

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0042-04

空间光通信中空间辐射对光纤放大器性能的影响

李 密 马 晶 谭立英 周彦平 于思源 俞建杰 常国龙 卢春莲 车 驰

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 以 ^{60}Co 为辐射源,通过地面辐射模拟实验,对掺铒和铒镱共掺两种光纤放大器的性能变化进行了对比分析。实验结果表明,在总剂量为 40 krad 的低剂量轨道辐射环境中,信号光通过这两种光纤放大器后,其中心波长及半宽都没有发生显著变化,这为光纤放大器能够应用于空间光通信提供了保证;在辐照过程中掺铒光纤放大器的增益下降 3.91 dB,而铒镱共掺光纤放大器的增益下降 17.60 dB,表明镱离子的存在使得铒镱共掺光纤放大器的抗辐射性能要明显弱于掺铒光纤放大器,这也为不同发射功率下的空间光通信系统在选择合适类型的放大器时提供了一个有益的参考。

关键词 光纤光学;卫星光通信;伽玛辐射影响;掺铒光纤放大器;铒镱共掺光纤放大器;空间环境

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0042

Space Radiation Effect on the Characters of Fiber Amplifiers for Space Optical Communication

Li Mi Ma Jing Tan Liying Zhou Yanping Yu Siyuan Yu Jianjie Chang Guolong
Lu Chunlian Che Chi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract The erbium-doped optical amplifier (EDFA) and erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier optical amplifier (EYDFA) are irradiated by ^{60}Co to simulate the condition on the low radiation dose orbits. Then the deterioration of their characters is analyzed by comparing these two kinds of fiber amplifiers. The central wavelength and half wave width of amplified signal change little in the radiation experiment, so it indicates that both of two kinds of fiber amplifiers can be applied to the inter-satellite optical communication systems. But we also find that the gain of EDFA comes down 3.91 dB, while the gain of EYDFA comes down 17.60 dB. The results indicate that ytterbium makes the antiradiation of EYDFA much worse than that of EDFA in the same radiation environment. These results also will be a good reference for space communication designers to choose the right kind of fiber amplifiers in each different system.

Key words fiber optics; inter-satellite optical communication; gamma-ray effects; erbium-doped fiber amplifier; erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier; space environment

1 引 言

随着地面光纤通信的发展,光纤放大器已被广泛应用于各种地面和海洋光纤通信系统中^[1~4]。而在空间光通信领域中,单独采用半导体激光器作为信号光源在结构和可靠性上具备无可匹敌的优势,但随着通信速率的日益增长,其在保持高输出功率的前提下,通信速率的指标已成为制约其发展的一个技术瓶颈。光纤放大器的出现可以降低信号光源

对功率的要求,从而实现提高调制速率的目的。

目前光纤放大器很少应用在空间光通信系统中,主要原因是光纤放大器在空间会受到强烈的辐射影响^[5]。当光纤放大器的工作光纤受到辐射后,在其内部会形成色心结构,使得信号光在光纤放大器内的传输损耗增加,从而降低了光纤放大器的性能指标^[6,7]。目前最主要的光纤放大器产品是掺铒光纤放大器(EDFA)和铒镱共掺光纤放大器

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介: 李 密(1980—),男,博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: limihit2008@126.com

导师简介: 马 晶(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: majing@hit.edu.cn

(EYDFA)两种。掺铒光纤放大器成功应用于各种地面光通信系统中,研究表明掺铒光纤放大器在辐射环境中的主要影响因素包括温度、辐射速率、辐射剂量及采用的光纤结构等^[8~10]。铒镱共掺光纤放大器技术的发展是来自地面通信系统对更高输出功率需求的结果,最大输出功率已达 40 dBm,在功率上的优势也使得其在各种放大器中的地位越来越重要。但也正是由于铒镱共掺光纤放大器的各种型号的输出功率都比较高,而且大部分产品都是国外进口,其造价十分昂贵,同时地面辐射模拟实验均为一次性破坏性实验,所以由于成本的原因,很少有研究小组对其辐射特性进行研究。考虑到铒镱共掺光纤放大器也是未来空间光通信系统的一种比较好的选择,本文采用⁶⁰Co为辐射源,同时对掺铒光纤放大器和铒镱共掺光纤放大器进行了地面辐射模拟实验,并对能够衡量光纤放大器性能的中心波长、波长半宽度、增益以及噪声系数这四个重要性能参数进行了测试,对这两种光纤放大器进行了性能对比分析,给出了这两种光纤放大器在辐射作用下各自性能变化情况,以及这两种放大器各自所适合的空间光通信系统。

