

# 空间光通信中 EDFA 的抗辐射技术的研究

王岩 李洪祚 郝子强

(长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 随着通信技术的不断发展和世界各国对空间领域的高度重视,空间光通信技术已经成为全世界的研究热点之一。目前地面光通信的发展十分迅速,放大技术中的各种难点都已经取得重大突破,特别是基于光纤放大器的技术应用已十分广泛,技术也十分成熟。由于光纤类器件对空间的辐射环境十分敏感,要想采用地面已非常成熟的外调制技术,就必须考虑外调制技术中的核心器件掺铒光纤放大器(EDFA)在空间环境中应用的可行性并分析相应的抗辐射技术。首先分析了空间的辐射环境,并对其对 EDFA 性能的影响进行了理论分析,提出了采用包括退色心抗辐射技术、预辐射和载氢抗辐射技术和光纤制作工艺的抗辐射技术在内的办法来有效提高 EDFA 系统空间抗辐射的性能,为 EDFA 在空间光通信领域的应用提供了理论基础。实验研究表明,采用上述抗辐射方法,理论上可以给 1550 nm 的掺铒光纤(EDF)大约减少 0.8 dB/km 的辐射衰减量。

**关键词** 光纤光学;空间环境;掺铒光纤放大器;抗辐射

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.070601

## Research of Anti-Radiation Technology for the EDFA Systems in Space Environment

Wang Yan Li Hongzuo Hao Ziqiang

(School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** With the development of communication technology and the highly valued position of space area, space optical communication technology has become one of the hot spots in the world. At present, the ground optical communication is developing very fast, and a variety of difficulties has already been broken through for amplification techniques, especially those based on fiber amplifier have been widely used, and the technology is very mature. As the fiber-type devices are very sensitive to the radiation environment of the space, if the external modulation technology which has been successfully used in ground optical communications is used in space environment, we must consider the feasibility of the erbium doped fiber amplifier (EDFA) which is the core device in the external modulation technology and analyze the corresponding anti-radiation technique. This paper analyzes the space radiation environment and its effect on the performance of EDFA. Approaches including fading center anti-radiation technique, pre-radiation and hydrogen loading active anti-radiation technique and fiber manufacturing technology of anti-radiation technique are proposed to improve the space radiation resistant performance of the EDFA systems. A theoretical basis is provided for the application of EDFA in space optical communications. Through the experimental study, it is found that by adopting the above anti-radiation methods, the radiative decay of 1550 nm erbium-doped fiber (EDF) can be reduced by 0.8 dB/km theoretically.

**Key words** fiber optics; space radiation environment; erbium-doped fiber amplifier; anti-radiation

**OCIS codes** 060.4510; 230.1150; 230.2285; 250.4480

## 1 引言

目前地面光通信的发展十分迅速,放大技术中的各种难点都已经取得重大突破,特别是基于光纤放大器的技术已相当成熟,应用也已十分广泛。这就为我们解决空间光通信的调制问题给出了一个具体思路。由

**收稿日期**: 2013-01-10; **收到修改稿日期**: 2013-02-28; **网络出版日期**: 2013-06-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977052)

**作者简介**: 王岩(1985—),男,博士研究生,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: juvener1985@163.com

**导师简介**: 李洪祚(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: lihongzuo@sohu.com

于掺铒光纤放大器(EDFA)具有良好的放大性能,应用广泛并且技术也十分成熟,所以光纤放大器在空间领域应用的前景被广大学者所看好。但是,光纤放大器属于光纤类器件,受空间的辐射环境影响非常严重,会因此产生色心从而严重影响光纤放大器的放大性能。但是相对于普通放大器,光纤放大器的优点十分明显,所以人们还是希望它能在空间光通信领域发挥重大作用。因此,光纤放大器在空间环境中的抗辐射技术研究就成为一个有现实意义的重要课题。

目前已有一些学者分析了空间辐射环境对 EDFA 的影响,并取得了丰硕的成果,但在 EDFA 的抗辐射技术领域的研究还显得有些不够。本文对 EDFA 抗辐射技术进行了探索性的研究,希望对 EDFA 在空间光通信领域的应用起到积极作用。

## 2 空间辐射环境对 EDFA 的影响

### 2.1 空间辐射环境

近地空间辐射源<sup>[1]</sup>的主要来源包括:1) 地球范艾伦带,距地面 1000~6000 km,包括地球磁场中的电子、质子;2) 银河系宇宙射线,其中的高能(几百兆电子伏)离子环境能够屏蔽低轨道(LEO)卫星;3) 太阳耀斑,主要包括高强度质子、电子和一些喷发到范艾伦带的氧离子;4) 其他行星和月球周围的场,主要指接近木星和木卫二引力场的硫和氧气,辐射剂量高达 10 Grad;5) 航天器上的反应堆:其中小航天器的影响更为明显并且可能在屏蔽中出现二次反应。辐射粒子主要由地球磁场俘获,这些粒子主要是质子、电子和半周期性太阳耀斑辐射的质子等,其中电子能量一般大于 0.5 MeV,质子能量为 0.4~50 MeV,最大积分通量约为  $10^8(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 。太阳宇宙线主要由质子和粒子组成,能量一般为 10~1000 MeV。

