

# $\gamma$ 射线辐照对掺Yb光纤材料性能的影响\*

黄宏琪 赵楠 陈瑰 廖雷 刘自军 彭景刚 戴能利†

(华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2014年4月30日收到; 2014年6月9日收到修改稿)

采用改进的化学气相沉积法制备掺Yb石英光纤预制棒, 以该预制棒制备了尺寸为10/130  $\mu\text{m}$ 的双包层掺Yb光纤, 将这些光纤分成若干组, 在不同剂量的 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐射源下辐照, 测试了光纤在辐射前后的吸收谱和激光性能以及光纤预制棒切片辐照后的吸收. 实验结果表明: 光纤中已存在的色心缺陷(如氧空位(II))和辐照引起的色心缺陷(如E'心、过氧基以及 $\text{Yb}^{2+}$ 离子)等因素的叠加作用可能导致辐照后的光纤在可见光区域的吸收显著增大; 与辐照前相比, 辐照后光纤的斜率效率、光-光效率显著下降, 剂量越大激光性能下降得越厉害; 基于Power-Law定理拟合了光纤辐致损耗与所受剂量的关系曲线, 定量分析了不同剂量辐照后光纤激光性能下降的原因. 研究结果将为进一步发展抗辐照光纤提供理论和实验依据.

**关键词:** 掺Yb双包层光纤, 辐致损耗, 色心, Power-Law定理**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc**DOI:** 10.7498/aps.63.200201

## 1 引言

光纤材料是光纤通信、光纤传感、光纤激光等领域的重要战略材料. 近年来随着光纤激光、光纤放大器的发展, 掺稀土光纤(rare-earth (RE) doped optical fibers)材料在通信、医疗、探测、军事等领域的应用迅猛发展. 以掺Yb双包层光纤作为增益介质的光纤激光器具有可靠性高、效率高、光束质量高、重量轻及体积小等优势, 其应用范围已经从传统领域拓展到太空、加速器、核设施等恶劣应用环境中. 例如, 2005年美国航天航空局NASA利用掺Yb光纤激光器进行卫星激光通信以及激光探测火星. 在这些环境中, 光纤材料会因为受到诸如 $\gamma$ 射线、质子、中子等重离子的辐射而导致光纤性能显著下降, 严重时甚至没有激光输出, 所以有必要对掺Yb光纤(YDFs)在辐照环境下的光学性能进行深入研究.

国际上很早就开展了光纤辐照性能的研究, 结果表明导致光纤性能下降的主要机制是光纤中产生了吸收光的缺陷, 这些缺陷抑制了光在某些波段

的传输<sup>[1-4]</sup>. 然而掺稀土光纤在辐射环境下的光学性能只限于少数研究<sup>[5-9]</sup>. 通过前人多年的研究<sup>[10]</sup>, 认为辐照造成光纤光学性能下降的机制有三种: 辐致损耗(RIA, 表现为光纤对传输光的吸收)、辐致发射(RIE, 表现为辐照过后的光纤会产生某些波段的波)、光致密(表现为辐照后光纤的折射率发生改变). 在这三种机制中, 辐致损耗被认为是导致光纤性能下降的主要原因. 一般认为, 辐照使光纤电离出自由电子和空穴对, 这些自由电子和空穴对又被光纤中的杂质或初始原子缺陷俘获而形成色心, 导致光纤产生一个很宽的吸收带. 文献<sup>[11]</sup>中阐述了不同辐射类型下光纤缺陷的形成机制. 为了预测光纤在辐射环境下的吸收损耗与辐照剂量、时间等的关系, 科研人员提出了一系列的经验与半经验模型<sup>[11]</sup>, 这些模型中比较理想的是Power-Law<sup>[12]</sup>定理. 关于光纤受辐照时在可见光和红外光区域吸收增强的原因, 文献<sup>[10]</sup>认为, 光纤的辐照敏感性随着掺稀土离子浓度的增大而加强, 稀土离子浓度越大, 光纤在辐照下形成色心缺陷的概率越大, 造成光纤在可见光和红外光区域的

