

中心外缺陷对带隙型光子晶体光纤色散特性的影响^{*}

赵 岩 施伟华[†] 姜跃进

(南京邮电大学光通信研究所 210003)

(2009 年 10 月 16 日收到;2009 年 12 月 8 日收到修改稿)

利用时域有限差分法(FDTD)模拟仿真了在中心缺陷外出现点缺陷、空气柱位错和内层空气柱发生形变三种缺陷形态对光子带隙型光子晶体光纤(PBG-PCF)色散特性的影响.发现一方面缺陷的出现会使色散曲线趋于平坦,另一方面点缺陷和位错缺陷的出现会使零色散点向长波移动,内层空气柱的形变使零色散点向短波长移动.这对 PBG-PCF 的实际生产实践会有指导意义.

关键词: 带隙型光子晶体光纤, 时域有限差分法, 缺陷态, 色散

PACC: 4270Q, 4280L, 4281D

1. 引 言

带隙型光子晶体光纤(PBG-PCF),被称作下一代光纤,理论上它具有很低的传输损耗和良好的色散特性,然而在 PBG-PCF 实际生产中,由于制造工艺或者一些参数的难以控制,会在光纤截面会出现这样那样的缺陷^[1],而使实际 PBG-PCF 很难达到普通光纤的损耗值和色散特性,图 1 显示了在带有各种缺陷态的 PCF 截面,因为 PBG-PCF 是应用光子带隙原理导光的,对晶格周期有严格的要求,缺陷的出现,势必会降低各项参数水平.

其中光纤的色散是影响光通信系统传输质量和传输距离的一个重要特性参数.对 PBG-PCF 色散特性的研究,对于 PBG-PCF 的实际应用有十分重要的意义.本文根据图 1 将缺陷形态归结为三类:点缺陷、内层空气柱变形和一排空气柱位错的情况.分别仿真计算了它们对 PBG-PCF 色散特性的影响.

2. 理论分析和数值方法

对于单模光纤色散表达式为^[4]

$$D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right) = -\frac{1}{c\lambda} k \frac{d^2\beta}{dk^2}. \quad (1)$$

表达式中包含两种色散,一种是材料色散,另一种是波导色散.材料色散是由于光纤纤芯的折射率是频率的函数引起的,对于 PBG 光子晶体光纤来说,其纤芯是空气,所以材料色散相对波导色散很小,本文仅考虑 PBG 光子晶体光纤的波导色散.

(1)式中 β 为传播常数, k 为波矢,对应于相应传播常数下适合在光纤中传输的模式,在 PBG-PCF 中又叫做缺陷态频率,也就是这个波长的波在光纤中可以纵向传输的很远,其他波长的波则被衰减散射.所以本文只要找到对于一些传播常数在光子带隙中的缺陷态频率就可以计算得到光纤的波导色散.

FDTD 方法最早由 Yee 在 1966 年提出^[5],它是由微分形式的麦克斯韦旋度方程出发对各电磁场分量进行时间和空间上的差分离散而来的.FDTD 计算域空间节点采用 Yee 元胞的方法,同时电场和磁场节点空间与时间上都采用交错抽样.关于三维情况下,电磁场对时间和空间的离散方程可以参考文献^[6],由于缺陷的出现,破坏了 PCF 截面结构的对称性,所以要利用 FDTD 对整个截面进行计算.在用 FDTD 模拟 PBG-PCF 的传输特性前要设置初始条件和边界条件,本文采用高斯脉冲作为激励源,采用完全匹配层的边界条件(PML),之后随着时间步的增加,不断更新电磁场的分布.可以得到任意

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60707006),江苏省教育厅省属高校“青蓝工程”(批准号:TJ207015),南京邮电大学攀登计划(批准号:NY207054)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail:njupt_shiwh@126.com