### 2.2 空间辐射环境对 EDFA 的影响

要想深入探究空间环境下 EDFA 抗辐射的方法,首先就要了解空间环境对 EDFA 性能的影响。在这方面国内外学者已经有了一些具体的分析<sup>[2-4]</sup>。掺铒光纤(EDF)是 EDFA 的重要组成部分,也是受辐射影响最大的一部分。EDF 受辐射影响较大,其根本原因在于它与普通掺杂的光纤有许多不同之处:首先,掺稀土的光纤对辐射敏感得多;其次,EDF 由于采用了双包层的结构,所以其在受到  $\gamma$  射线的辐射后会导致在包层中含氟聚合物的辐照损伤,而且损伤程度比较严重,进而会使 EDF 的色心平衡点较高,并且光纤的色心效应会使抽运光(980 nm)和信号光(1550 nm)产生色心吸收,这会大大降低 EDFA 的放大倍数;最后,在 EDFA 中,为了使其具有较高的光增益,就必须提高 EDF 中  $\text{Er}^{3+}$  离子的浓度(约  $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ), $\text{Er}^{3+}$  离子浓度过高会导致  $\text{Er}^{3+}$  离子团聚,所以必须要进行二次掺杂,而二次掺杂过程中所使用的 Al 和 La 会增大 EDF 对辐射的敏感性。

在研究空间辐射对 EDFA 的影响时,可以通过数学推导从理论上对 EDFA 的辐射特性进行定性分析,其中,常规环境下对 EDFA 的性能参数进行分析所采用的基本公式有<sup>[5-6]</sup>

$$\frac{dn_2(z,t)}{dt} = \frac{\sigma_{sa}\Gamma_s}{h\nu_s A}(P_s + P_a)n_1 - \frac{\sigma_{se}\Gamma_s}{h\nu_s A}(P_s + P_a)n_2 + \frac{\sigma_{pa}\Gamma_p}{h\nu_p A}P_p n_1 - \frac{\sigma_{pe}\Gamma_p}{h\nu_p A}P_p n_2 - \frac{n_2}{\tau}, \quad (1)$$

$$n_1(z,t) = n_1(z,t) + n_2(z,t), \quad (2)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = P_s \Gamma_s (\sigma_{se} n_2 - \sigma_{sa} n_1), \quad (3)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = P_p \Gamma_p (\sigma_{pe} n_2 - \sigma_{pa} n_1), \quad (4)$$

$$\frac{dP_a}{dz} = P_a \Gamma_s (\sigma_{se} n_2 - \sigma_{sa} n_1) + 2\sigma_{se}\Gamma_s N_2 h\nu_s \Delta\nu, \quad (5)$$

式中  $\sigma_{sa}$  为信号吸收截面, $\sigma_{se}$  为信号发射截面, $\sigma_{pa}$  为抽运吸收截面, $\sigma_{pe}$  为抽运发射截面, $h\nu_s$  为信号光子能量, $h\nu_p$  为抽运光子能量, $A$  为纤芯的有效面积, $P_a$  为放大自发辐射(ASE)噪声功率, $P_s$  为信号光功率, $P_p$  为抽运光功率, $\Gamma_s$  和  $\Gamma_p$  为光波模场与掺杂  $\text{Er}^{3+}$  分布之间的重合积分, $\tau$  为亚稳态能级自发辐射寿命, $n_1(z,t)$  为总的粒子数密度, $n_1(z,t)$  为基态的粒子数密度, $n_2(z,t)$  为激发态的粒子数密度。(1)~(5)式是分析 EDFA 的性能的基本公式。在空间辐射环境下如果令

$$\begin{cases} \alpha_s = n_t \sigma_{sa} \Gamma_s, & \alpha_p = n_t \sigma_{pa} \Gamma_p, \\ \beta_s = n_\beta \sigma_{sa} \Gamma_s, & \beta_p = n_\beta \sigma_{pa} \Gamma_p, \\ P_s^{\text{sat}} = \frac{A}{\Gamma_s (\sigma_{sa} + \sigma_{se}) \tau}, & P_p^{\text{sat}} = \frac{A}{\Gamma_p (\sigma_{pa} + \sigma_{pe}) \tau}, \end{cases} \quad (6)$$

可以推出

$$I^{\text{out}} = I_p^{\text{in}} \exp\left[-(\alpha_p - \beta_p)L + I_s^{\text{in}} \exp\left[-(\alpha_s - \beta_s)L + \frac{1}{P_s^{\text{sat}}}(I^{\text{in}} - I^{\text{out}})\right] + \frac{1}{P_p^{\text{sat}}}(I^{\text{in}} - I^{\text{out}})\right], \quad (7)$$

式中  $I_p^{\text{in}}$  和  $I_s^{\text{in}}$  分别为抽运光和信号光输入的光强,  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  为抽运光和信号光的吸收系数,  $\beta_p$  和  $\beta_s$  为由于辐射所折合而来的抽运光和信号光所受额外辐射的吸收系数,  $I^{\text{in}}$  和  $I^{\text{out}}$  为输入和输出光强, 也是判断辐射对 EDFA 影响的重要指标,  $P_s^{\text{sat}}$  和  $P_p^{\text{sat}}$  为信号光和抽运光的饱和功率,  $L$  为光纤长度。

