并验证其光学性能^[86],

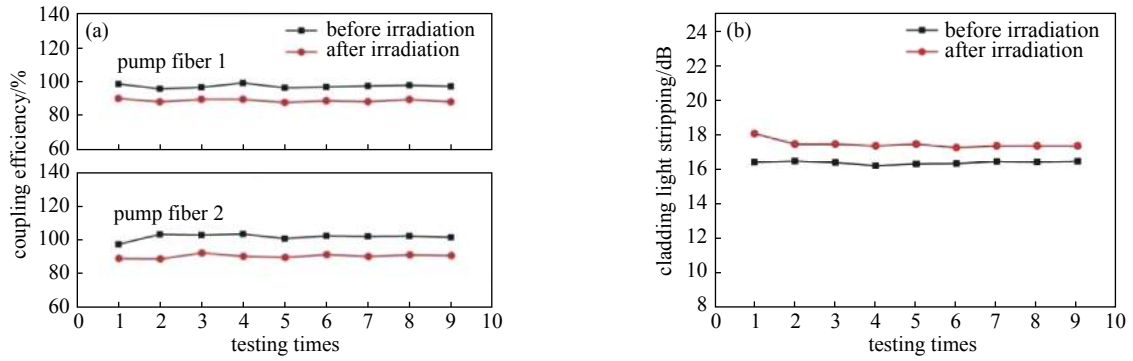


Fig. 8 Properties variation of (a) combiner and (b) cladding pump stripper before and after radiation

图 8 辐照前后(a)光纤合束器耦合效率与(b)包层光剥离器剥离度变化情况

结果如图 9 所示。表明在总剂量 700 Gy 辐照条件下,由预载气处理和热退火预处理过的预制件制成的掺镜光纤输出功率退化率保持在 21% 以下,原始未处理的掺镜光纤则根本没有激光输出,这是由于预处理后诱导辐致暗化效应的磷氧空穴中心(POHCs)被有效抑制。研究结果还揭示了载氢和载氖预处理均能明显提升掺镜光纤的抗辐照能力,但是载氢预处理会极大恶化未辐照掺镜光纤的激光性能,载氖预处理对此影响可以忽略。其根本原因与 OH 和 OD 基团的吸收强度、吸收峰位置有关。

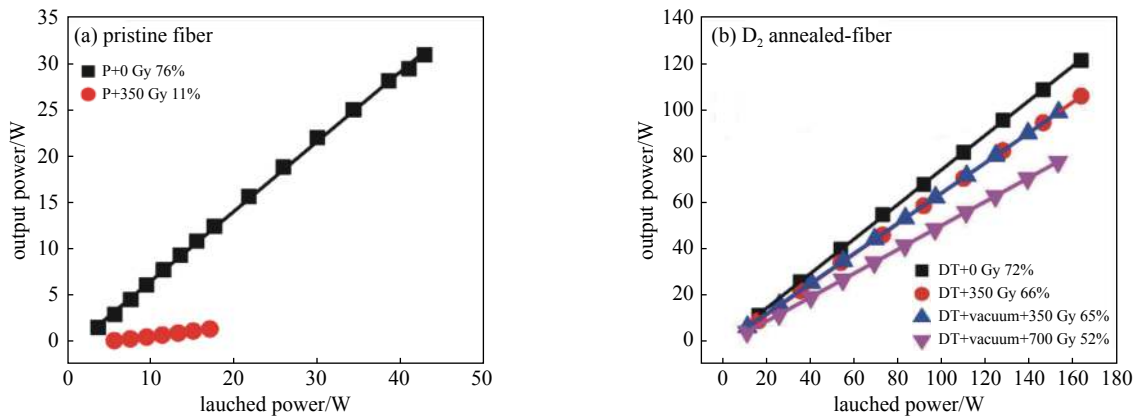


Fig. 9 Slope efficiency under different total radiation dose

图 9 不同辐照剂量条件下的激光斜率效率

华中科技大学在掺镜光纤的辐照影响及抗辐照方法方面进行了广泛研究^[13, 87-91]。在辐照影响方面,2014年,黄宏琪等人分析了 γ 射线辐照下色心吸收对光纤性能的影响并进行了抗辐照光纤设计,发现掺镜光纤中掺杂一定浓度的铈离子可以改善光纤的抗辐照性能^[87]。此外,该研究团队的Chen还测试了不同辐照剂量下的光纤激光器效率和模式不稳定阈值^[13],结果表明 γ 射线辐照会严重降低模式不稳定的阈值。在抗辐照方法方面,2015年,Zhao等人开展了793 nm 半导体激光器对高功率双包层掺镜光纤的暗化损耗漂白研究^[88],结果显示10/130 μm 双包层 Yb/Al 共掺光纤在总功率 5 W 的 793 nm 光漂白下,损耗恢复 60%,当 915 和 793 nm 半导体激光器同时泵浦时,光纤内的光子暗化效应降低了 80%。2019年,该团队的Cao等人报道了一种利用 532 nm 包层泵浦抑制掺镜光纤中光子暗化的漂白方法^[91],实验结果如图 10 所示。在辐照总剂量 375 Gy、辐照剂量率 250 Gy/h 条件下,长度 20 m 的 20/400 μm 掺镜光纤,最大输出功率从 513 W 下降至 160 W,效率从 77% 下降至 37%。采用 4 W 的 532 nm LD 漂白 20 h,输出功率恢复至 421 W,性能恢复到原始光纤的 82%,该研究结果显示出 532 nm LD 应用于高功率激光领域的漂白前景,通过进一步提升漂白功率,有望实现更高比例的恢复。

