深空辐射条件下 EDFA 波分复用性能研究

柳青峰^{1,2},李 博^{1,2},康冬鹏^{1,2},杨清波^{1,2},马 晶^{1,2},谭立英^{1,2},于思源^{1,2},赵 生^{1,2},王 洪^{1,2} (1.哈尔滨工业大学航天学院,哈尔滨150001; 2.哈工大卫星激光通信股份有限公司,哈尔滨150028)

摘 要:随着对空间试验卫星光通信系统数据容量需求的逐年增加,空间波分复用技术将成为拓展通信容量的有效手段,需要研究掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)波分复用特性在深空辐射条件下的性能变化情况。研究了深空辐射及温度场对 EDFA 的性能影响、非均匀特性,建立了深空辐射条件下 EDFA 的波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术信号之间的增益影响模型,给出了增益的非均匀变化影响的评估方法。 并分别采用电子和中子作为辐射源,进行了地面模拟深空辐射环境的辐射电离效应和辐射位移效应实验,实验结果进 一步验证了该模型正确性。利用该模型,可获得深空辐射环境中,不同辐射类型、不同温度下,EDFA 在 WDM 应用时 各波长增益的非均匀特性,可为深空光通信中 EDFA 的 WDM 应用提供参考。

关键词: 深空辐射; 卫星光通信; EDFA; 波分复用

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号:2095-7777(2019)06-0545-08 **DOI**:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.06.005

引用格式:柳青峰,李博,康冬鹏,等.深空辐射条件下EDFA波分复用性能研究[J].深空探测学报,2019, 6 (6): 545-552.

Reference format: LIU Q F, LI B, KANG D P, et al. Research on EDFA wavelength division multiplexing performance under deep space radiation[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (6): 545-552.

引 言

国外正逐渐将地面成熟应用的掺铒光纤放大器 (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) 波分复用技 术推广至空间应用,在深空辐射条件下若仅仅从单一 波长的角度来分析 EDFA 的性能变化将无法跟上这一 迫切发展趋势。波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)¹¹¹技术,是一种在光域上的复用技 术,将几个不同的标称波长或光信道信号通过 WDM 耦合器复用在一个信道中进行空间传输,WDM 技术 可有效拓展原有卫星光通信的传输数据率。

目前各国在进行空间试验卫星光通信系统中,一 般仅采用单通道模式,随着对存储数据容量大大增加 的需求,空间波分复用技术将成为拓展通信容量的有 效手段,因此需要研究EDFA波分复用特性在深空辐 射条件下的性能变化情况。

2013年,Fox等对一系列铒镱共掺光纤样品进行 了18个月的国际空间站在轨试验,主要研究色心产 生后辐射对样品的可见光至近红外光谱的影响,结果 表明:由于共掺技术相对于掺杂一种稀土元素而引入 更少的铝元素,色心产生的可见光吸收和近红外吸收 较小,并通过地面辐射源 Co⁶⁰产生的 Gamma 射线验 证了这一辐射致色心吸收现象^[2]。

2014年,Girard S小组通过实验研究了新型结构 (Hole-Assisted Carbon Coated,HACC)的掺铒光纤 对辐射的耐受能力,在辐射速率为0.15 rad/s,辐射 总剂量为100 krad时,增益只下降了1.7%,通过实验 测试和仿真分析,采用该结构的掺铒光纤大大提高耐 辐射性能^[3-5]。

不同掺杂材料的光纤放大器的抗辐射特性不同, 其中Yb³⁺的存在会降低掺铒光纤辐射下的性能,从而 使得铒镱共掺光纤放大器的辐射性能明显弱于掺铒光 纤放大器^[6];采用EDFA 黑匣子模型的多波长 EDFA 辐射增益特性的测试方法,大幅度提高测试的效率, 解决了测试时间对分析多波长 EDFA 辐射增益特性的 限制^[6-13]。

尽管国内外对EDFA 在空间环境中,针对不同辐射源、不同剂量率、不同温度场进行了大量的辐射实

收稿日期: 2019-8-6 修回日期: 2019-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61705053);中国博士后科学基金资助项目(2016M600249);黑龙江省博士后特别资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

