

# 激光与光电子学进展

## 稀土掺杂光纤辐照性能及抗辐照技术研究现状

王博, 曹驰, 邢颖滨, 陈瑰, 戴能利, 李海清, 彭景刚, 李进延\*

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

**摘要** 采用稀土掺杂光纤(又称有源光纤)制成的光纤激光器和光纤放大器具有优异的光学性能,已被广泛应用于太空、核电设施及高能物理设施中。有源光纤对辐照十分敏感,当其处于上述辐照环境时易产生辐致损耗,导致光学性能迅速恶化,因此,提高有源光纤的抗辐照性能十分有必要。本文简要介绍了有源光纤在辐照环境下的应用背景以及面临的问题,并从有源光纤的辐照特性、影响辐照特性的因素和有源光纤抗辐照手段三个方面详细介绍了国内外抗辐照有源光纤的研究进展,最后对抗辐照有源光纤未来的研究趋势进行了展望。

**关键词** 激光光学; 稀土掺杂光纤; 抗辐照; 色心; 辐致损耗; 光纤激光器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1516012

### Research Status on Radiation Performance and Radiation Resistance Technology of Rare-Earth-Doped Fibers

Wang Bo, Cao Chi, Xing Yingbin, Chen Gui, Dai Nengli, Li Haiqing,

Peng Jinggang, Li Jinyan\*

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** Owing to their excellent optical properties, fiber lasers and fiber amplifiers composed of rare-earth-doped fibers (also known as active fibers) are widely used in space, nuclear power, and high-energy physics facilities. However, in an irradiation environment, rare-earth-doped fibers are vulnerable to radiation-induced loss and their optical performance deteriorates rapidly. Therefore, improving the radiation resistance of active fibers is necessary to prevent such losses. This study first overviews the application background and problems of active fibers in irradiation environments. Second, it introduces the research progress of anti-irradiation active fibers in China and other countries from the following three perspectives: irradiation characteristics of active fibers, the primary factors influencing the irradiation characteristics, and radiation resistant technologies for active fibers. Finally, the future research trend of radiation resistant active fibers is prospected.

**Key words** laser optics; rare-earth-doped fiber; radiation resistance; color center; radiation induced attenuation; fiber laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 160.5690; 140.4480

## 1 引言

近年来,随着光纤制造工艺的日趋成熟和激光

技术的快速发展,掺稀土离子光纤(RDF,即有源光纤)凭借其优良的光学性能和物理特性在辐照环境下获得了广泛应用。在空间通信方面,有源光纤具

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-16; 录用日期: 2021-03-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104400)

通信作者: \*ljy@hust.edu.cn

有低损耗、宽带宽以及多路复用的能力,可以高速传输大量数据<sup>[1]</sup>,轻便、小巧以及几乎不受电磁干扰影响的物理性质使其成为航天器通信和聚变反应堆探测的最佳选择<sup>[2]</sup>;同时,有源光纤也可用来制作监测核电站温度、压力以及辐射情况的各种传感器。当有源光纤及有源器件处于上述各种自然或人工辐照环境中时,会在各种高能粒子(质子、中子)和高能射线(X射线、 $\gamma$ 射线)的作用下产生辐致损耗(RIA)、辐致发射(RIE)以及辐致折射率改变(RIRIC)<sup>[3-6]</sup>等现象。有源光纤本身的性质以及辐照剂量或辐照剂量率都会不同程度地影响其光学性能和寿命。为了保证有源光纤及其系统性能的稳定,人们对其在辐照环境下的性能以及相应的抗辐照技术进行了大量研究。本文将简要介绍有源光纤的辐照响应及相应的机理,总结有源光纤在辐照环境下面临的挑战,最后总结影响有源光纤辐照敏感性的内外部因素,并列举几种目前有效的抗辐照技术。

## 2 有源光纤及其辐照特性

### 2.1 有源光纤在辐照环境中的应用及前景

在过去的几十年中,有源光纤取得了令人瞩目的成就,并被逐渐应用于太空、核电站、检测仪器等辐照环境中。掺镱(Yb)光纤自问世以来就受到了广泛关注,其简单的能级结构、高的上能级寿命和低的量子缺陷使其成为高功率光纤激光器和放大器的最佳增益介质。经过近30年的发展和改进,掺镱双包层光纤激光器的连续输出功率已从最初的几百mW发展到目前的500kW<sup>[7]</sup>,其极高的功率在太空残骸清理和核电站内部清理方面具有较大优势,同时促进了激光切割和加工技术的迅速发展。在高压脉冲输出方面,王世杰等<sup>[8]</sup>基于全国产光纤搭建了高功率主振荡功率放大(MOPA)结构的纳秒调Q光纤激光器,实现了平均功率为761W、单脉冲能量为17.5mJ的纳秒脉冲激光输出,这一高峰值功率和窄脉宽特性使得激光在传输超远距离时依然能够具有足够的能量密度;因此,掺镱脉冲光纤激光器在深空通信领域也具有一定的应用潜力<sup>[9]</sup>。

掺铒(Er)光纤发射带位于光纤通信的低损耗窗口,在卫星光纤通信、数据采集、卫星导航和太空探测等领域具有较为广泛的应用,例如,20世纪末美国国家航空航天局(NASA)设计的弹道导弹防御系统激光通信卫星终端以及欧洲航天局(ESA)的SILEX(Semiconductor Intersatellite Link Experiment)

项目均采用了掺铒光纤<sup>[10]</sup>。掺铒光纤放大器(EDFA)可以直接放大光信号,在光纤通信中具有十分关键的作用。近年来,随着航天技术的发展,掺铒光纤放大器凭借其宽带宽、低损耗的光学性能以及重量轻的物理特性受到了航天领域研究人员的广泛关注,并拟搭载在卫星上承担空间通信、数据传输等任务<sup>[11]</sup>。目前,掺铒光纤放大器的数据传输速率可达TB/s量级。由于铒的能级结构较为复杂,发光效率较低,因此目前广泛采用铒镱共掺的手段来提升铒离子的发光效率。镱离子作为激活剂可以减弱铒离子的团簇效应和上转换效率,从而使得铒镱共掺放大器能够输出更高的功率。目前,铒镱共掺已被应用于远距离光纤通信中。

同样,掺铊(Tm)光纤在辐照环境下也具有较大的应用潜力,比如:大气激光雷达传感需要采用2 $\mu$ m激光进行空间的大气测量<sup>[12]</sup>;掺铊光纤激光器可以用于水蒸气激光雷达中,探测火星上的水分布情况<sup>[13]</sup>。与掺铒光纤一样,掺铊光纤在S波段也存在通信窗口,因此掺铊光纤具有巨大的发展潜力。

### 2.2 有源光纤的辐照特性

相较于无源光纤,有源光纤对辐照更加敏感,在太空及高能物理设施等辐照环境中应用时易受到辐照损伤,所以需要采取抗辐照手段来减小辐照对光纤性能的影响。传统的抗辐照方式通常是物理屏蔽,例如使用数厘米厚的铅板隔绝 $\gamma$ 射线<sup>[14]</sup>,但这种方式所需空间太大,且铅板重量过大,无法应用于太空精密设备中。因此,提升有源光纤自身的抗辐照性能才是解决有源光纤在太空中应用难题的有效途径。

若想提高有源光纤的抗辐照性能,必须先了解辐照是如何影响有源光纤的。目前来看,辐照导致光纤产生缺陷的机理主要有两种:电离损伤(ionization)和位移损伤(displace damage)<sup>[15-17]</sup>。

首先,辐照会将大量的高能粒子引入到光纤基质中。电离损伤是当光纤受到辐照时其价带中的电子吸收入射粒子能量跃迁到导带,同时在价带中产生对应空穴(即电子-空穴对)的现象。电子-空穴对可以通过辐射复合或非辐射复合的方式进行复合,当电子-空穴对通过非辐射复合时,能量会以产生声子或次级辐射分解(secondary radiolytic processes)的形式耗散,从而产生点缺陷[也可以称之为色心(color center)]。当辐照引入到光纤基质中的粒子能量足够大时,高能粒子会导致Si或者O原子产生位移,此即位移损伤。位移损伤产生后,会形成相关缺陷,例如

氧空位(ODCs)。其次,由于产生位移损伤所需的能量高于电离损伤的能量,所以电离损伤是引起有源光纤辐照损伤的主要机制。点缺陷会导致光纤产生辐致损耗(RIA),降低系统的增益,提高光纤的背景损耗,在较高剂量(>1 MGy)和剂量率的情况下甚至会产生辐致发射(RIE)和辐致折射率改变(RIRIC)<sup>[18]</sup>,严重影响光学系统的稳定性。

### 3 影响有源光纤辐照性能的因素

#### 3.1 光纤制备参数

##### 3.1.1 掺杂元素

在有源光纤的制备过程中,为了增加稀土离子的溶解度以及调控有源光纤折射率剖面等,需要加入共掺剂元素(Ge、Al、P等),因而打破了原有的配位平衡。在这种情况下,有源光纤中会形成更多的前驱体<sup>[19]</sup>,使其辐照敏感性远大于无源光纤。这些前驱体会在 高能粒子、X 射线或  $\gamma$  射线等高能辐照

下失去电子或者捕获空穴形成各类色心,大幅降低有源光纤的传输性能。此外,不同的共掺剂元素会在有源光纤中形成不同的缺陷和色心,因此表现出了不同的辐照性能。

掺锗光纤被广泛应用于空间应用、高能物理设施和核反应堆等场所中,锗与硅类似,在辐照环境下会产生一些可见光和紫外波段的色心。磷经常作为有源光纤中的共掺剂,其在钕共掺光纤中可以提高稀土离子的溶解度(改善折射率),同时可以提高镱离子向钕离子传递能量的效率,进而提高 1550 nm 通信窗口的放大效率。在有源光纤的制备过程中,如掺锗光纤,一般会共掺杂铝,以避免稀土离子产生团簇效应,提高稀土离子的溶解度。因此,很有必要对上述三种常见共掺元素引起的辐照特性变化进行研究。随着检测手段的不断进步,研究人员对点缺陷的研究也在不断深入。表 1 汇总了近年来报道的纯石英光纤以及铝、磷、锗单掺杂光纤中的常见点缺陷。

表 1 纯石英光纤及单掺杂光纤中的常见点缺陷

Table 1 Common point defects in pure silica fibers and single-doped fibers

Type	Full name	Abbreviation	OA peak(FWHM) /eV	
Pure-silica related point defects	Oxygen deficient center	ODC ( I )	7.6(0.5) <sup>[20-21]</sup>	
		ODC ( II )	5.05(0.32) <sup>[20-21]</sup>	
	Non-bridging oxygen hole center	NBOHC		3.15(0.3) <sup>[20]</sup> , 6.9(0.4) <sup>[20]</sup>
				2.0(0.18) <sup>[20]</sup> , 4.8(1.0) <sup>[20,22]</sup>
	Pure-silica related point defects	Peroxy linkage	POL	3.8(0.2), 4.2(0.6), 7.3(0.2), 7.5(0.1) <sup>[24]</sup>
		Peroxy radical	POR	2.08, 2.19, 5.5 <sup>[25]</sup>
		Self-trapped electron	STE	3.7(1.2) <sup>[26]</sup>
		Self-trapped hole	STH <sub>1</sub>	2.61(1.2) <sup>[27]</sup> , 1.88(0.5) <sup>[27]</sup>
			STH <sub>2</sub>	2.16(0.9) <sup>[27]</sup> , 1.63(0.6) <sup>[27]</sup>
	E' center	E'	5.8(0.7) <sup>[20]</sup>	
Germanium-related point defects	Germanium lone pair center	GLPC	5.14(0.4) <sup>[28]</sup> , 3.8 <sup>[29]</sup>	
		No	Ge(1)	4.41(1.39) <sup>[27,30]</sup>
		No	Ge(2)	5.8(0.74-0.9) <sup>[29]</sup>
	Germanium E' center	GeE'	6.2(1.1) <sup>[30]</sup>	
	Germanium-related NBOHC	Ge-NBOHC	1.97(0.26) <sup>[30]</sup> , 3.68 <sup>[31]</sup>	
		No	GeX	2.61(0.97) <sup>[27,30,32]</sup>
No	GeY	1.38(0.71) <sup>[27]</sup>		
Phosphorus-related point defects	Meta-stable POHC	m-POHC	2.2(0.35), 2.5(0.63) <sup>[27,30]</sup>	
	Stable POHC	S-POHC	3.1(0.73) <sup>[27,30]</sup> , 5.3(0.74) <sup>[30]</sup>	
	No	P <sub>1</sub>	0.79(0.29) <sup>[27]</sup>	
		P <sub>2</sub>	4.5(1.27) <sup>[30]</sup>	
P <sub>4</sub>		4.8(0.41) <sup>[30]</sup>		
Aluminum-related point defects	Aluminum E' center	Al-OHC	2.3(0.9) <sup>[27]</sup> , 3.2(1) <sup>[27]</sup> , 4.9(1.08) <sup>[33]</sup>	
		AIE'	4.1(1.02) <sup>[33]</sup>	
	No	AIX	1.67-1.82 <sup>[34]</sup>	
Impurity	Hydroxyl	-OH	0.90, 0.992, 1.31 <sup>[14]</sup>	
	Chlorine related defects	Cl <sup>0</sup>	3.26, 3.65 <sup>[27]</sup>	
		Cl <sup>2</sup>	3.78(0.7) <sup>[27]</sup>	
	Interstitial oxygen	O <sub>2</sub>	0.975(0.011), 1.62(0.012) <sup>[20]</sup>	
O <sub>3</sub>		4.8(0.84) <sup>[20,22]</sup>		

