

# 光纤布拉格光栅 $\gamma$ 辐射损伤及其对光谱特性的影响

马晶 车驰<sup>†</sup> 于思源 谭丽英 周彦平 王健

(哈尔滨工业大学可调谐激光(气体)技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2011年5月24日收到; 2011年6月27日收到修改稿)

基于色心产生模型理论分析了电离辐射对光纤布拉格光栅的影响, 并推导出了光栅有效折射率变化与辐射剂量的函数关系式. 使用  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  辐射源对光纤布拉格光栅进行了总剂量为  $1 \times 10^6$  rad 的电离辐射实验, 实验结果与理论符合较好. 在辐射环境下, 光栅反射谱的峰值波长随着剂量增加向着长波方向移动, 由其计算所得的辐射致折射率变化规律与所得到的函数关系式相符. 该公式结合低剂量辐射实验可预测光栅在高剂量辐射下的性能变化, 对评估光栅产品抗辐射特性, 及筛选出性能较好产品有着实际应用价值.

**关键词:** 光纤, 电离辐射, 色心, 缺陷

**PACS:** 42.88.+h, 61.80.Ed, 61.72.jn

## 1 引言

光纤布拉格光栅是通过相位掩模紫外曝光等方式, 在纤芯内形成折射率周期性分布, 其作用的实质就是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或反射镜. 利用这一特性可以制造出很多性能独特的光纤器件. 这些器件具有附加损耗小、体积小、易与光纤耦合、可与其他光器件兼容为一体以及不受振动等环境影响等一系列优异性能<sup>[1]</sup>. 而且其为被动型原件, 不消耗电能. 结合以上优点其在卫星激光通信上有着广泛的应用前景: 1) 窄带滤波器, 利用光纤布拉格光栅的窄带滤波特性, 其作为一个滤波器放置在接收端的前端, 可以抑制背景噪声; 2) WDM 系统的波分复用和解复用单元; 3) 光分插复用器<sup>[2-4]</sup>. 同时其作为光纤传感器可以对卫星或核设施等进行监测, 通过对位移、速度、温度等的测量, 反映设施的工作状态, 保证其工作健康<sup>[5-7]</sup>.

航天及核反应堆的一个共同特点是存在恶劣的辐射环境, 对光纤器件的性能造成损伤<sup>[4-9]</sup>. 辐射对物质作用, 其能量沉积主要通过两种方式, 一种是原子的位移效应, 一种就是电离效应. 由于二

氧化硅光纤中的强共价键结构, 辐射粒子的入射很难造成位移效应, 因此对光纤器件来说, 主要起作用的是电离效应<sup>[10]</sup>. 光纤中存在着先驱缺陷, 这些固有点缺陷在二氧化硅本征能级中形成缺陷能级, 在辐射情况下, 通过电离效应引起缺陷能级电子电离就形成了色心. 色心的形成就造成了光纤吸收光谱的变化<sup>[11-15]</sup>.

为了评估辐射环境下光纤布拉格光栅性能的变化, 必须通过实验对其进行研究. 在空间或反应堆环境下进行实验, 由于其费用高、周期长、难度大, 因此一般在地面实验室环境使用电离辐射源对器件的电离效应进行模拟. Ferdinand 等<sup>[5]</sup>和 Gusarov 等<sup>[6,7]</sup>对写在掺锗光纤上的光纤布拉格光栅进行了  $\gamma$  及中子辐照实验, 观察到了光栅反射光峰值波长及折射率的增大, 并认为该现象由电离辐射产生的色心所导致, 但是并未对色心的产生规律和趋势进行深入的分析<sup>[5-7]</sup>.

本文从理论上分析了电离辐射对光纤的影响. 使用  $\gamma$  辐射源 ( $^{60}\text{Co}$  源) 对光纤光栅样品进行了电离辐射实验, 并进行了样品辐射后的常温退火实验. 得到的模型与实验结果符合得较好, 并且该公式在

<sup>†</sup> E-mail: chiche.hit@gmail.com

实际工作中有着一定的应用价值.