通过(7)式可以得出一个含有辐射因素  $\beta_p$  和  $\beta_s$  的关于  $I^{\text{out}}$  的方程, 其中, 如果可以确定  $\beta_s$ , 就能够通过数值计算的方法较容易地计算出 EDFA 的输出功率。由此就可以看出空间辐射环境对 EDFA 输出功率的影响。在(1)式中可以看出如果光纤放大器没有经过辐射, 即  $\beta_p$  和  $\beta_s$  为 0 时, 有

$$I^{\text{out}} = I_p^{\text{in}} \exp\left[-\alpha_p L + \frac{1}{P_p^{\text{sat}}}(I^{\text{in}} - I^{\text{out}})\right] + I_s^{\text{in}} \exp\left[-\alpha_s L + \frac{1}{P_s^{\text{sat}}}(I^{\text{in}} - I^{\text{out}})\right], \quad (8)$$

式中  $P_s^{\text{sat}}$  和  $P_p^{\text{sat}}$  分别为在辐射环境下信号光和抽运光的饱和功率。

$\text{Er}^{3+}$  离子在 EDFA 中的传输特性也是分析 EDFA 在空间辐射环境下损耗的一个重要方面。在采用基于  $\text{Er}^{3+}$  浓度的速率方程与传输方程分析辐射损耗时会有比较明显的局限性。为了更好地描述增益和辐射剂量之间的关系, 下面给出已报道的基于背景损耗的含有辐射因素的速率方程和传输方程:

$$\frac{dP_s}{dz} = g_s \frac{(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) P_p}{[(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{se} \Gamma_s / h\nu_s A)] P_s + [(\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) + (\sigma_{pe} \Gamma_p / h\nu_p A)] P_p + 1/\tau} - \alpha_s \left\{ 1 - \frac{[(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) P_p]}{[(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{se} \Gamma_s / h\nu_s A)] P_s + [(\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) + (\sigma_{pe} \Gamma_p / h\nu_p A)] P_p + 1/\tau} \right\} P_s - \alpha_{\text{rads}} P_s, \quad (9)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = g_p \frac{(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) P_p}{[(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{se} \Gamma_s / h\nu_s A)] P_s + [(\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) + (\sigma_{pe} \Gamma_p / h\nu_p A)] P_p + 1/\tau} - \alpha_s \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) P_p}{[(\sigma_{sa} \Gamma_s / h\nu_s A) P_s + (\sigma_{se} \Gamma_s / h\nu_s A)] P_s + [(\sigma_{pa} \Gamma_p / h\nu_p A) + (\sigma_{pe} \Gamma_p / h\nu_p A)] P_p + 1/\tau} \right\} P_p - \alpha_{\text{radp}} P_p, \quad (10)$$

式中  $\alpha_{\text{rads}}$  为掺铒光纤经过辐射后信号光(1550 nm)产生的附加辐射损耗系数,  $\alpha_{\text{radp}}$  为抽运光(980 nm)产生的附加辐射损耗系数。(9),(10)式也是分析 EDFA 受空间辐射影响的基本公式, 利用 4 阶龙格-库塔算法可以对其进行求解。由上述公式可以看出, 辐射总剂量、剂量率、 $\text{Er}^{3+}$  浓度和工作温度等因素都会使 EDFA 的性能受到一定的影响。这些数据都是研究 EDFA 空间抗辐射性能的重要指标。

图 1 给出的是辐照前后 EDFA 输出功率随输入功率的变化情况, 可以看到使 EDFA 的输出功率达到 14.3 dBm 的最小输入功率从辐照前的 -5 dBm 上升到辐照后的 3 dBm, 同时可以看出输入功率在

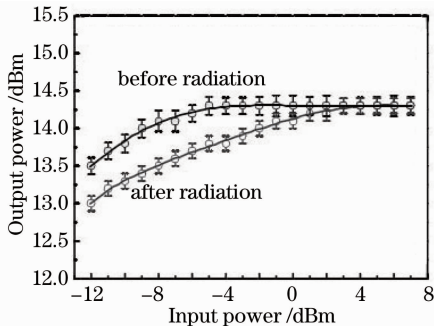


图 1 辐照前后 EDFA 输出功率随输入功率的变化

Fig. 1 Output power of EDFA as a function of input power before and after radiation

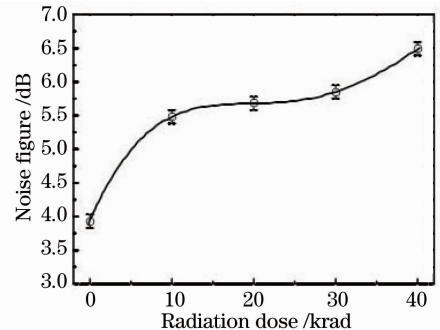


图 2 EYDFA 的噪声系数随辐射总剂量的变化

Fig. 2 Noise figure of EYDFA as a function of radiation dose

-12 dBm和-5 dBm 之间所对应的输出功率在辐照后都下降了 0.5 dB 左右。

图 2 给出了铒镜共掺光纤放大器(EYDFA)的噪声系数随辐射剂量的变化情况。从图中可以看到,当 EDFA 所受辐射剂量小于 10 krad 时,光纤放大器噪声系数的增长速度较快,但当辐射剂量大于 10 krad 后,其增长速度趋于平缓。

