

掺铒光纤辐射效应对光纤光源输出特性的影响

李彦, 黎珂钦*, 金靖

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 对掺铒光纤进行了伽马辐照实验, 根据辐照前后掺铒光纤的吸收系数和发射系数测试数据, 计算了掺铒光纤的吸收截面和发射截面。基于幂律模型建立了掺铒光纤吸收截面和发射截面的辐射模型。将吸收截面和发射截面的辐射模型代入掺铒光纤光源模型中, 仿真分析了掺铒光纤的辐射效应对掺铒光纤光源输出光谱及其特征参数的影响。结果表明: 与辐照前相比, 掺铒光纤被辐照后, 光纤光源的输出功率从 9.32 mW 衰减到 4.30 mW; 平均波长从 1531.60 nm 漂移到 1531.19 nm; 谱宽从 8.79 nm 变化到 6.78 nm。最后通过实验验证了仿真结果的正确性。

关键词 光纤光学; 辐射效应; 掺铒光纤光源; 输出特性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1206003

Influence of Erbium-Doped Fiber's Radiation Effects on Output Characteristics of Fiber Source

Li Yan, Li Keqin, Jin Jing

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract A gamma irradiation experiment is conducted on erbium-doped fiber, and its' absorption and emission cross sections are calculated according to measured absorption and emission coefficients of erbium-doped fiber before and after irradiation. Radiation models of absorption and emission cross sections are built up based on power law model. Radiation effects on the output spectrum shape and characteristics parameters of erbium-doped fiber source are simulated and analyzed based on the radiation models of absorption and emission cross sections being put into the model of erbium-doped fiber source. The simulation results show that after gamma irradiation, the output power of source decreases from 9.32 mW to 4.30 mW, the mean wavelength moves from 1531.60 nm to 1531.19 nm, and the band width varies from 8.79 nm to 6.78 nm. Finally, the simulation results are verified experimentally.

Key words fiber optics; radiation effects; erbium-doped fiber source; output characteristics

OCIS codes 060.2310; 060.2410; 140.6630; 350.5610

1 引 言

掺铒光纤(EDF)光源具有功率大、光谱宽和平均波长稳定等优点,是高精度光纤陀螺的理想光源^[1-3]。太空中光纤器件 10 年内会受到约 200 krad(1 rad=10⁻² Gy)的总辐射剂量的约束,这对飞行器的可靠性和寿命提出了严重的考验^[4-5]。研究表明,在该量级的空间辐射环境下,掺铒光纤光源中对辐射最敏感的部分为掺铒光纤,其辐射致损耗是光源辐射致损耗的主要来源^[6],激光二极管(LD)抽运光源的输出功率衰减小于 2%,波分复用器、光隔离器、法拉第反射镜的辐射致损耗均小于 0.2 dB^[7],因此,掺铒光纤光源受辐射的影响主要来自于掺铒光纤的辐射效应。国内外研究人员主要从掺铒光纤的辐射特性^[6,8-9]或掺铒光纤光源本身的辐射特性^[10-12]展开研究,而关于掺铒光纤辐射效应对掺铒光纤光源输出特性影响的研究迄今为止尚未见报道。

收稿日期: 2017-07-03; **收到修改稿日期:** 2017-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(61575013)

作者简介: 李彦(1975—),女,博士,讲师,主要从事光纤陀螺、光纤传感器方面的研究。

E-mail: lettlorom1118@sina.com

* **通信联系人.** E-mail: likeqin@buaa.edu.cn

本文对掺铒光纤进行了辐照测试,利用测试数据计算了不同辐射剂量下掺铒光纤的吸收截面和发射截面。基于幂率模型建立了掺铒光纤吸收截面和发射截面的辐射模型,仿真分析了掺铒光纤辐射效应对掺铒光纤光源输出特性的影响,最后对仿真结果进行了实验验证。