2 辐射实验建立

掺铒光纤放大器和铒镱共掺光纤放大器所含的主要组件比较相似,考虑到在各个组件中,光纤是受辐射影响最严重的一个组件。采用⁶⁰Co作为辐射源基本可模拟空间中真实的辐射环境,所以此次地面辐射模拟实验也采用⁶⁰Co对掺铒光纤和铒镱共掺光纤进行辐照,辐射总剂量为 40 krad,地面辐射模拟实验原理图见图 1。实验中采用光源为可调谐激光器,最大输出光功率为 9 dBm,可调谐光衰减器对进入光纤放大器的输入信号光功率进行强度调节。光纤放大器的中心波长、波长半宽度、增益和噪

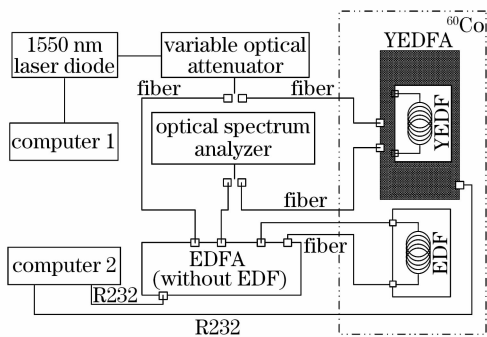


图 1 实验示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

声系数这四个重要性能参数由光谱仪直接进行测量,同时在测量过程中采用光波万用表对光谱仪所测得的输入输出光功率进行校正。在实验前为了方便对掺铒光纤放大器进行测量,特殊定制了一台机架式掺铒光纤放大器,其由两部分组成,一部分是把掺铒光纤单独拿出来,放在一个特制的光纤固定盒内,盒子外面做成标准的 FC 光纤接头;另一部分是不含掺铒光纤的掺铒光纤放大器机箱,也就是除掺铒光纤外其他组件都放在机箱内,机箱的接头也做成标准的 FC 光纤接头。考虑到实验现场的测试情况,还定制了两根 20 m 的高标光纤,用来连接含有掺铒光纤的盒子和机箱,这样在辐射实验中,由于只把掺铒光纤放在辐射场内,而其他组件都在辐射场之外,可确保实验测试的精度。对于铒镱共掺光纤放大器,由于将其改制成和掺铒光纤放大器相同的两部分存在比较大的困难,所以在辐射过程中将机箱外壳打开,并对除铒镱共掺光纤外的其他部分都用铅砖遮挡进行辐射防护。测试方法与掺铒光纤放大器相同,采用 20 m 光纤连出辐射场进行相关测试。

在辐照过程中,由于辐射场的特殊要求,只能通过光纤外引的方式进行测量。除此之外由于样品所需测量的参数比较多,在测试的过程中需要一段不太短的时间。光纤对总剂量比较敏感^[5],而模拟实验的辐射速率要比空间辐射速率高很多。在这种情况下,如果在没有停止辐射的情况下进行测量,所测得的值并不是该样品在某个特定剂量下性能变化的准确情况。所以为了准确测量出样品在特定总剂量下的性能变化情况,设定了几个特定的辐射节点,当辐射总剂量达到每个节点时,停止辐射,并进行相关的性能参数测量,测试完毕再进行辐射,直到最后整个实验测试完毕。