由图 3 可以看出,铒镜共掺光纤放大器的增益在经过 40 krad 辐射剂量的辐射后,增益下降 17.60 dB。这说明,铒镜共掺光纤放大器在辐射过程中,由于  $Yb^{3+}$  的存在使得铒镜共掺光纤在辐射环境中产生的色心数量明显增加,其中由于大量色心的存在又会使光纤的传输损耗明显增大,从而使光纤放大器的增益明显下降。

由图 4 可知,在其他条件相同的情况下,1550 nm 的波长损耗最小,980 nm 的波长损耗最大,由此可见辐射损耗与 EDFA 的工作波长有直接联系,并且 980 nm 波长的斜率要比 1550 nm 波长的大得多。所以,在实际情况下 EDFA 的工作波长可选为 1300 nm 波段。

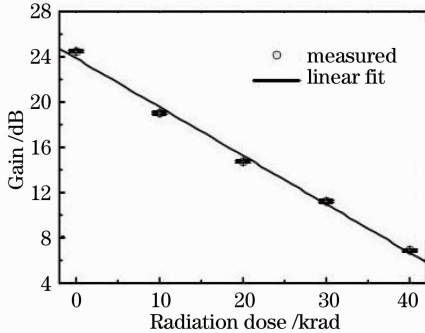


图 3 EYDFA 的增益随辐射总剂量的变化

Fig. 3 Gain of EYDFA as a function of radiation dose

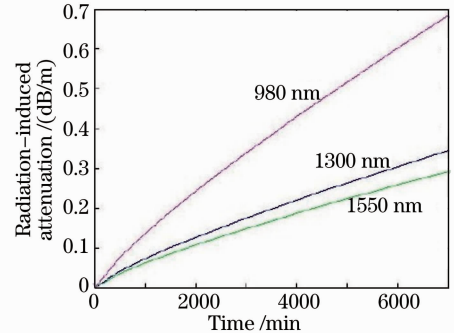


图 4 不同波长下辐射引入损耗的对比

Fig. 4 Radiation-induced attenuation of EDFA at different wavelengths

图 5 和图 6 表示由 EDFA 的辐射损耗对光纤传输系统的输出功率和信噪比的影响。其中横坐标所表示的损伤级别即为由于空间辐射所导致的 EDFA 的损伤程度,损伤级别越高,说明 EDFA 所受的辐射影响越大。可以看出,两图中曲线的走向大体一致,其中输出功率大约从辐射前的 -22dBm 下降到约 -43 dBm,而信噪比则由辐射前的 74 dB 下降到 39 dB,其性能降约 43%,这说明由空间辐射导致的 EDFA 损伤会导致空间传输系统的性能大大减低,表明了抗辐射技术对空间激光通信研究的重要性。

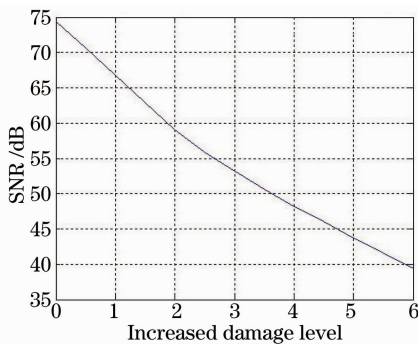


图 5 EDFA 的损伤程度对信噪比的影响

Fig. 5 Effect of increased damage level of EDFA on the SNR

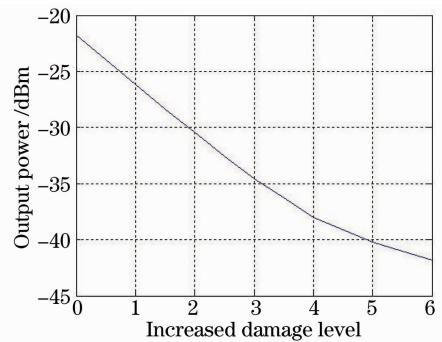


图 6 EDFA 的损伤程度对系统输出功率的影响

Fig. 6 Effect of increased damage level of EDFA on the output power

### 3 EDFA 抗辐射技术的选择及改善措施

如前所述,空间辐射环境中存在大量的高能带电粒子,这些带电粒子极易与空间中运行的航天器件及其材料相互作用,产生空间辐射效应,导致航天器件的性能下降或发生故障。

空间辐射对 EDFA 系统性能影响较大的主要原因在于 EDFA 主要以玻璃光纤构成,光纤中掺入了  $Er^{3+}$  离子,所以对于长时间暴露在空间辐射环境中的 EDFA 系统,必须对其进行抗辐射防护,以减少系统因

辐射而造成的性能下降。从空间辐射环境的特点以及 EDFA 所包含的电路、光电元件和它的材料组成在空间的辐射效应的特点看,对 EDFA 的抗辐射技术应从以下几个方面加以考虑。