2 理论分析与建模

2.1 掺铒光纤辐射模型

铒离子的能级由于晶格环境的影响存在 Stark 分裂^[13],吸收截面和发射截面在一定波长范围内形成了谱分布,因此掺铒光纤可作为宽带光源的增益和传输介质。吸收截面和发射截面是光源仿真的重要参数,也是判断光源输出光谱性质的重要指标。依据 Fuchtbauer-Ladenburg 分析理论^[14],掺铒光纤的吸收截面和发射截面可分别由光纤的吸收系数和发射系数计算得到。吸收系数通过测量两段不同长度的光纤,由在相同波长和输入光功率条件下的传输光谱差值得到;发射系数通过测量两段不同长度的光纤,由在相同抽运波长和功率条件下的荧光谱差值得到。测量发射系数时,被抽运的掺铒光纤的长度不能太长,否则铒离子不能得到充分的抽运^[15]。测试的实验装置如图 1 所示(图中 OSA 为光谱仪),采用⁶⁰Co 辐射源对掺铒光纤进行 γ 射线辐照,辐射剂量率为 2.5 Gy/min,辐射总剂量为 500 Gy。自发放大辐射(ASE)光源用于测量掺铒光纤的吸收系数,980 nm 工作波长的 LD 光源用于测量掺铒光纤的发射系数,抽运功率为 100 mW,掺铒光纤长度分别为 1 m 和 0.5 m。测量发射系数时,该长度的掺铒光纤中铒离子均能得到充分的抽运。

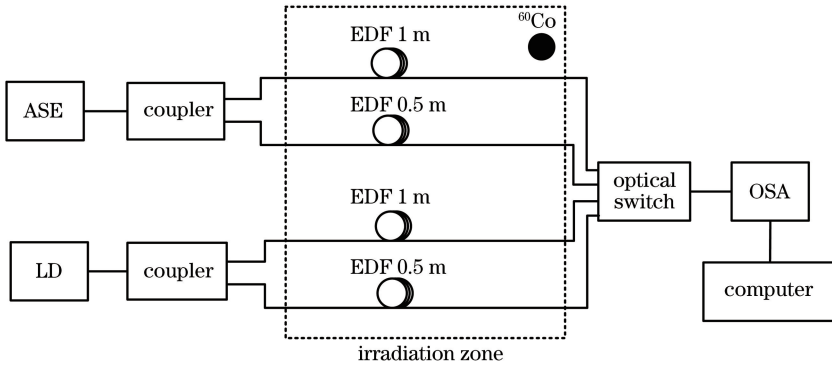


图 1 掺铒光纤吸收和发射谱的测量装置

Fig. 1 Measuring equipment of absorption and emission spectra of erbium-doped fiber

掺铒光纤吸收系数和发射系数测量结果如图 2 所示。吸收截面和发射截面可表示为^[15]

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{\alpha_a(\lambda)}{N_d \cdot \Gamma(\lambda)}, \quad (1)$$

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{\alpha_e(\lambda)}{N_d \cdot \Gamma(\lambda)}, \quad (2)$$

式中 $\alpha_a(\lambda)$ 为吸收系数, $\sigma_a(\lambda)$ 为吸收截面, $\alpha_e(\lambda)$ 为发射系数, $\sigma_e(\lambda)$ 为发射截面, $\Gamma(\lambda)$ 为信号光模场与铒离

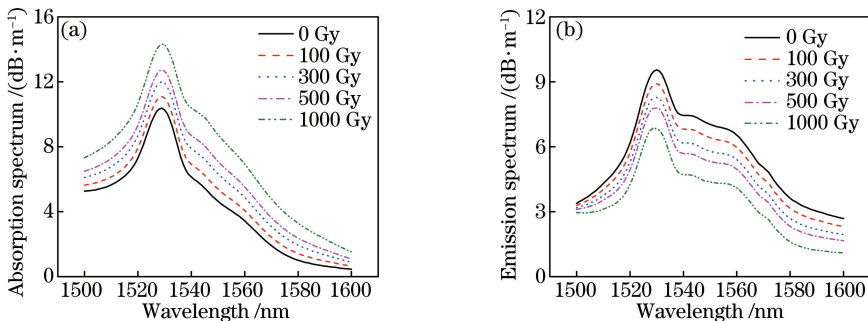


图 2 掺铒光纤吸收谱和发射谱测量结果。(a)吸收谱;(b)发射谱

Fig. 2 Absorption and emission spectra of erbium-doped fiber. (a) Absorption spectrum; (b) emission spectrum