验^[1417],但以上研究内容均未涉及波分复用的各通道特性与深空辐射的关系,而在EDFA进行WDM应用时,增益谱的平坦特性^[18-19]也是尤为重要的。

本文首先研究卫星光通信系统采用波分复用技术 时,深空辐射及温度场对EDFA的性能影响、非均匀 特性,建立深空辐射条件下EDFA的WDM信号之间 的增益影响模型,给出了温度、辐射等变化对EDFA 波分复用信号增益的非均匀变化影响的评估方法。在 深空辐射环境的各类粒子中,由于电子更能体现出对 靶材的电离效应,而中子不带电荷,更能体现出对靶 材的位移效应,为了更详细地研究EDFA的深空辐射 性能变化规律,分别采用电子和中子作为辐射源,进 行地面模拟深空辐射环境的辐射电离效应和辐射位移 效应实验,测试EDFA波分复用信号的变化情况,建 立深空辐射条件下EDFA的WDM信号之间的增益影 响模型,并通过实验结果进一步验证该模型与实验结 果的一致性。

1 原理分析

在深空辐射条件下掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)产生的色心^[20],对全谱范围内的传输光 均产生一定的吸收^[21],一部分吸收能量引起晶格振动 最终以热量形式释放出来^[22]。光通信卫星链路中不能 像地面一样进行中继放大,所以对通信发送端的光功 率要求较大,功率一般为10 dBm以上。若泵浦效率 为10%时,其对应的泵浦光至少为100 dBm,当如此 高功率的泵浦在EDF中传输时,色心吸收产生的热 量积累会导致EDF内部温度升高,甚至烧毁EDFA。

若单通道信号传输光功率为P_{single},则N路WDM 信号传输时,对应的传输光功率P_{WDM}为

$$P_{\rm WDM} = N \times P_{\rm single} \tag{1}$$

在变化的温度场中,考虑Er³⁺能级的Stark分裂, 温度对EDFA中参与工作的Er³⁺能级粒子数分布满足 波尔兹曼统计规律。图1为980 nm泵浦EDFA的铒离 子Stark能级分布。

温度较高时,改变了各分裂能级粒子数分布权 重,由此产生了更多的基级向工作能级激发,即带内 激发,吸收了更多的较短波长的放大光,并将吸收的 能量传递给较长的波长,从而在高温时,较长波长的 信号放大幅度较大,低温时,较短波长的信号放大幅 度较大。

铒离子在1550 nm 光放大能级和基态能级吸收^[23],如图2所示。铒离子在1550 nm 光放大能级和基态能级发射如图3所示。





注: 阴影处表示不同的能级在室温下的玻尔兹曼统计分布



图2 能级 Stark 分裂下的铒离子能级 $I_{15/2}$ 和能级 $I_{13/2}$ 吸收示意图 ^[23] Fig. 2 Energy diagram showing the Stark components of the $I_{15/2}$ and $I_{13/2}$ manifolds and the assignment of observed absorption transitions ^[23]



图 3 能级 Stark 分裂下的铒离子能级 $I_{15/2}$ 和能级 $I_{13/2}$ 发射示意图 ^[23] Fig. 3 Energy diagram showing the Stark components of the $I_{15/2}$ and $I_{13/2}$ manifolds and the assignment of observed fluorescence transitions ^[23]

下面研究不同温度下 EDFA 对1 530~1 560 nm 宽带光源的响应情况,试验结果如图4所示,图4中的高温对应的是+85 ℃,低温对应的是-170 ℃。

由图4可知,低温时对宽带光源的短波长附近产 生一定的吸收,并将吸收的能量传递给较长波长,在 EDFA内部形成带内泵浦,给长波带来一定的增大作 用。这种增益随波长变化的情况可影响WDM接收系 统中信号处理的动态响应。掺铒光纤处于深空辐射环 境中时,其内部的色心吸收和退化的过程将对应更多 的吸收发射能级,辐射后增益变化更加明显。



at different temperature

目前光卫星通信系统设计中,只能实现路数较少的波分复用,比如两路或者四路波分复用。在此情况下,为了计算简单,考虑在1550 nm 附近的一小段波长区间内,可认为深空辐射对其带内能量传递的影响是近似线性的。