### 3.1.2 拉丝工艺

除了共掺元素之外,有源光纤的制备工艺也会影响其辐照性能。目前几种主流的预制棒制作工艺有外部气相沉积法(OVD)、气相轴向沉积法(VAD)、改进的化学气相沉积法(MCVD)和等离子体化学气相沉积法(PCVD)等。制备有源光纤较为常用的工艺是MCVD,在MCVD工艺中有许多因素会影响光纤的结构和组分,例如MCVD的沉积温度、沉积趟数及氧气含量等。一般来说,温度和沉积趟数会影响掺杂离子的浓度及分布,从而影响光纤纤芯中前驱体的产生及数量,温度越高,离子分布越均匀,前驱体产生的概率可能会相应降低。

对于制成预制棒后的光纤,影响其主要性能的是拉丝工艺。早在1985年,日本NTT电信实验室的Hanafusa等<sup>[35]</sup>就对拉丝产生的缺陷进行了理论研究,并给出了拉丝速度和炉内温度与E'心浓度之间的关系。1986年,该团队通过实验测试了不同拉丝速度和炉内温度下制成的光纤的RIA,最终得出结论:拉丝速度越快,炉内温度越低,光纤的RIA就越小<sup>[36]</sup>。2000年,美国罗格斯大学的Yin等<sup>[37]</sup>通过理论推导结合实验分析得出了相似的结论,他们给出的解释是,在拉丝过程中Si-O键断裂产生了NBOHC和E'心,且E'的浓度会随着温度上升而增加。当光纤的黏度较大时,拉丝所需的炉温较高且拉丝速度较慢,所以E'的浓度较高。2009年,美国罗格斯大学的Chen等<sup>[38]</sup>给出了拉丝速度和掺杂组分的关系,提出掺F/B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可以有效降低黏度和提高拉丝速度,从而减少E'的浓度,为抗辐照拉丝工艺提供了参考。同年,法国圣埃蒂安大学的Origlio等<sup>[39]</sup>通过对阶梯式掺Ge预制棒拉丝过程中不同浓度区域产生的锗孤电子对中心(GLPC)进行比较后得出:拉丝过程会产生额外的应力,从而导致GLPC的浓度具有不连续性,进而影响了光纤的光敏性。2011—2012年,法国圣埃蒂安大学的Alessi以及Girard等<sup>[40-44]</sup>就拉丝速率对掺Ge和纯硅芯光纤点缺陷的产生进行了一系列实验研究,对拉曼光谱和电子自旋共振(EPR)进行分析后得出结论:拉丝速度的改变几乎不会影响点缺陷的产生。2011年,欧洲粒子物理实验室的Wijnands等<sup>[45]</sup>制备了一批光纤,并测试了它们的辐照特性,测试结果与Alessi等的相似,进一步证明了上述结论。2015年,俄罗斯科学院的Kashaykin等<sup>[46]</sup>提出拉丝张力会影响STH<sub>2</sub>缺陷的产生,并提出在过氧环境下制备光纤可以有

效抑制STH<sub>2</sub>相关RIA。综合上述理论可以提出如下假设:拉丝过程会使化学键断裂,从而形成某些点缺陷及前驱体;当拉丝速率较低(<500 m/min)时,断键速率主要与加热炉内的温度有关,而炉内温度与光纤本身的黏度相关,掺杂组分改变光纤预制棒的黏度。所以,在抗辐照光纤生产过程中应该综合分析上述因素的影响。

### 3.1.3 涂覆层

光纤的涂覆层材料也会对光纤的抗辐照性能造成一定影响,虽然截至目前对于该方面的研究较少,但高分子涂层作为光纤的重要组成部分应该受到重视。如今的光纤涂覆层材料多采用丙烯酸酯(acrylate)、聚酰亚胺(polyimide)以及金属。相比热固化而言,紫外光固化对光纤性能的影响更小。现今的RDF涂覆层多采用紫外线光固化丙烯酸酯,所以人们着重研究了丙烯酸酯材料的抗辐照性能。

2001年,比利时核研究中心的Brichard等<sup>[47]</sup>对纯硅芯光纤进行了大剂量的中子和γ射线辐照,比较丙烯酸酯涂层光纤和铝涂层光纤可以发现,前者在1390 nm处存在一个强吸收峰,这个吸收峰与羟基(-OH)有关,并随辐照剂量提升而增强。同时,对比辐照结束后1390 nm处的RIA光谱可以发现,包层厚度更大的光纤在辐照结束后会出现RIA先下降后上升的趋势。于是,Brichard等提出了氢扩散机制:分子氢从高分子涂覆层中产生并通过包层扩散至芯包界面。2002年,Brichard等<sup>[48]</sup>对氢扩散机制进行了进一步解释,他们认为羟基的产生机理共有2种:反冲质子(recoil proton)及氢扩散。他们根据计算得到的反冲质子产生的羟基数量远少于实际数量的这一结果,判断羟基的主要来源为氢扩散机制,并给出了分子氢和NBOHC反应生成羟基的化学式,即 $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot + \text{H}_2 \rightleftharpoons \equiv\text{Si}-\text{OH} + \text{H}^\circ$ 。这一反应可以抑制NBOHC的生成,对抗辐照光纤的生产具有借鉴意义。2008年,比利时国家核能研究中心的Gusarov等<sup>[49]</sup>研究了γ射线辐照对不同涂覆层光纤布拉格光栅(FBG)的影响,通过对比得出丙烯酸酯和聚酰亚胺的性能较好,同时利用剥离涂覆层的方法得出辐照涂层会产生应力,应力会影响FBG布拉格峰值的偏移。2012年,西班牙坎塔布里亚物理研究所的Curras等<sup>[50]</sup>研究了质子辐照对不同涂覆层FBG的影响,结果发现,丙烯酸酯涂覆层FBG的布拉格峰值偏移很小,抗辐照性能较好。2018年,法国里昂大学的Blanchet等<sup>[51]</sup>研究了重涂和

预辐照技术对 FBG 的影响,并得出预辐照技术对 FBG 布拉格峰值偏移抑制效果不理想的结论。2019 年,法国里昂大学的 Mélin 等<sup>[52]</sup>通过对 4 种不同涂层(电信级丙烯酸酯、高温丙烯酸酯、聚酰亚胺和铝涂层)的抗辐照特性进行了研究,结果发现,电信级丙烯酸酯的力学性能在大剂量辐照后迅速下降,而高温丙烯酸酯和聚酰亚胺经过辐照之后的力学性能较为稳定。

综上所述,丙烯酸酯涂层在大剂量辐照情况下(>MGy)会释放分子氢,但分子氢可以与 NBOHC 反应生成更稳定的羟基。2015 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的刘双等<sup>[53]</sup>发现,羟基与 NBOHC 之间存在可逆反应( $\equiv\text{Si}-\text{OH}+\equiv\text{Si}\cdot\rightleftharpoons\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot+\equiv\text{Si}-\text{H}$ ),所以引入适当的羟基可以在一定程度上增强抗辐照性能。

此外,丙烯酸酯在辐照后可使 FBG 布拉格峰值偏移很小,这也证明了辐照后光纤产生的内应力较小。虽然电信级丙烯酸酯在大剂量辐照后力学性能有所下降,但高温丙烯酸酯可以保持稳定,为制备抗辐照光纤提供了参考。

### 3.2 环境因素

在光纤的实际应用中,要同时考虑其自身参数和所处环境对光纤的影响。首先,各种人工和自然辐照环境下的辐照剂量和剂量率均有所不同,因此会对处于其中的有源光纤造成不同程度的影响。对于同种光纤而言,辐照剂量率越大,其损耗越大,但经过长时间恒温退火处理的光纤,其损耗比较接近,这表明剂量率的变化对永久性损伤的影响较小<sup>[44]</sup>。

此外,温度也会影响光纤的辐照性能。随着温度升高,光纤中的某些色心变得不稳定从而分解(或形成新的缺陷),导致光纤相应波段的 RIA 水平降低(或升高)。2013 年,法国圣埃蒂安大学的 Girard 等<sup>[54]</sup>研究了高温和大剂量辐照对光纤辐照特性的影响,结果发现,温度升高对不同波段的 RIA 的影响不同,于是认为高温会促使不稳定的点缺陷转变成另一种点缺陷,如 POHC 会在高温下转换成  $\text{P}_1$ 。这种效应会使光纤在高温环境下产生新的吸收峰,恶化相应波段的光学性能。2016 年,法国里昂大学的 Alessi 等<sup>[55]</sup>对掺 Ge 光纤辐照温度的影响进行了研究,解释了 Ge 相关缺陷在高温下的转变,并认为辐照温度在高剂量辐照时的影响较低剂量辐照时的更大。2020 年,法国圣埃蒂安大学的

Campanella 等<sup>[56]</sup>着重研究了温度和辐照在红外波段对光纤的影响,并测试了掺杂铝、磷和锗等常见元素的单模光纤在 1310 nm 和 1550 nm 两个通信波段的 RIA,这一实验波段与 2013 年 Girard 等的实验波段互补。实验结果表明,不同的掺杂元素会使光纤在改变辐照温度条件下的 RIA 的变化趋势不同,例如掺杂磷和掺杂铝的光纤的变化趋势是相反的,这种现象也可以利用点缺陷在高温下转换成另一种点缺陷来解释。综上,温度改变光纤辐照特性的机理是比较复杂的,包含高温不稳定点缺陷的转换,这使得人们难以利用热漂白效应来提高光纤的抗辐照性能。同时,对于高功率光纤而言,其热效应较为明显,需要考虑上述缺陷转换问题,以防止激光器的性能下降。

色心与缺陷存在各自的吸收波段,如果有源系统或器件的工作波长与色心吸收波段相近,就会影响其光学性能;此外,研究表明,通过注入特定波长的泵浦光可以减小有源光纤辐照带来的光学损耗。2008 年俄罗斯科学院的 Zotov 等<sup>[57]</sup>对掺铒光纤的 2 个泵浦波段进行了研究,认为 980 nm 泵浦光可以促进掺铒光纤的漂白,并优化了泵浦波长。2018 年,北京航天控制仪器研究所的池俊杰等<sup>[58]</sup>对 976 nm 和 915 nm 泵浦掺铒光纤激光器进行了辐照实验,结果表明,976 nm 泵浦光纤激光器的抗辐照性能更优。

在实际生产和应用中,以上因素都应该综合考虑,在不同应用环境下的抗辐照光纤应采用不同的优化方法,以达到最佳的抗辐照效果。

## 4 有源光纤的抗辐照手段

随着有源光纤在辐照环境下的应用越来越广泛,在各种辐照环境下维持光纤以及光纤器件的稳定性愈发重要。近年来,有源光纤抗辐照手段的研究成为科研人员关注的热点。目前,有源光纤抗辐照的手段主要分为两大类:第一类是在光纤制备时通过改变光纤掺杂元素、光纤结构或者改进制备工艺来减少光纤中色心和缺陷的形成,进而提高光纤的抗辐照性能;第二类是采用光纤处理的方法,在辐照前或辐照后减少色心和缺陷的数量,提高光纤的抗辐照性能。