子掺杂之间的重叠积分, N_d 为等效的铒离子浓度。

在单模条件下, $\Gamma(\lambda)$ 表示为

$$\Gamma(\lambda) = 1 - \exp(-2d_F^2/d_s^2), \quad (3)$$

式中 d_F 为掺铒光纤芯径, d_s 为信号光的模场直径。

铒离子的等效掺杂浓度 N_d 可表示为

$$N_d = xN_A\rho_0/167.3, \quad (4)$$

式中 x 为铒离子的掺杂浓度, N_A 为阿伏伽德罗常数, ρ_0 光纤的玻璃密度, 167.3 为铒元素的原子量。

测试使用的 IXfiber 光纤芯径 d_F 为 3.6 μm , 信号光模场直径 d_s 为 6.2 μm , 等效掺杂浓度 x 为 5035×10^{-6} , 光纤的玻璃密度 ρ_0 为 $1.498 \times 10^6 \text{ g/m}^3$, 阿伏伽德罗常数 N_A 为 6.02×10^{23} 。计算得到掺铒光纤在辐射剂量分别为 0, 100, 300, 500, 1000 Gy 时的吸收截面和发射截面结果, 如图 3 所示。计算得出的吸收截面和发射截面结果均在 10^{-25} m^2 的数量级, 与文献[12]中的结果相符合, 证明这种测量方法是可行的。

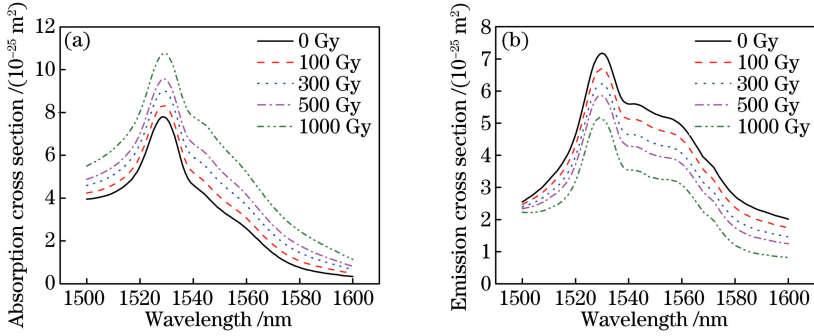


图 3 掺铒光纤截面计算结果。(a)吸收截面;(b)发射截面

Fig. 3 Cross section of erbium-doped fiber. (a) Absorption cross section; (b) emission cross section

由计算结果可以得到, 辐射使得掺铒光纤的吸收截面增加, 发射截面减少。为了仿真掺铒光纤吸收截面和发射截面受辐射变化对光源输出特性的影响, 对计算得出的吸收截面和发射截面建立模辐射模型并进行拟合。研究表明, 幂率模型对光纤材料的辐射致衰减特性的拟合有较好的适应性^[16]。同时从测量结果可以得出, 辐射后吸收截面与辐射前吸收截面的差值, 以及辐射后发射截面和辐射前发射截面的差值, 均基本满足关于辐射剂量的幂律函数, 因此基于幂律模型建立了掺铒光纤吸收截面和发射截面随辐射剂量变化的函数, 表达式为

$$\sigma_a(\lambda_i, D) = \sigma_a(\lambda_i, 0) + A_a(\lambda_i) \cdot D^{B_a(\lambda_i)}, \quad (5)$$

$$\sigma_e(\lambda_i, D) = \sigma_e(\lambda_i, 0) - A_e(\lambda_i) \cdot D^{B_e(\lambda_i)}, \quad (6)$$

式中 $\sigma_a(\lambda_i, D)$ 、 $\sigma_e(\lambda_i, D)$ 分别为辐射剂量为 D 时波长 λ_i 对应的吸收截面和发射截面, $\sigma_a(\lambda_i, 0)$ 、 $\sigma_e(\lambda_i, 0)$ 分别为辐射前波长 λ_i 对应的吸收截面和发射截面, $A_a(\lambda_i)$ 、 $B_a(\lambda_i)$ 分别为拟合吸收截面时波长 λ_i 对应的常数, $A_e(\lambda_i)$ 、 $B_e(\lambda_i)$ 分别为拟合发射截面时波长为 λ_i 对应的常数。