3 实验结果及分析

3.1 中心波长及半宽

由于空间光通信系统的接收端含有大量的光学器件和光电器件,其中如滤波片等光学设备对接收到的信号光波长有很高的要求,而很多其他仪器对于信号光的半宽也有一定的要求,所以这两个参数的变化情况成为光纤放大器能否应用于空间光通信系统中的前提条件。

图 2(a)、图 2(b)分别是掺铒光纤放大器和铒镱共掺光纤放大器经过大剂量辐射后的光谱图。由图 2 可知,掺铒光纤放大器的中心波长为 1550.124 nm,半宽为 0.016 nm,铒镱共掺光纤放大器的中心波长为

1550.124 nm,半宽为 0.014 nm,而光源的中心波长为 1550.124 nm,半宽为 0.015 nm,明显可见信号光的中心波长以及半宽经过辐射后没有发生太大的变化,说明光纤经过辐射后,其产生的色心在能级跃迁以及受激发射这个层面上并没有对这两种光纤放大器产生物理机理的改变,而只是增加了光在其中的传输损耗或减小了能级跃迁的效率,这为光纤放大器能够应用于空间光通信系统中提供了保障。

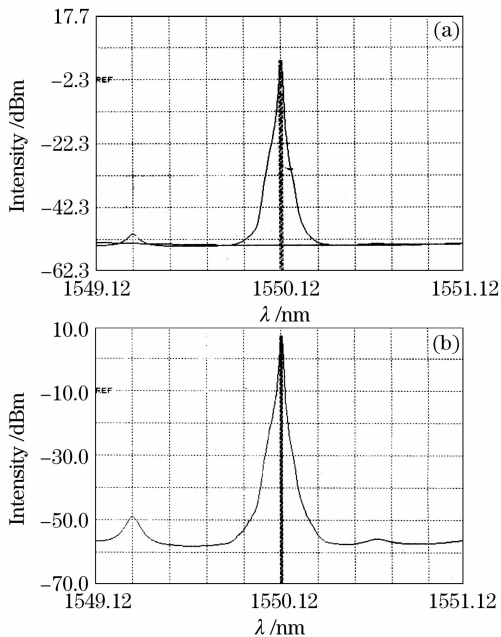


图 2 经过辐射后 EDFA(a)和 EYDFA (b)的输出光谱图

Fig. 2 Output optical spectrum of EDFA (a) and EYDFA (b) after radiation

3.2 增益与噪声系数

光纤放大器的增益为输出信号与输入信号的比值,它是衡量光纤放大器的放大能力的性能指标。噪声系数为输入信号的信噪比和经过光学系统后输出信号的信噪比的比值,它是衡量光纤放大器对输入信号质量影响程度的参量。

掺铒光纤放大器和铒镱共掺光纤放大器经过 40 krad 总剂量辐射后的增益恶化情况如图 3 所示。图 3(a)中需要额外解释的是在掺铒光纤放大器的测试过程中,由于设备问题,在 24 krad 和 40 krad 的数据都是在辐射停止 4 h 后测得的。由于光纤经过辐射后会随着时间的增加而产生恢复作用,这个过程称为光纤在辐射后的退火效应。由图 3(a)可见掺铒光纤放大器经过 4 h 的恢复非常明显,在这两个剂量点处的增益甚至都已经好于它们各自的前一个测试节点。由经验可知,放大器的增益在没有恶化到饱和程度时,一般随着剂量的增加基本处于

一个线性下降的趋势。根据数据中前 3 个剂量点的增益做了一个线性拟合。从结果可见,掺铒光纤放大器经过 40 krad 总剂量的辐射后,增益实际应该下降 3.91 dB 左右,而对于铒镱共掺光纤放大器,其增益恶化明显呈现出一个线性的下降趋势,但与掺铒光纤放大器不同的是其经过 40 krad 的辐射后增益下降了 17.60 dB。这说明比掺铒光纤多了一些 Yb^{3+} 的铒镱共掺光纤经过辐射后, Yb^{3+} 的存在使得光纤在辐射过程中产生的色心数量显著增加,造成了光纤传输损耗的增加,使得光纤放大器的增益下降得更为严重。