2020年,国防科技大学的张汉伟等人研究了空间辐照对掺镜光纤激光器效率的影响^[92],详细测量了掺镜光纤在 γ 射线总辐照剂量 30 krad 辐照情况下的损耗系数,并且基于速率方程模型和测量得到的损耗特性,理论分析了不同激光器结构参数对输出激光效率的影响,如图 11 所示。结果表明采用 976 nm 泵浦光纤放大器方案最有利于降低辐照损耗的影响,系统中心波长选择在 1070 nm 时激光器效率最大。此外,还对振荡器和放大器两种方案在辐照后的性能进行对比,结果显示放大器比振荡器的效率要高出 20%,这是由于相比于放大器,激光在振荡器中经历的有效长度更长,由此产生的损耗也更大。因此,在不考虑辐照对种子影响的情况下,放大器对光子暗化的敏感

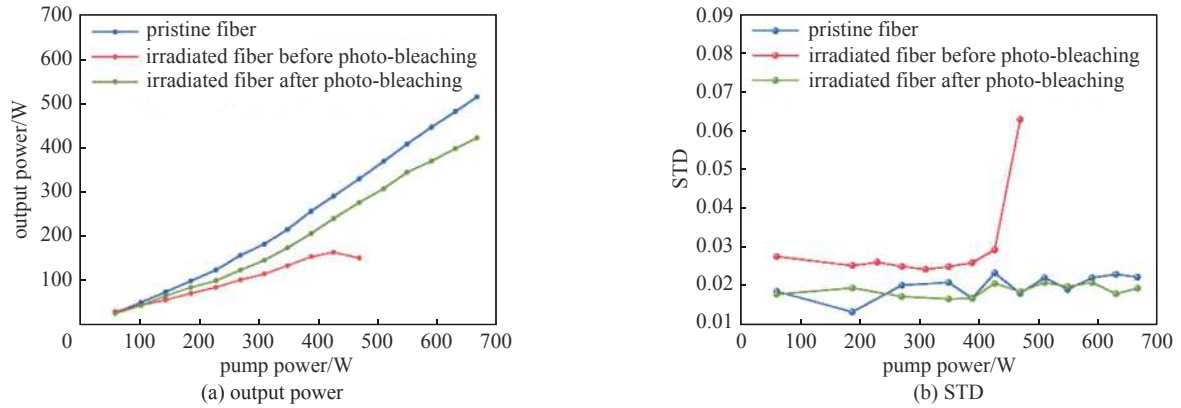


Fig. 10 Output power and STD versus pump power of pristine, γ irradiated and 532 nm bleached fibers
图 10 原始光纤、 γ 辐照光纤及 532 nm 漂白后光纤的输出功率和标准偏差随泵浦功率变化关系

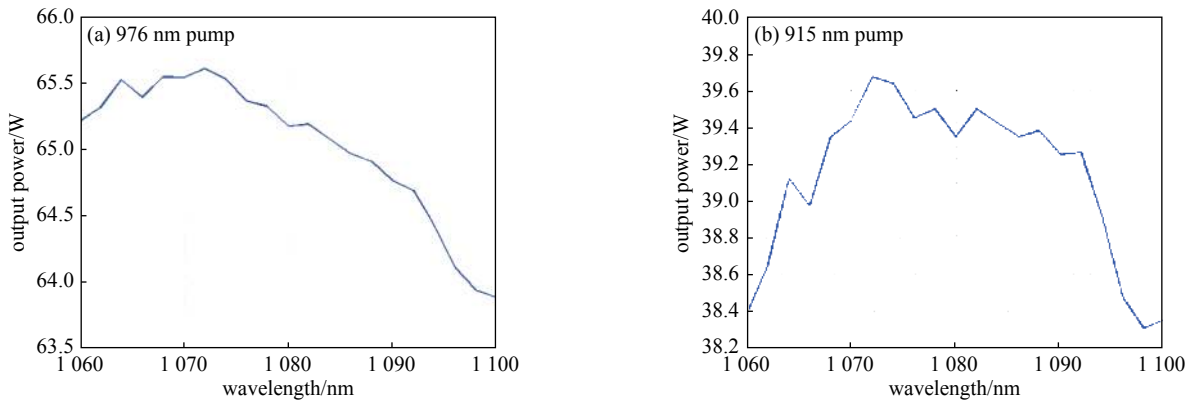


Fig. 11 Output power of the fiber laser at different wavelength under different pump
图 11 不同泵浦时光纤振荡器不同信号波长的输出功率