波长为 λ_i 时, 将计算得到的 0, 100, 300, 500, 1000 Gy 剂量下的吸收截面值 $\sigma_a(\lambda_i, 0)$ 、 $\sigma_a(\lambda_i, 100)$ 、 $\sigma_a(\lambda_i, 300)$ 、 $\sigma_a(\lambda_i, 500)$ 、 $\sigma_a(\lambda_i, 1000)$ 通过(5)式进行拟合。拟合采用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法, 拟合得到常数 $A_a(\lambda_i)$ 、 $B_a(\lambda_i)$ 和拟合度 R^2 。 R^2 越接近 1, 表示拟合的效果越好, 函数模型越合适。发射截面的拟合采用相同的方法, 通过(6)式进行拟合, 同样得到每个波长下的常数 $A_e(\lambda_i)$ 、 $B_e(\lambda_i)$ 和 R^2 。不同波长下的 R^2 结果如图 4 所示。

由不同波长下辐射模型拟合度的结果可知, 每个波长下的吸收截面和发射截面的拟合度都大于 0.985, 证明辐射模型合适。将拟合后的模型代入掺铒光纤光源的模型中, 即可模拟得到不同辐射剂量下掺铒光纤光源的输出光谱和特征参数。

2.2 掺铒光纤光源模型

根据抽运光输入方向和信号光输出方向的异同以及光纤两端是否加反射镜, 掺铒光纤光源可分为单程前向(SPF)、单程后向(SPB)、双程前向(DPF)和双程后向(DPB)4 种不同的结构^[17]。单程结构由于输出功

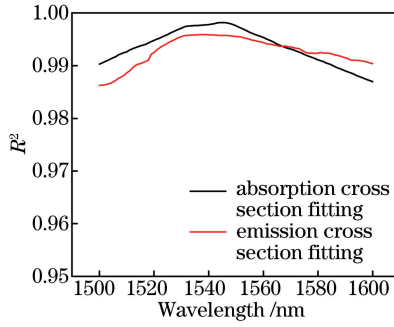


图 4 掺铒光纤吸收截面和发射截面辐射模型拟合度

Fig. 4 Fitting degree of erbium-doped fiber absorption and emission cross sections

率小,不满足光纤陀螺的精度和灵敏度的要求,而双程后向结构的光源光谱特性好,输出功率大,应用范围最广^[18],因此本文研究的光源为双程后向结构的光源。设 z 为沿光纤的轴向坐标,抽运光由掺铒光纤的一端 ($z=0$) 注入,则铒离子吸收抽运光后导致能级上粒子数反转,从而产生自发辐射和进一步的受激辐射或吸收。考虑光纤内的信号光仅以 LP_{01} 模传播,信号光和抽运光在光纤内的传输方程可描述为^[18]

$$dP_{s,\nu_i}^+(z)/dz = \gamma_{s,\nu_i}(z)P_{s,\nu_i}^+(z) + \gamma_{es,\nu_i}(z)2h\nu_i(\Delta\nu/n), \quad (7)$$

$$dP_{s,\nu_i}^-(z)/dz = -\gamma_{s,\nu_i}(z)P_{s,\nu_i}^-(z) - \gamma_{es,\nu_i}(z)2h\nu_i(\Delta\nu/n), \quad (8)$$

$$dP_p(z)/dz = -\gamma_p(z)P_p(z), \quad (9)$$

式中 $dP_{s,\nu_i}^+(z)$ 为正向传播的信号光, $dP_{s,\nu_i}^-(z)$ 为反向传播的信号光, h 为普朗克常量, ν_i 为频率, $\Delta\nu$ 为谱宽, n 为 1500~1600 nm 范围内波长带的数量。 γ_s 、 γ_{es} 和 γ_p 分别为自发辐射光辐射和吸收几率的差值、ASE 光辐射几率和抽运光吸收几率,具体表达式为

$$\gamma_{s,\nu_i}(z) = r_0/S_s[\sigma_{e,\nu_i}N_2(z) - \sigma_{a,\nu_i}N_1(z)], \quad (10)$$