基于这种近似,为了得到波分复用时各波长的增益关系,本文定义了在深空辐射环境中变化温度场作用下EDFA的信道增益斜率SwpM

$$S_{\rm WDM} = C \times \frac{\Delta G_{\lambda} (S_7, S_{\beta})}{(N-1)\Delta\lambda}$$
(2)

其中: ΔG_{λ} 为最短与最长有效波长对应增益的差值; N为WDM中的有效波长个数; $\Delta \lambda$ 为WDM中各有效 波长的波长间隔; *C*为待定斜率修正常数; *S*_β为辐射 斜率因子。

考虑不同信道增益的差分关系对应的斜率,掺铒 光纤形成色心的吸收带特征与硅基的石英晶体辐射致 色心的吸收带特征相似,因此掺铒光纤的微观结构可 近似按照石英晶体的晶格理论进行研究^[24-25]。

为了描述不同辐射速率下的EDFA特性变化,并 同时考虑掺铒光纤中的色心效应,从辐射场对硅基氧 化物材料色心产生的原理出发^[24-25],得到

$$\frac{\mathrm{d}Ncs}{\mathrm{d}t} = N_p b \dot{D} - A_N \tag{3}$$

$$A_N = \frac{c}{\tau_a^c} t^{c-1} N_{CS}^{\omega}(T) \tag{4}$$

其中: N_P 为掺铒光纤中固有的缺陷个数; D为辐射速 率; A_N 为掺铒光纤制造工艺或者外界因素引起的色 心退化项; N_{CS} 为辐射对掺铒光纤作用时产生的色心 数量; T为辐射对掺铒光纤作用时的温度相关量; τ_a 为掺铒光纤制造工艺或者外界因素引起的色心退化时 间; b, c, ω 为待定常量。 辐射与损耗成正比的关系和辐射与近红外波段的 损耗关系,可近似认为 ΔG_{λ} (S_{β}) $\sim \lambda D$, S_{T} 为温度 斜率因子。

石英晶格在受到温度场作用后产生振动,使得色 心退化概率增大,按照统计力学理论符合麦克斯韦-波尔兹曼统计概率分布为

$$p = e^{-\frac{1}{K_B T}} \tag{5}$$

其中: *p*为掺铒光纤受温度影响的概率; *K*_B为波尔兹 曼常数; *T*为绝对温度。

将式(5)按照Taylor级数展开

$$p = 1 - \frac{1}{K_B T} + \Delta p \tag{6}$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{K_B T} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{1}{K_B T} \right)^3 + \frac{1}{24} \left(\frac{1}{K_B T} \right)^4 - \dots$$
(7)

若将 Δp 忽略,即考虑 Δp 为无穷小量,式(6)为1-(1/ K_BT)。

实际上Δ*p*是不能忽略的,下面对低阶量Δ*p*进行 修正,为使问题简便,将本底影响设为常量,同时考 虑温度场对晶格产生热激发作用使得材料更易受到外 界条件影响,导致辐射敏感性的增加,加入修正系数 *f*,因此可以得到,掺铒光纤在辐射条件下的损耗与 工作温度的概率关系为

$$P = \frac{f}{K_B T} \tag{8}$$

对于 S_{WDM} ,考虑信道增益斜率与不同信道增益 的差分有关,近似认为 ΔG_{λ} (S_T) ~ ($T - T_0$)², T_0 为与应用环境有关的温度量。

将上述简化过程代入式(2)中,可得深空辐射 环境中变化温度场作用下EDFA的信道增益斜率函数 Swpm为

$$S_{\rm WDM} = C \times \frac{\lambda D \left(T - T_0\right)^2}{(N - 1)\Delta\lambda}$$
(9)