### 4.1 光纤的制备

#### 4.1.1 掺杂铈元素

2012 年,华中科技大学的 Sheng 等<sup>[59]</sup>提出在掺铈硅酸盐玻璃中掺铈可以提高玻璃的抗辐照性

能,并解释了铈离子与镱离子之间的价态转换是提高抗辐照性能的内在机制。2016年,上海光学精密机械研究所的邵冲云等<sup>[60]</sup>发现,增加镱/铝/铈共掺玻璃中的铈含量可以提高玻璃的抗辐照性能。铈元素是变价元素,Ce<sup>3+</sup>可以对辐照产生的空穴起到一定的保护作用,从而减少色心的生成,而Ce<sup>4+</sup>则可以捕获辐照产生的多余电子,抑制捕获电子产生的相关色心,所以在有源光纤中掺入铈元素可以在光纤受到辐照时有效减少色心的产生。

2018年,法国圣埃蒂安大学的Ladaci等<sup>[61]</sup>对不同掺杂的光纤进行辐照测试,主要研究了不同铈含量对铒镱共掺光纤抗辐照性能的影响。三种铒镱光纤分别为不掺铈、低掺铈和高掺铈光纤,详细的掺杂参数如表2所示。他们采用图1所示的高功率

铒镱共掺放大器系统进行实验,中心波长位于1565 nm。在辐照剂量率为3.4 rad/s、总剂量为100 krad的辐照环境下,测试结果如图2所示。实验结果说明,掺杂一定量的铈可以提升铒镱共掺光纤的抗辐照性能,并且适当提高铈的掺杂量可以进一步增强铒镱共掺光纤的抗辐照性能。

表2 被测稀土光纤的参数<sup>[61]</sup>

Table 2 Characteristics of tested Re-doped fibers<sup>[61]</sup>

Parameter	#ErYb	#ErYbCe	#ErYbCe+
Core diameter (μm)	12	12	11.5
1st Clad diameter (μm)	125	125	125
2nd Clad diameter (μm)	170	170	170
P (wt. %)	9	9	9
Er (×10 <sup>25</sup> Ions/m <sup>3</sup> )	2.4	3.3	2.9
Yb (×10 <sup>25</sup> Ions/m <sup>3</sup> )	37	43	39
Ce (Ions/m <sup>3</sup> )	none	level 1	level 2
SM α @ 1.536 μm dB/m	63	58	55
MM α @ 0.915 μm dB/m	2.9	3.3	2.8

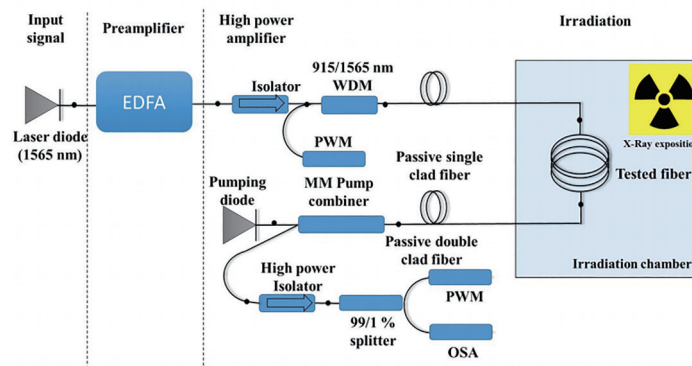


图1 铒镱共掺光纤放大器结构和辐照实验装置方案<sup>[61]</sup>

Fig. 1 EYDFA architecture and scheme of the irradiation test setup<sup>[61]</sup>

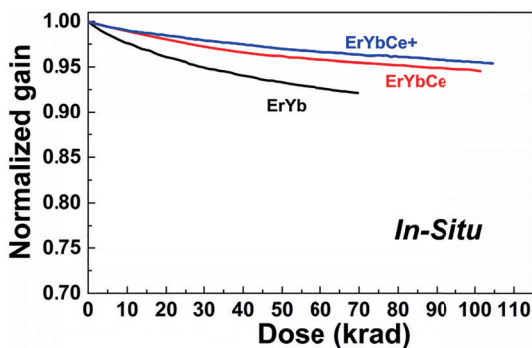


图2 三种光纤的归一化增益与辐照剂量的关系<sup>[61]</sup>

Fig. 2 Normalized gain degradation as a function of the total accumulated dose for the three fibers<sup>[61]</sup>

铈对Er<sup>3+</sup>离子的发光性能也有影响。2012年,法国圣埃蒂安大学的Vivona等<sup>[62]</sup>证明了铈掺杂可以为铒镱共掺光纤提供额外的紫外激发通道,增强铒到Er<sup>3+</sup>的能量转移,这种现象有利于提高铒镱共

掺光纤的通信性能。

掺入铈在抑制光子暗化(PD)方面也有不错的表现。2009年,瑞典皇家理工学院的Engholm等<sup>[63]</sup>通过在镱/铝光纤中掺杂铈有效地抑制了光子暗化效应,并发现增加铈的掺杂量后抑制效果得以提升。2019年,法国蔚蓝海岸大学的Mady等<sup>[64]</sup>系统地研究铈掺杂对掺镱光纤抗辐照性能的影响后提出,与光子暗化相关的色心与RIA相关的部分色心是相同的,掺铈可以有效缓解上述两种效应带来的有源光纤性能的恶化。由于光子暗化会限制高功率光纤功率的提升,所以在优化高功率光纤抗辐照性能时要考虑光子暗化带来的影响。掺铈可以同时优化光子暗化效应和RIA效应,这对于制备高功率抗辐照掺镱光纤具有参考意义。

但掺铈会导致纤芯的数值孔径增大,降低激光效率,这对于高功率光纤激光器是不利的<sup>[65]</sup>。

同时,掺铈也会导致光纤内部温度升高,影响光纤的传输性能<sup>[66]</sup>,因此应对铈的掺杂量进行适度优化。

#### 4.1.2 铝、磷、锗共掺杂比例

稀土元素在纯二氧化硅基质中很难溶解,所以为了增加稀土离子在光纤中的含量以及提高有源

光纤的光学性能,就需要加入一系列共掺杂剂,比如铝、磷、锗等。对于掺稀土离子光纤来说,稀土离子(如 $\text{Er}^{3+}$ )本身并不是影响光纤抗辐照性能的主要因素。2010年,法国圣埃蒂安大学的 Girard 等<sup>[67]</sup>通过对比掺铈和铈/铈共掺光纤发现,掺杂铈离子并没有显著影响光纤的辐照敏感性,如图 3 所示。

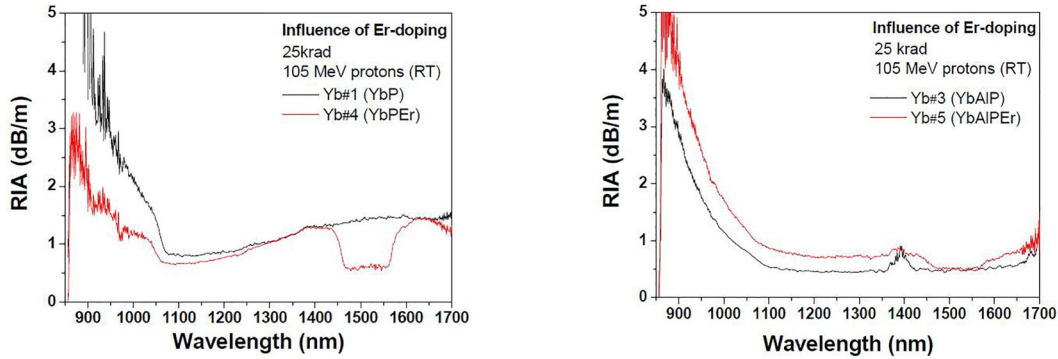


图 3 铈离子掺杂对光纤辐照敏感性的影响<sup>[67]</sup>

Fig. 3 Influence of the doping with  $\text{Er}^{3+}$  ions on the fiber radiation sensitivity<sup>[67]</sup>

共掺杂剂可能是导致 RIA 的主要因素。每种共掺杂剂在辐照之后都会形成相应的点缺陷,比如  $\text{P}_1$ 、 $\text{P-OHC}$ 、 $\text{Al-OHC}$ 、 $\text{Ge}(1)$ <sup>[68]</sup>等,影响有源光纤的光学性能,这一点在单掺杂光纤中的表现更为明显。此外,共掺杂剂之间也会互相影响,当同时共掺多种共掺杂剂时,情况就较为复杂。为了提高有源光纤的抗辐照性能,同时保证其光学性能不变,探究掺杂元素之间的最佳比例十分重要。

##### 1) 铝/磷共掺

早在 1989 年,美国贝尔实验室的 DiGiovanni 等<sup>[69]</sup>就对铝/磷共掺二氧化硅基质进行了研究,并提出铝/磷以等物质的量比掺杂产生的  $\text{AlPO}_4$  具有类似二氧化硅四面体的稳定网络结构。2013 年,法国里昂大学的 Deschamps 等<sup>[70]</sup>制备了一组铝/磷掺杂量不同的掺铈光纤,对该光学进行测试后发现:随着铝/磷掺杂量的增加,Al-OHC 的含量逐渐下降;在磷掺杂量高于铝掺杂量的情况下,Al-OHC 几乎消失,说明高掺磷可以抑制 Al-OHC 缺陷的生成。他们推测是由于  $\text{AlPO}_4$  的生成抑制了 Al-OHC 的生成,从而提高了掺铈光纤的抗辐照性能。2018 年,上海光学精密机械研究所的邵冲云等<sup>[71]</sup>发现,在铈/铝共掺石英玻璃中加入磷可以提高玻璃的抗辐照性能,且在铈/铝/磷共掺石英玻璃中,当磷与铝的物质之量之比略大于 1 时,玻璃的抗辐照性能最佳。

##### 2) 铝/锗共掺

2013 年,俄罗斯科学院的 Likhachev 等<sup>[72]</sup>制备

了一系列光纤,用来探究抗辐照掺铈光纤掺杂剂的最佳浓度,其掺杂情况如表 3 所示。辐照剂量为 3 kGy,测试结果如图 4 所示。

表 3 实验光纤参数<sup>[72]</sup>

Table 3 Parameters of experimental optical fiber<sup>[72]</sup>

Fiber No.	Fiber designation	Dopant concentration (mol.%)				
		$\text{Er}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{AlPO}_4$	$\text{GeO}_2$
1	P	-	-	12	-	-
2	$\text{P}_{\text{Al}}$	-	-	4	13.6	-
3	$\text{Al}_{\text{P}}$	-	2.3	-	17	-
4	Al	-	4	-	-	-
5	Al-Ge	-	4	-	-	0.05
6	$\text{Al}_{\text{P}}\text{-Ge}$	-	1	-	21	2
7	Er-Al-Ge	0.074	12	-	-	0.8
8	Er- $\text{P}_{\text{Al}}$	0.038	-	4.3	19.4	-
9	Er-Al	0.046	6.5	-	-	-

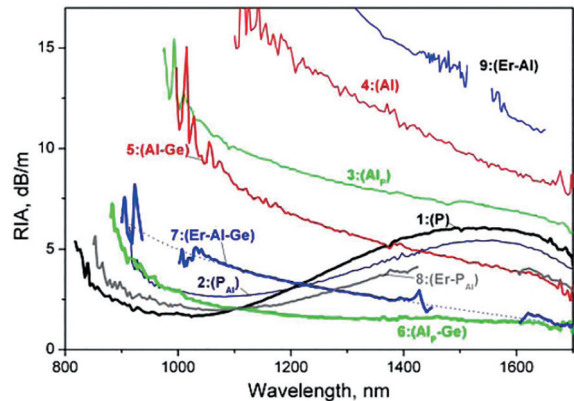


图 4 总剂量 3.0 kGy 辐照 8 个月后测定的光纤的 RIA<sup>[72]</sup>

Fig. 4 Measured RIA spectra of fibers exposed to 3.0 kGy of irradiation for 8 months<sup>[72]</sup>

对比 7 号和 9 号光纤可以明显看出,采用铝/锗共掺的掺铒光纤的抗辐照性能要好于单掺铝的掺铒光纤。对于 8 号光纤,当磷的掺杂浓度大于铝时,其 1500 nm 附近的 RIA 高于 7 号光纤,但 1000 nm 附近的 RIA 低于 7 号光纤,这同样证明了高掺磷可以抑制 Al-OHC,但磷过量会导致  $P_1$  缺陷产生。