## 2 光栅辐射损伤的色心产生模型

非晶体二氧化硅具有无规则网络结构, 硅氧四面体结构单元通过顶角相互连接, 短程有序, 范围约 10 nm, 和晶体硅相比, 非晶体硅玻璃在制备过程中就可能含有中间体、悬挂键和过氧连接等缺陷结构. 在辐射情况下, 由于玻璃网格结构的变化或固有点缺陷结构俘获电子或空穴, 在玻璃材料中形成新的吸收中心, 这将影响硅玻璃的物理化学性能.

光纤中的固有缺陷是不可避免的, 纯二氧化硅光纤对电离辐射并不敏感, 但是掺杂元素会极大的影响光纤的辐射敏感性. 同时, 光纤生产过程中引入的杂质, 以及光纤拉丝过程中由于工艺原因造成的缺陷, 都是不可避免的.

光纤光栅原理的色心模型认为, 掺杂物质与 SiO<sub>2</sub> 混合形成结构缺陷, 在外界紫外光场的作用下, 掺锗光纤中的缺氧中心对紫外光强烈吸收, 电离释放电子陷于缺陷位置, 形成色心导致了吸收谱的变化, 并因此导致了折射率变化<sup>[16]</sup>. 值得注意的是, 一般来说, 光纤光栅的写入使用的是紫外光, 而对于我们所使用的  $\gamma$  辐照来说, 其光子能量大于紫外光, 不能引起缺氧中心的共振吸收.  $\gamma$  射线光子引起材料中电子电离或激发, 并被先驱缺陷俘获而形成色心, 因此其产生色心种类与紫外曝光不尽相同, 但是其与紫外曝光形成的色心一样导致了吸收谱的变化, 并通过 K-K 关系导致了折射率的变化.

随着色心的产生, 光纤的吸收光谱将发生变化, 而且增大了其在信号传输波段的损耗. 辐射是一个复杂的物理化学过程, 不仅涉及吸收剂量  $D$  和辐射中采用的剂量率  $J$ , 还涉及与材料种类和缺陷分布有关的因子. 在上述分析及前人工作的基础上, 可提出如下假设:

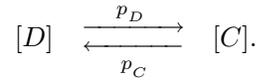
1) 缺陷均匀分布在光纤内, 其浓度为  $N$ ;

2)  $n(t)$  为  $t$  时刻  $\gamma$  辐射在光纤内产生的色心浓度, 在受到辐射之前  $n(t) = 0$ , 未辐射前光纤在该色心相应吸收波段的吸收为本底吸收, 其中  $t$  为光纤样品受到  $\gamma$  射线照射的时间;

3)  $\frac{dn(t)}{dt}$  为单位时间、单位体积的光纤内缺陷转变为色心的数量;

4) 不考虑色心的转型和聚合等复杂过程.

如果用  $[D]$  表示先前固有点缺陷, 用  $[C]$  表示生成的色心,  $p_D$  和  $p_C$  分别表示在辐射过程中, 由先前固有点缺陷形成色心和由色心退化形成先前固有点缺陷的概率, 则上述过程可表示如下:



则根据上述假设, 色心的速率方程由下式给出:

$$\frac{dn(t)}{dt} = Jp_D [N - n(t)] - Jp_C n(t). \quad (1)$$

根据假设有  $n(0) = 0$ , 所以在  $t$  时刻光纤内色心的浓度为

$$n(t) = \frac{p_D N}{p_D + p_C} \cdot \{1 - \exp[-(p_D + p_C)Jt]\}. \quad (2)$$

因为  $Jt = D$ , 所以色心浓度与辐射剂量  $D$  之间的关系如下:

$$n(t) = \frac{p_D N}{p_D + p_C} \cdot \{1 - \exp[-(p_D + p_C)D]\}. \quad (3)$$

Smakula 根据经典色散理论得到  $\int \alpha_i(E) dE$ , 即吸收曲线积分面积与  $n$  个振子强度为  $f$  的色心的关系<sup>[17]</sup>. 如下所示:

$$n \cdot f = \frac{9cm^*}{2\pi^2 e^2 \hbar} \cdot \frac{n_z}{(n_z^2 + 2)^2} \cdot \int \alpha(E) dE, \quad (4)$$

