

文章编号: 0258-7025(2006)03-0343-04

# 相干背散射法测量微结构光纤中的 光子局域化

刘艳云, 侯蓝田, 李秋菊, 韩 颖, 刘兆伦, 郭 巍

(燕山大学红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 光子局域化是光子晶体的重要性质, 提出采用相干背散射法对微结构光纤(MOFs)进行测量, 为了便于理解并解释光子局域化的理论, 在可见光波段分别测量了石英晶体、集束式微结构光纤和双芯型微结构光纤, 应用光波经典扩散理论, 搭建了实验平台。实验结果表明, 对石英晶体的探测没有发现相干现象, 而在 575 nm 左右微结构光纤中产生了很强的干涉。分析认为是由于二维微结构光纤的端面中分布着从节区到脉区变化的周期结构, 尺寸约为 500~600 nm, 相当于一些不连续的散射粒子, 当入射 575 nm 光波长和这些粒子的尺寸相接近时, 满足了光子局域化的条件, 便产生了强烈的背相散射相干现象。

**关键词** 光电子学; 微结构光纤; 光子局域化; 相干背散射法

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Measurement of Photon Localization in Micro-Structure Optical Fibers Using Coherent Back Scattering

LIU Yan-yun, HOU Lan-tian, LI Qiu-ju, HAN Ying, LIU Zhao-lun, GUO Wei

(*Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)

**Abstract** Photon localization is the fundamental property of microstructure fibers. A method of coherent back scattering for measurement on micro-structure optical fibers (MOFs) is proposed. In order to understand and explain the theory of photon localization, the quartz-crystal, integrated multimillion micro-structure optical fiber and dual-core micro-structure optical fiber were measured in the visible region. Based on the wave classical transmission theory, the experimental equipment for the measurement was setup. The experimental results reveal that there is not interference phenomenon for quartz-crystal, but some strong interference apexes for micro-structure optical fibers at 575 nm. Because of the existence of the periodic structure from the vein region to the node region in 2D micro-structure optical fibers, the dimension is around 500~600 nm which is corresponding to some discontinuous scattered particles, when the wavelength is 575 nm, the dimension is close to the particles which meets the condition of photon localization. Therefore, the phenomena of strong coherent back scattering come into being.

**Key words** optoelectronics; micro-structure optical fiber; photon localization; coherent back scattering method

## 1 引 言

光子晶体中的一个重要性质就是光子局域化<sup>[1,2]</sup>。理想的光子局域化材料对于其深部的光来讲是陷阱, 对于外部的光来讲是一个完美的反射体, 因而有人称之为“白洞”<sup>[3,4]</sup>。光子局域化包括无序光子局域化和有序局域化, 其中有序局域化材料即

是光子晶体。

微结构光纤(MOFs)也称为光子晶体光纤或多孔光纤, 是一种带有缺陷的二维光子晶体, 即在二维光子晶体纤维长度方向连续制造缺陷, 利用其局域光的能力, 将光限制在缺陷内传播<sup>[5,6]</sup>。对于有纵向缺陷的微结构光纤来说, 如果光照射到没有缺陷

收稿日期: 2005-08-29; 收到修改稿日期: 2005-11-08

基金项目: 国家 863 计划(2003AA311010)和国家 973 计划(2003CB314905)资助项目。

作者简介: 刘艳云(1979—), 女, 河北省保定市人, 燕山大学硕士研究生, 主要从事微结构光纤的参数的测量与研究。

E-mail: yanyunliu2004@163.com

的理想的光子带隙上就应该被全部反射回来,如果反射光的光程差恰好产生相干的话,那么就可以观察到相干背散射现象<sup>[7]</sup>,所以利用相干背散射来测量微结构光纤中的光子局域化是一种简单的方法。