2016 年,法国巴黎南大学的 León 等<sup>[73]</sup>发现,在铒/锗/铝共掺光纤中较高的锗含量可以抑制铝相关色心的生成,并且锗的辐致色心并非单纯依赖锗含量,还与铝含量相关,由此提出最佳锗/铝比的概念。2020 年,法国蒙彼利埃大学的 Dardailon 等<sup>[34]</sup>详细解释了 Al-OHC 的产生过程,并发现了一种新的色心 AlX;他们通过分析不同铒/锗/铝含量光纤的 RIA 得出,在最佳锗/铝比条件下尽可能提高锗、铒含量有利于提高光纤的抗辐照强度。

### 3) 磷/锗共掺

2018 年,Kobayashi 等<sup>[74]</sup>制备了一种磷/锗共掺的掺铒光纤,并发现当锗的掺杂量达到 4.4% (质量分数) 时,光纤的抗辐照性能明显增强。光纤的掺杂情况见表 4,辐照源为  $^{60}\text{Co}$ ,进行 16.5 h 的  $\gamma$  射线辐照,辐照总剂量大于 100 krad,测试结果如图 5 所示。可以看出,随着锗含量增加,光纤的抗辐照性能逐渐提升。这说明在铒/锗/磷共掺光纤中掺入锗可以提高光纤的抗辐照性能,但是掺入锗会增大光纤的黏度和纤芯的数值孔径,增加有源光纤与无源光纤的熔接损耗;同时,在辐照之后会产生锗在紫外波段的色心,影响有源光纤的光学性能。

当利用掺杂元素优化光纤的抗辐照特性时需要注意以下问题。首先,掺杂铈可以在提高有源光纤抗辐照性能的同时降低光子暗化效应,然而掺铈带来的效率降低和热负载提高可能会降低光纤的

表 4 实验所用预制棒的掺杂浓度<sup>[74]</sup>

Table 4 Dopant concentrations in the studied glass preforms<sup>[74]</sup>

	Er	Yb	P	Ge	
Sample 1	0.11 wt%	0.95 wt%	10 wt%	-	MMF
Sample 2	0.09 wt%	0.79 wt%	7.7 wt%	0.79 wt%	
Sample 3	0.10 wt%	1.2 wt%	8.5 wt%	1.7 wt%	
Sample 4	0.10 wt%	0.51 wt%	4.5 wt%	3.2 wt%	
Sample 5	0.12 wt%	0.69 wt%	10 wt%	4.0 wt%	MMF
Sample 6	0.09 wt%	0.52 wt%	8.3 wt%	4.4 wt%	
Sample 7	0.17 wt%	0.84 wt%	7.3 wt%	6.7 wt%	SMF

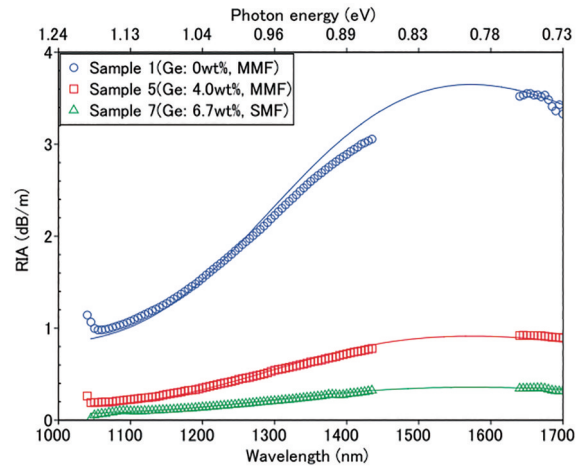


图 5 100 krad  $\gamma$  射线辐照后光纤 RIA 的高斯拟合结果<sup>[74]</sup>  
Fig. 5 RIA and Gaussian-fitted results for the fibers exposed to 100 krad of  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray irradiation<sup>[74]</sup>

传输性能,因此掺杂时应适量。其次,在铝、磷和锗单掺光纤中,光纤的辐照敏感性会随上述单掺元素含量的增加而增大,而且在共掺杂时情况会变得更复杂。综合来看,共掺杂有利于提升有源光纤的抗辐照性能,但掺杂组分过多会导致拉丝难度提高、折射率剖面凹陷、光纤热负载上升等一系列问题。最后,现有的掺杂工艺难以准确控制各个掺杂组分的含量,只能在一定范围内进行调节。所以,想要通过改变掺杂元素来提高光纤的抗辐照性能,不仅需要合理分配掺杂含量,还需要更加成熟的掺杂技术。

### 4.1.3 光纤制备工艺

通过改变光纤的制备方式也可以达到抗辐照的目的。2012 年,法国蒙彼利埃大学的 Thomas 等<sup>[75]</sup>采用纳米掺杂技术制备了掺铒光纤,并对其抗辐照性能进行了测试,测试结果表明,纳米掺杂技术使掺铒光纤中的铒元素分布得更为均匀,降低了铒离子的团簇效应。其制备工艺流程如图 6 所示。用纳米掺杂技术与 MCVD 工艺制备的掺铒光纤分别搭建掺铒光纤放大器(EDFA)并进行对比,具体参数见表 5,其中 Al-NB、Al-LB 为传统 MCVD 工艺制备的掺铒光纤, NP-Al、NP-Si 和 NP-Si+ 为纳米掺杂工艺制备的掺铒光纤。在相同的辐照条件下进行在线辐照实验,实验结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,纳米掺杂工艺提升了掺铒光纤的抗辐照性能。这主要是因为纳米掺杂工艺减少了掺铒光纤中的铝含量,减少了受到辐照时铝相关色心(如 Al-OHC)的形成。但是采用纳米掺杂工艺制备的掺铒光纤的增益较低,应用在 EDFA 时需



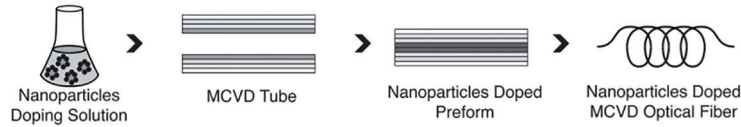


图 6 纳米掺杂工艺制备掺铒光纤的工艺流程<sup>[75]</sup>

Fig. 6 Fabrication process steps for nanoparticles erbium-doped fibers<sup>[75]</sup>

表 5 两种工艺制备的掺铒光纤及 EDFA 参数<sup>[75]</sup>

Table 5 EDFs prepared with two processes and associated EDFA parameters<sup>[75]</sup>

Fiber Name	Al-NB	Al-LB	NP-Al	NP-Si	NP-Si+
Erbium absorption (dB/m@1530nm)	4.7	12.3	23	2	3.2
Aluminum (wt%)	<1	6-8	4-6	0	0
Pump power (dBm)	23	23	21	23	21
Optimal Length (m)	25	6	2.5	45	22
Output signal (dBm)	17	18	16	17	15

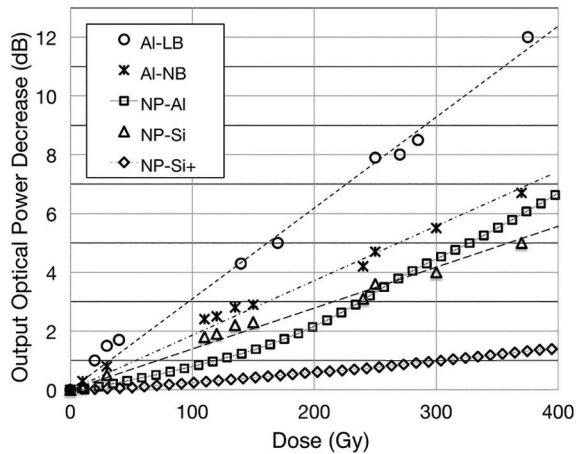


图 7 辐照后 EDFA 输出功率下降的对比<sup>[75]</sup>

Fig. 7 Optical power decrease for each EDFA configuration after radiation<sup>[75]</sup>

要较长的光纤长度,这对 EDFA 整体的抗辐照性能不利。

## 4.2 光纤处理

在光纤处理中,载气、光漂白和热漂白等手段可以有效提升光纤的抗辐照性能或者恢复辐照后光纤的性能。载气包含载氢、载氦和载氧等。载气处理由于操作较为简单而受到了广泛研究,载氢和载氦处理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。

### 4.2.1 载气处理

早在 1987 年,美国贝尔实验室的 Stone<sup>[76]</sup>就对光纤载氢及载氦的影响进行了分析总结,认为载氢和载氦虽然可以优化光纤的抗辐照性能,但会引入额外的缺陷;他还详细阐述了载氢和载氦的优缺点及相关机理。载氦与载氢优化光纤抗辐照特性的机理较为相近。首先,辐照后的光纤中有大量的辐

致色心,由于—OH/—OD 比辐致色心的化学键更加稳定,载氢/载氦引入的 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 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。具体反应过程可参考图 8 及公式  $\equiv\text{Si}-\text{O}^{\cdot}+\text{H}_2\rightleftharpoons\equiv\text{Si}-\text{OH}+\text{H}^{\circ}$ 。

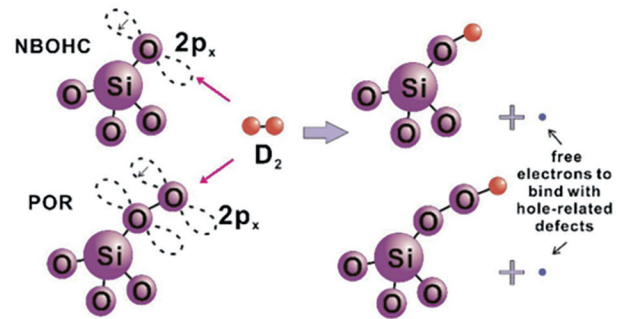


图 8 载氦处理辐照光纤的原理示意图

Fig. 8 Schematic representation of the irradiated fiber being bleached by D<sub>2</sub>

为了使有源光纤具有更好的抗辐照效果,2012 年,法国圣埃蒂安大学的 Girard 等<sup>[77]</sup>对掺铈和载氢这两种抗辐照技术进行了比较,得到了在铈/铈共掺光纤中载氢相对于掺铈的抗辐照效果更好的结论。他们制备了 6 根铈/铈共掺光纤样品进行对比研究,详细的掺杂情况见表 6。为了使光纤能够达到氢饱和,在温度为 85 °C、压力在 192 bar (1 bar=0.1 MPa)的环境下对光纤进行为期 48 h 的载氢处理,之后进行热处理(消除过量的氢)。在辐照速率为 0.003 Gy/s、辐照总剂量为 400~900 Gy 的环境下得到的测试结果如图 9 所示。铈/铈共掺光纤载氢有着比掺铈更好的抗辐照性能,在辐照剂量较低的情况下同时使用载氢和掺铈两种抗辐照方式会使放大器的增益始终保持在较高的水平。

表 6 稀土光纤中各元素的掺杂情况<sup>[77]</sup>

Table 6 Doping of each element in tested rare-earth optical fibers<sup>[77]</sup>

Fibers	Er <sup>3+</sup> (wt. %)	Yb <sup>3+</sup> (wt. %)	Ce <sup>3+</sup> (wt. %)	P (wt. %)	H <sub>2</sub> pre-loading
#1	0.07	1.50	-	-12	-
#1H	0.07	1.50	-	-12	Yes
#2	0.07	1.40	0.6	-12	-
#2H	0.07	1.40	0.6	-12	Yes
#3	-	-	0.6	-12	-
#3H	-	-	0.6	-12	Yes

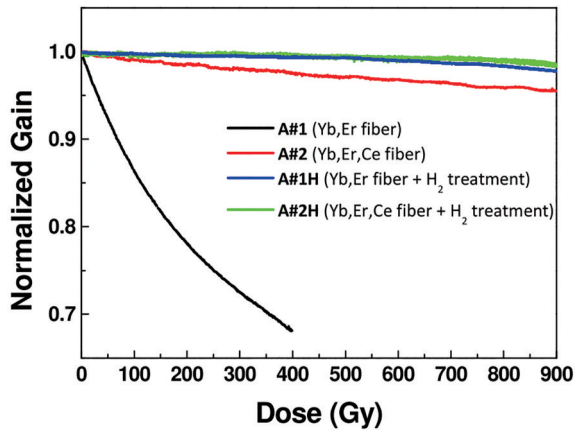


图9 4种放大器归一化增益与辐照剂量的关系<sup>[77]</sup>

Fig. 9 Irradiation dose dependence of the normalized gain of the four amplifiers<sup>[77]</sup>