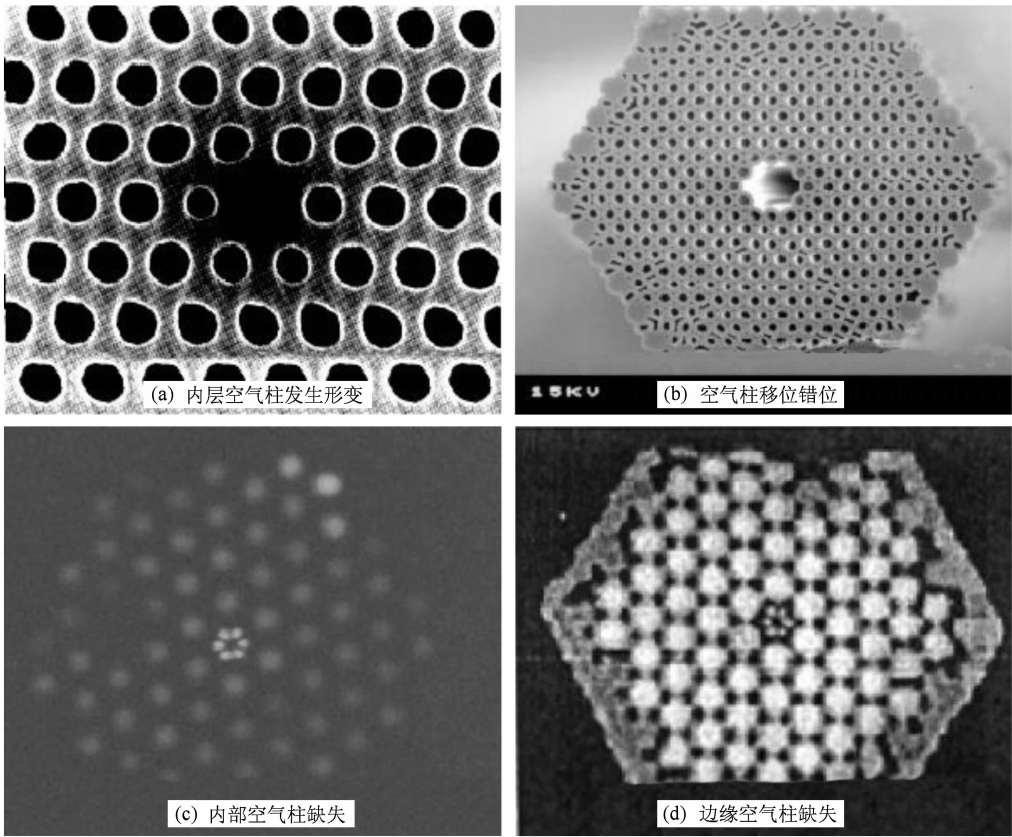


图 1 含有不同缺陷的 PCF^[2,3]

时间步时的电磁场分布,通过记录中心缺陷处的一些点的场分布,一定时间步后再进行傅里叶变换就可以得到相应的频谱图,选择在带隙范围内的峰值处的频率,就是缺陷态频率.从而进一步得到色散曲线.

3. 数值计算和结果讨论

对 PBG-PCF 设置参数如下:空气折射率 $n_1 = 1$, 介质折射率 $n_2 = 1.46$, 占空比(空气柱半径/空气柱之间的距离) $r/\Lambda = 0.47$. 结合 PBG-PCF 的完全带隙图(如图 2), 根据 FDTD 方法就可以寻找对于不同的传播常数存在于带隙内的缺陷态频率了,图 3 显示的就是当 $\beta a = 10.3$, 时间步 $T = 20000$ 时的频谱图,从频谱图中可以得到缺陷态频率 $ka = 10.36474500751880$, 有人经过实验得到过这样的频谱图^[7], 可以看出 FDTD 理论的正确性. 利用同样的方法,可以在带隙附近寻找到多个不同传播常数在带隙中存在的缺陷态频率.

我们取空气孔间距 $\Lambda = 2.523$, 便可以得到在不

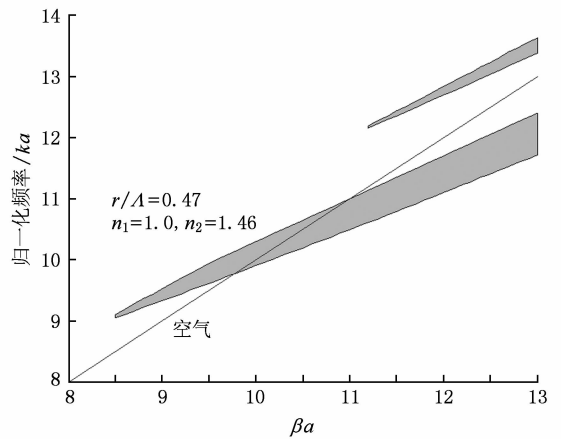


图 2 不同传播常数下的带隙扫描图

同传播常数下适合传播的波长如表 1 所示, 根据 (1) 式就可以拟合出色散曲线.