\* 国家自然科学基金(批准号: 61378070)和湖北省自然科学基金(批准号: ZRY0535)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dainl@mail.hust.edu.cn

吸收增强, 并且不同的稀土离子对光纤的辐照敏感性影响差别巨大; 文献 [13] 认为, 提高光纤中稀土离子掺杂浓度的 Al 离子也会提高光纤的辐照敏感性, 从而导致光纤的吸收增强. 但至今辐照导致光纤传输性能显著降低的机制还不完全清楚 [5]. 另外国内外也在进行抗辐照光纤设计和制作方面的研究, 结果表明在光纤制作过程中加大 O<sub>2</sub> [14] 浓度或者将光纤载氢 [15] 都会改善光纤的抗辐照性能; 同时, 我们发现掺 Yb 玻璃或光纤中掺一定浓度的 Ce 离子可以很好地改善光纤的抗辐照性能.

本文通过测量辐照前后双包层掺 Yb 光纤、预制棒切片的吸收谱, 并结合前人的结论, 分析了 γ 射线辐照下色心吸收对光纤性能的影响. 根据 Power-Law 定理拟合了双包层掺 Yb 光纤的辐照损耗曲线, 结合理论预测了辐照影响光纤激光性能下降的趋势.

## 2 实验

### 2.1 光纤参数及辐照条件

实验所使用的光纤为单模双包层掺 Yb 光纤, 纤芯直径为 10 μm, 包层直径为 130 μm. 光纤辐照实验采用的是位于湖北省农业科学院辐照中心的 <sup>60</sup>Co γ 辐射装置. 实验中选取不同的辐照剂量对光纤进行辐照, 辐照结束后迅速进行光纤性能测试.

光纤的辐照分为 5 个剂量, 加上未辐照的光纤共 6 根. 光纤编号与辐照剂量如表 1 所示. 辐照所采用的光纤长为 20 m, 均在室温条件下进行测试.

表 1 光纤编号及其所受到的辐照剂量

光纤编号	1	2	3	4	5	6
辐照剂量/Gy	0	50	80	185	605	745

### 2.2 测试方法

采用 PK2500 测试光纤辐照前后的吸收, 测量的波长范围是 600—1500 nm, 间隔为 5 nm. 测试方法为常见的截断法, 即测量同一根光纤在不同长度下的输出功率, 由该法测光纤的吸收系数的方法如 (1) 式:

$$RIA(\lambda) = -\frac{10}{L} \lg \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 RIA (λ) 表示的是长度为 L 的光纤在波长 λ 处的吸收系数, 单位是 dB·km<sup>-1</sup>; P<sub>1</sub> (λ) 为波长 λ 处

光纤长度为 L<sub>1</sub> 时测得的输出功率; P<sub>2</sub> (λ) 为波长 λ 处把光纤截断 L (即此时光纤长度 L<sub>2</sub> = L<sub>1</sub> - L, 光纤长度单位为 km) 时测得的输出功率; L 为两次测量时截掉的光纤长度.

用吸收测试后所剩的光纤测了光纤激光谱和激光输出功率, 计算了辐照前后光纤的斜率效率、光-光效率. 测试系统 (如图 1 所示) 所用 LD 激光波长为 915 nm, 光纤光栅谐振波长为 1080 nm. 通过该系统测得辐照前后光纤的激光谱、输出功率. 图 1 中滤抽运光装置是用来滤掉在光纤输出端光纤包层中残留的抽运光, YDFs 尾端连光谱仪或者功率计以测量其激光谱或者功率.