## 2 光子局域化理论

在光波经典传输理论中,由于散射体的无规分布,电介质内的多重散射被认为是不相干的,散射波总强度是各个波场振幅平方的和。但是由于时间反演路径出射波的干涉效应,在背向附近的一定角度内发生明显的相长干涉,精确的背向相长干涉将使强度变为振幅相加后的平方,因而精确地等于忽略干涉效应的散射强度的两倍,这就是相干背散射<sup>[8]</sup>。两种具有高介电常数对比度的材料无序分布并组成复合介质,当散射体尺寸  $a$  和传输波长可比拟或者是成简单的倍数关系,在材料的吸收和相空间都很小时,就容易产生强局域化<sup>[9]</sup>,而一旦实现某一波长的强局域化时,对外部的入射光将发生全部反射的现象。

在由折射率为  $n_1$  和  $n_2$  两种成分组成的系统中,光散射的效率依赖于这些成分的构成、成分的线度和二者的折射率比  $m = n_1/n_2$ ,如果  $m$  较大且折射率变化的长度与光的波长可比拟,光子受到散射体的多重强散射而产生干涉,使得光子传播(或扩散)的平均自由程  $l$  非常小,光子的扩散趋于零,即出现了所谓的强光子局域化,真正的局域化出现时满足 Ioffe-Regel 临界条件<sup>[10]</sup>,即:  $k_e l \leq 1$ , 这里,  $k_e$  为等效介质光波矢。其直观理解是:如果实现  $k_e l \leq 1$ , 那么光波被散射前不能完成一次完整的电磁振荡。

无吸收的无穷大电介质半空间表面进行相干背散射实验,其强度(设扩散背景强度为 1)角分布(设背向  $\theta = 0$ ) 特征是:  $\theta = 0$  时,增强因子  $\varepsilon$  为 2; 在背散射方向附近分布轮廓为一个三角方锥; 锥的宽度  $W$  定义为半最大值处的全宽度(FWHM), 它与  $l$ ,  $k_e$ , 介质等效折射率  $n_e$ , 表面反射系数  $R$  的关系为

$$W = 0.7n_e(k_e l)^{-1}(1 - R), \quad (1)$$

因而可以推出扩散系数<sup>[11]</sup>

$$k_e l = 0.7n_e W^{-1}(1 - R), \quad (2)$$

即锥宽窄时,  $k_e l$  值较大,说明散射较弱; 锥宽宽时,  $k_e l$  值较小,说明散射较强。

对于无吸收有限厚度  $L$  的电介质板,由于长程相干路径的截断,锥顶处增强因子  $\varepsilon$  将小于 2,致使锥顶变圆。同样在有吸收的情况下也会使锥顶变

圆,但二者之间仍然有微妙的差别。

相干背散射增强效应一般体现的是弱局域化特征,1993年, M. S. Kushwaha 等<sup>[12]</sup>指出:当散射逐渐增强时,由于多重散射的原因,增强因子  $\varepsilon$  逐渐低于 2,即  $\varepsilon = 2 - \eta(k_e l)$ ,当综合考虑增强因子  $\varepsilon$  后,相干背散射实验能够测定强散射体系的局域化程度。

## 3 实验测量与结果分析

相干背散射的系统实验验证始于 1985 年<sup>[13]</sup>,在随后的 10 年中一直是一个热门的课题,它已成为光子局域化研究中的基本实验项目。根据光子局域化原理,自行搭建了测量平台,实验装置见图 1<sup>[14]</sup>。

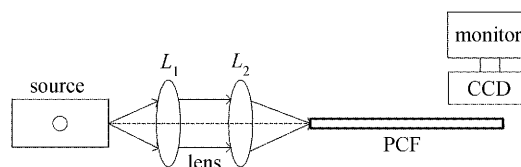


图 1 相干背散射实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup for coherent back scattering measurement