上式称为 Smakula 公式,  $n_z$  为晶体折射率,  $m^*$  为色心电子的有效质量,  $f$  为有效振子强度,  $c$  为光速,  $\hbar = h/(2\pi)$ ,  $h$  为普朗克常量.

吸收曲线积分面积可用一等效面积表示, 将一些常数代入后得到

$$n = 10^{17} \frac{C}{f} \cdot \frac{n_z}{(n_z^2 + 2)^2} \cdot \alpha_{\max} \cdot \Delta\nu_{1/2}, \quad (5)$$

式中  $\alpha_{\max}$  为该吸收曲线的峰值吸收系数;  $\Delta\nu_{1/2}$  为吸收带的半高宽;  $C$  是与线型有关的一个常数.

假设吸收带的半高宽为一个常量, 则由上式可以得到吸收系数与色心浓度呈正比关系, 即:

$$\alpha \propto n = \frac{p_D N}{p_D + p_C} \cdot \{1 - \exp[-(p_D + p_C)D]\}. \quad (6)$$

由以上可知, 色心的浓度与峰值吸收系数成正比. 复极化率的实部与虚部满足 Kramers-Kronig 因果性定律, 可以推导出吸收系数与折射率之间的关系<sup>[16]</sup>:

$$n_z - 1 = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{\alpha(\lambda)}{1 - (\lambda/\lambda')^2} d\lambda, \quad (7)$$

其中  $\lambda'$  为感兴趣的波长;  $n_z$  为波长  $\lambda'$  处的折射率;  $\alpha(\lambda)$  为吸收系数. 那么:

$$\Delta n_z = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{\Delta\alpha(\lambda)}{1 - (\lambda/\lambda')^2} d\lambda. \quad (8)$$

如果发生吸收谱变化的区域远离感兴趣的波长  $\lambda'$ , 并且可以表示为一系列高斯吸收带的叠加, 则上式可近似的表示为

$$\Delta n_z = \frac{1}{4\pi\sqrt{\pi \ln 2}} \sum_i \frac{\Delta\alpha_{\max} \Delta\lambda_{1/2}}{1 - (\lambda_i/\lambda')^2}, \quad (9)$$

式中  $\lambda_i$  为第  $i$  个吸收带的中心波长,  $\Delta\alpha_{\max}$  为峰值吸收改变量,  $\Delta\lambda_{1/2}$  为该吸收带的半高全宽 (FWHM).

从 (9) 式可以看出, 玻璃吸收系数的变化与折射率的变化成正比. 考虑最简单的情况:  $\gamma$  辐射对光纤的电离作用主要产生一种色心, 其导致吸收谱近似为高斯线型. 当其吸收带 FWHM 为一定值时, 联立公式 (3),(6) 及 (9) 将得到辐射剂量与光栅折射

率变化之间的关系:

$$\Delta n_z = \eta \cdot \frac{p_D N}{p_D + p_C} \cdot \{1 - \exp[-(p_D + p_C)D]\}, \quad (10)$$

其中  $\eta$  是与辐射产生的色心类型及吸收谱相关的常数.

### 3 $\gamma$ 辐射实验设置

为了验证我们所进行的分析, 进行了光纤布拉格光栅的电离辐射实验. 实验所采用的  $\gamma$  辐射源为  $^{60}\text{Co}$  辐射源, 辐射时剂量率为 25.2 rad/s, 总剂量  $1 \times 10^6$  rad. 布拉格光栅通过相位掩模法写在 SMF28 光纤上, 其反射谱的峰值波长如表 1 所示.