其中: T₀为起始温度常数。

可以看出,式(9)给出了EDFA中WDM信号 之间的增益关系,因此又可定义它为增益影响模型。 该模型描述了EDFA中,WDM各信号对应增益的非 均匀性程度。

在空间采用波分复用技术时,在复用波长数较少的情况下,信道中各信号增益具有一定的线性比例关系,是空间温度场和辐射场的函数。

当温度选择适当时,信道中各信号增益大小相当, *S*_{WDM} 接近于 0 dB/nm。*S*_{WDM} 不等于 0 时,若 |*S*_{WDM}|<0.1 dB/nm,可认为温度和辐射对通信接收系 统各信号增益的均匀性影响可忽略,反之亦然。当 |S_{WDM}|很大时,信道增益斜率函数反映了WDM信道 中各信号的不均匀性,可导致通信接收系统的动态响 应范围变小,为卫星激光通信系统最优温度阈值控制 设计提供了理论依据。

2 建立实验

上一节给出了在深空辐射环境及变化温度场作用 下,建立的EDFA中WDM信号之间的增益影响模 型。为验证该模型的正确性,给出高能电子辐射后的 实验验证结果,实验装置如图5~6所示。



图 5 实验中的波分器照片 Fig. 5 The photo of wave divider in experiment





在 EDFA 输入端接入 WDM 信号,该 WDM 信号 由 C 放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)宽带光源产生,经过光纤光栅波分器后进入耦 合器,由耦合器输出至 EDFA 输入端。

耦合器输出至EDFA输入端的信号质量较好,信 噪比较高,如图7所示,作为本次实验可以认为是较 理想的WDM信号,波长间隔为1.6 nm。

对 EDFA 在辐射前进行本底测试,如图 8 所示。 本底测试后的 WDM 信号随温度变化如图 9 所示。在 高温时,较长波长的信号得到了更大的放大,但增大 趋势不明显。而在低温时,较长波长的信号放大幅度 有较大的衰减。





3 实验验证

在空间辐射环境的各类粒子中,电子更能体现出 对靶材的电离效应,而中子不带电荷,更能体现出对 靶材的位移效应,为了更详细地研究EDFA的空间辐 射性能变化规律,本文分别采用电子和中子作为辐射 源,进行地面模拟空间辐射环境的辐射电离效应和辐 射位移效应实验,验证空间辐射条件下 EDFA 的 WDM 信号之间的增益影响模型。

1) 电子试验验证

电子辐射实验主要参数:电子能量为1.0 MeV, 束流 1~2 μ A,测试板面积 70 cm²,扫描宽度 50 mm,辐射样品距扫描盒 300 mm;辐射实验精度:在 试验范围内扫描不均匀度小于±5%,能量不稳定度小 于±5%,束流积分仪最大测量误差±2%。

对电子辐射实验后的 EDFA 进行 WDM 信号测 试,EDFA 输入端的信号光如图 8 所示,辐射后的 WDM 输出信号在不同温度下的表现如图 10 所示,经 EDFA 放大后的 WDM 输出信号均有所衰减,各信号 衰减幅度大致相同,高温时,较长波长的信号放大幅 度较大,低温时,较短波长的信号放大幅度较大,与 辐射前的规律相同。





由图 10 可知,辐射后各信号对温度变化更加敏 感,不同温度下辐射对 EDFA 中的各光波长放大的影 响相差较大,辐射前后 WDM 各信号对应的峰值波长 未发生明显变化,仿真曲线与实测数据符合较好,信 号波长越大,对温度敏感性越大。产生这一现象的原 因是铒离子对宽带光源的短波长附近产生一定的吸 收,并将吸收得能量传递至较长的波长,在EDFA内 部形成带内泵浦,并给长波长信号带来一定的放大, 与低温时相比,铒离子在高温时各能级产生展宽,基 态能级中分裂的较高的 Stark 能级其粒子数较低温时 更多,在 EDFA 内部更易发生带内泵浦,对长波长信 号的放大更多。利用信道增益斜率公式可以很好的描 述空间在不同温度场中电离辐射对增益影响的不均衡 性质。

从实验结果可以得出:利用信道增益斜率公式建

立的深空辐射环境中变化温度场作用下 EDFA 的WDM 中各波长增益关系,只要测量辐射条件下的一组WDM 信号的各波长增益数据,即可外推出在该辐射条件下,变化温度场对 EDFA 中 WDM 信号性能的影响。