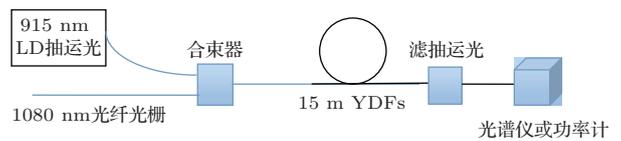


图 1 掺 Yb 光纤的激光谱、输出功率测试系统

同时我们还测量了辐照前和 745 Gy 辐照后的光纤预制棒切片的吸收系数, 该测试由紫外可见光光度计 Lambda 35 测量.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 不同剂量 γ 辐照下掺 Yb 光纤吸收谱的变化

掺 Yb 光纤在辐照前以及不同的辐照剂量下的吸收系数随波长的变化如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 辐照后掺 Yb 光纤在可见光区域的吸收系数明显增强, 并且随着辐照剂量的增加, 可见光区域的吸收系数增长得很快, 185 Gy 时在 600 nm 处的吸收系数已经超过了 915 nm 和 976 nm 处光纤的吸收, 而这两个波长是 Yb<sup>3+</sup> 离子的本征吸收峰. 可以看出, 辐照前后 Yb<sup>3+</sup> 离子的本征吸收系数变化不大, 峰值波长、半高宽也未见明显变化, 这说明辐照可能并没有改变光纤中 Yb<sup>3+</sup> 离子的能级结构, 从而说明 Yb<sup>3+</sup> 离子的配位场基本没有发生改变.

图 3 所示为光纤预制棒切片在辐照前和 745 Gy 辐照后的吸收系数, 可见辐照后切片在 350—700 nm 之间有很强的吸收, 有一个或者多个吸收峰存在. 图中附有光纤预制棒切片辐照前后在显微镜下观察到的端面, 可以发现纤芯在 745 Gy 辐照后已经变黑.

一般认为 $\gamma$ 辐照下的辐致损耗是光纤吸收增强的主要因素. 辐致损耗是光纤在辐照下产生电子空穴对, 这些电子空穴对与光纤中的离子或者缺陷结合形成了色心, 从而产生附加损耗. 色心主要包括氧空位 (ODCs, 吸收峰大约为 3.15 和 7.6 eV)、过氧连接 (POL, 吸收峰为 3.8 eV)、E' 色心 (吸收峰为 5.8 eV)<sup>[16-18]</sup>、非桥氧心 (NBO-HCs, 吸收峰位于 4.8 eV)、过氧基 (POR, 吸收峰位于 2.3 eV)<sup>[17-19]</sup>、自陷激子 (self-trapped excitons, STE)<sup>[20]</sup>、自陷空穴 (self-trapped holes, STHs, 吸收峰大约为 2.16 和 2.6 eV)<sup>[21-23]</sup>, 另外还有一些氢类缺陷、O<sub>3</sub> 分子<sup>[24]</sup> 等. 这些石英光纤在辐照下产生的辐致吸收带在文献 [10] 中有较为详细的分析.

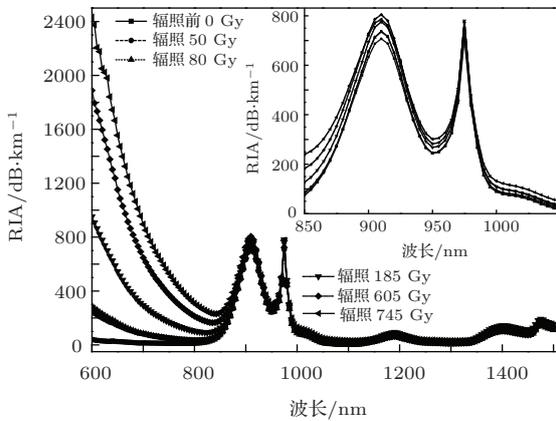


图2 辐照前后在不同波长处掺 Yb 光纤的吸收系数

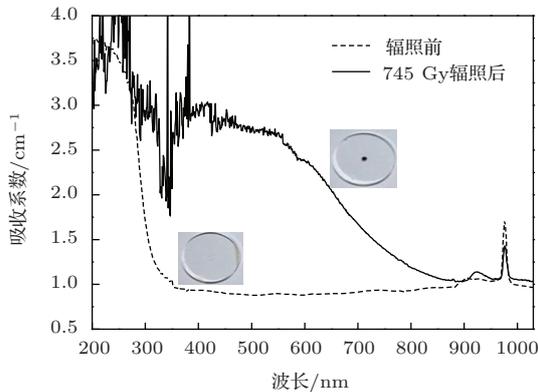


图3 辐照前和 745 Gy 辐照后光纤预制棒切片吸收系数

根据前人对辐致色心的研究, 我们认为造成光纤吸收迅速增大的原因可能是在辐照下光纤中非弛豫 ODC (II)<sup>[25]</sup>, E' 心, POR 等缺陷的吸收增强.