表 1 样品光纤参数

序号	光纤种类	峰值波长/nm	制作方法
样品 1	SMF 28	1545.501	相位掩模法
样品 2	SMF 28	1546.570	相位掩模法
样品 3	SMF 28	1551.729	相位掩模法
样品 4	SMF 28	1562.457	相位掩模法

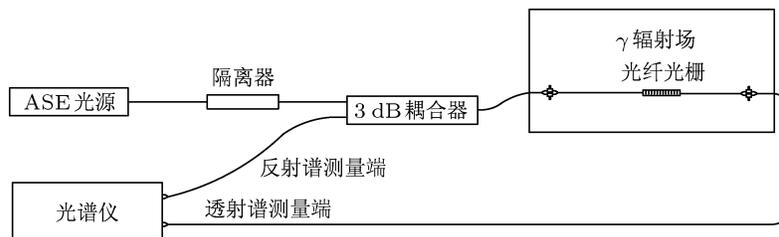


图 1 光纤电离辐射实验示意图

实验装置如图 1 所示. 辐射室内光栅样品两端各接长为 20 m 的 Corning 光纤 (共 40 m 长) 作为跳线, 引到辐射场外用以对光栅的反射谱及透射谱进行测量 (引到辐射场外是为了防止对人的辐射损害及对仪器造成干扰及辐射损伤). 跳线使用铅做屏蔽, 基本不受辐射影响. 光源为工作波长在 C 波段的 ASE 自发辐射光源, 其输出功率为 10 mW, 能够提供 3 dB 带宽大于 30 nm 的稳定输出光谱. 使用光谱仪测试光栅的反射谱和透射谱.

### 4 结果与讨论

图 2 给出了辐射前后光栅样品 1 光谱的变化. 其整个光谱发生了很明显的红移, 但是光谱形状保

持得较好, 反射带宽 (3 dB) 及反射强度均无明显的变化. 根据光栅的基本公式

$$\lambda_{\max} \approx \lambda_B = 2n_z \Lambda, \quad (11)$$

得到

$$\Delta n_z = \frac{\Delta\lambda_{\max}}{2\Lambda}, \quad (12)$$

其中  $\Delta\lambda_{\max}$  为峰值波长变化,  $\Lambda$  为光栅的周期长度;  $\lambda_B$  为光栅的布拉格波长, 由于光栅写入时产生的折射率变化远远小于光纤的初始折射率, 在光栅应用时可以认为其与峰值波长  $\lambda_{\max}$  近似相等. 为了更好地分析电离辐射对光纤布拉格光栅的影响, 我们使用 (12) 式将光栅波长的变化换算为有效折射率的变化, 其结果如图 3 所示, 光栅折射率的变化随着辐射剂量成指数规律增长. 一般来说, 色心

的产生速率  $p_D$  远远大于其复合的速率  $p_C$ , 因此, 为了验证公式的正确性, 使用以下的函数形式对样品 1 辐射致光栅折射率变化的数据进行拟合 (结果如图 4 所示):

$$y = y_0 - y_0 \exp(-B_0 x), \quad (13)$$

其中  $y_0 \approx \eta \cdot N$ ,  $B_0 = p_D + p_C$ . 从图 4 可以看出, 直接使用函数形式对实验数据进行拟合时, 误差是比较大的. 这是因为我们考虑的是最简单的情况, 即材料中只存在一种先驱缺陷, 并在辐照后转化为一种色心. 当样品中存在多种先驱缺陷时, (10) 式改写为多项式

$$\Delta n_z = \sum_i \eta^i \cdot \frac{p_D^i N^i}{p_D^i + p_C^i} \times \{1 - \exp[-(p_D^i + p_C^i) D]\}. \quad (14)$$