### 3.1 退色心抗辐射技术

光纤的损耗原理是一个较复杂的问题。即使其在非辐射环境下也可能因为其构成光纤材料的随机性,产生氧空穴和非桥键氧离子等导致损耗。在辐射环境下,光纤的芯层和包层中会形成电子空穴对,而这些电子和空穴在光纤自身缺陷和杂质的位置上很容易被俘获,产生新的缺陷中心,这种缺陷中心通常被称为“色心”,色心效应导致光纤的缺陷增多并使光纤对抽运光和信号光的吸收增加,以至于光纤的损耗增加<sup>[7]</sup>。

色心浓度的变化是一个动态过程,在考虑缺陷的产生和退色两方面因素时,可由下面的微分方程表示<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -k_g n(t) + k_a [n_0 - n(t)], \quad (11)$$

式中  $n_0$  和  $n(t)$  分别是初始色心浓度和瞬态色心浓度; $k_g$  和  $k_a$  分别是缺陷产生和退色使其恢复的速率。对(11)式进行求解可知缺陷浓度为

$$n_i(k_a) = n_{0i} \frac{k_g}{k_a + k_g} \{1 - \exp[-(k_a + k_g)t]\}. \quad (12)$$

辐照开始阶段,缺陷浓度会随辐照时间的增加而增加,直到饱和为止。而其饱和值的大小取决于缺陷产生速率和退色速率。若色心恢复较快,即  $k_g \leq k_a$ , 其饱和值的缺陷浓度就相对较小。

当温度足够高时,高能辐射在固体中产生的缺陷能使其在晶格中运动,此时辐射损伤可以随运动而减轻,甚至最终消除,这一过程被称为退色。所以我们可以利用这一原理采用退色心主动抗辐射技术使光纤中的色心逐渐消失以起到抗辐射的作用。退色可分为热退色和光退色两种。在空间光通信中,EDFA 对温度的要求是非常复杂的,一方面温度过高会引起 EDF 的热损伤,从而增强 EDFA 对辐射的敏感性;另一方面,温度过低还会对电离总剂量效应(TID)起加速作用,从而增强了系统的辐射损耗。因此较之热退色效应,光退色效应的实现相对容易。光退色效应与退色心的原理一样都是一种主动恢复效应,只不过是因为“光”的作用导致因辐照而损耗的晶格能够得到恢复。并且随着光功率的增强和波长的变短,光退色的效果会变得更加明显。所以可以用大功率光使被辐照光纤产生光退色效应从而加快光纤的光退色恢复速度,以此抑制光纤在空间辐射环境下形成的色心。为使退色心技术能够在 EDFA 的空间通信系统中较好地实现,必须设计一种允许足够大的光功率通过光纤的系统。本文采用采用双光源抗辐射的方法来提高光的退色效应,其原理框图如图 7 所示。

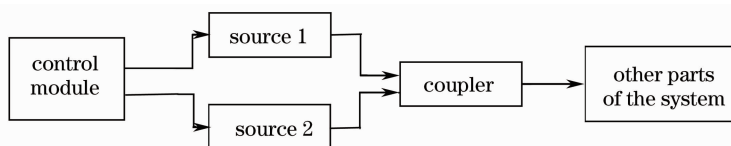


图 7 双光源抗辐射的基本框图

Fig. 7 Principle frame of the anti-radiation design using two sources

如图 7 所示,该系统的特点就是在原系统光源的基础上再加上一个附加光源,并通过耦合器使两光源联入原系统光路中。独立设计的控制模块负责控制两光源的开启,并使其能分时工作,即在系统工作时,附加光源关闭,整个系统与原系统没有区别;若需要恢复辐射引起的损耗,则关闭原系统光源和一些相关电路,并开启附加光源,使大功率光可以通过光纤。其中,主动抗辐射与系统工作是相对独立的,可以在对原有系统的正常工作不受影响的情况下实现主动退色心的目的。

### 3.2 预辐射载氢抗辐射技术

对光纤进行较高剂量的预辐射,可降低其对辐射的敏感性,从而提高光纤的抗辐射能力,这是由于辐射会与玻璃基质中最活泼的格点发生反应,产生比较稳定的晶体结构。虽然预辐射会使光纤的初始损耗和固有损耗有所增加,但它可以改善其在辐射环境下使用中的损耗。预辐射技术已有一些理论基础,但是目前关于预辐射的机理解释仍然显得有些牵强,所以想采用单纯的预辐射技术以提高 EDFA 的抗辐射性能的办法目前还显得不够成熟。

相对单纯的预辐射而言,光纤在辐射前做载氢处理,同等条件下的辐射损耗会明显较低。关于氢分子对辐射光暗化的阻滞作用最初见于人们对石英玻璃的研究<sup>[9]</sup>。研究发现,在辐射前经过载氢处理的光纤,辐射损耗明显降低,其效果取决于氢离子与缺陷的反应程度,研究结果表明采用较高的氢分压处理的办法能够有效改善光纤的抗辐射性能。