度比振荡器更低，在空间用高功率光纤激光器的设计中可以优先选择放大器方案。

西北核技术研究所对掺镱光纤激光器的空间辐照性能进行了理论和实验研究^[73, 93-94]。2019年，对 10/125 μm 双包层掺镱光纤进行辐照实验，当辐射剂量累积至 900 Gy 时，不同泵浦功率下激光器的功率退化率达到 70% 以上^[93]。2020年，理论分析了辐照损耗、辐射剂量、光纤长度以及泵浦方式对激光器输出功率的影响，结果表明，在 1000 W 泵浦光功率、增益光纤长度 13.6 m、辐照总剂量 1000 Gy 条件下，前向泵浦比后向泵浦的输出功率低了近 180 W，双向泵浦比后向泵浦的输出功率低 50 W，表明泵浦方式对辐射作用下光纤激光器的输出功率也有重要的影响，反向泵浦方式最优^[73]。在此基础上，建立了辐照后高功率光纤激光器的热模型，得到了输出功率、光-光效率、横向模式不稳定(TMI)阈值随辐照剂量变化的仿真结果，同时给出了不同辐照剂量、不同泵浦功率条件下 TMI 区域的定义^[94]，如图 12 所示，为空间应用条件下高功率光纤激光器的性能预测和分析提供重要参考。

2018年，中国工程物理研究院激光聚变研究中心对辐照条件下的 kW 级掺镱光纤激光特性进行了研究^[95]。在

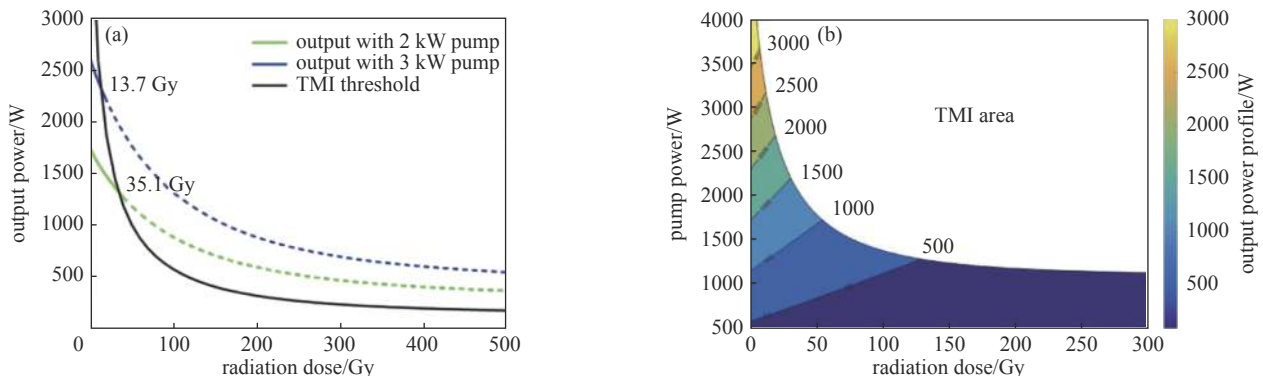


Fig. 12 (a) Variation of TMI versus radiation dose and (b) the output power profile and TMI area under different radiation dose
图 12 (a) TMI 随辐照剂量变化关系以及 (b) 不同辐照剂量下输出功率分布和 TMI 区域

剂量率 0.3 Gy/min、总剂量 117 Gy 的辐照条件下,对自研 20/400 μm 掺镱铝磷酸盐光纤与商用 20/400 μm 光纤的辐照特性进行对比,结果如图 13 所示。采用自研光纤的斜率效率下降了 72.8%,采用商用光纤的斜率效率下降了 65%,证明了 Al/P 浓度更高的 YDF 对 γ 辐照更为敏感,呈现出更显著的性能下降。2020 年,该团队进一步研究了掺镱光纤材料特性的辐照影响^[96],结果显示,经过总剂量约 300 Gy 的 γ 辐照后,Yb/Ce 共掺光纤激光器的最高输出功率从辐照前的 1030 W 降低到辐照后的 630 W,衰减 38.8%,斜率效率从辐照前的 74.6% 降低到辐照后的 45.6%,衰减 29%。而掺镱光纤未掺 Ce 离子时,斜率效率从原先的 82.3% 降到受辐照后的 28%,衰减了 54.3%,下降幅度明显大于 Yb/Ce 共掺光纤。表明光纤中掺杂的 Ce 离子可有效抑制掺镱区域中 Al-OHC 色心缺陷的数量,进而减缓 Yb³⁺ 荧光寿命的下降幅度,起到良好的抗辐照作用。