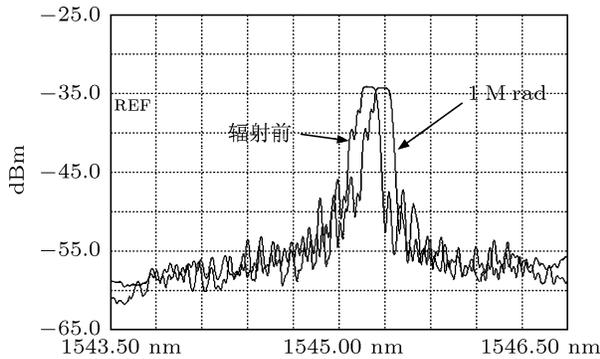


图 2 辐射前后样品 1 光谱变化

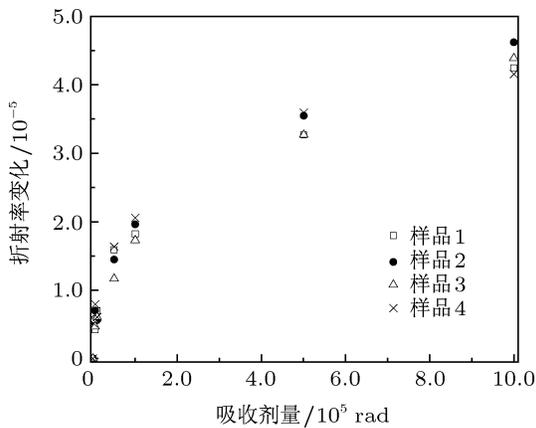


图 3 布拉格光栅辐射致折射率变化

在使用双 e 指数项形式对数据进行拟合后发现, 拟合曲线和实验数据符合得很好, 而三 e 指数项形式的拟合曲线与双 e 指数项的曲线几乎重合, 因此未在图上表示. 这说明, 在辐射过程中, 至少有

两种色心对光纤布拉格光栅样品的折射率变化做出了主要贡献, 同时也证明了我们以上分析的正确性. 其他样品的拟合参数如表 2 所示.

表 2 双 e 指数形式拟合参数

序号	$y_0$	$B_0$	$y_1$	$B_1$
样品 1	$1.24 \times 10^{-5}$	$5.53 \times 10^{-5}$	$3.98 \times 10^{-5}$	$1.28 \times 10^{-6}$
样品 2	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.44 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-5}$	$1.32 \times 10^{-6}$
样品 3	$9.59 \times 10^{-6}$	$5.27 \times 10^{-5}$	$4.50 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-6}$
样品 4	$1.02 \times 10^{-5}$	$5.32 \times 10^{-5}$	$3.05 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-6}$

在实验所达到的剂量范围内, 辐射致折射率的变化一直在增加, 虽然增长速度随着剂量增加放缓, 但是并未观察到饱和效应的发生. 而根据我们的分析, 在较大剂量处折射率的增加将会达到稳定, 这是因为, 首先, 通常认为光纤中的先驱缺陷是形成色心的主要原因. 这些固有点缺陷在二氧化硅本征能级中形成缺陷能级, 在辐射情况下, 通过电离效应引起缺陷能级电子电离就形成了色心. 一般来说对于低能粒子, 其主要以电离方式影响光纤材料, 不会形成新的点缺陷 [10]. 也就是说  $N$  为定值, 其结果就是折射率的最大改变量并不随着辐射剂量的增加而改变. 其次,  $p_D$  与  $p_C$  的值影响着样品折射率变化达到稳定的速度. 在辐射刚开始, 光纤中的色心快速累积, 但是由于光纤中的固有缺陷是一定值, 随着辐射剂量的进一步增大, 色心的产生和湮没形成了动态平衡, 达到饱和, 从而表现为样品折射率的变化趋于稳定.