由此说明对于有源光纤来说,载氢是一种很好的抗辐照方式。

值得注意的是,载氢技术有着较为不稳定的因素。首先,光纤中的氢会随着时间慢慢逸出,从而使得有源光纤的抗辐照性能逐渐变差。2020年,Girard等<sup>[78]</sup>研究了载氢对掺磷光纤稳态辐照的影响,并分析了光纤的RIA随光纤载氢后放置时间的变化,结果发现:载氢30 d后,光纤的RIA提升了近1个数量级;载氢365 d后,光纤的RIA与初始RIA几乎相同。其次,在激光器或放大器运转时,由于热效应的存在,光纤中会逐渐积累热量,而温度的升高会进一步加剧氢的逸出<sup>[79]</sup>。因此,为了保证氢分子在光纤内长时间不逸出,优化光纤结构或者寻找更好的载氢技术很有必要。

2007年,俄罗斯科学院的Zotov等<sup>[80]</sup>提出了利用金属涂层的密封性来抑制载氢后氢逸出的方法,这种方法可以使掺铒光纤载氢后的气体流失速率下降近一半。然而,由于金属涂层的固化方式为热固化,容易影响光纤的性能,因此这种方法的可行性较差。

2014年,针对 $H_2$ 和 $D_2$ 容易逸出的问题,法国Hubert Curien实验室的Girard等<sup>[81]</sup>设计了一种新的掺铒光纤结构HACC(hole-assisted carbon-coated),如图10(a)所示,该结构通过在光纤中均匀打孔并涂覆碳涂层来实现减少气体逸出的目的。将光纤载入氢气后在常温下进行为期5个月的氢气浓度测试,最终的测试结果为光纤内部氢气浓度(体积分数)的下降小于10%。同时,他们对HACC掺铒光纤进行了载氢处理,并搭建EDFA进行了辐照测试,实验结构如图10(b)所示。在剂量率为0.0019 Gy/s、总剂量为3150 Gy的辐照环境下进行放大性能的测试,测试结果如图11所示,其中RTAC为无孔的抗辐照丙烯酸酯涂层光纤,辐照之后HACC-EDFA的增益衰减速率较RTAC-EDFA低一个数量级。新结构光纤有效地减少了有源光纤载气之后的气体泄漏,显著提升了光纤的抗辐照性能,并且采用新结构光纤搭建的EDFA具有31 dB的高增益,不会使掺铒光纤原本的光学性能损失。虽然这种结构的光纤的抗辐照性能优异,但不适用于包层泵浦光纤,如掺镱双包层光纤,同时这种光纤的制备工艺十分复杂,制备成本较高,难以批量生产。

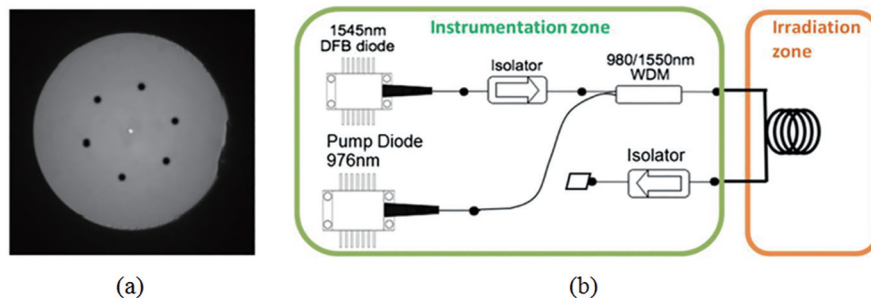


图10 HACC光纤结构以及表征EDFA辐照响应的实验装置<sup>[81]</sup>。(a)光纤结构;(b)实验装置

Fig. 10 HACC fiber structure and experimental setup used for the characterization of the radiation response of EDFA<sup>[81]</sup>.

(a) Fiber structure; (b) experimental setup

2018年,华中科技大学的Xing等<sup>[82]</sup>研究了载氙对掺铒辐照光纤激光效率的恢复情况,对掺铒光纤(TDF)进行剂量为300 Gy、速率为28.3 Gy/min的 $\gamma$ 射线辐照,随后将光纤样品用 $D_2/N_2$ 混合气体处理48 h。其中, $D_2$ 和 $N_2$ 的体积比为5:95,掺入适量 $N_2$

可以提高混合气体的压力,加速铒和掺铒光纤之间的相互作用。搭建如图12所示的系统对载氙掺铒光纤进行793 nm泵浦光漂白实验,实验结果如图13所示,可以看到,载氙之后,光纤的斜率效率几乎可以完全恢复,并且载氙的恢复程度要好于载氢。载

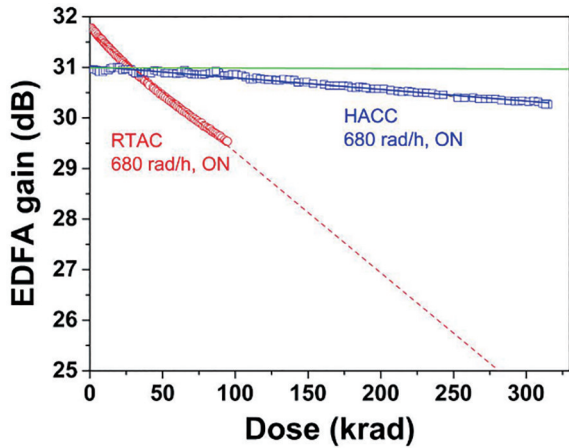


图 11 使用 HACC 及 RTAC 搭建的 EDFA 的辐照增益衰减<sup>[81]</sup>

Fig. 11 Radiation induced degradation in the gain of the EDFAs designed with HACC and RTAC<sup>[81]</sup>

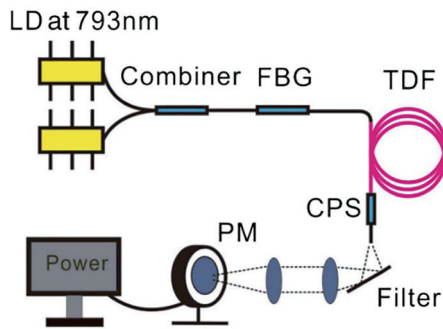


图 12 测量 TDF 激光特性的实验装置<sup>[82]</sup>

Fig. 12 Experimental setup used to measure the laser property of TDF<sup>[82]</sup>

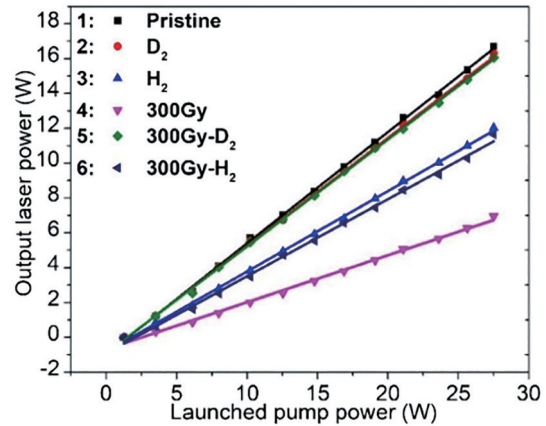


图 13 2  $\mu\text{m}$  原始 TDF、载氢和载氘后的 TDFs、辐照 TDFs、载氢和载氘后的辐照 TDFs 的激光输出功率与泵浦功率的关系<sup>[82]</sup>

Fig. 13 Laser output power of 2  $\mu\text{m}$  pristine TDF, the TDFs with  $\text{H}_2$ -loading and  $\text{D}_2$ -loading, the irradiated TDFs, and the irradiated TDFs with  $\text{H}_2$ -loading and  $\text{D}_2$ -loading versus the launched pump power<sup>[82]</sup>

氧可以加速 793 nm 泵浦光对光纤的漂白效果，793 nm 泵浦光也位于铈离子的吸收波段，所以在漂白的同时可以为激光器系统提供能量。以上说明，对于辐照环境下的掺铈光纤激光器，光纤预载氧是一种有效的抗辐照技术。

2020 年，上海光学精密机械研究所的邵冲云等<sup>[83]</sup>结合载氧、预辐照及热退火三种方法处理掺铈光纤预制棒，处理过程及实验流程如图 14 所示。

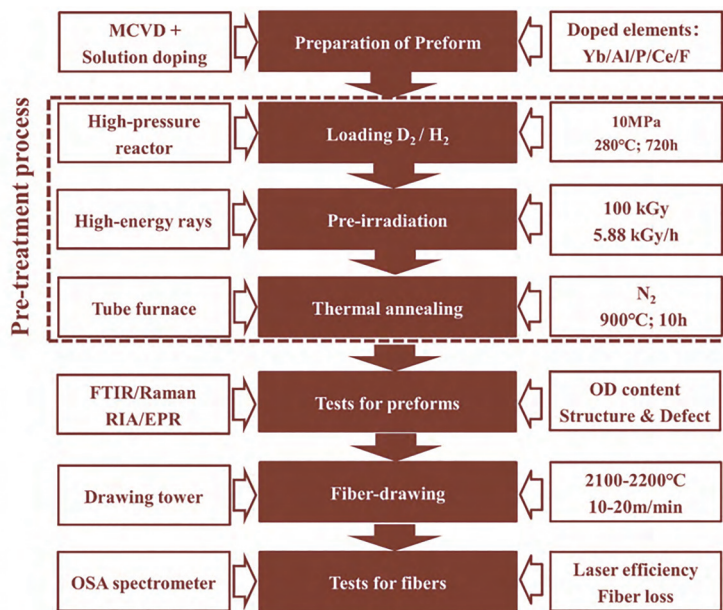


图 14 样品制备及测试流程图<sup>[83]</sup>

Fig. 14 Flow chart of sample preparation and test<sup>[83]</sup>

实验结果表明,采用该方式处理的预制棒芯棒中的辐致点缺陷浓度显著低于未处理预制棒,而且使用该方式处理的预制棒拉制的掺铒光纤经 700 Gy 剂量辐照后激光斜率效率下降小于 21 个百分点(从 79% 下降至 59%),而未处理的预制棒拉制的 YDF 经同等剂量辐照后无法输出激光。这说明使用该方式处理光纤预制棒是一种有效的抗辐照手段。

人们也研究了载氧对光纤抗辐照特性的影响。2007 年,南安普敦大学的 Yoo 等<sup>[84]</sup>提出载氧技术可以抑制掺铒光纤的光子暗化效应,其原因是载氧抑制了铒相关氧空位的形成,从而改善了光子暗化性能。2014 年,圣埃蒂安大学的 di Francesca 等<sup>[85]</sup>研究了载氧对纯硅芯及掺氟光纤辐照特性的影响,光纤的掺杂组分如表 7 所示。光纤在 390 °C 高温和 95 bar 压力下载氧 21 d,载氧后的 7 d 和 1 a 的拉曼光谱表明载氧的效果几乎没有下降,这说明载氧技术的持续时间要长于载氢和载氦。

表 7 文献[85]中被测光纤的掺杂组分  
Table 7 Composition of tested optical fibers in Ref.[85]

Samples	SiD3	SiD3-O2	F2D3	F2D3-O2
F core (w%)	<0.06	<0.06	0.15±0.25	0.15±0.25
F clad (w%)	1.5±1.6	1.5±1.6	1.3±1.4	1.3±1.4
Cl core (w%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cl clad (w%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
[O <sub>2</sub> ] (cm <sup>-3</sup> )	none	~2·10 <sup>18</sup>	none	~2·10 <sup>18</sup>

di Francesca 等<sup>[85]</sup>对 4 种光纤进行了辐照测试,辐照源为 <sup>60</sup>Co,辐照剂量率为 50 Gy/s,总剂量为 1 MGy。辐照后光纤的 RIA 如图 15 所示,可以看出,

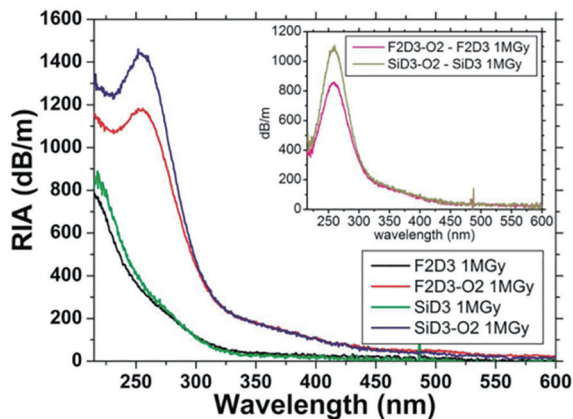


图 15 1 MGy 辐照剂量下 4 种测试光纤的 RIA (插图为 RIA 差值)<sup>[85]</sup>  
Fig. 15 RIA-spectra at the maximum dose 1 MGy of the four tested fibers (the inset shows the differences of RIA)<sup>[85]</sup>