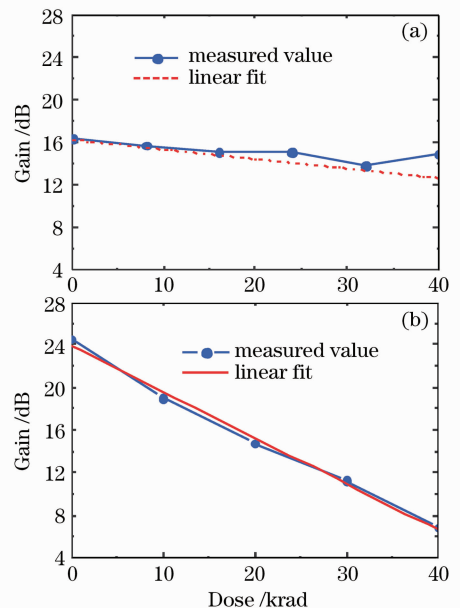


图 3 EDFA(a)和 EYDFA (b)的增益随辐射总剂量的变化
Fig. 3 Gain of EDFA (a) and EYDFA (b) as a function of radiation dose

图 4 所示分别为 EDFA 和 EYDFA 的噪声系数随辐射总剂量的变化,可见,噪声系数不再具有像增益随着辐射剂量呈线性变化的趋势,而是在 10 krad 左右的剂量之前保持一个很快的增长趋势,当超过这个剂量时,速度开始放缓。对于图 4(a)中 24 krad 和 40 krad 的数值比前一个测试节点小的原因和增益情况一样,光纤放大器的噪声系数也会随时间的变化而存在一个退火效应。对于铒镱共掺光纤放大器,其经过 40 krad 的辐射后,噪声系数上升 2.56 dB;而对于掺铒光纤放大器,其在 30 krad 的情况下就已使噪声系数增加了 1.89 dB。考虑到 24 krad 和 40 krad 节点处都存在 4 h 的恢复情况,可认为这两种放大器的噪声系数在同辐射剂量下的情况相差不大。

由分析结果可知,对于掺铒光纤放大器和铒镱

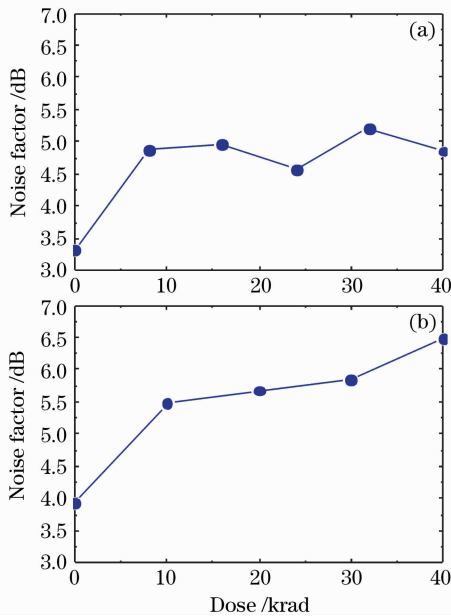


图4 EDFA (a)和EYDFA (b)的噪声系数随辐射总剂量的变化

Fig. 4 Noise factor of EDFA (a) and EYDFA (b) as a function of radiation dose

共掺光纤放大器,在相同辐射剂量下的噪声系数的恶化情况相差不大,那么在具体考虑采用哪种光纤放大器时,应该主要以增益为选择基准。掺铒光纤放大器的主要优势在于其技术比较成熟,价格低廉,在输出功率为30 dBm附近或30 dBm以下时具有巨大的竞争优势,但由于技术原因当输出功率远远超过30 dBm甚至是40 dBm时,只有铽共掺光纤放大器才能达到如此高的输出功率。所以,当输出功率在30 dBm附近或30 dBm以下时,由于掺铒光纤放大器在增益上抗辐射性能明显优于铽共掺光纤放大器,所以建议采用EDFA作为空间光通信系统的放大器;而当功率远远超过30 dBm时,只能采用铽共掺光纤放大器,但由于其增益下降十分明显,应采取有效的抗辐射措施。除了传统的屏蔽防护外,当减小 Yb^{3+} 浓度时,通过增加工作光纤长度同样可使光纤放大器达到相同的输出功率,这样在设计铽共掺光纤放大器时通过适当减小 Yb^{3+} 的掺杂浓度进而从根本上增加其抗辐射性也是一个比较直接简洁的办法。