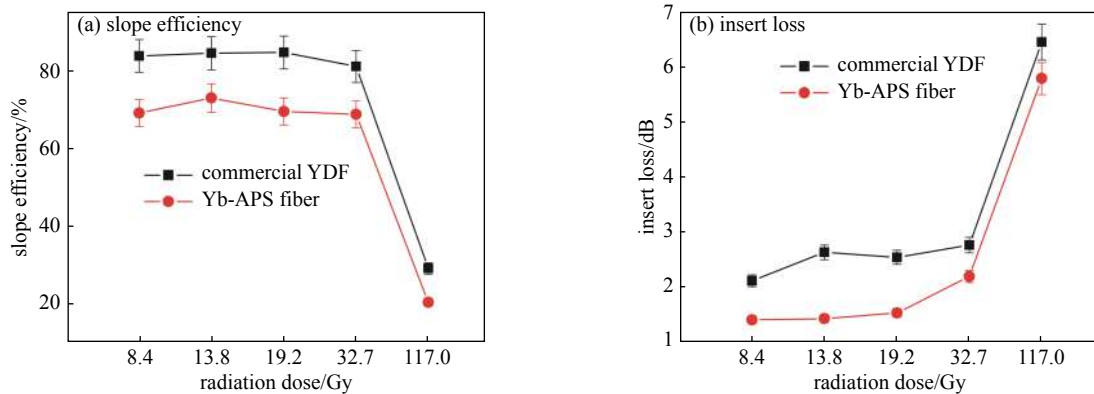


Fig. 13 Comparison of properties under different radiation dose between Ce doped fiber and commercial fiber

图 13 掺镱光纤与商用光纤不同条件下随辐照总剂量变化规律

3.3 研究现状分析

通过上述研究情况可以看出,针对掺镱光纤激光器的空间应用,国内外研究人员在掺镱光纤材料和光纤激光器的辐照影响规律,以及共掺杂金属变价离子、特殊气体预加载、光漂白、系统优化设计等方法抗辐照能力方面进行了大量研究工作,给出了辐照对光纤激光器输出性能影响的基本规律,并探索出不同抗辐照方法对辐照的抑制效果,为抗辐照高功率掺镱光纤激光器的设计提供了重要依据。

但是,目前的研究限于揭示机理和探索规律,尚不足以完全解决高辐照剂量条件下高功率掺镱光纤激光器性能退化甚至损坏的问题,为实现高功率掺镱光纤激光器空间环境长期稳定工作,还需要在以下方面作进一步探索。

(1) 目前的研究成果大多以实验研究为主,理论研究相对偏少,尤其是专门针对高功率光纤激光放大时容易出现的非线性效应的辐照影响理论研究尚处于空白阶段,无法对辐照条件下激光器输出性能参数的变化给出全面、合理的分析预测。因此,需要开展充分的理论研究,建立辐照条件下激光放大模型,在抗辐照高功率光纤激光器的系统设计层面提供指导。

(2) 大多数辐照影响规律是在单一条件下获取的,以掺镱光纤随辐照剂量产生的损耗为出发点,探索了输出功率、转换效率、热分布、模式不稳定阈值等变化规律,尚未针对激光器系统内全部光纤器件的变化进行研究,无法给出多因素耦合作用条件下辐照对激光器性能的影响规律。尤其是 MOPA 结构的窄线宽光纤激光器,种子源和放大级的变化对激光放大过程及最终的输出激光都有较大的关联,需要从多个方面入手,揭示影响规律并探索有效的抑制方法。

(3) 目前的辐照影响研究大多是针对输出功率不足 kW 的光纤激光器开展的,少量研究针对 kW 级光纤激光器的热效应和模式不稳定效应进行了理论分析,在高功率激光输出时,光纤激光器对辐照损耗更为敏感,与低功率条件下的对应关系可能截然不同。因此,亟需针对数千瓦级光纤激光器的辐照影响开展相关理论和实验研究,丰富和完善高功率光纤激光器的热效应以及非线性效应的影响规律,为空间用高功率光纤激光器的设计提供重要支撑。

(4) 在抗辐照方法方面,对增益光纤掺杂成分、特殊气体加载,特殊波长光漂白等方面进行了低功率、低辐照剂量下的验证试验,证明了上述方法具备一定的辐照抑制能力。但是,关键参数(如共掺杂离子的掺杂比例、气体加载浓度和时间、漂白光波长和通光时间等)与抗辐照效果的映射关系尚不清晰,当输出功率进一步提升至数千 W 级别,上述方法与高功率光纤激光器系统的兼容性尚未明确。已有研究成果显示辐照总剂量达到 10 krad(Si)时,光

纤器件性能已经严重退化,输出功率和效率几乎下降 50% 以上,目前的辐照抑制方法研究仅显示出了一定的辐照抑制效果,并没有将辐照影响减少至可接受范围,尚不足以解决实际应用的抗辐照问题。因此,需要结合高功率和高辐照剂量条件对抗辐照方法进行更深入的验证试验,摸索出合适的参数,将辐照对高功率光纤激光器的影响降至最低,大幅增加其在轨服务寿命,为空间用高功率掺镱光纤激光器的设计奠定基础。

4 结 论

无论是光纤陀螺、卫星光通信和光纤传感等激光通信领域的应用,还是空间碎片清除以及空间定向能等激光系统而言,进一步提高光纤激光器的输出功率是今后发展的主要目标之一,而光纤激光器的“减负”任务也是未来天基应用的重点,需要从提高效率为切入点,结合轻量化结构设计和高效的抗辐照技术,从而减少额外质量。