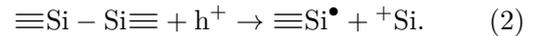
在石英光纤制备过程中, 由于气氛的差异, 可能形成氧空位缺陷, 氧空位缺陷分为弛豫氧空位 ODC (I) 和非弛豫氧空位 ODC (II). 研究表明, 辐照前 ODC (I) 占较大的比例, 而在高能辐照下

ODC (II) 占的比例将增大. ODC (I) 的吸收峰为 7.6 eV, 对应的是单态单态跃迁 (S<sub>0</sub>—S<sub>1</sub>), 位于深紫外区, 很少受到人们的关注. 而 ODC (II) 吸收峰为 3.15 eV, 对应的是单态-三重态跃迁 (S<sub>0</sub>—T<sub>1</sub>), 波长大约为 393 nm. 所以当光纤受到高能辐照后在 393 nm 附近区域的吸收迅速增强. 图 4 为氧空位缺陷的两种类型.



图4 两种氧空位的结构示意图

在高能辐照下这些氧空位又会俘获空穴而形成 E' 心, 具体过程如 (2) 式所示. E' 心的吸收峰在 5.8 eV, 该吸收峰是由  $\equiv\text{Si}\cdot$  到  $\equiv\text{Si}^+$  的电子转移引起的, 即未成对的电子吸收能量从价带跃迁到 sp<sup>3</sup> 杂化轨道上, 再通过无辐射跃迁到基态, 在此过程中没有荧光产生.



另外 POR 也会在光纤的制备过程中形成, 其吸收峰位于 2.3 eV, 对应波长为 544 nm. 经过  $\gamma$  辐照后过氧基的数量会增加, 同时 POR 也会由 E' 心束缚一个 O<sub>2</sub> 分子转换而来, 其化学方程式如 (3) 式. 所以由于氧空位、过氧基的存在, 辐照后光纤在 544, 393 nm 以及紫外区吸收增大.



另外光纤在辐照下形成的 Yb<sup>2+</sup> 离子<sup>[26]</sup> 也会造成光纤在可见光区域的吸收. 文献 [24] 中观察到在同一辐照剂量下相同基质的 Yb 玻璃中, Yb<sup>3+</sup> 离子浓度高的在可见光区域的吸收系数比 Yb<sup>3+</sup> 离子浓度低的大. 这是因为光纤在辐照过程中会产生自由电子和空穴对, 一些 Yb<sup>3+</sup> 离子通过吸收自由电子转换为 Yb<sup>2+</sup> 离子, Yb<sup>2+</sup> 离子的 4f<sup>14</sup> 向 4f<sup>13</sup>5d 跃迁引起的吸收带在 22000—55000 cm<sup>-1</sup> 处, 且 f-d 振子强度远远大于 Yb<sup>3+</sup> 离子的 f-f 振子强度 (约数百倍)<sup>[26]</sup>, 故少量 Yb<sup>3+</sup> 离子变成 Yb<sup>2+</sup> 离子便导致光纤在可见光区出现明显的吸收.