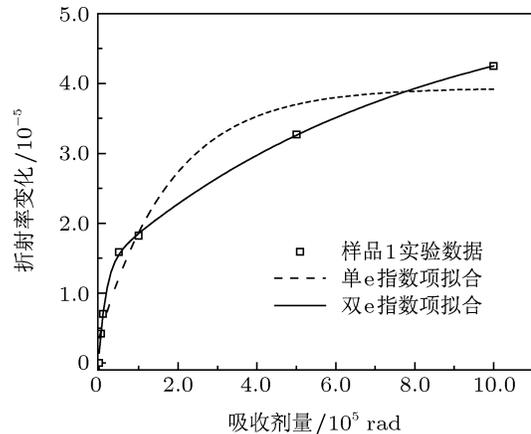


图 4 布拉格光栅样品 1 实验数据及拟合曲线

显然, 对于不同的样品来说, 其辐射下折射率的变化趋势是略有不同的, 这是因为制造过程中的差异 (如曝光量的不同) 造成了样品初始材料参数

的不同. 我们可以看到,  $N$ ,  $\eta$ ,  $p_D$  和  $p_C$  是与材料相关的参数, 其一般较难通过实验直接测定, 也对我们实际工程中直接应用公式进行计算和预测带来了难度. 可以考虑, 在光栅样品进行应用前, 进行较低剂量的辐射, 测得其性能的变化, 通过公式的拟合得到我们所需要的参数, 再进行外延计算, 得到样品在高辐射剂量下的性能变化. 而且由于我们观察到的恢复效应的存在, 在进行充分的退火后, 低剂量辐射对器件的性能不会造成比较明显的影响. 因此这种实验可以作为筛选, 挑选出抗辐射性能较好的器件进行应用, 又可以对器件在辐射环境下的性能进行预测, 并为辐射防护和器件的应用方式提供指导.

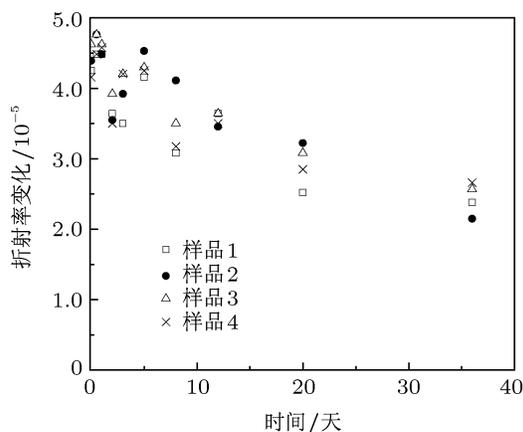


图5 辐射后样品折射率随时间变化

辐射结束后, 又对两种光纤布拉格光栅样品进

行了常温退火实验, 即在室温下跟踪测试两种光栅样品的性能变化, 实验长度为 36 天.

该实验结果如图 5 所示. 其中 0 天表示的是辐射达到最大剂量时样品的吸收系数. 从图中可以看出, 光纤布拉格光栅样品表现出明显的恢复效应, 辐射造成的折射率增加在辐射结束后一天内迅速减小, 其恢复趋势随着时间增长变缓, 并趋于稳定. 这是因为电离效应产生的色心并不是稳定的系统, 由于温度、光照等条件的影响, 部分非稳定的色心其俘获的电子、空穴最终被释放, 退化为对吸收没有贡献的缺陷. 部分稳定的色心仍存在于材料中, 造成样品吸收系数的永久增加.

## 5 结论

基于色心产生模型, 理论分析了电离辐射对光纤布拉格光栅的辐射损伤, 并推导出了辐射致折射率变化随着辐射剂量增长的函数关系式. 使用  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  辐射源对光纤布拉格光栅进行了电离辐射实验. 在辐射下光栅样品反射谱的峰值波长随着辐射剂量增加而向长波方向移动, 反射率及反射带宽未见明显变化. 拟合结果证明实验数据与理论分析的结果符合的较好. 得到的公式结合低剂量辐射实验可以筛选出抗辐射特性较好的光栅器件, 并可以预测其在高辐射剂量时的性能变化, 为辐射防护和器件合理应用提供依据, 对评估光栅产品抗辐射特性, 及筛选出性能较好光栅有着实际应用价值.