$$\gamma_{es,\nu_i} = r_0/S_s[\sigma_{e,\nu_i}N_2(z)], \quad (11)$$

$$\gamma_p(z) = r_0/S_p[\sigma_{pa}N_1(z)], \quad (12)$$

式中 r_0 为掺铒光纤的掺杂半径; S_s 为信号光波模面积; S_p 为抽运模面积; σ_{pa} 为抽运光吸收截面; $N_1(z)$ 和 $N_2(z)$ 分别为单位体积内激光上能级和激光下能级的粒子浓度。其中掺铒光纤的吸收截面 σ_a 和掺铒光纤的发射截面 σ_e 均为辐射剂量的函数,其他参数仿真时均视为常数。对于相同结构的光源,当光源结构参数相同时,掺铒光纤的吸收截面和发射截面变化决定了其输出光谱形状及其特征参数。

掺铒光纤光源最重要的输出特征参数为输出功率、平均波长和谱宽。由于掺铒光纤光源输出光谱的不规则性,定义一种加权平均计算方式,加权因子为功率谱密度。在 n 个波长带内,波长 λ_i 对应的功率值为 $P(\lambda_i)$,输出功率、平均波长和谱宽的表达式为

$$P = \sum_{i=1}^n P(\lambda_i), \quad (13)$$

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^n P(\lambda_i) \cdot \lambda_i / \sum_{i=1}^n P(\lambda_i), \quad (14)$$

$$\Delta\lambda = \sum_{i=1}^n P(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i / P_{\max}, \quad (15)$$

式中 P_{\max} 为输出光谱最大值, $\Delta\lambda_i$ 为波长带的带宽。

3 仿真分析

仿真程序利用差分迭代的方法,对信号光的传输方程进行求解。输入的数据包括光源的抽运功率、掺铒光纤的长度、掺铒光纤吸收和发射截面辐射模型、反射镜和滤波器等参数,仿真得到不同辐射剂量下光源的输出特性,并用实验测量结果对比验证。

仿真时使用 IXfiber 掺铒光纤,仿真参数如表 1 所示,光源的抽运功率为 100 mW,仿真的掺铒光纤长度为 2.4 m。增加了单边滤波技术,滤掉波长大于 1540 nm 的信号光成分。仿真辐射总剂量为 500 Gy。

表 1 光源仿真参数

Table 1 Simulation parameters of light source

Parameter	$r_o / \mu\text{m}$	$S_s / \mu\text{m}^2$	$S_p / \mu\text{m}^2$	σ_{pa} / m^2	$h / (\text{J} \cdot \text{s})$	n
Value	1.8	31.15	10.75	2.96×10^{-25}	6.626×10^{-34}	100

为了分析辐射对光源输出特性的影响,对比了辐射前后输出功率、平均波长和谱宽的变化。其中平均波长的变化相对于平均波长本身较小,故其计算公式为

$$\Delta\bar{\lambda} = 2 \times 10^6 \times (\bar{\lambda}_{\max} - \bar{\lambda}_{\min}) / (\bar{\lambda}_{\max} + \bar{\lambda}_{\min}), \quad (16)$$

式中 $\bar{\lambda}_{\max}$ 为辐射过程中平均波长的最大值, $\bar{\lambda}_{\min}$ 为辐射过程中平均波长的最小值, 单位为 10^{-6} 。