光源采用溴钨灯,其光谱范围为 250 ~ 2500 nm,通过光栅光谱仪获得各个波长的单色光。光谱仪的输出狭缝高度约为 14 mm,狭缝宽度约为 1.5~2 mm。为了便于耦合入光纤,采用了嵌叠式透镜组合  $L_1$  和  $L_2$ ,以保证尽可能不损失光能量。光先经过  $10\times$  透镜  $L_1$ ,变为平行光,再经过一个  $10\times$  透镜  $L_2$  聚焦,照射在光纤端面上,用 CCD 接收光信号。CCD 与光纤平行放置,观察端距离光纤端点约为 9 mm,CCD 在侧面观测,前端不需要采用成像镜头,接收到光信号之后在电脑屏幕上就会出现相应的谱线。实验中 CCD 的像元尺寸为  $7\ \mu\text{m}$  长,  $7\ \mu\text{m}$  高,中心距亦为  $7\ \mu\text{m}$ ,像元总长为 37.38 mm。实验是测量可见光部分,所以光源发出的光,可以通过目测和相应的调整,使 CCD 的光敏面对准光斑的中心,只要轻微的上下移动 CCD,直到通过计算机看到接收到光的像元数最多时固定好 CCD,此时,接收到的信号即为实验结果图。

由于 CCD 对光强十分敏感,为了避免杂散光对实验结果的干扰,必须将杂散光全部遮挡掉,所以整个实验是在暗室中操作的。CCD 探测器与微结构光纤的距离为 2.2~2.3 cm,从图 1 中可以看出微

结构光纤的光轴与光源及透镜组的中心在一条直线上, 这样可确保光能量不损失。

图 2 为测量石英棒得到的光强分布图。从图中可以看出, 强度较高的部分靠近石英棒的端面处, 而在远离端面处的强度渐低, 但是总的趋势是一条平滑的曲线, 在可见光范围内平稳, 没有任何的吸收, 而且从石英棒侧面透过的光也没有发生干涉现象。

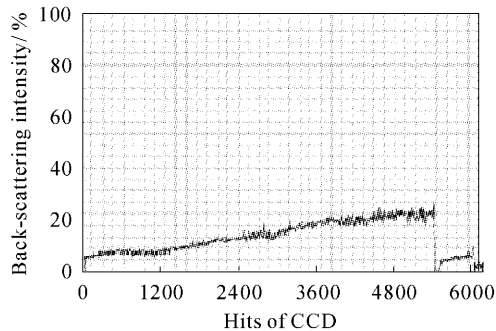


图 2 石英的背散射图形, 电压 5.75 V

Fig. 2 Back scattering spectrum of the end face of silica fiber, 5.75 V

可见光波段的测量从 400~850 nm, 以步长为 2 nm 或 5 nm 增加。从实验结果发现, CCD 探测到在 575 nm 处的信号强度相对较高, 图形清晰可见。产生此种现象的原因是由于微结构光纤的端面中分布着从节区到脉区变化的周期结构, 尺寸为 500~600 nm, 相当于一些不连续散射粒子。当入射 575 nm 光波长和这些粒子的尺寸相接近时(或相关联时), 便产生了强烈的背相散射相干现象。

图 3, 图 4 分别给出了在 575 nm 处对两种不同微结构光纤的测量结果。图 3(a) 是在与图 2 相同测试条件下对集束式微结构光纤的背散射的测量结果。集束式微结构光纤是多结构集成式的微结构光纤, 是同一种结构的微结构光纤通过堆叠—拉丝技术控制而成, 每根光纤中大约包含有几十个结构相同的单结构的微结构光纤。插图为被测光纤的结构图。其结构参数为: 集束式光纤中的每根光纤的外半径大小为  $17.34 \mu\text{m}$ , 内半径大小为  $7.45 \mu\text{m}$ , 每根光纤内部的空气孔尺寸包括: 包层孔半径  $0.41 \mu\text{m}$ , 内部实芯半径  $0.65 \mu\text{m}$ , 孔间距  $0.91 \mu\text{m}$ 。从图 3 中可以看出明显的干涉现象, 这是因为在微结构光纤的节区和脉区在周期结构中带有无序分布, 这种全同散射体在几何上的互相关联, 正是导致散射光相干共振的结构。当分散的无吸收介质的尺寸和波长  $\lambda$  相接近时, 介质对光的弹性散射特别强烈, 根据经典输运理论, 对一般的无序尺度分布的粒子, 其散射