- [1] Marshall P W, Dale C J, Carts M A, Label K A 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 1958
- [2] Marshall P W, Dale C J, Burke E A 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 1982
- [3] Ott M N, Plante J, Shaw J, Garrison-Darrin M A 1997 *World Aviation Congress Anaheim, USA, October 13-16, 1997* p975592
- [4] Gusarov A I, Doyle D B, Karafolas N, Berghmans F 2000 *Photonics for Space Environments VII* (USA: SPIE) p253
- [5] Ferdinand P, Magne S, Marty V, Rougeault S 1994 *Optical Fiber Sensing and Systems in Nuclear Environment*, Mol, Belgium, September 17, 1994 p11
- [6] Gusarov A I, Berghmans F, Deparis O 1999 *IEEE Photo. Technol. Lett.* **11** 65
- [7] Gusarov A I, Fernandez A, Vssiliev S, Medvedkov O, Blondel M, Berghmans F 2002 *Nucl. Instrum. Meth. B Beam* **187** 79
- [8] Girard S, Tortech B, Regnier E, Van Uffelen M, Gusarov A, Ouerdane Y, Baggio J, Paillet P, Ferlet-Cavrois V, Boukenter A, Meunier J P, Berghmans F, Schwank J R, Shanryfelt M R, Felix J A, Blackmore E W, Thienpont H 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2426
- [9] Zhou C M, Zhang F, Ding L, Jiang D H 2011 *Laser Optoelectron. Prog.* **48** 040601 (in Chinese) [周次明, 张方, 丁立, 姜德生 2011 激光与光电子学进展 **48** 040601]
- [10] Holmes-Siedle A, Adams L 2002 *Handbook of Radiation Effects* (New York: Oxford University Press) pp 311-326
- [11] Regnier E, Flammer I, Girard S, Gooijer F, Achten F, Kuyt G 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1115
- [12] Rusell P S, Poyntz-Wright L J, Hand D P 1991 *Fiber Laser Sources and Amplifiers II*, San Jose, USA, September 18, 1990 p126
- [13] Neustrnev V B 1994 *J. Phys. Condens. Matt.* **6** 6901
- [14] Jiang H, Chen B X, Fu C S, Sui G R, Mamoru I 2010 *Acta Phys.*

- Sin.* **59** 7782 (in Chinese) [姜辉, 陈抱雪, 傅长松, 隋国荣, 矾守 2010 物理学报 **59** 7782]
- [15] Xiao Z Y, Luo W Y, Wang T Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2731 (in Chinese) [肖中银, 罗文芸, 王廷云 2007 物理学报 **56** 2731]
- [16] Hand D P, Russell P St J 1990 *Opt. Lett.* **15** 102
- [17] Fang S G, Zhang Q Y 1989 *Physics of Color Center in Crystal* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) pp 26–27 (in Chinese) [方书淦, 张启仁 1989 晶体色心固体物理学 (上海: 上海交通大学出版社) 第 26—27 页]

# $\gamma$ -radiation damage of fiber Bragg grating and its effects on reflected spectrum characteristics

Ma Jing   Che Chi<sup>†</sup>   Yu Si-Yuan   Tan Li-Ying   Zhou Yan-Ping   Wang Jian

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 24 May 2011; revised manuscript received 27 June 2011)

## Abstract

The ionizing radiation effects on fiber Bragg grating are theoretically analyzed based on the color center model. And the relationship between the radiation induced refractive index change and dose is deduced. Fiber Bragg grating sample are irradiated by  $\gamma$  ray with a total dose of  $1 \times 10^6$  rad. Under  $\gamma$  radiation the reflected spectrum peak wavelength of FBG sample is red shifted, but the full width at half maximum and the reflectivity are not changed obviously. The experiment results accord well with our function. With the low level radiation experiment, this expression can screen the FBG samples and predict their performances under high level radiation.

**Keywords:** fiber Bragg grating, ionizing radiation, color center, defect

**PACS:** 42.88.+h, 61.80.Ed, 61.72.jn

<sup>†</sup> E-mail: chiche.hit@gmail.com