本文分析了高功率掺镱光纤激光器的辐照影响,从关键光纤器件、热效应、非线性效应等方面出发,介绍了辐照条件下高功率光纤激光器输出性能的变化情况,从增益光纤掺杂组分优化、预处理、后处理、激光器参数优化等方面对辐照抑制方法进行了介绍和可行性分析,掺杂铈离子、特殊气体加载预处理能够有效提高增益光纤本身的抗辐照能力,系统参数优化可以从激光产生过程降低光纤激光器的辐照敏感性,而特殊波长光漂白则能够将已经形成的色心进行恢复,从而降低辐照的影响,将上述方法进行有机结合有望成为有效的高功率光纤激光器抗辐照方法。对国内外相关研究进展进行了分析介绍并进行了展望,尽管已经取得了较大的成就,但还需在多因素耦合作用下辐照影响规律、辐照对高功率激光放大非线性效应的影响、抗辐照方法与高功率激光器系统兼容性等方面进行深入研究,尤其是高功率窄线宽光纤激光器。在抗辐照方法方面,尚处于实验研究与摸索阶段,距离满足高功率掺镱光纤激光器在空间环境长期稳定工作的实际应用还存在一定差距,通过掺杂离子参数优化、光纤拉制工艺提升、高功率短波长漂白光源研制、新型防泄漏结构光纤设计等方面的努力,有望大幅提升高功率掺镱光纤激光器的抗辐照能力。本文期望能为设计满足空间环境应用的高功率光纤激光器提供指导,有助于推动空间定向能、碎片清除等应用的发展。

参 考 文 献:

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [2] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, et al. The renaissance and bright future of fibre lasers[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S681-S693.
- [3] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 537-545.
- [4] 王巍. 光纤陀螺在宇航领域中的应用及发展趋势[J]. *导航与控制*, 2020, 19(4/5): 18-28. (Wang Wei. Application and development tendency of fiber optic gyroscope in space[J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(4/5): 18-28)
- [5] 杨生胜, 高欣, 冯展祖, 等. 空间激光通信系统光电器件辐射效应研究[J]. *航天器环境工程*, 2017, 34(6): 571-576. (Yang Shengsheng, Gao Xin, Feng Zhanzu, et al. The effect of radiation on the optoelectronic devices used in space laser communication system[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(6): 571-576)
- [6] 冯忠伟, 荣刚, 姜爽, 等. 空间光纤传感测量技术应用研究[J]. *宇航计测技术*, 2017, 37(2): 5-9. (Feng Zhongwei, Rong Gang, Jiang Shuang, et al. Research on fiber sensing measurement for spacecraft[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(2): 5-9)
- [7] 郑永超, 赵思思, 李同, 等. 激光空间碎片移除技术发展及展望[J]. *空间碎片研究*, 2020, 20(4): 1-10. (Zheng Yongchao, Zhao Sisi, Li Tong, et al. Current status and development of laser active debris removal technology[J]. *Space Debris Research*, 2020, 20(4): 1-10)
- [8] 陈川, 宋光明, 杨武霖, 等. 空间碎片激光移除: 从概念设计到技术与系统实践[J]. *空间碎片研究*, 2020, 20(4): 11-20. (Chen Chuan, Song Guangming, Yang Wulin, et al. Laser removal of space debris: from conceptual design to technology and system practice[J]. *Space Debris Research*, 2020, 20(4): 11-20)
- [9] 程勇, 郭延龙, 唐璜, 等. 战术激光武器的发展动向[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53: 110004. (Cheng Yong, Guo Yanlong, Tang Huang, et al. Development trend of tactical laser weapons[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 110004)
- [10] 陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战[J]. *科学通报*, 2017, 62(10): 978-989. (Chen Wei, Yang Hailiang, Guo Xiaoqiang, et al. The research status and challenge of space radiation physics and application[J]. *Chinese Science Bull*, 2017, 62(10): 978-989)
- [11] 马晶, 李密, 谭立英, 等. 卫星光通信中空间辐射对EDFA性能的影响分析[J]. *宇航学报*, 2009, 30(1): 250-254. (Ma Jing, Li Mi, Tan Liying, et al. Analysis of the space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(1): 250-254)
- [12] 李密. 卫星光通信中空间辐射环境对掺铒光纤放大器影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. (Li Mi. Space radiation effect on the erbium-doped fiber amplifiers for inter-satellite optical communications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009)
- [13] Chen Yisha, Xu Haozhen, Xing Yinbin, et al. Impact of gamma-ray radiation-induced photodarkening on mode instability degradation of an ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20430-20441.
- [14] 折胜飞, 梅林, 周振宇, 等. 空间光通信用耐辐照掺铒/铽共掺光纤研究进展[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(4): 579-594. (She Shengfei, Mei Lin, Zhou Zhenyu, et al. Progress in radiation-resistant erbium-doped and erbium-ytterbium Co-doped fibers for space optical communication[J]. *Journal of Applied*