结合国内外的研究 (辐照下产生的色心缺陷会造成光纤可见光区域吸收增大<sup>[16-24]</sup>, 光纤稀土离子浓度越高在辐照下引起的吸收越强<sup>[10]</sup>), 我们认为光纤中已存在的色心缺陷 (如 ODC (II)) 和辐照引起的色心缺陷 (如 E' 心、POR 以及 Yb<sup>2+</sup> 离子) 等

因素的共同作用会造成辐照后光纤在可见光区域的吸收增强。

另一方面,  $\text{Yb}^{3+}$  离子在辐照下变成  $\text{Yb}^{2+}$  离子便会造成在 976 nm 处的本征吸收减少, 而  $\text{Yb}^{2+}$  离子造成的辐致吸收又会增强, 这也就会在该波长位置产生波动, 但从其吸收波长峰值和半高宽来看并没有发生明显的改变(如图 2 附图), 这说明光纤中  $\text{Yb}^{3+}$  离子的配位场结构可能没什么变化。

### 3.2 $\gamma$ 辐照前后掺 Yb 光纤的激光性能

图 5 是由图 1 所示的实验装置测得的辐照前后掺 Yb 光纤的输出激光的光-光效率。散点为不同剂量辐照后同长度的掺 Yb 光纤在相同的抽运功率

下的激光输出(该输出激光为滤掉抽运光后的, 即 1080 nm 处的激光), 实线是对抽运激光功率和输出 1080 nm 激光功率的线性拟合, 即拟合出光纤的光光效率。可见随着辐照剂量的增加, 光纤的输出功率明显降低。在更大剂量时, 光纤几乎没有激光输出, 经在显微镜下观察光纤端面发现光纤的纤芯变黑, 图 3 中显示了光纤辐照前和大剂量辐照后显微镜下观察的端面。表 2 列出了不同剂量辐照后光纤的斜率效率和光-光效率。通过本课题组对掺 Yb 玻璃中  $\text{Yb}^{3+}$  离子激发态寿命的分析<sup>[27]</sup>, 认为辐致缺陷造成光纤激光性能减弱的原因可能是  $\text{Yb}^{3+}$  离子  $^2\text{F}_{5/2}$  能级将能量转移给辐致缺陷, 辐致缺陷又通过辐射跃迁和无辐射跃迁回到基态, 从而造成了光纤激光性能的减弱。

表 2 光纤在不同的辐照剂量下的光-光效率和斜率效率

辐照剂量/Gy	0	50	80	185	605	745
斜率效率/%	77.55	73.33	65.15	44.25	31.43	17.18
光-光效率/%	70.08	66.29	59.91	41.58	29.37	15.68

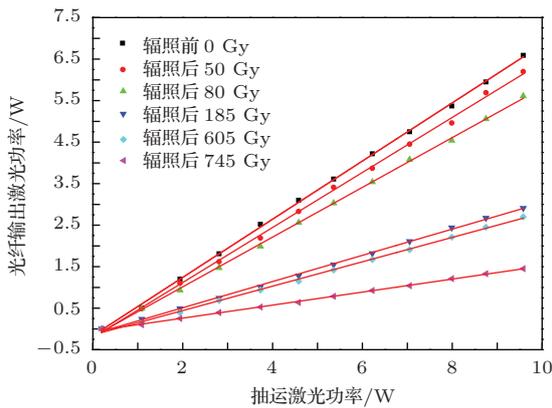


图 5 不同剂量下掺 Yb 光纤的光-光效率

### 3.3 Power-Law 定理和光纤 RIA 与剂量的关系

文献[1]中详细地讲述了 Power-Law 定理, Power-Law 定理是前人在实验的基础上总结出来的基于经验的辐致损耗与辐照剂量的关系式, 其表达式如下:

$$\text{RIA} = c \cdot D^b, \quad (4)$$

其中 RIA 表示光纤在辐照下由辐照引起的吸收, 单位为 dB/km;  $D$  表示辐照剂量;  $c, b$  为与光纤(如光纤的掺杂离子, 掺杂浓度等)有关的常数,  $c$  的单位

是  $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$ ,  $b$  为无量纲常数。经实验证明, Power-Law 定理在较低剂量下与光纤由辐照导致的吸收符合得很好, 同时文献[5]中指出  $b$  是介于 0.7—1 之间的常数, 而  $c$  则随着掺杂离子和掺杂浓度的不同变化很大。