2) 中子试验验证

中子辐射待辐射样品为980 nm泵浦的EDFA, 位 于高能中子脉冲反应堆旁,辐射源中子能量平均为 1 MeV,辐射通量为1.5×10¹³ n/cm²,辐射时间为7 d。

高能中子对 EDFA 增益损耗影响实验过程为: EDF(6个裸纤样品)放置在中子反应堆附近,保证 6个样品同时受到均匀的辐照。本次实验为离线测 试,输入信号光功率可通过可变光衰减器进行控制, EDFA的特性变化将通过光谱仪测量。中子辐射后, 通过测量辐射导致的EDFA 增益变化与输入信号光功 率、泵浦光功率的关系,并与辐射之前的结果相比。 在本次实验中6个商用EDF 样品的参数一致,EDF1 样品裸纤参数见表1,EDF1 辐射前后参数变化情况 如表2所示。

表1 EDF1样品裸纤参数 Table 1 The parameter of original EDF sample

参数名称	数 值	
Absorption@1 558 nm/(dB \cdot m ⁻¹)	4.5	
Absorption@1 530 nm/(dB \cdot m ⁻¹)	12.57	
Absorption@980 nm/($dB \cdot m^{-1}$)	9.28	
Er3+ dose density/m ⁻³	12.33×10 ²⁴	
Cut-off wavelength/nm	940	
NA.	0.244	
$\Delta n(1.550 \text{ nm})$	0.020 3	
Core Diameter/µm	1.47	

表2 EDF1 辐射前后参数变化情况 Table 2 Characteristic change of EDF sample 1 before and

after irradiation		
测试条件	辐射前	辐射后
温度/K	296	296
信号宽度/nm	0.013	0.013
峰值波长/nm	1 549.844	1 549.936
峰值功率/dBm	10.4	10.32
平均波长/nm	1 549.841	1 549.936

针对EDFA的波分复用技术进行高能中子辐射效应研究,实验中将ASE平坦宽带光源输出的信号光通过波分器,分成中心波长间距为1.6 nm的信号光,依然选取中心波长1547.7、1549.3、1550.9、

1 552.5 nm的4束信号光,再将4束信号光通过耦合 器耦合成1束梳状信号光输入中子辐射后掺铒光纤制 作的EDFA,经中子辐射后掺铒光纤制作的EDFA放 大后输入高精度光谱分析系统AQ6317C输出光谱。 图11为在满功率泵浦条件下,高能中子辐射前后的 WDM图形,WDM的输入信号见图8。



图 11 辐射前后 EDFA 输出的 WDM 信号 Fig. 11 The output WDM signal of EDFA before and after irradiation

将图 11 中的各 WDM 信号的峰值区域进行放大, 如图 12 所示,将辐射实验条件代入己推导的 EDFA 的 信道增益斜率模型,并绘制模型计算的增益斜线。



Fig. 12 The output WDM signal relationship of EDFA before and after irradiation

从图 12 可知,辐射前后 EDFA 输出的 WDM 信号 经放大后各信号波长保持恒定,对应的放大信号功率 变化不大,辐射导致的平均吸收损失 0.6 dB,单个波 长的光信号与 WDM 信号的最大差异分别为 0.5 dB 和 0.6 dB,各信号峰值功率几乎没有改变。产生此种现

象的原因是由于反应堆的中子能量较小,在辐射位移 实验过程中,EDF内部未能产生足够多的位移缺陷, 同时中子在EDF中的二次电离效应不明显。仿真曲 线与实测数据符合较好,利用信道增益斜率模型可以 描述深空辐射中辐射位移效应增益的不均衡性质。

4 结 论

利用信道增益斜率公式建立的深空辐射环境中变 化温度场作用下 EDFA 的 WDM 中各波长的增益关 系,即可研究深空辐射环境中两种最主要的辐射效应 为辐射电离效应和辐射位移效应对 EDFA 中 WDM 信 号的影响,只要测量辐射条件下的一组 WDM 信号的 各波长的增益数据,即可外推出在该辐射条件下,变 化温度场对 EDFA 中 WDM 信号性能的影响。