- Sciences*, 2020, 38(4): 579-594)
- [15] 王博, 曹驰, 邢颖滨, 等. 稀土掺杂光纤辐照性能及抗辐照技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58: 1516012. (Wang Bo, Cao Chi, Xing Yingbin, et al. Research status on radiation performance and radiation resistance technology of rare-earth-doped fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58: 1516012)
- [16] Shao Chongyun, Ren Jinjun, Wang Fan, et al. Origin of radiation-induced darkening in $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}/\text{P}^{5+}$ -doped silica glasses: effect of the P/Al ratio[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018, 122(10): 2809-2820.
- [17] 邵冲云. 掺 Yb^{3+} 石英玻璃的结构、光谱与耐辐照性能及辐致暗化机理研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2019. (Shao Chongyun. Study on structure, spectrum, radiation resistance and radiation-induced darkening mechanism of Yb^{3+} -doped silica glasses[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2019)
- [18] Taylor E W, Hulick K E, Battiato J M, et al. Response of germanium-doped fiber Bragg gratings in radiation environments[C]//Proceedings of SPIE 3714, Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications. 1999.
- [19] Fernandez A F, Gusarov A I, Berghmans F, et al. Long-term irradiation of fiber Bragg gratings in a low-dose-rate gamma-neutron radiation field[C]//Proceedings of SPIE 4823, Photonics for Space Environments VIII. 2002: 205-212.
- [20] 马晶, 车驰, 于思源, 等. 光纤布拉格光栅 γ 辐射损伤及其对光谱特性的影响[J]. 物理学报, 2012, 61: 064201. (Ma Jing, Che Chi, Yu Siyuan, et al. γ -radiation damage of fiber Bragg grating and its effects on reflected spectrum characteristics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 064201)
- [21] 熊伟晨, 温世喆, 王福娟, 等. 掺铈单模光纤布拉格光栅 γ 辐射损伤实验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(5): 76-80. (Xiong Weichen, Wen Shizhe, Wang Fujuan, et al. Experiment about γ -ray radiation damage of Ge-doped silica single-mode fiber[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(5): 76-80)
- [22] Thompson R J, Tu M, Aveline D C, et al. High power single frequency 780nm laser source generated from frequency doubling of a seeded fiber amplifier in a cascade of PPLN crystals[J]. *Optics Express*, 2003, 11(14): 1709-1713.
- [23] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, et al. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 354-360.
- [24] Liu Yingfan, Lü Zhiwei, Dong Yongkang, et al. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(1): 29-31.
- [25] Supradeepa V R. Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4677-4687.
- [26] 赵丹. 总剂量效应对铈酸锂电光强度调制器性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. (Zhao Dan. Research on total ionizing dose effect on the performance of LiNbO_3 intensity modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019)
- [27] 胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53: 080002. (Hu Zhitao, He Bing, Zhou Jun, et al. Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 080002)
- [28] 赵楠. 高功率掺镱光纤激光器中光子暗化效应研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. (Zhao Nan. The study on photo-darkening effect in ytterbium doped high power fiber lasers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018)
- [29] Cao Ruiting, Wang Yibo, Chen Gui, et al. Investigation of photo-darkening-induced thermal load in Yb-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 809-812.
- [30] Otto H J, Modsching N, Jauregui C, et al. Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15265-15277.
- [31] 陈益沙, 廖雷, 李进延. 光纤激光器模式不稳定机理及抑制方法研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54: 080001. (Chen Yisha, Liao Lei, Li Jinyan. Research progress on mode instability mechanism and suppression methods for fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 080001)
- [32] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(27): 13240-13266.
- [33] Hu Man, Yang Yifeng, Zheng Ye, et al. Raman suppression in a kilowatt narrow-band fiber amplifier[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33: 044208.
- [34] Hu Man, Ke Weiwei, Yang Yifeng, et al. Low threshold Raman effect in high power narrowband fiber amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14: 011901.
- [35] Zhang Song, Zhang Wanru, Jiang Man, et al. Suppressing stimulated Raman scattering by adopting a composite cavity in a narrow linewidth fiber oscillator[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(20): 5984-5989.
- [36] Kovalev V I, Harrison R G. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 161-163.
- [37] Liu Anping. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 977-984.
- [38] Hansryd J, Dross F, Westlund M, et al. Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(11): 1691-1697.
- [39] Girard S, Laurent A, Pinsard E, et al. Radiation-hard erbium optical fiber and fiber amplifier for both low- and high-dose space missions[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2541-2544.
- [40] Ladaci A, Girard S, Mescia L, et al. Optimized radiation-hardened erbium doped fiber amplifiers for long space missions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121: 163104.
- [41] Girard S, Morana A, Ladaci A, et al. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20: 093001.
- [42] DiGiovanni D J, MacChesney J B, Kometani T Y. Structure and properties of silica containing aluminum and phosphorus near the AlPO_4 join[J]. *Journal of*