图 6(a) 为不同剂量下掺 Yb 光纤在 660, 700, 740 nm 处的 RIA 与辐照剂量的 Power-Law 拟合曲线。其中散点为所测各波长处不同剂量下的吸收, 实线为 Power-Law 定理拟合的曲线。图 6(b) 散点表示的是 915 nm 抽运下光纤产生 1080 nm 激光时不同辐照剂量下光纤的吸收, 这些数据由测试光纤激光性能的数据得出; 实线为 Power-Law 定理拟合的曲线, 拟合参数如表 3 所示。在不同波长下所拟合出的  $c, b$  参数不同, 这是因为光纤在不同波长处由辐照引起的吸收是不同的。在表 3 中也给出了文献[10, 28, 29]就三种不同掺 Yb 光纤通过 Power-Law 拟合出的  $c, b$  参数, 再通过与文献[5]中列出的各类光纤  $c, b$  参数进行比较, 可以发现本文拟合的参数与他人结论相符。图 6(a) 是对光纤辐照后吸收的拟合, 作为图 6(b) 的参考, 以分析在不同剂量辐照下光纤激光性能的变化并判定该拟合是否可行。从  $c, b$  参数和拟合的趋势来看, 我们认为本文对光纤吸收系数的这种拟合是可行的。

表3 本实验(Yb10/130)和文献[10, 28, 29]所用掺Yb光纤在不同波长下Power-Law定理拟合的c, b参数

光纤型号	Yb10/130	Yb10/130	Yb10/130	Yb10/130	Yb <sup>[28]</sup>	Yb1200 <sup>[10]</sup>	Yb1200 <sup>[29]</sup>
波长/nm	660	700	740	1080	1310	1310	1310
c/dB·km <sup>-1</sup> ·Gy <sup>-1</sup>	4.38	2.29	1.37	1.26	0.9	6.73	10.8
b	0.87	0.89	0.91	0.87	0.88	0.91	0.91