4 结 论

以 ^{60}Co 为辐射源,对掺铒和铽共掺两种光纤放大器进行了总剂量为40 krad的地面辐射模拟实验。经过辐射后,信号光的中心波长以及半宽没有发生太大的改变,说明其产生的色心在能级跃迁以

及受激发射这个层面上并没有对这两种光纤放大器产生物理机理的改变,而只是增加了光在其中的传输损耗或减小了能级跃迁的效率,为光纤放大器能够应用于空间光通信提供了保障。由实验结果可知,虽然这两种光纤放大器的噪声系数恶化情况相当,都在2.5 dB左右,但在辐射过程中掺铒光纤放大器的增益下降3.91 dB的同时铽共掺光纤放大器下降了17.60 dB,表明当输出功率在30 dBm附近或30 dBm以下时,由于掺铒光纤放大器的抗辐射性能在增益性能指标上比掺铒光纤放大器强很多,所以建议采用掺铒光纤放大器作为空间光通信系统的放大器;而当功率远远超过30 dBm时,由于掺铒光纤放大器无法达到如此高的输出功率,采用铽共掺光纤放大器时应采取有效的方法降低其在辐射环境中的性能恶化程度。

参 考 文 献

- 1 Y. Miyamoto, T. Kataoka, K. Yonenaga *et al.*. WDM field trials of 43-Gb/s/channel transport system for optical transport network[J]. *J. Light Technol.*, 2002, **20**(12): 2115~2128
- 2 Y. Mochida, N. Yamaguchi, G. Ishikawa. Technology-oriented review and vision of 40-Gb/s-based optical transport networks [J]. *J. Light Technol.*, 2002, **20**(12): 2272~2281
- 3 Ning Tigang, Jian Shuisheng, Pei Li *et al.*. 4×10 Gb/s 412 km DWDM dispersion compensation using multiwavelength chirped fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 839~841
- 4 宁提纲,简水生,裴 丽等. 4×10 Gb/s 412 km 密集波分复用光纤光栅色散补偿的实验[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 839~841
- 5 Shao Zhonghao, Zhang Guoqiang, Ma Jun. Transmission bandwidth of WDM system using optical phase conjugator for dispersion compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1044~1050
- 6 邵钟浩,张国强,马 骏. 光相位共轭色散补偿波分复用系统的传输带宽[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1044~1050
- 7 T. S. Rose, D. Gunn, G. C. Valley. Gamma and proton radiation effects in erbium-doped fiber amplifiers: active and passive measurements[J]. *J. Light Technol.*, 2001, **19**(12): 1918~1923
- 8 H. Yzshima, H. Mitera, Y. Itoh. Radiation-induced loss and colour-centre concentration in optical fibers[J]. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(1): 11~12
- 9 D. L. Griscom, M. E. Gingerich, E. J. Friebele. Radiation-induced defect in glasses: origin of power-law dependence of concentration on dose [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(7): 1019~1022
- 10 G. M. Williams, M. A. Putnam, C. G. Askins. Radiation effects in erbium-doped optical fibers[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(19): 11~12
- 11 G. M. Williams, E. J. Friebele. Space radiation effects on erbium-doped Fiber devices: sources, amplifiers, and passive measurements[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(3): 1531~1536
- 12 M. Caussanel, O. Gilard, M. Sotom *et al.*. Extrapolation of radiation-induced EDFA gain degradation at space dose rate[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4): 11~12