图 5 为不同辐射剂量下光源输出特征参数的仿真结果, 表 2 为辐射前后光源的输出特征参数, 以及辐射前后特征参数的变化量。

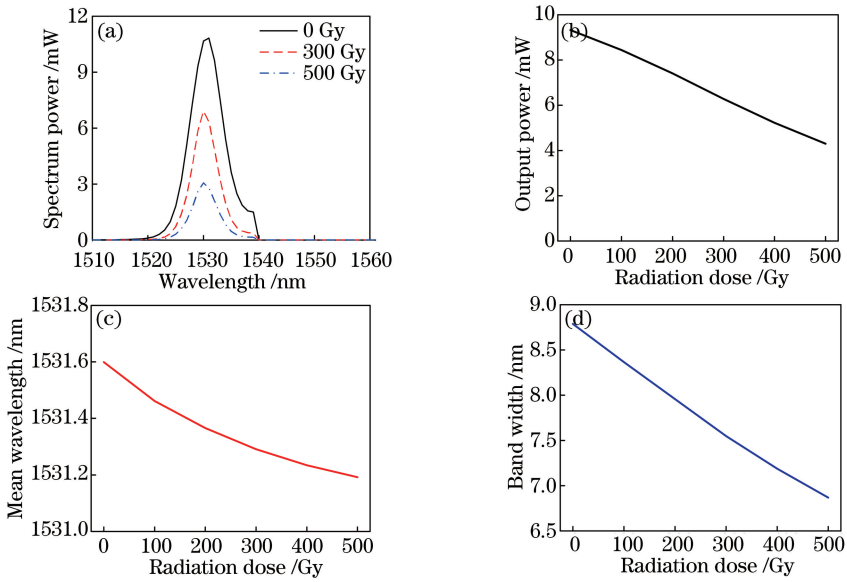


图 5 不同辐射剂量下光源仿真结果。(a)光谱功率;(b)输出功率;(c)平均波长;(d)谱宽

Fig. 5 Simulation performance of light source with different radiation doses.

(a) Spectrum power; (b) output power; (c) mean wavelength; (d) band width

表 2 仿真辐射前后光源输出特征参数及其变化

Table 2 Light source output characteristic parameters and their variation before and after irradiation

Light source parameter	Before irradiation	After 500 Gy irradiation	Variation
Output power /mW	9.32	4.30	5.02
Mean wavelength /nm	1531.60	1531.19	0.41
Band width /nm	8.79	6.78	2.01

从仿真的结果可以得出,500 Gy 辐射后光源输出功率出现明显衰减,输出功率衰减了 53.9%,平均衰减率为 -0.0101 mW/Gy 。光源的辐射致衰减主要来自于掺铒光纤的辐射效应,辐射使光纤生成色心,色心对光的吸收作用使掺铒光纤的吸收截面增加,发射截面减少,因此掺铒光纤光源输出功率出现衰减。光源平均波长向短波长方向移动,变化了 276×10^{-6} ,平均波长随辐射的平均变化率为 $-8.2 \times 10^{-4} \text{ nm/Gy}$ 。从辐射对掺铒光纤截面的影响分析可知,辐射前 1560 nm 处发射截面大于吸收截面,铒离子受激发射出 1560 nm 的信号光^[18],辐射后 1560 nm 处的发射截面相对于吸收截面逐渐失去优势,影响了光源的受激发射,使光源长波长处的辐射衰减大于短波长处的辐射衰减,从而造成了光源平均波长向短波长方向的移动。光源的谱宽出现明显变窄,谱宽减少了 22.9%,随辐射的平均化率为 $-4.02 \times 10^{-3} \text{ nm/Gy}$ 。

4 实验研究

为对上述的仿真模型进行验证,按照仿真的参数,设计并制作了双程后向结构的掺铒光纤光源,光源结

构及辐射实验装置如图 6 所示,图中 SMF 为单模光纤,WALL 为 10 m 左右厚度的水泥墙,用来隔离辐射,FRM 为法拉第旋转镜,WDM 为波分复用。光源常温下的输出功率为 8.1 mW,平均波长为 1531.52 nm,谱宽为 8.64 nm,常温下的输出功率略小于仿真值,误差来源于光纤熔点的损耗、无源器件本身的损耗和连接损耗。辐射剂量率与掺铒光纤测试时的剂量一致,为 2.5 Gy/min,总剂量为 500 Gy。在光源中,只有掺铒光纤直接暴露在伽马辐射源下,其他部分的器件都用厚铅块挡住,才能避免伽马射线的照射。测量仪器和光源的输出端采用 30 m 的单模光纤连接,单模光纤的损耗较小可忽略不计。