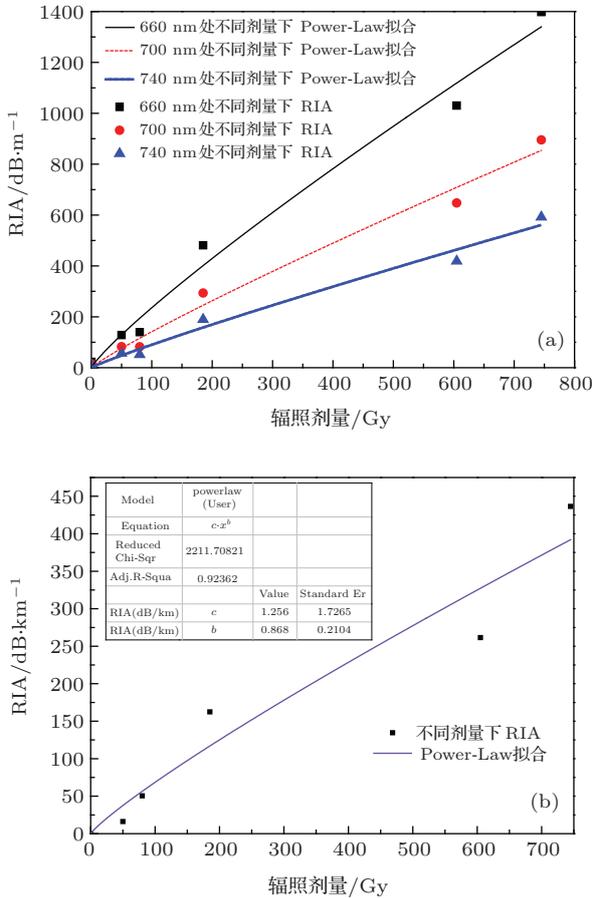


图6 (a)不同辐照剂量下光纤在不同波长处的RIA和Power-Law拟合; (b)不同辐照剂量下光纤输出1080 nm激光时的RIA和Power-Law拟合

Power-Law定理拟合的目的是预测在不同剂量辐照下光纤的传输性能. 通过Power-Law定理判定光纤在辐照环境下的抗辐照性能. 图7为Power-Law定理拟合出的不同辐照剂量下光纤的光-光效率, 其依据的是图6计算出的在1080 nm处的c, b参数, 方形表示实验测出的光-光效率, 圆点为拟合出的光-光效率, 三角形符号为实测光-光效率与拟合光-光效率的偏差(0 Gy时光-光效率相同, 是因为在用Power-Law定理拟合出的曲线计算光-光效率时把0 Gy光-光效率当作基准). 通过偏差分析(偏差绝对值小于7%)可以发现, Power-Law定理能很好地预测光纤光-光效率随辐照剂量的变化, 这说明导致光纤性能下降的主要原因是光

纤的辐致损耗. 由拟合效率曲线可知, 当辐照为2000 Gy时辐致损耗为924 dB/km, 光纤的光-光效率为2.87%, 这时光纤几乎没有激光输出.

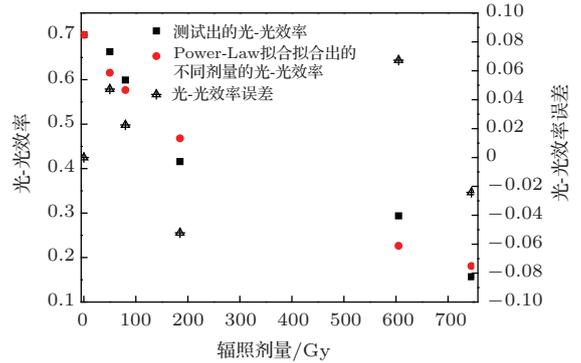


图7 不同辐照剂量下Power-Law定理拟合光-光效率和测试光-光效率及误差

## 4 结论

本文通过对双包层掺Yb光纤进行<sup>60</sup>Coγ辐照, 测试了辐照前后光纤的吸收、光纤预制棒切片的吸收, 认为辐照后造成光纤吸收增强的原因可能是光纤中已存在的色心缺陷(如ODC(II))和辐照产生的色心缺陷(如E'心、POR以及Yb<sup>2+</sup>离子)等因素的综合作用. 同时我们测试了不同剂量辐照下光纤的激光性能, 认为色心对光纤激光性能的影响表现在色心能级和Yb<sup>3+</sup>离子<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>能级发生了能量转移, 导致输出激光的减弱. 最后由Power-Law定理拟合了不同辐照剂量下不同波长处的辐致损耗与剂量的关系, 通过Power-Law定理拟合曲线计算出的光-光效率与测激光性能得出的光-光效率的对比, 从理论上说明导致光纤性能下降的主要原因是光纤的辐致损耗.

## 参考文献

- [1] Griscom D L, Gingerich M E, Friebele E J 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1019
- [2] Friebele E J, Schultz P C, Gingerich M E 1980 *Appl. Opt.* **19** 2910