在室温下,用99%纯度的氢气对EDFA系统进行载氢处理,再用 $\gamma$ 射线对其进行预辐射,理论上就可完成一次预辐射载氢过程。预辐射技术必将成为光纤抗辐射领域的一个研究方向,虽然其理论基础尚不成熟,但是通过预辐射与载氢技术相结合的方法还是可以较好地实现EDFA的抗辐射处理。通过载氢、辐射后的EDFA再进行氢处理,随后再次进行同等剂量的辐射。这样通过氢气处理及再次辐射,就实现了预辐射与载氢技术的结合。预辐射与载氢处理相结合的技术能有效地提高EDFA的抗辐射能力,尤其是在可见光波段以及受紫外、可见光区强吸收峰尾带影响的近红外波段,可有效对辐射进行抑制。

### 3.3 光纤制作工艺的抗辐射技术

光纤是用高纯度的玻璃材料制成的。如果按光纤内所含化学元素的不同,可以把光纤分为石英光纤和玻璃光纤两大类。EDF的制备可采用改进型化学气相沉积(MCVD)、轴向气相沉积(VAD)和外部气相沉积(OVD)等制备方法,其实质就是在石英光纤的制备工艺的基础上再加以少许改进,其中的核心问题就是如何将 $\text{Er}^{3+}$ 掺入到光纤的芯部,实现光纤设计。 $\text{Er}^{3+}$ 的掺入方法很多,当前主要有溶液掺杂法、气相掺杂法、气溶胶法、溶胶凝胶法等,应用较广泛的是以MCVD为基础的制造工艺。

在制作EDF的过程中,制作工艺对EDF的抗辐射性能有较大影响<sup>[10-13]</sup>,生产过程中材料的纯度对EDF的抗辐射性能影响较大。在实际制作过程中,可以从光纤预制棒的纯度、拉丝的速度、拉丝引入的应力和残余应力等因素对由制作工艺而导致的光纤材料缺陷进行控制。其中,拉丝过程的制作工艺对EDF的抗辐射性能的影响尤为重要。拉丝过程是光纤制备的最后一道工序,对拉丝过程的控制是保证光纤各种指标合格的关键因素之一。

光纤对辐射的吸收情况与光纤中的应力有关<sup>[14]</sup>,而光纤中的应力主要是热应力和机械应力。其中,热应力是由于各层的热膨胀系数不同而引起的,属于无法通过调整制作工艺予以消除的永久性应力;而机械应力则不同,它属于可以通过调整拉丝工艺予以消除的暂时性应力,并且与拉丝张力成正比。对于纯硅芯光纤,其内部的缺陷对拉丝张力有着相对较强的依赖性。这是因为包层掺氟使得芯和包层玻璃的转变温度存在较大差异,以至于光纤中存在较大的机械应力。所以,如果采用粘度匹配的设计方法,可以使芯与包层材料的玻璃转变温度的差异减小,从而有效缓解光纤中的机械应力,降低光纤中缺陷对拉丝张力的依赖。由上文可知,由于光纤的抗辐射性能对其拉丝工艺有着较强的依赖性,所以为了使其具备有较好的抗辐射性能,可以在低速、低张力条件下拉丝,这样就会使 $\text{Er}^{3+}$ 浓度的增加对EDF的抗辐射性能的影响降低。

另外,掺铒光子晶体光纤具有较好的抗辐射性能<sup>[15]</sup>,可以尝试用它来代替传统的EDF。如果采用相同长度和浓度的传统EDF和掺铒光子晶体光纤,将二者置于 $\gamma$ 射线的辐射环境下,可以看出两种光纤在辐射中具有相近的辐射损耗和相似的衰减过程,其输出光谱的变化也都主要集中在1560 nm附近。但是从辐射后的恢复过程来看,掺铒光子晶体光纤表现出了更好的恢复特性。这就表明掺铒光子晶体光纤在空间领域应用具有良好的发展潜力。虽然目前光子晶体光纤的控制工艺还不够成熟,但由于光子晶体光纤的多孔性和灵活的可设计性,都为光子晶体光纤的抗辐射技术提供了更多可能,所以光子晶体光纤在抗辐射方面的优势也将日益明显,也必定会得到更多的重视。

### 3.4 EDFA抗辐射实验研究

实验1主要分析了光退色的相关性质。首先采用剂量率为1 rad/s的 $\gamma$ 射线,光路中注入光的功率为0.3 mW,在照射1600 s后撤去辐射源,实验结果如图8所示。可以看出:停止辐照后,光退色的效果很明显,光纤损耗一直减小,几乎恢复到施加辐射之前的状态。

为对比光功率变化对恢复效果的影响,实验2采用2 rad/s的剂量率,分别向光路中注入0.3、0.2、0.1 mW激光进行光退色的比较实验,结果如图9所示。从实验结果可以看出,输入光功率为0.3 mW的光纤损耗增长较慢,且在同等剂量的辐照下,产生的损耗较小,光退色效果最显著。