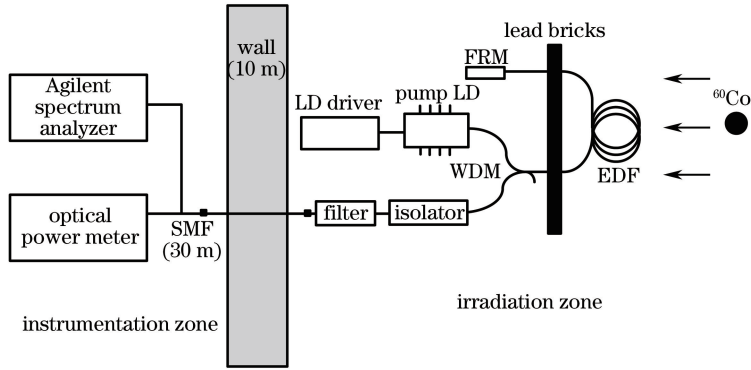


图 6 光源辐射实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of light source irradiation

实验测量得到的不同辐射剂量下光源实验输出结果如图 7 所示。从实验结果可以得出,500 Gy 辐射后,光源输出功率、平均波长和谱宽随辐射剂量增加的变化趋势均与仿真的结果一致。辐射后光源的功率衰减了 6.157 mW,辐射致衰减率为 -0.0123 mW/Gy ,实验测量的辐射致衰减率略大于仿真衰减率,其原因是:在实验过程中用铅块挡住的器件仍会受到小部分的微量辐射。平均波长向短波长漂移到 1531.13 nm,变化了 254×10^{-6} ,平均波长随辐射的平均变化率为 $-7.8 \times 10^{-4} \text{ nm/Gy}$ 。谱宽减少为 6.98 nm,变化了 19.2%,谱宽随辐射的变化率为 $-3.32 \times 10^{-3} \text{ nm/Gy}$ 。实验结果与仿真结果吻合得较好,仿真模型能够较好地反映掺铒光纤辐射效应对光源的影响。

仿真误差主要来自于:1)在吸收截面和发射截面的计算中,只考虑了光纤轴向的一维光强传输的情况,忽略了径向变化;2)仿真时忽略了光纤熔点的损耗和器件的连接损耗;3)仿真时忽略了各个波长之间的信号

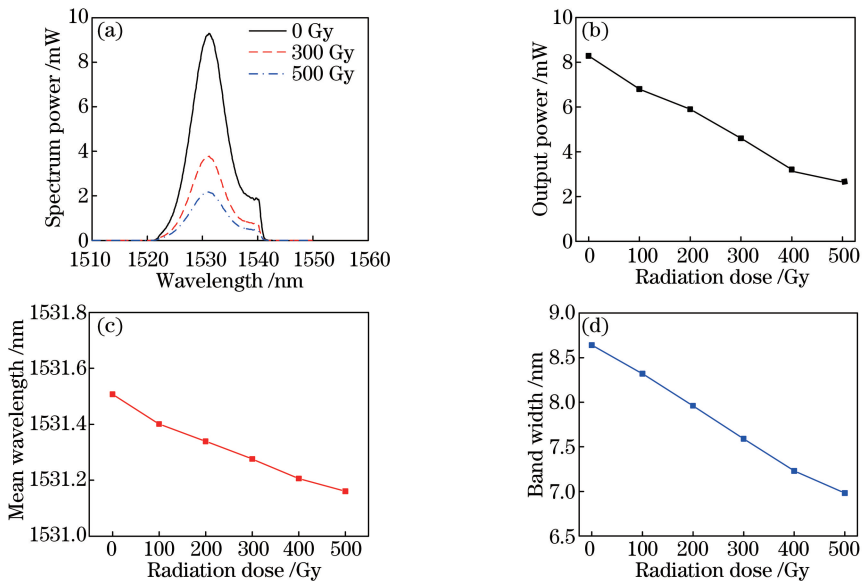


图 7 不同辐射剂量下光源实验测量结果。(a)光谱功率;(b)输出功率;(c)平均波长;(d)谱宽

Fig. 7 Experimental performance of light source with different radiation doses.