- [3] Brooks C, Di Teodoro F 2005 *Opt. Express* **13** 8999
- [4] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes W J, *et al.* 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 1618
- [5] Lezius M, Lezius K, Predehl W, Stöwer A, Türler M 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 425
- [6] Liu F X, Zhang C H, Jin S Z, Xuan Z H, Li Z M 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1871 (in Chinese) [刘方新, 张辰华, 金嗣昭, 轩植华, 李宗民 1994 物理学报 **43** 1871]
- [7] Jiang H, Chen B X, Fu C S, Sui G R 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]
- [8] Hu K S, Li Z X, Ning D, Li H, Zhou J P, Liu W M 1992 *Acta Phys. Sin.* **41** 890 (in Chinese) [胡恺生, 李宗祥, 宁鼎, 李浩, 周建平, 刘为民 1992 物理学报 **41** 890]
- [9] Sheng Y B, Yang L Y, Luan H X, Liu Z J, Li J Y, Dai N L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 116301 (in Chinese) [盛于邦, 杨旅云, 栾怀训, 刘自军, 李进延, 戴能利 2012 物理学报 **61** 116301]
- [10] Girard S, Kuhnenn J A, Brichard B, van Uffelen M, Ouerdane Y, Boukenter A, Marcandella C 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2015
- [11] David L Griscom 2013 *Phys. Res. Int.* **2013** 379041
- [12] Griscom D L, Gingerich M E, Friebele E J 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 523
- [13] Girard S, Tortech B, Regnier E, van Uffelen M, Gusarov A, Ouerdane Y 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2426
- [14] Alexander L T, Mikhail Y S, Pavel F K, Vladimir F K, Albina I S, Konstantin N N, Sergey E B 2014 *J. Light-wave Technol.* **32** 213
- [15] Girard S, Mescia L, Vivona M, Laurent A, Ouerdane Y, Marcandella C, Prudenzeno F, Boukenter A 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 1247
- [16] Raghavachari K, Ricci D, Pacchioni G 2002 *J. Chem. Phys.* **116** 825
- [17] Skuja L, Hirano M, Hosono H 2005 *Phys. Status Solidi C* **2** 15
- [18] Griscom D L 1991 *J. Ceram. Soc. Jpn.* **99** 923
- [19] Raghavachari K, Pacchioni G 2001 *J. Chem. Phys.* **114** 4657
- [20] Tanimura K, Itoh C, Itoh N 1988 *J. Phys. C: Solid State Phys.* **21** 1869
- [21] Griscom D L 2004 *J. Non-Cyst. Solids* **349** 139
- [22] Griscom D L 2006 *J. Non-Cyst. Solids* **352** 2601
- [23] Sasajima Y, Tanimura K 2003 *Phys. Rev. B* **68** 014204
- [24] Cooke D W 1996 *J. Nucl. Mater.* **232** 214
- [25] Carlson C G, Keister K E, Dragic P D 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2087
- [26] Engholm M, Norin L, Berg D 2007 *Opt. Lett.* **32** 3352
- [27] Sheng Y B, Xing R X, Luan H X, Liu Z J, Li J Y, Dai N L 2012 *J. Inorg. Mater.* **27** 1077 (in Chinese) [盛于邦, 邢瑞先, 栾怀训, 刘自军, 李进延, 戴能利 2012 无机材料学报 **27** 1077]
- [28] Henschel H, Kohn O, Schmidt H U, Kirchhof J, Unger S 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 1552
- [29] Fox B P, Simmons-Potter K, Simmons J H, Thomes W J, Bambha R P, Kliner D A V 2008 *Proc. SPIE Fiber Lasers V: Technol. Syst. Appl.* **27** 6873

# Effects of $\gamma$ -radiation on Yb-doped fiber\*

Huang Hong-Qi Zhao Nan Chen Gui Liao Lei Liu Zi-Jun

Peng Jing-Gang Dai Neng-Li<sup>†</sup>

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 30 April 2014; revised manuscript received 9 June 2014 )

## Abstract

Yb-doped double-clad fibers are prepared through a conventional modified chemical-vapor deposition technique and solution doping method: each fiber contains a core of around 10  $\mu\text{m}$  in diameter. These fibers are divided into groups under  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  radiations of different doses, and we investigate the fiber absorption spectra and laser spectral properties before and after irradiation. Experimental results show that with increasing the irradiation dose the absorption of the fiber after irradiation increases significantly in the visible region, we believe that the enhancement of optical fiber absorption in the visible region may be due to the color center defects existing already in the fiber (such ODC (II)) and the color center defects produced by the irradiation (E'center, POR and  $\text{Yb}^{2+}$  ions). We also analyze slope efficiencies, bare efficiencies, and transmission characteristics of the fiber before and after laser irradiation. Finally, we use the power-law to fit the radiation-induced losses of the fiber under different radiation doses, and the results obtained in this paper provide a theoretical basis for studying the anti-radiation of optical fibers.

**Keywords:** Yb-doped double-clad fiber, radiation-induced loss, color center, Power-Law

**PACS:** 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

**DOI:** 10.7498/aps.63.200201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61378070) and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. ZRY0535).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [dainl@mail.hust.edu.cn](mailto:dainl@mail.hust.edu.cn)