利用该模型,可获得深空辐射环境中,不同的辐射类型、不同的温度下,EDFA在WDM应用时各波长增益的非均匀特性,为卫星光通信中EDFA的WDM应用提供参考。

参考文献

- MENG X, SONGNIAN F, MING T, et al. Nyquist WDM superchannel using offset-16QAM and receiver-side digital spectral shaping[J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17448-17457.
- [2] FOX B P, SIMMONS-POTTER K, KLINER D A V, et al. Effect of low-Earth orbit space on radiation-induced absorption in rare-Earthdoped optical fibers[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2013, 378 (11):79-88.
- [3] GIRARD S, LAURENT A, PINSARD E, et al. Proton irradiation response of hole-assisted carbon coated erbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6): 3309-3314.
- [4] 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.
- [5] GIRARD S, LAURENT A, PINSARD E, et al. Radiation-hardened erbium-doped optical fibers and amplifiers for future high-dose space missions[C]//SPIE LASE. San Francisco, United States: International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [6] MA J, LI M, TAN L Y, et al. Investigation of the irradiation effect on erbium-doped fiber amplifiers composed by different density erbiumdoped fibers[J]. Laser Physics, 2009, 19(1): 138-142.
- [7] LI M, MA J, TAN L Y, et al. A new simple model for EDFA incorporated in the irradiated environment for inter-satellite optical communication[J]. Journal of Russian Laser Research, 2008, 29(3): 262-267.
- [8] LI M, MA J, TAN L Y, et al. Active measuring method for investigating the irradiation effect on the gain characteristics of an erbium-doped fiber amplifier in inter-satellite optical communication [J]. Journal of Russian Laser Research, 2009, 30(6):583-590.

- [9] MA J, LI M, TAN L Y, et al. Space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication[J]. Optik: International Journal for Light and Electron Optics, 2010, 121(6):535-538.
- [10] LI M, MA J, TAN L Y, et al. Radiation effect on EDFA for intersatellite optical communication on low dose orbits[C]//Proceedings of SPIE. [S.I]:SPIE,2008.
- [11] 李密,马晶,谭立英,等.光卫星通信中辐射对光纤放大器的性能 影响分析[J].中国激光,2009,35(S2):42-45.
- [12] 李密,于思源,马晶,等. 新型衬底开槽结构的LiNbO3波导强度调制器设计分析[J]. 中国激光,2008,35(3):410-413.
 LI M,YU SY,MA J, et al. Research on the design of LiNbO3 waveguide intensity modulator with a new back slot structure[J]. Chinese Journal of Lasers,2008,35(3):410-413.
- [13] 马晶,李密,谭立英,等.光卫星通信中空间辐射对EDFA性能的影响分析[J]. 宇航学报,2009,30(1):250-254.
 MA J,LI M,TAN L Y, et al. Analysis of the space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication[J]. Journal of Astronautics,2009,30(1):250-254.
- [14] LIU Q F, MA J, TAN L Y, et al. Experimental study of the temperature and electron-irradiation effect on erbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of Russian Laser Research, 2013, 34 (3) : 226-229
- [15] MA J, LIU Q F, TAN L Y. Experimental investigation of neutron irradiation effect on silica-based erbium-doped fiber amplifier[J]. Advanced Materials Research, 2013(679):59-62.
- [16] MA J, LIU Q F, ZHOU Y P, et al. Simulation approach for the design of radiation-hardened Erbium doped fiber amplifiers[C]//Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. Beijing: SPIE, 2013.
- [17] LIU Q F, MA J, TAN L Y, et al. Experimental investigation of gamma ray radiation effects on 1 500 nm single mode fiber[C]// Proceedings of the Photoelectronic Technology Committee Conferences. Beijing: Chinese Society of Astronautics 2014.
- [18] SHEN J L, HUANG H M, LEE Y C, et al. Improved automatic filtered power control pumping method for uniform short pass band in optical fiber communications[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009, 30(1):44-50.
- [19] 于岭,张昊,刘艳格,等.一种超宽带掺铒光纤放大器的实验研究[J].南开大学学报:自然科学版,2006,39(1):70-73.