纯硅芯和掺氟光纤载氧后,紫外波段的 RIA 上升,推测是产生了氧相关缺陷。图 16 给出了 F2D3-O2 与 F2D3 RIA 差值的高斯分解结果,可以看出,载氧后 F2D3 光纤中主要产生了 O<sub>3</sub> 和 NBOHC 这两种缺陷。

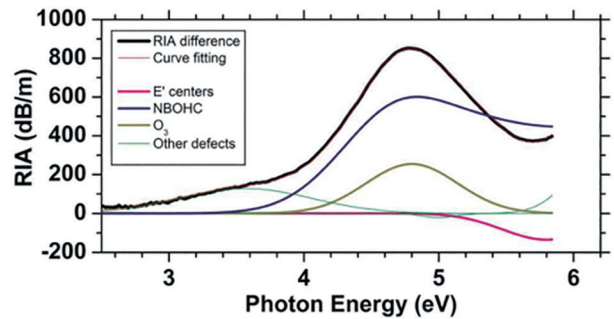


图 16 1 MGy 辐照剂量下 F2D3-O2 与 F2D3 RIA 差值的光谱分解<sup>[85]</sup>  
Fig. 16 Spectral decomposition of the difference of RIA between the F2D3-O2 and F2D3 at 1 MGy<sup>[85]</sup>

2016 年,di Francesca 等<sup>[86]</sup>研究了载氧对掺锗光纤辐照特性的影响,载氧条件仍为 390 °C 高温、95 bar 压力下载氧 21 d,辐照剂量率为 50 Gy/s,总剂量为 1 MGy。辐照结果如图 17 所示,可以看出,载氧掺锗光纤表现出了更好的抗辐照性能,在紫外波段的 RIA 低于原始光纤。这一现象可能与 GLPC 的减少有关,载氧可以有效抑制 GLPC 的生成。然而,载氧会产生一系列的过氧缺陷和间隙氧。为了获得更好的抗辐照效果,在进行载氧处理时要注意平衡好缺氧缺陷和过氧缺陷。

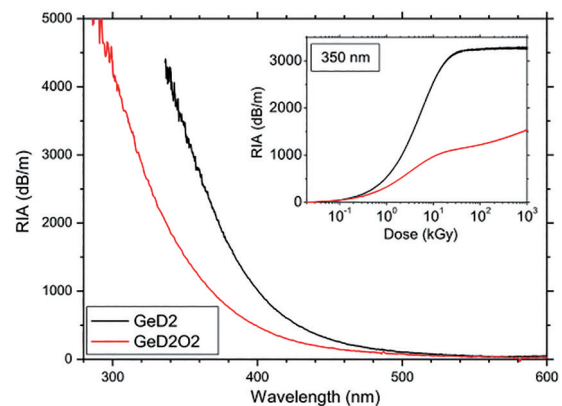


图 17 1 MGy 辐照剂量下 GeD2 及 GeD2O2 的 RIA (插图为 350 nm 处的 RIA)<sup>[86]</sup>  
Fig. 17 RIA spectra of GeD2 and GeD2O2 irradiated at 1 MGy (the inset shows the RIA at 350 nm)<sup>[86]</sup>

#### 4.2.2 光漂白及热漂白

除了常用的载气之外,光漂白和热漂白在减小辐照带来的不利影响方面也是较为有效的。光漂白及热漂白效应的基本机理尚在研究中,目前较为合理的解释是:当光纤中注入某种特定波长的光或者光纤处于高温环境中时,其内部的某些点缺陷及色心会变得不稳定,分解或转变成其他缺陷,从而降低光纤的附加损耗。光子暗化效应的机理与辐致损伤的部分机理较为相近,因此漂白技术同样可以应用于优化光子暗化效应。

##### 1) 热漂白处理

1997年,美国普林斯顿大学的 Ramsey 等<sup>[87]</sup>发现,辐照后的光纤可以通过加热来降低 RIA,当温度达到 400 °C 时传输损耗可下降近 2 个数量级。2006年,美国 OFS 实验室的 Jaspars 等<sup>[88]</sup>研究了热处理对掺镱光纤光子暗化效应的影响,实验结果表明,当温度提高至约 500 °C 时,光纤在可见光波段的光子暗化效应几乎完全漂白。然而,当光纤所处的环境温度低于某一阈值时,热效应可能会增大光纤的传输损耗。2009年,南安普顿大学的 Basu 等<sup>[89]</sup>发现,在 120 °C 进行 30 min 的热处理后,光纤在 633 nm 的附加损耗高于未处理光纤。同年,赫尔辛基理工大学的 Söderlund 等<sup>[90]</sup>发现:在他们的实验条件下,当温度高于 350 °C,热漂白效应占据主导之前,高温会诱导光子暗化掺镱光纤,产生额外的色心,从而增大光纤的损耗;当温度达到 625 °C 时,光纤才会完

全漂白。2018年,国防科技大学的李森<sup>[91]</sup>通过实验对比了不同升温速率下的热漂白效果,结果表明,高温诱导产生的额外色心与升温速率无关,且热漂白开始作用的阈值温度不变。2020年,华中科技大学的刘茵紫等<sup>[92]</sup>在 550 °C 下通过热漂白成功消除了掺铥光纤的光子暗化效应,且漂白的掺铥光纤的光子暗化抗性有所提升。

综上,热漂白效应可以有效降低光纤的 RIA 及光子暗化效应,但其完全漂白所需温度普遍较高 (>500 °C),这对于有源光纤的高温稳定性是很大的挑战。此外,热漂白具有一定阈值,光纤泵浦过程中产生的热效应一般难以超过该阈值,需要加热,这使得热漂白效应难以实际应用。

##### 2) 光漂白处理

早在 1981年,美国海军实验室的 Friebele 等<sup>[93]</sup>就发现使用 850 nm 激光泵浦可以降低辐照光纤的 RIA,并将这种效应称为光漂白效应。2007年,波尔多大学的 Manek-Höninger 等<sup>[94]</sup>采用 355 nm 紫外光照射成功消除了掺镱光纤的光子暗化效应,并在后续进行了多次重复实验,验证了光子暗化和光漂白的可逆性。该实验所用光纤为大模场双层掺镱光纤,采用 976 nm 泵浦光,泵浦功率为 45 W,光子暗化效应在泵浦约 40 min 后达到饱和。光漂白所用 355 nm 紫外光是通过三倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器得到的,功率为 450 mW,重复频率为 5 kHz,在几分钟后光漂白效果达到最优。如图 18 所示,光

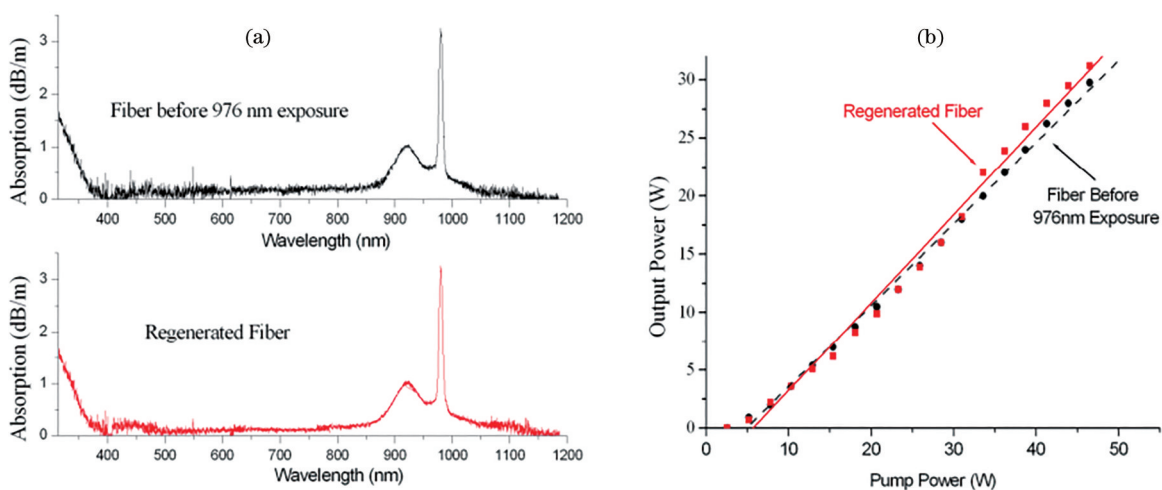


图 18 吸收光谱以及激光振荡器的输出特性<sup>[94]</sup>。(a) 原始光纤(上图)与 355 nm 漂白后光纤(下图)的吸收光谱对比;

(b) 原始光纤(圆形)与漂白光纤(方块)激光振荡器的输出特性对比

Fig. 18 Absorption spectra and output characteristics of laser oscillator<sup>[94]</sup>. (a) Absorption spectra of a new fiber (upper graph) and a photobleached (lower graph) fiber; (b) output characteristics of the laser oscillator using the new fiber (circles) and photobleached (squares) fiber

漂白后的光纤吸收谱及其光纤振荡器输出特性与原始光纤几乎相同,这说明在特定条件下 355 nm 光漂白可以完全消除光子暗化效应。

不同波长光的漂白效果不同。2007 年,瓜纳华托大学的 Guzman Chávez 等<sup>[95]</sup>使用 543 nm 激光(光源为 He-Ne 激光器,功率为 1 mW)漂白掺镱光纤,成功降低了约 50% 的附加损耗,并提出 Yb<sup>3+</sup>与 Yb<sup>2+</sup>之间的光致转化是光子暗化效应与光漂白效应的内在机理。2013 年,斯旺西大学的 Gebavi 等<sup>[96]</sup>使用 1.7 mW 的 633 nm 激光降低了掺镱光纤的光子暗化效应。2014 年,斯旺西大学的 Piccoli 等<sup>[97]</sup>通过实验证明了 405 nm 激光可以部分漂白掺镱光纤的光子暗化效应,但无法完全恢复,这可能是因为 405 nm 激光照射原始光纤会产生基态吸收,从而产生了部分光子暗化效应。除掺镱光纤外,掺铽光纤也可以通过光漂白的方法降低 RIA。2015 年,华中科技大学的 Xing 等<sup>[98]</sup>利用 793 nm 泵浦光对辐照掺铽光纤进行漂白,结果发现掺铽光纤激光器的斜率效率有较大幅度的回升,如图 19 所示,原始光纤的斜率效率为 56.3%,经过总剂量为 500 Gy 的  $\gamma$  射线辐照后,斜率效率下降至 26.7%,再经 793 nm 泵浦光持续泵浦 15 h 后斜率

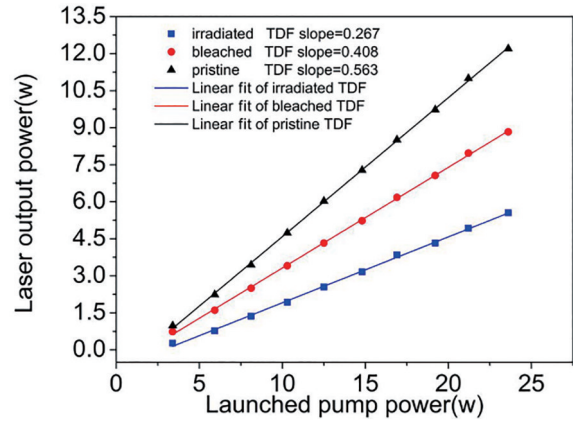


图 19 三种 TDF 输出功率与泵浦功率的关系<sup>[98]</sup>  
Fig. 19 Output power of three kinds of TDFs versus launched pump power<sup>[98]</sup>

效率回升至 40.8%。

根据之前的报道来看,对于实验级光纤而言,光漂白的功率普遍在 mW 级别,但随着高能光纤激光器的逐步发展,对于 kW 级别的工业级光纤而言, mW 级别的光漂白难以实际应用。2019 年, Cao 等<sup>[99]</sup>提出使用 532 nm 光漂白可以降低掺镱光纤的 RIA,光纤经输出功率为 5 W 的 532 nm 光预处理 20 h(辐照总剂量为 395 Gy)后,RIA 降低了近 30%,如图 20 所示。

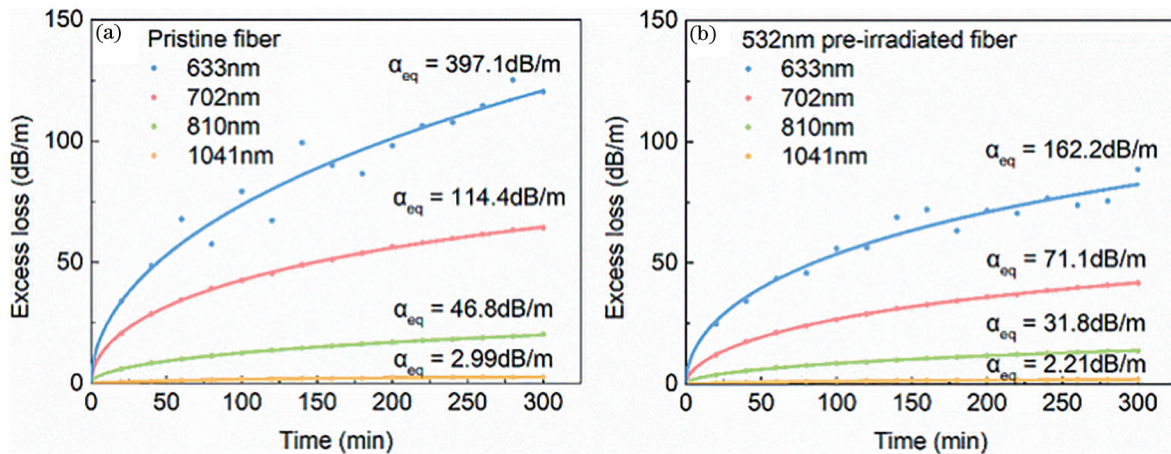


图 20 原始光纤与 532 nm 光预辐照光纤在 633, 702, 810, 1041 nm 处的光子暗化附加损耗<sup>[99]</sup>。(a) 原始光纤;(b) 532 nm 光预辐照光纤

Fig. 20 PD induced excess loss at 633, 702, 810, and 1041 nm for the pristine fiber and the 532 nm pre-irradiated fiber<sup>[99]</sup>.