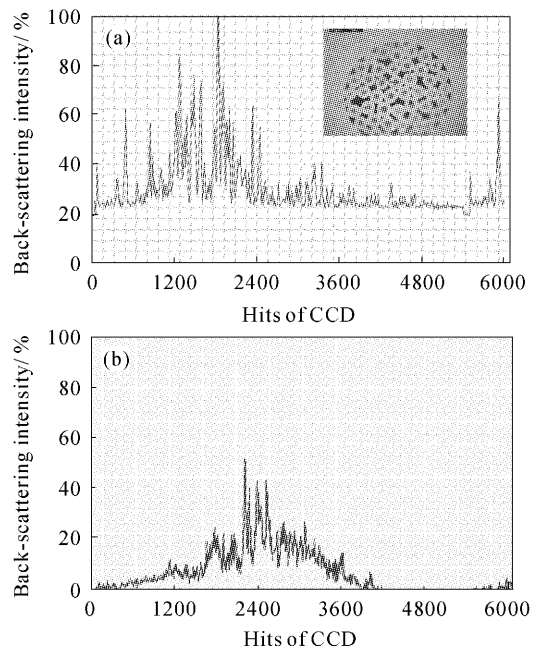


图 3 集束式微结构光纤 575 nm 处的散射图(a)和散射减去石英的散射图谱(b)

Fig. 3 (a) Back scattering spectrum of integrated MOFs at 575 nm, the condition of experiments same to Fig. 2, the inset is structure of the tested fiber; (b) Spectrum of subtracting silica fibers scattering from integrated MOFs scattering

波大多是前向不相干的, 但是满足了上述条件后, 散射光振幅在某一路径和反演路径上各点都是相同的, 而且在背散射方向  $k_i + k_f = 0$  ( $k_i$  为入射波矢,  $k_f$  为出射波矢)<sup>[15]</sup> 出现相干。

为了尽量减小实验中的偶然误差, 对同一根微结构光纤的相干背散射进行了反复多次测量, 然后将得到的光纤相干背散射光强分布图样与石英棒的光强分布图样进行逐点相减, 这样可以消除石英材料对于相干背散射测量的干扰(图 3(b))。

图 4 是在与图 2 相同测试条件下对双芯微结构光纤的背散射的测量光强分布图。插图为双芯微结构光纤的结构。其结构参数为: 内部纤芯直径  $1.43 \mu\text{m}$ , 包层孔直径  $1.32 \mu\text{m}$ , 孔间距  $\Delta$  为  $2.08 \mu\text{m}$ 。从图 4(b) 中可以看出, 消除了石英材料对测量结果的干扰后, 出现了几个强度很大的干涉峰, 这说明双芯微结构光纤由于其具有两个纤芯, 并且内部结构达到了微米量级, 所以当光波长和折射率周期变化的材料相互作用时, 尤其是当变化周期尺寸和光波长满足一定条件时, 就会产生强烈散射, 这时的散射截面可以比粒子的几何截面大几倍<sup>[16]</sup>, 使