YU L, ZHANG H, LIU Y G, et al. Experimental study on a broadband erbium-doped fiber amplifier[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition), 2006, 39(1): 70-73

- [20] YASHIMA H, MITERA H, ITOH Y. Radiation-induced loss and colour-centre concentration in optical fibres[J]. Electronics Letters, 1983,19(1):11-12.
- [21] NEUSTRUEV B V. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1994, 6(35): 6901-6936.
- [22] 李竞飞,陈伟民,雷小华,等.伽马辐照对掺铒光纤性能影响的研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(6):1882-1887.
 LI J F, CHEN W M, LEI X H, et al. Gamma radiation effects on erbium-doped optical fibers properties[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(6):1882-1887.
- [23] DESURVIRE E, SIMPSON J R. Evaluation of (4)I(15/2) and (4)I (13/2) Stark-level energies in erbium-doped aluminosilicate glass fibers[J]. Optics Letters, 1990, 15(10):547-549.
- [24] BOCH J, SAIGNE F, TOUBOUL A D, et al. Dose rate effects in bipolar oxides: competition between trap filling and recombination [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(23): 1-3.
- [25] BARNABY H J, MCLAIN M L, ESQUEDA I S, et al. Modeling ionizing radiation effects in solid state materials and CMOS devices [J]. Circuits and Systems I: IEEE Transactions on Regular Papers, 2008,56(8):1870-1883.

作者简介:

柳青峰(1984-),男,助理研究员,主要研究方向:卫星光通信中 EDFA的辐射效应。

通讯地址:哈尔滨工业大学科学园2A栋可调谐国家重点实验室(150001)

电话:(0451)86413044

E-mail: ALWAYSLQF@163.com

杨清波(1980-),男,副研究员,主要研究方向:光卫星通信中ED-FA通信技术。

通讯地址:哈尔滨工业大学科学园2A栋可调谐国家重点实验室(150001)

电话:(0451)86413044

E-mail:yangqingbo@hit.edu.cn

Research on EDFA Wavelength Division Multiplexing Performance under Deep Space Radiation

LIU Qingfeng^{1,2}, LI Bo^{1,2}, KANG Dongpeng^{1,2}, YANG Qingbo^{1,2}, MA Jing^{1,2}, TAN Liying^{1,2},

YU Siyuan^{1,2}, ZHAO Sheng^{1,2}, WANG Qi^{1,2}

School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
 HIT Satellite Laser Communication Co. Ltd., Harbin 150028, China)

Abstract: With the increasing demand for data capacity of deep space laser communication systems, the wavelength division multiplexing (WDM) technology will become an effective method to expand communication capacity. It is necessary to study the performance variation of EDFA WDM characteristics under deep space radiation conditions. The effects of deep space radiation and temperature field on the performance of EDFA, non-uniform characteristics are analyzed, and the gain influence model between EDFA WDM signals under deep space radiation conditions are established, and the evaluation method of the influence of non-uniform variation of gain is given. Deep space radiation environment was simulated, and the electron irradiation and neutron irradiation were used as radiation sources to simulate the effects of radiation ionization and radiation displacement, respectively. The correctness of the model is verified by experimental results. Using this model, the non-uniform characteristics of the gain of each wavelength of EDFA in WDM application under different types of radiation and different temperatures in deep-space radiation environment can be obtained, providing reference for WDM application of EDFA in deep space laser communication.

Keywords: deep space radiation; satellite laser communication; EDFA; WDM

Highlights:

- The effects of deep space radiation ionization is simulated by utilizing electron irradiation and neutron irradiation as radiation sources.
- Deep space radiation displacement effect is simulated by neutron irradiation.
- Non-uniform characteristics of the gain of each wavelength of EDFA in WDM application (1 550.13 ± 0.8 nm, 1 550.13 ± 2.4 nm) are analyzed under different types of radiation.
- The gain of each wavelength of EDFA in WDM under different temperatures (-170 °C, +20 °C, +85 °C) in deep-space radiation environment can be obtained.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:朱恬]