(a) Pristine fiber; (b) 532 nm pre-irradiated fiber

此外,不同于 405 nm 激光,532 nm 光漂白不会产生额外的光子暗化效应,所以可以进一步提升光漂白效果,如图 21(a)所示。随后, Cao 等进行了 25 mW~5 W 泵浦功率的光漂白实验,结果表明,随着泵浦功率的增加,漂白速度加快,漂白 300 min 后

漂白率提高,且在 5 W 时达到 97%,如图 21(b)所示。这种优秀的光漂白能力有望使 532 nm 光应用在高功率抗辐照光纤领域。

综上,不同波长光的光漂白效果不同,在特定情况下可以完全消除辐照光纤的附加损耗,并且光

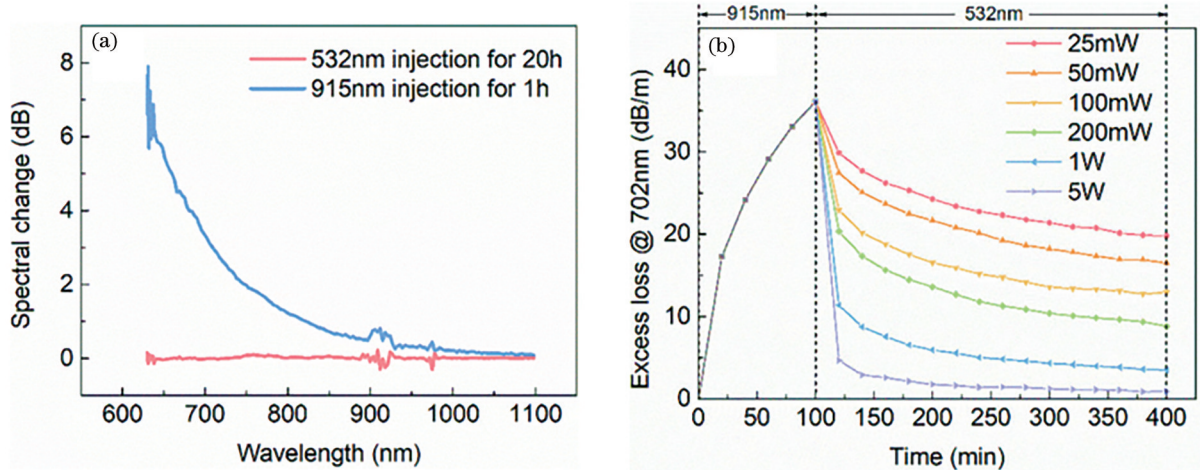


图 21 532 nm 激光注入对光纤性能的影响<sup>[99]</sup>。(a) 532 nm 和 915 nm 光注入对吸收谱的改变; (b) 532 nm 激光在不同泵浦功率下于 702 nm 处的光子暗化效应和光漂白效果

Fig. 21 Effect of 532 nm laser injection on optical fiber properties<sup>[99]</sup>. (a) Absorption spectra change for 532 nm and 915 nm injection; (b) PD and photo-bleaching evolution under different pump powers of 532 nm laser at 702 nm

漂白系统的搭建较为简单可行,是一种可靠的抗辐照手段。然而,目前对光漂白效应内在机理的解释尚未完全明确,后续研究的重心应放在其机理的解释上。

### 4.3 小结

有源光纤抗辐照的方式有很多,各种抗辐照手段均有优劣之处。采用光纤掺杂可较容易达到较好的抗辐照效果,但对制备工艺水平的要求较高。在实际制备过程中,由于工艺限制,难以准确控制各元素的实际掺杂量。另外,为了保证有源光纤的光学性能和抗辐照性能,探索各元素适宜比例的过程也需要时间与成本。载气操作

简单,是目前有源光纤最为有效的抗辐照手段,但只能保证一段时间内有源光纤的抗辐照性能,而且载入的气体会随着时间延长而不断减少,可以通过优化光纤结构来加以改善。不过,载入的气体也会带来额外损耗,会对有源光纤的光学性能造成一定影响。光漂白和热漂白在低剂量辐照环境下也是比较好的抗辐照手段,对光纤本身来说没有特殊要求。但是漂白一般要保证系统处于工作状态,而且要尽量选用对系统有利的波长,这样可以兼顾有源光纤的光学性能与抗辐照性能。表 8 总结了目前多种抗辐照手段的机理及优缺点。

表 8 目前多种抗辐照手段的机理及优缺点

Table 8 Mechanism, advantages and disadvantages of various anti-irradiation methods

Method	Mechanism	Advantage	Disadvantage
Ce co-doping	Valence change of Ce	Reduce both RIA and PD	Increase thermal effect and reduce laser efficiency
Adjust doping ratio	See 4.1.2	Simplicity of operator	Difficult to accurate proportion adjustment
Nanoparticules doping-process	Reduce Al co-doping and quenching level of Er	Reduce the Al related color center	Reduced fiber gain
Gas loading (H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> )	Reduce the corresponding point defects	Simplicity of operator, radiation-hardening effect is good	H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> outdiffuse with time easily, O <sub>2</sub> loading can produce peroxy defects and interstitial oxygen
Photobleaching / heat bleaching	Color centers absorb energy / heat to bleach (still in research)	Reduce both RIA and PD, easy to operate	Photobleaching requires the system to work, the heat bleaching temperature is too high

综上所述,在工艺成熟的前提下,在各种人工或者自然辐照环境中尽量采用多种抗辐照手段可能会达到更好的抗辐照结果。

## 5 结束语

随着太空探索及高能物理设施的发展,人们对

抗辐照有源光纤的性能提出了更高要求,探究通信及高能有源光纤的抗辐照机理成为未来有源光纤发展的重点。本文主要从三个方面详细阐述了稀土掺杂有源光纤在抗辐照方面的进展:1)有源光纤的抗辐照特性;2)有源光纤抗辐照特性的影响因素;3)有源光纤的抗辐照手段。有源光纤抗辐照特性的影响因素对抗辐照手段的改进具有参考意义,在实际的生产中需要给予综合考虑。抗辐照手段主要分为光纤掺杂、光纤处理及制备工艺,其中的光纤掺杂与光纤处理的使用与研究较多,但仍存在相当大的理论空白。

未来的研究可以从以下方面展开:1)从光纤的掺杂组分来看,有源光纤的重要掺杂成分是稀土离子,不同的稀土离子具有不同的特性,在具体实验过程中应当分别深入研究。例如,掺镱光纤的工作波长为  $1\ \mu\text{m}$ ,主要用于高功率方向,而掺铒光纤的工作波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,主要用于通信方向,掺铥光纤的工作波长为  $2\ \mu\text{m}$ ,主要用于探测方向,三种光纤的抗辐照技术的侧重方向不同,所以对特定稀土掺杂光纤要进行针对性的研究。此外,在确定了稀土掺杂成分之后,应探究共掺杂成分对光纤抗辐照性能的影响机制,尤其是常见的 Al、P、Ge 这三种共掺剂的相互作用机制。2)从光纤的抗辐照手段来看,掺杂特定元素以及载气都是较为简单可行的办法,纳米掺杂技术的抗辐照效果优异,但是对制备工艺的要求较高。掺杂元素的量取决于制备工艺,当前的制备工艺难以精准控制各个组分,所以改良制备工艺同样十分重要,在现有条件下结合多种抗辐照手段提高光纤的抗辐照性能或许是可行的。3)从抗辐照手段的可靠性来看,掺杂元素和载氧较为稳定,而载氢技术通常只能持续几个月。热漂白的温度较高,不利于光纤的稳定运行,同时光纤涂覆层在高温下易产生损伤,这都使得热漂白难以应用。在未来的抗辐照技术的应用中,不仅要考虑其性能,更要考虑其长期可靠性。4)从有源光纤辐照特性的影响因素来看,除了光纤本身的参数以外,还需要考虑涂覆层和应用环境的影响,许多研究侧重于玻璃基质而忽略了整体光纤的性能。在实际应用中整体光纤需要考虑的因素更为复杂,未来应重点研究各影响因素的内在作用机制,建立较为完善的辐照特性理论模型。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y B, Chen G, Li J Y. Development and prospect of high-power doped fibers[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e40.
- [2] Malik A, Singh P. Free space optics: current applications and future challenges[J]. International Journal of Optics, 2015, 2015: 1-7.
- [3] Skuja L. Optical properties of defects in silica[M]// Pacchioni G, Skuja L, Griscom D L. Defects in  $\text{SiO}_2$  and related dielectrics: science and technology, NATO science series. Dordrecht: Springer, 2000, 2: 73-116.
- [4] Leone M, Agnello S, Boscaino R, et al. Optical absorption, luminescence, and ESR spectral properties of point defects in silica[M]//Nalwa H S. Silicon-based material and devices. Amsterdam: Elsevier, 2001: 1-50.
- [5] Girard S, Kuhnhen J, Gusarov A, et al. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 2015-2036.
- [6] Henschel H, Kohn O, Schmidt H U, et al. Radiation-induced loss of rare earth doped silica fibres [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45 (3): 1552-1557.
- [7] Yao T F, Huang L J, Zhou P, et al. High-power double-cladding fiber lasers: a 30-year overview[J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 50(2): 123-135.
- [8] Wang S J, Zhang Z L, Cao C, et al. Nanosecond pulse laser output with average power of 761 W and pulse energy of 17.5 mJ based on domestic fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1215002. 王世杰, 张志伦, 曹驰, 等. 利用国产光纤实现平均功率 761 W、脉冲能量 17.5 mJ 纳秒脉冲激光输出 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1215002.
- [9] Wright M W, Valley G C. Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1369-1374.
- [10] Ma J, Li M, Tan L Y, et al. Experimental investigation of radiation effect on erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier for space optical communication in low-dose radiation environment[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15571-15577.
- [11] Ma J, Li M, Tan L Y, et al. Space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication[J]. Optik, 2010, 121(6): 535-538.
- [12] Brocklesby W S, Lincoln J R, Mathieu A, et al.