(a) Spectrum power; (b) output power; (c) mean wavelength; (d) band width

光可能存在的相互作用。

5 结 论

通过辐照实验,测量了掺铒光纤在不同辐射剂量下的吸收系数和发射系数,建立了基于幂率模型的掺铒光纤吸收截面和发射截面的辐射模型。仿真分析了掺铒光纤辐射效应对光源输出特性的影响。仿真分析得出,500 Gy 总剂量辐射后,光源的输出功率出现辐射致衰减,降低了 53.9%,平均波长向短波长方向移动,变化 267×10^{-6} ,谱宽变窄,变化了 22.9%。根据仿真的参数设计并制作掺铒光纤光源,通过光源的辐射实验验证了仿真模型的正确性。仿真模型可用于指导空间用掺铒光纤光源的研制。

参 考 文 献

- [1] Qian Jingren, Chen Dengpeng, Shen Linfang, *et al.* Forward-pumping dual-stage double-pass broadband erbium-doped fiber source[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(12): 1075-1078.
钱景仁, 陈登鹏, 沈林放, 等. 前向抽运双级双程掺铒光纤宽带光源[J]. 中国激光, 2001, 28(12): 1075-1078.
- [2] Qian Jingren, Cheng Xu, Zhu Bing. The experimental research of a broadband erbium-doped fiber superfluorescence source[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(11): 989-992.
钱景仁, 程旭, 朱冰. 掺铒光纤超荧光宽带光源的实验研究[J]. 中国激光, 1998, 25(11): 989-992.
- [3] Liao Huiqi, Luo Rongya, Deng Sheng, *et al.* Characteristics of light source based on dual polarization fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0505009.
廖恢齐, 罗荣亚, 邓圣, 等. 双偏振光纤陀螺光源特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505009.
- [4] Williams G M, Friebele E J. Space radiation effects on erbium-doped fiber devices: Sources, amplifiers, and passive measurements[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 1531-1536.
- [5] Li Long, Ding Xiaokun, Chen Linfeng, *et al.* Research on a method of radiation-resistant RLG readout system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202006.
李龙, 丁小昆, 陈林峰, 等. 激光陀螺抗辐照读出系统方案研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202006.
- [6] Girard S, Tortech B, Régnier E, *et al.* Proton- and gamma-induced effects on erbium-doped optical fibers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2426-2434.
- [7] Zhu Jianhui. Study on space environmental adaptability of erbium-doped photonic crystal fiber source[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015: 13-15.
朱剑辉. 掺铒光子晶体光纤光源空间环境适应性研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015: 13-15.
- [8] Li Jingfei, Chen Weimin, Lei Xiaohua, *et al.* Gamma radiation effects on erbium-doped optical fibers properties[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(6): 1882-1887.
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.
- [9] Lezius M, Predehl K, Stöwer W, *et al.* Radiation induced absorption in rare earth doped optical fibers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(2): 425-433.
- [10] Wang Wei, Wang Xuefeng, Li Jing, *et al.* Experiment on performance of erbium-doped fiber source for high performance fiber-optic gyroscope in a space irradiation environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1826-1830.
王巍, 王学峰, 李晶, 等. 高精度光纤陀螺用掺铒光纤光源辐照性能试验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1826-1830.
- [11] Wang W, Wang X F, Xia J L. The influence of Er-doped fiber source under irradiation on fiber optic gyro[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(1): 39-43.
- [12] Li M, Song N F, Jin J. Gamma radiation effects on the DPB SFS in space FOGs applications[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(17): 1542-1545.
- [13] Wysocki P F, Kim B Y, Digonnet M J F, *et al.* Temperature stabilized broadband light source: European Patent 0476914A2[P]. 1996-01-17.
- [14] Barnes W L, Laming R I, Tarbox E J, *et al.* Absorption and emission cross section of Er^{3+} doped silica fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(4): 1004-1010.
- [15] Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(2):

271-283.

- [16] Griscom D L, Gingerich M E, Friebele E J, *et al.* Radiation-induced defects in glasses: Origin of power law dependence of concentration on dose[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(7): 1019.
- [17] Xing Lifeng, Feng Ying, Xiao Rui. Broadband Er-doped superfluorescent fiber sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(12): 37-40.
邢丽峰, 冯莹, 肖瑞. 宽带掺铒光纤超荧光光源[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(12): 37-40.
- [18] Wysocki P F, Digonnet M J F, Kim B Y, *et al.* Characteristics of Erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(3): 550-567.