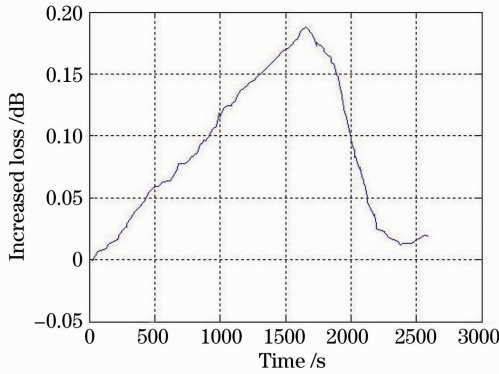


图8 光退色实验曲线

Fig. 8 Experimental curve of photo-bleaching

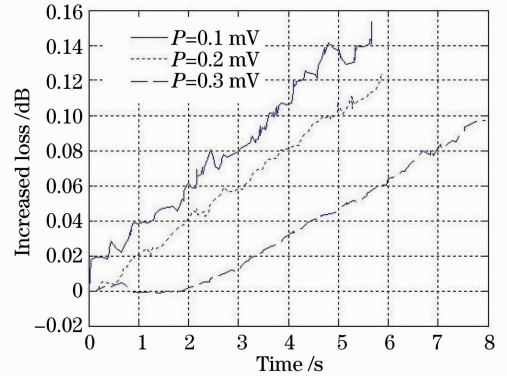


图9 不同光功率下损耗曲线对比

Fig. 9 Contrast of induced loss curves under different light power

为验证预辐射载氢技术对 EDFA 的抗辐射性能的影响,在实验 1 的基础上就预辐射和载氢对抗  $\gamma$  射线特性的影响进行了探讨,用以评估辐照前的预辐射和载氢处理对 EDF 抗辐射性能优化的可行性。

实验 3 中,载氢处理在室温下完成,氢气纯度大于 99%,载氢压力为  $2.02 \times 10^5$  Pa,载氢时间 48 h。基于以上思路,对经过载氢、辐照后的光纤重新进行了同一条件的  $H_2$  处理,随后再次进行了同等剂量的辐照。其衰减谱如图 10 所示。

图 10 表明,对辐照后的光纤再次进行载氢处理,大大降低了 630 nm 的吸收峰,从而优化了光纤在可见光区的光传输性能,这在图像传输光纤束中具有较大意义。经过初次辐照、辐照后载氢两步处理后的光纤,再次对其进行 2 rad/s 的剂量辐照时,630 nm 的吸收增加值仅为 8 dB/km 左右。吸收的增加是由于初次辐照尚未完全消耗尽的缺陷前驱体(应力键)在第二次辐照过程中断键引起的。由此可知,预辐照结合载氢处理能有效地提高光纤的抗辐射能力,尤其是在可见光波段以及受紫外、可见光区强吸收峰尾带影响的近红外波段可有效抑制辐射衰减的增加。

### 3.5 抗辐射技术总结

一般而言,抗辐照技术有被动防护技术和主动防护技术。所谓被动防护技术是指通过在元器件表面增加防辐射屏蔽来提高器件的抗辐射能力,但是简单的大面积蒙皮的方法往往会造成大量无用的额外质量,而飞行器对载荷的重量要求相当苛刻,载荷重量增加 1 kg,发射系统就要付出增加几百千克的巨大代价,所以首先要提高光器件本身的抗辐射能力。上文提到的包括退色心抗辐射技术、预辐射和载氢主动抗辐射技术和光纤制作工艺的抗辐射技术的办法都属于主动抗辐射技术。在实际操作中,以上方法可以同时使用,即在实验前首先在 EDF 的制作环节采用适当的制作工艺,然后对其进行预辐射载氢处理,再在通信系统中采用双光源抗辐射的设计来实现退色心的目的。如图 10 所示,以采用 630 nm 和 1550 nm 波长的光纤为例,预辐射载氢技术能为其减少约 65 dB/km 和 0.4 dB/km 的辐射衰减量;通过采用双光源抗辐射提高光退色效应的方法,由(11)、(12)式可计算出色心效应给光纤带来的衰减量大约为 0.2 dB/km;而通过采用光纤制作工艺的抗辐射技术目前已经十分成熟,目前国内很多研究单位都可以把光纤在 1310 nm 和 1550 nm 的损耗分别降到 0.3 dB/km 和 0.2 dB/km 左右。所以总体来说,采用上述抗辐射方法,理论上可以给 1550 nm 的 EDF 大约减少 0.8 dB/km 的辐射衰减量。

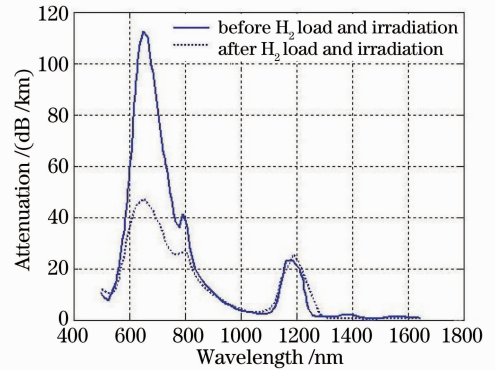


图10 预辐射载氢前后光纤的衰减情况

Fig. 10 Attenuation spectra before and after  $H_2$  load and irradiation

根据本文所分析的 EDFA 在空间中的抗辐射方法,加之 EDFA 在空间光通信系统中的作用,有必要提

出为加强 EDFA 在空间的抗辐射性能而采用的空间光通信的系统设计:1) 因为长波长光纤的增益衰减小于短波长光纤,应选择波长为 1550 nm 的光纤,所以在系统的发射端,应该采用发布反馈式(DFB)激光器与 EDFA 相结合的系统设计;2) 为采用退色心抗辐射技术,在系统发射端的光源处应采用如图 7 所示述的双光源系统;3) 光纤制作过程中,应从光纤预制棒的纯度、拉丝的速度以及拉丝引入的应力和残余应力等因素对制作工艺原因所造成的光纤材料缺陷加以控制;4) 预辐射载氢技术能提高 EDFA 的抗辐射性能,所以在系统工作之前有必要对 EDF 进行预辐射载氢处理;5) 在空间环境下,由于无法通过对流的方式进行散热,所以可以通过传导和辐射的方式对 EDFA 的散热装置进行重新设计;6) 由于空间的粒子辐射会对光纤折射率产生影响,所以有必要对 EDFA 进行射线防护的设计。