- Defect production in silica fibers doped with  $Tm^{3+}$ [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(24): 2105-2107.
- [13] Barnes N P, Walsh B M, Reichle D J, et al. Tm: fiber lasers for remote sensing[J]. *Optical Materials*, 2009, 31(7): 1061-1064.
- [14] Deng T. Study on radiation resistance properties of silica glass and silica optical fibre[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 4-6.  
邓涛. 石英玻璃及石英光纤的抗辐射性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 4-6.
- [15] Griscom D L. The natures of point defects in amorphous silicon dioxide[M]//Pacchioni G, Skuja L, Griscom D L. Defects in  $SiO_2$  and related dielectrics: science and technology, NATO science series. Dordrecht: Springer, 2000, 2: 117-159.
- [16] Devine R A B, Francou J M. Extrinsic- and intrinsic-defect creation in amorphous  $SiO_2$ [J]. *Physical Review B*, 1990, 41(18): 12882-12887.
- [17] Griscom D L. Optical properties and structure of defects in silica glass[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 1991, 99(1154): 923-942.
- [18] Muller C, Lépine T, Allanche T, et al. Extrapolated degradation of optical systems at MGy levels due to radiation-induced refractive index change[C]//2017 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), October 2-6, 2017, Geneva, Switzerland. New York: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [19] Girard S, Alessi A, Richard N, et al. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers[J]. *Reviews in Physics*, 2019, 4: 100032.
- [20] Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, 239(1/2/3): 16-48.
- [21] Richard N, Martin-Samos L, Girard S, et al. Oxygen deficient centers in silica: optical properties within many-body perturbation theory[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, 25(33): 335502.
- [22] Skuja L, Hirano M, Hosono H. Oxygen-related intrinsic defects in glassy  $SiO_2$ : interstitial ozone molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(2): 302.
- [23] Skuja L, Kajihara K, Hirano M, et al. Visible to vacuum-UV range optical absorption of oxygen dangling bonds in amorphous  $SiO_2$ [J]. *Physical Review B*, 2011, 84(20): 205206.
- [24] Winkler B, Martin-Samos L, Richard N, et al. Correlations between structural and optical properties of peroxy bridges from first principles[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(7): 4002-4010.
- [25] Sousa C, de Graaf C, Pacchioni G. Optical properties of peroxy radicals in silica: multiconfigurational perturbation theory calculations[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2001, 114(14): 6259-6264.
- [26] Kashaykin P F, Tomashuk A L, Salgansky M Y, et al. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica optical fibers at different temperatures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(21): 213104.
- [27] de Michele V, Morana A, Campanella C, et al. Steady-state X-ray radiation-induced attenuation in canonical optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(7): 1650-1657.
- [28] Awazu K, Kawazoe H, Yamane M. Simultaneous generation of optical absorption bands at 5.14 and 0.452 eV in 9  $SiO_2:GeO_2$  glasses heated under an  $H_2$  atmosphere[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(6): 2713-2718.
- [29] Neustruev V B. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1994, 6(35): 6901-6936.
- [30] Girard S, Baggio J, Bisutti J. 14-MeV neutron,  $\gamma$ -ray, and pulsed X-ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(6): 3750-3757.
- [31] Skuja L, Naber A. Site-selective luminescence study of defects in gamma-irradiated glassy germanium dioxide[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 1996, 116(1/2/3/4): 549-553.
- [32] di Francesca D, Girard S, Agnello S, et al. Radiation response of ce-codoped germanosilicate and phosphosilicate optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 63(4): 2058-2064.
- [33] Hideo H, Hiroshi K. Radiation-induced coloring and paramagnetic centers in synthetic  $SiO_2:Al$  glasses[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1994, 91(1/2/3/4): 395-399.
- [34] Dardaillon R, Lancry M, Myara M, et al. Radiation-induced absorption and photobleaching in erbium Al-Ge-codoped optical fiber[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(29): 14326-14335.
- [35] Hanafusa H, Hibino Y, Yamamoto F. Formation mechanism of drawing-induced  $E'$  centers in silica optical fibers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985,

- 58(3): 1356-1361.
- [36] Hanafusa H, Hibino Y, Yamamoto F. Drawing condition dependence of radiation-induced loss in optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(2): 106-108.
- [37] Yin Z, Jaluria Y. Neck down and thermally induced defects in high-speed optical fiber drawing[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2000, 122(2): 351-362.
- [38] Chen C M, Jaluria Y. Effects of doping on the optical fiber drawing process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21/22): 4812-4822.
- [39] Origlio G, Cannas M, Girard S, et al. Influence of the drawing process on the defect generation in multistep-index germanium-doped optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(15): 2282-2284.
- [40] Alessi A, Girard S, Marcandella C, et al. X-ray irradiation effects on a multistep Ge-doped silica fiber produced using different drawing conditions[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(8/9): 1966-1970.
- [41] Alessi A, Girard S, Cannas M, et al. Evolution of photo-induced defects in Ge-doped fiber/preform: influence of the drawing[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11680-11690.
- [42] Alessi A, Girard S, Marcandella C, et al. Raman investigation of the drawing effects on Ge-doped fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(1): 24-27.
- [43] Alessi A, Girard S, Cannas M, et al. Influence of drawing conditions on the properties and radiation sensitivities of pure-silica-core optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(11): 1726-1732.
- [44] Girard S, Marcandella C, Alessi A, et al. Transient radiation responses of optical fibers: influence of MCVD process parameters[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(6): 2894-2901.
- [45] Wijnands T, Aikawa K, Kuhnenn J, et al. Radiation tolerant optical fibers: from sample testing to large series production[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(22): 3393-3400.
- [46] Kashaykin P F, Tomashuk A L, Salgansky M Y, et al. Radiation-induced attenuation in silica optical fibers fabricated in high O<sub>2</sub> excess conditions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1788-1793.
- [47] Brichard B, Borgermans P, Fernandez A F, et al. Radiation effect in silica optical fiber exposed to intense mixed neutron-gamma radiation field[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, 48(6): 2069-2073.
- [48] Brichard B, Fernandez A F, Berghmans F, et al. Origin of the radiation-induced OH vibration band in polymer-coated optical fibers irradiated in a nuclear fission reactor[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(6): 2852-2856.
- [49] Gusarov A, Chojetzki C, McKenzie I, et al. Effect of the fiber coating on the radiation sensitivity of type I FBGs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(21): 1802-1804.
- [50] Curras E, Virto A L, Moya D, et al. Influence of the fiber coating type on the strain response of proton-irradiated fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(4): 937-942.
- [51] Blanchet T, Morana A, Laffont G, et al. Radiation effects on type I fiber Bragg gratings: influence of recoating and irradiation conditions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 998-1004.
- [52] Mélin G, Guitton P, Montron R, et al. Radiation resistant single-mode fiber with different coatings for sensing in high dose environments[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(7): 1657-1662.
- [53] Liu S, Zheng S P, Yang K, et al. Radiation-induced change of OH content in Yb-doped silica glass[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(6): 060602.
- [54] Girard S, Marcandella C, Morana A, et al. Combined high dose and temperature radiation effects on multimode silica-based optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(6): 4305-4313.
- [55] Alessi A, di Francesca D, Girard S, et al. Effect of irradiation temperature on the radiation induced attenuation of Ge-doped fibers[C]//16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), September 19-23, 2016, Bremen, Germany. New York: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [56] Campanella C, Morana A, Girard S, et al. Combined temperature and radiation effects on radiation-sensitive single-mode optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(7): 1643-1649.
- [57] Zotov K V, Likhachev M E, Tomashuk A L, et al. Radiation resistant Er-doped fibers: optimization of pump wavelength[J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 2008, 20(17): 1476-1478.
- [58] Chi J J, Jiang S Q, Zhang L, et al. Experimental study on radiation performance of fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061406. 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(6): 061406.
- [59] Sheng Y B, Yang L Y, Luan H X, et al. Improvement of radiation resistance by introducing CeO<sub>2</sub> in Yb-doped silicate glasses[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, 427(1/2/3): 58-61.
- [60] Shao C Y, Xu W B, Ollier N, et al. Suppression mechanism of radiation-induced darkening by Ce doping in Al/Yb/Ce-doped silica glasses: evidence from optical spectroscopy, EPR and XPS analyses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(15): 153101.
- [61] Ladaci A, Girard S, Mescia L, et al. Radiation hardened high-power Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped fiber amplifiers for free-space optical communications[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3049-3052.
- [62] Vivona M, Girard S, Robin T, et al. Influence of Ce<sup>3+</sup> codoping on the photoluminescence excitation channels of phosphosilicate Yb/Er-doped glasses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(6): 509-511.
- [63] 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.
- [64] 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[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(6): 2466-2489.
- [65] Zhao N. The study on photo-darkening effect in ytterbium doped high power fiber lasers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 52-59. 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: 52-59.
- [66] 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.
- [67] Girard S, Ouerdane Y, Vivona M, et al. Radiation effects on rare-earth doped optical fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7817: 78170I.
- [68] 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(9): 093001.
- [69] DiGiovanni D J, MacChesney J B, Kometani T Y. Structure and properties of silica containing aluminum and phosphorus near the AlPO<sub>4</sub> join[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1989, 113(1): 58-64.
- [70] Deschamps T, Vezin H, Gonnet C, et al. Evidence of AlOHC responsible for the radiation-induced darkening in Yb doped fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8382-8392.
- [71] Shao C Y, Ren J J, Wang F, et al. Origin of radiation-induced darkening in Yb<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup>/P<sup>5+</sup>-doped silica glasses: effect of the P/Al ratio[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018, 122(10): 2809-2820.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] Thomas J, Myara M, Troussellier L, et al. Radiation-resistant erbium-doped-nanoparticles optical fiber for space applications[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2435-2444.
- [76] Stone J. Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers: a review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(5): 712-733.
- [77] 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.
- [78] Girard S, Agnello S, Cannas M, et al. Transient and steady-state radiation response of phosphosilicate optical fibers: influence of H<sub>2</sub> loading[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(1): 289-295.
- [79] 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(1/2/3): 142-148.
- [80] Zotov K V, Likhachev M E, Tomashuk A L, et al. Radiation-resistant erbium-doped fiber for spacecraft applications[C]//9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, September 10-14, 2007, Deauville, France. New York: IEEE Press, 2007: 1-4.
- [81] 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.
- [82] Xing Y B, Liu Y Z, Zhao N, et al. Radical passive bleaching of Tm-doped silica fiber with deuterium[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1075-1078.
- [83] Shao C Y, Jiao Y, Lou F G, et al. Enhanced radiation resistance of ytterbium-doped silica fiber by pretreating on a fiber preform[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(2): 408-420.
- [84] 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.
- [85] di Francesca D, Agnello S, Girard S, et al. Influence of O<sub>2</sub>-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.
- [86] di Francesca D, Agnello S, Girard S, et al. O<sub>2</sub>-loading treatment of Ge-doped silica fibers: a radiation hardening process[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2311-2316.
- [87] Ramsey A T, Tighe W, Bartolick J, et al. Radiation effects on heated optical fibers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 632-635.
- [88] Jasapara J, Andrejco M, DiGiovanni D, et al. Effect of heat and H<sub>2</sub> gas on the photo-darkening of Yb<sup>3+</sup> fibers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006: 1-2.
- [89] Basu C, Yoo S, Boyland A J, et al. Influence of temperature on the post-irradiation temporal loss evolution in Yb-doped aluminosilicate fibers, photodarkened by 488 nm CW irradiation[C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2009, June 14-19, 2009, Munich Germany. Washington D.C.: OSA, 2009: CJ1\_2.
- [90] Söderlund M J, Montiel i Ponsoda J J, Koplów J P, et al. Heat-induced darkening and spectral broadening in photodarkened ytterbium-doped fiber under thermal cycling[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 9940-9946.
- [91] Li M. The study on the suppression of photodarkening in high power fiber[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 69-73.  
李森. 高功率光纤中光子暗化效应的抑制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018: 69-73.
- [92] Liu Y Z, Xing Y B, Chen G, et al. Thermal bleaching of photodarkening and heat-induced loss and spectral broadening in Tm<sup>3+</sup>-doped fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21845-21853.
- [93] Friebele E J, Gingerich M E. Photobleaching effects in optical fiber waveguides[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(19): 3448-3452.
- [94] Manek-Hönninger I, Bouillet J, Cardinal T, et al. Photodarkening and photobleaching of an ytterbium-doped silica double-clad LMA fiber[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1606-1611.
- [95] Guzman Chávez A D, 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.
- [96] Gebavi H, Taccheo S, Lablonde L, et al. Mitigation of photodarkening phenomenon in fiber lasers by 633 nm light exposure[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 196-198.
- [97] Piccoli R, Gebavi H, Taccheo S, et al. Photodarkening mitigation in Yb-doped fiber lasers by 405 nm irradiation[C]//Advanced Solid State Lasers 2013, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington D.C.: OSA, 2013: AM2A.6.
- [98] Xing Y B, Huang H Q, Zhao N, et al. Pump bleaching of Tm-doped fiber with 793 nm pump source [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 681-684.
- [99] Cao R T, Lin X F, Chen Y S, et al. 532 nm pump induced photo-darkening inhibition and photobleaching in high power Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26523-26531.