- Non-Crystalline Solids*, 1989, 113(1): 58-64.
- [43] Deschamps T, Vezin H, Gonnet C, et al. Evidence of AlOH₂ responsible for the radiation-induced darkening in Yb doped fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8382-8392.
- [44] León M, Lancry M, Ollier N, et al. Ge- and Al-related point defects generated by gamma irradiation in nanostructured erbium-doped optical fiber preforms[J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(22): 10245-10261.
- [45] Likhachev M E, Bubnov M M, Zotov K V, et al. Radiation resistance of Er-doped silica fibers: effect of host glass composition[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(5): 749-755.
- [46] Kobayashi Y, Sekiya E H, Saito K, et al. Effects of Ge co-doping on P-related radiation-induced absorption in Er/Yb-doped optical fibers for space applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2723-2729.
- [47] Wang Qian, Tian Cuiping, Wang Yingying, et al. Review of radiation hardening techniques for EDFAs in space environment[C]//Proceedings of SPIE, 9521 Selected Papers from Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014, Part I. 2015: 95211D.
- [48] Mady F, Guttilla A, Benabdesselam M, et al. Systematic investigation of composition effects on the radiation-induced attenuation mechanisms of aluminosilicate, Yb-doped silicate, Yb- and Yb, Ce-doped aluminosilicate fiber preforms[Invited][J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(6): 2466-2489.
- [49] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, et al. Role of Ce in Yb/Al laser fibers: prevention of photodarkening and thermal effects[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13009-13022.
- [50] Engholm M, Jelger P, Laurell F, et al. Improved photodarkening resistivity in ytterbium-doped fiber lasers by cerium codoping[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1285-1287.
- [51] She Shengfei, Liu Bo, Chang Chang, et al. Yb/Ce codoped aluminosilicate fiber with high laser stability for multi-kW level laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(24): 6924-6931.
- [52] Zhao Nan, Liu Yehui, Li Miao, et al. Mitigation of photodarkening effect in Yb-doped fiber through Na⁺ ions doping[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18191-18196.
- [53] Griscom D L. Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers by ultra-high-dose γ -ray pre-irradiation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 77(10): 5008-5013.
- [54] 李荣玉, 殷宗敏, 王建华, 等. 石英光纤抗辐照加固的研究[J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(2): 215-217. (Li Rongyu, Yin Zongmin, Wang Jianhua, et al. Research on anti-radiation of silica fiber[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(2): 215-217)
- [55] Stone J. Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers: a review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(5): 712-733.
- [56] Girard S, Vivona M, Laurent A, et al. Radiation hardening techniques for Er/Yb doped optical fibers and amplifiers for space application[J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8457-8465.
- [57] Girard S, De Michele V, Alessi A, et al. Transient and steady-state radiation response of phosphosilicate optical fibers: influence of H₂ loading[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(1): 289-295.
- [58] Sporea D, Sporea A, Oproiu C. Effects of hydrogen loading on optical attenuation of gamma-irradiated UV fibers[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, 423(1/3): 142-148.
- [59] Xing Yingbin, Liu Yinzi, Zhao Nan, et al. Radical passive bleaching of Tm-doped silica fiber with deuterium[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1075-1078.
- [60] Liu Yinzi, Xing Yingbin, Lin Xianfeng, et al. Bleaching of photodarkening in Tm-doped silica fiber with deuterium loading[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(9): 2534-2537.
- [61] Yoo S, Basu C, Boyland A J, et al. Photodarkening in Yb-doped aluminosilicate fibers induced by 488 nm irradiation[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(12): 1626-1628.
- [62] Di Francesca D, Agnello S, Girard S, et al. Influence of O₂-loading pretreatment on the radiation response of pure and fluorine-doped silica-based optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(6): 3302-3308.
- [63] Di Francesca D, Agnello S, Girard S, et al. O₂-loading treatment of Ge-doped silica fibers: a radiation hardening process[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2311-2316.
- [64] Söderlund M J, Ponsoda J M I, Koplou J P, et al. Thermal bleaching of photodarkening in ytterbium-doped fibers[C]//Proceedings of SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications. 2010: 75800B.
- [65] Friebele E J, Gingerich M E. Photobleaching effects in optical fiber waveguides[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(19): 3448-3452.
- [66] Piccoli R, Robin T, Méchin D, et al. Effective mitigation of photodarkening in Yb-doped lasers based on Al-silicate using UV/visible light[C]//Proceedings of SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications. 2014: 896121.
- [67] Chávez A D G, Kir'yanov A V, Barmenkov Y O, et al. Reversible photo-darkening and resonant photo-bleaching of ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(10): 734-739.
- [68] Gebavi H, Taccheo S, Tregoa D, et al. Photobleaching of photodarkening in ytterbium doped aluminosilicate fibers with 633nm irradiation[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(9): 1286-1291.
- [69] Piccoli R, Robin T, Brand T, et al. Effective photodarkening suppression in Yb-doped fiber lasers by visible light injection[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7638-7643.
- [70] Peretti R, Jurdy A M, Jacquier B, et al. How do traces of thulium explain photodarkening in Yb doped fibers?[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20455-20460.
- [71] Mescia L, Girard S, Bia P, et al. Optimization of the design of high power Er³⁺/Yb³⁺-codoped fiber amplifiers for space missions by means of particle swarm approach[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 3100108.