## 4 结 论

目前,EDFA 在地面上的应用技术已经相当成熟,空间光通信也是现代空间通信技术中的热点之一。本文分析了 EDFA 的工作原理和其在空间辐射环境中所受到的影响,表明空间辐射环境对 EDFA 有较大的影响,限制了 EDFA 在空间光通信的应用,所以探究 EDFA 在空间中的抗辐射问题就显得尤为必要。从空间辐射环境的特点和 EDFA 本身的特性出发,提出采用包括退色心主动抗辐射技术、预辐射和载氢主动抗辐射技术和光纤制作工艺的抗辐射技术在内的办法可以有效提高 EDFA 系统空间抗辐射的性能。通过分析,在提高 EDFA 空间抗辐射能力问题上可以得出以下结论:1) 选择波长为 1550 nm 的光纤,因为在辐射环境中,长波长光纤的增益衰减小于短波长光纤;2) 在光纤制作过程中,采用适当的制作工艺来提高 EDF 的抗辐射性能;3) 用退色心的主动抗辐射技术使光纤中的色心缺陷恢复,大芯径光纤的光退色效果更好;4) 对光纤进行较高剂量的预辐射,可降低其对辐射的敏感性(1550 nm 的光纤可减少约 0.2 dB/km 的衰减量);5) 对光纤(1550 nm)进行氢处理,可为其减少大约 0.2 dB/km 的辐射衰减量。

## 参 考 文 献

- 1 Hamid Hemmati. Deep Space Optical Communications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006. 337—343.
- 2 Ma Jing, Li Mi, Tan Liying, *et al.*. Analysis of the space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication [J]. J Astronautics, 2009, 30(1): 250—254.  
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.
- 3 O Berne, M Caussanel, O Gilard. A model for the prediction of EDFA gain in a space radiation environment [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(10): 2233—2235.
- 4 Chen Jinzhong, Chen Zhenyu, Ma Ruiling, *et al.*. Effect of spatial confinement of carbon sheets on the soil plasma radiation characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0115002.  
陈金忠, 陈振玉, 马瑞玲, 等. 碳片的空间约束对土壤等离子辐射特性的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0115002.
- 5 Huang Changchun. Analysis of the Space Radiation Effect on EDFA[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005.  
黄常春. EDFA 在空间辐射环境中性能分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- 6 A A M Saleh, R M Jopson. Modeling of gain in erbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(10): 714—717.
- 7 Christppher D Marshall, Joel A Speth, Stephen A Payne. Induced optical absorption in gamma, neutron and ultraviolet irradiated fused quartz and silica[J]. J Non-Cryst Solids, 1997, 212(1): 59—73.
- 8 Guan Youguang. A novel high energy laser beam detector for measuring energy distribution[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(4): 175—177.  
关有光. 一种新型高能激光束能量分布探测器[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 175—177.
- 9 D L Griscom. Radiation hardening of pure-silica-core optical fibers by ultra-high dose ray pre-irradiation[J]. J Appl Phys, 1995, 77(10): 5008—5013.
- 10 Deng Tao. Study on Radiation Resistance Properties of Silica Glass and Silica Optical Fibre[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.  
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.
- 11 Wang Wenhua, Yu Qingxu, Jiang Xinsheng. CO<sub>2</sub> laser heating fusion welding technique of ultra-thin fused silica glass[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003004.  
王文华, 于清旭, 姜心声. 超薄熔石英玻璃的 CO<sub>2</sub> 激光热熔焊接工艺[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003004.
- 12 Huang Zhihui, Liu Huixia, Shen Zongbao, *et al.*. Process parameters analysis on surface texturing under laser shock



peening[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503004.

黄志辉, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503004.

- 13 P Borgermans, B Brichard, F Berghmans, *et al.*. Kinetic models and spectral dependencies of the radiation induced attenuation in pure silica and phosphorous doped fibres[J]. J Nuclear Science, 2002, 49(3): 1439–1445.
  - 14 S Shibata. Fluorine and chlorine effects on radiation-induced loss for GeO<sub>2</sub>-doped silica optical fibers[J]. J Lightwave Technol, 1985, 3(4): 860–863.
  - 15 Liu Chengxiang. Gamma-radiation induced effects on erbium-doped photonic crystal fiber in superfluorescent source[J]. J Shenzhen University Science and Engineering, 2011, 28(4): 335–340.
- 刘承香. 超荧光光源中掺铒光子晶体光纤辐射效应[J]. 深圳大学学报理工版, 2011, 28(4): 335–340.