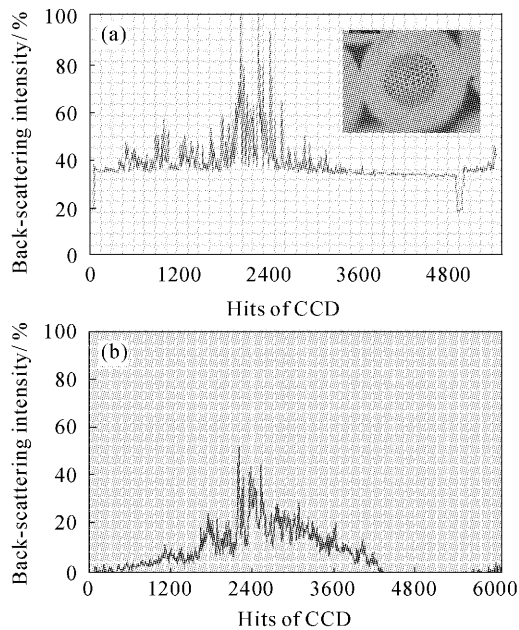


图 4 双芯微结构光纤 575 nm 处的散射图(a)和  
散射减去石英的散射图谱(b)

Fig. 4 (a) Back scattering spectrum of dual-core MOFs at 575 nm, the condition of experiments same to Fig. 2, the inset is structure of the tested fiber; (b) Spectrum of subtracting silica fibers scattering from dual-core MOFs scattering

侧向传输的光能量无法通过,而被全部反射回纤芯中传输,这是实现了真正意义上的光子局域化作用。

## 4 结 论

利用相干背散射法分别对石英晶体、集束式微结构光纤和双芯型微结构光纤进行了测量,采用光子局域化理论来解释探测到的微结构光纤侧向的相干现象,进一步认识到微结构光纤的导光机制中存在着光子局域化的影响。对于相干散射法的实验工作还在进一步的进行中。

### 参 考 文 献

- S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric supperlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Progress and applications of photonic crystal fibers [J]. *World Science-Technology R&D*, 2001, **23**(6):7~11  
李曙光,刘晓东,侯蓝田. 光子晶体光纤进展及其应用[J]. *世界科技研究与发展*, 2001, **23**(6):7~11
- Liu Xiaodong, Hou Lantian, Wang Huitian *et al.*. Mid-infrared photon localization using two kinds of mid-infrared materials as random scatterers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(9):1353~1355
- Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. The transmission properties of photonic crystals without strict periodicity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6):847~850  
朱志宏,叶卫民,季家谔等. 光子晶体的非严格周期性对其传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6):847~850
- Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fibers with closing to zero and flattened chromatic dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):713~717  
李曙光,刘晓东,侯蓝田. 接近于零色散的色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):713~717
- J. Martorell, N. M. Lawandy. Observation of inhibited spontaneous emission in a periodic dielectric structure [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(15):1877~1880
- P. Lodahl, A. F. van Driel, I. S. Nikolaev *et al.*. Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals [J]. *Nature*, 2004, **430**(7000):654~657
- Gary Pickrell, Daniel Kominsky, Roger Stolen *et al.*. Microstructural analysis of random hole optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):491~493
- S. John, Jian Wang. Quantum electrodynamics near a photonic band gap: photon bound states and dressed atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(20):2418~2421
- A. M. Apeteri, J. M. Moison, J. A. Levenson *et al.*. Electromagnetic field confined and tailored with a few air holes in a photonic-crystal fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**:409~414
- M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski *et al.*. Acoustic band structure of periodic elastic composites [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(13):2022~2025
- Randall G. Hulet, Eric S. Hilfer, Daniel Kleppner. Inhibited spontaneous emission by a Rydberg atom [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(20):2137~2140
- Juan Cheng, Yinghong He, Haoyi Zuo *et al.*. Enhancement of stimulated Raman scattering of acetone and the generation of three-color laser by using fluorescence dye RB [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):46~48
- Zhengdong Liu, Yu Lin, Liang Zeng *et al.*. The influence of virtual-photon processes on spontaneous emission from an atom in photonic band gap crystals [J]. *Phys. Lett. A*, 2001, **287**: 39~44
- G. Kurizki, A. Z. Genack. Suppression of molecular interactions in periodic dielectric structures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(19):2269~2271