- [72] 王巍, 王学锋, 李晶, 等. 高精度光纤陀螺用掺铒光纤光源辐照性能试验[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1826-1830. (Wang Wei, Wang Xuefeng, Li Jing, et al. Experiment on performance of erbium-doped fiber source for high performance fiber-optic gyroscope in a space irradiation environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1826-1830)
- [73] 淇鸿伟, 陶蒙蒙, 赵海川, 等. γ 射线作用下光纤激光器的功率特性及热效应分析[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0401004. (Chen Hongwei, Tao Mengmeng, Zhao Haichuan, et al. Power characteristics and thermal effects of the gamma-ray radiated fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0401004)
- [74] Girard S, Ouerdane Y, Origlio G, et al. Radiation effects on silica-based preforms and optical fibers—I: experimental study with canonical samples[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(6): 3473-3482.
- [75] Girard S, Richard N, Ouerdane Y, et al. Radiation effects on silica-based preforms and optical fibers-II: coupling ab initio simulations and experiments[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(6): 3508-3514.
- [76] Girard S, Mescia L, Vivona M, et al. Design of radiation-hardened rare-earth doped amplifiers through a coupled experiment/simulation approach[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(8): 1247-1254.
- [77] Fox B P, Schneider Z V, Simmons-Potter K, et al. Gamma radiation effects in Yb-doped optical fiber[C]//Proceedings of SPIE 6453, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications. 2007: 645328.
- [78] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes Jr W J, et al. Gamma-radiation-induced photodarkening in unpumped optical fibers doped with rare-earth constituents[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(3): 1618-1625.
- [79] Fox B P, Simmons-Potter K, Kliner D A V, et al. Effect of low-earth orbit space on radiation-induced absorption in rare-earth-doped optical fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 378: 79-88.
- [80] Singleton B, Petrosky J, Pochet M, et al. Gamma-radiation-induced degradation of actively pumped single-mode ytterbium-doped optical fibers[C]. Proceedings of SPIE 8982, Optical Components and Materials XI. 2014: 89820S.
- [81] Duchez J B, Mady F, Mebrouk Y, et al. Interplay between photo- and radiation-induced darkening in ytterbium-doped fibers[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5969-5972.
- [82] Ladaci A, Girard S, Mescia L, et al. Radiation hardened high-power $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped fiber amplifiers for free-space optical communications[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3049-3052.
- [83] Campanella C, Mescia L, Bia P, et al. Theoretical investigation of thermal effects in high power $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped double-clad fiber amplifiers for space applications[J]. *Physics Status Solidi (A)*, 2019, 216: 1800582.
- [84] 池俊杰, 姜诗琦, 张琳, 等. 光纤激光器辐照性能实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 061406. (Chi Junjie, Jiang Shiqi, Zhang Lin, et al. Experimental study on radiation performance of fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55: 061406)
- [85] Xie Fenghou, Shao Chongyun, Wang Meng, et al. Research on photo-radiation darkening performance of ytterbium-doped silica fibers for space applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1091-1097.
- [86] 邵冲云, 于春雷, 胡丽丽. 面向空间应用耐辐照有源光纤研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0500014. (Shao Chongyun, Yu Chunlei, Hu Lili. Radiation-resistant active fibers for space applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0500014)
- [87] 黄宏琪, 赵楠, 陈瑰, 等. γ 射线辐照对掺Yb光纤材料性能的影响[J]. *物理学报*, 2014, 63: 200201. (Huang Hongqi, Zhao Nan, Chen Gui, et al. Effects of γ -radiation on Yb-doped fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 200201)
- [88] Zhao Nan, Xing Yingbin, Li Jiaming, et al. 793 nm pump induced photo-bleaching of photo-darkened Yb^{3+} -doped fibers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25272-25278.
- [89] Xing Yingbin, Zhao Nan, Liao Lei, et al. Active radiation hardening of Tm-doped silica fiber based on pump bleaching[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24236-24245.
- [90] Xing Yingbin, Huang Hongqi, Zhao Nan, et al. Pump bleaching of Tm-doped fiber with 793 nm pump source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 681-684.
- [91] Cao Ruiting, Lin Xianfeng, Chen Yisha, et al. 532 nm pump induced photo-darkening inhibition and photo-bleaching in high power Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26523-26531.
- [92] 张汉伟, 王小林, 唐峰, 等. γ 射线导致的光子暗化对掺镜光纤激光器效率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57: 011406. (Zhang Hanwei, Wang Xiaolin, Tang Feng, et al. Influence of γ ray induced photo darkening on efficiency of ytterbium-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57: 011406)
- [93] 淇鸿伟, 陶蒙蒙, 赵海川, 等. γ 射线辐照增益光纤影响激光器功率特性实验[J]. *中国激光*, 2019, 46: 1201005. (Chen Hongwei, Tao Mengmeng, Zhao Haichuan, et al. Experimental investigations on laser power characteristics influenced by gamma-ray irradiated gain fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46: 1201005)
- [94] Tao Mengmeng, Chen Hongwei, Feng Guobin, et al. Thermal modeling of high-power Yb-doped fiber lasers with irradiated active fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10104-10123.
- [95] Wang Yuying, Gao Cong, Peng Kun, et al. Laser performances of Yb-doped aluminophosphosilicate fiber under γ -radiation[C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2018. 2018.
- [96] 李奋飞, 周晓燕, 张魁宝, 等. 伽马辐照对掺镜光纤材料特性影响的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 081003. (Li Fenfei, Zhou Xiaoyan, Zhang Kuibao, et al. Effect of gamma irradiation on characteristics of Yb-doped fiber materials[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 081003)