根据图 1 中经常出现的缺陷类型, 总结出三类缺陷形态: 点缺陷, 一排空气柱位错和内层空气柱形变. 用 FDTD 实现对这些缺陷的模拟仿真过程中, 采用的模型如图 4 所示.

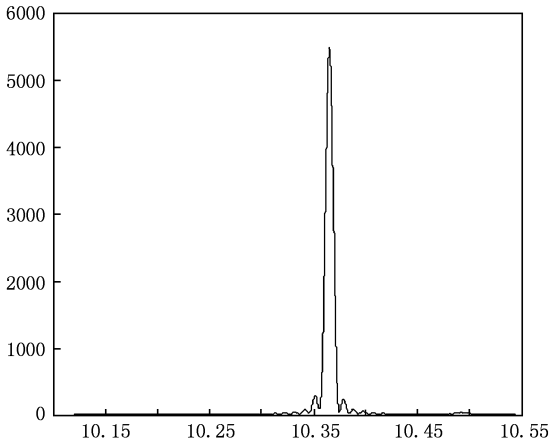


图3 传播常数 $\beta a = 10.3$ 时的频谱图

表1 不同传播常数对于的适合波长

βa	9.9	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8
$\lambda/\mu\text{m}$	1.5911	1.5751	1.5601	1.5441	1.5301	1.5151	1.5001	1.4861	1.471	1.457

利用上面介绍的 FDTD 以及主要参数设置求缺陷态频率, 仿真得到不同缺陷形态出现在不同位置, 以及不同程度的缺陷下的 PBG-PCF 的色散曲线.

从图 5 看出, 完整结构的 PBG-PCF 的色散曲线, 零色散点在 1550 nm, 该波长附近绝对色散值在 $10^0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 数量级, 当边缘出现点缺陷时, 零色散点移到 1553 nm 处; 点缺陷存在于内部时, 零色散点出现在 1557 nm 处. 原零色散点 1550 nm 处为负色散.

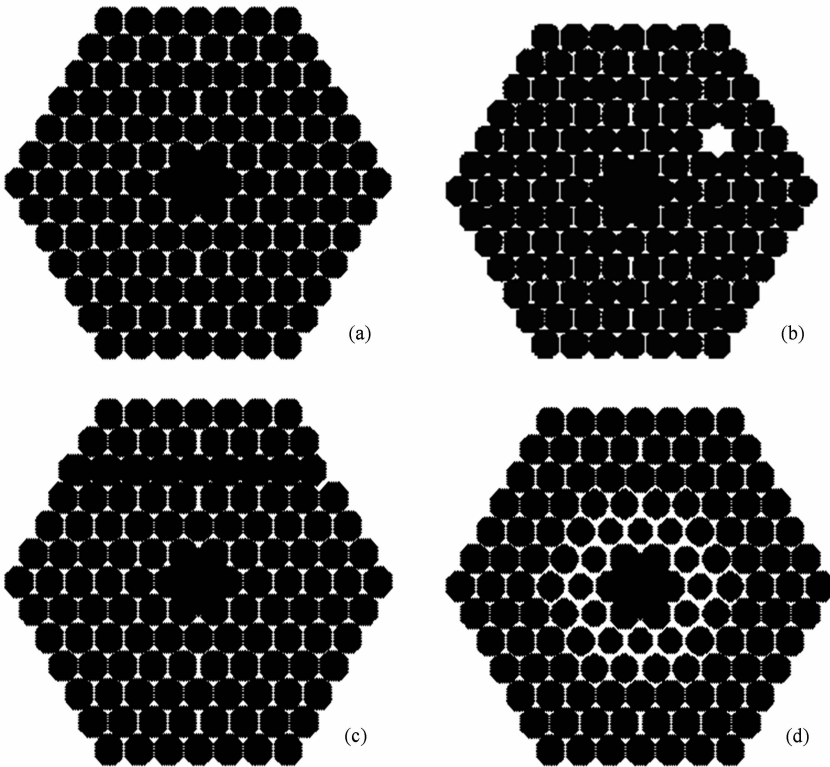


图4 出现不同缺陷的 PBG-PCF 截面折射率分布图 (a)完整结构; (b)包层中缺失一个空气柱; (c)有一排空气柱发生位错; (d)纤芯周围空气柱发生形变

从图 6 看出, 空气柱的移位, 当离中心第四层空气柱发生 0.1λ 的位错时, 使零色散点移至 1554 nm, 当发生 0.2λ 的位错时, 使零色散点移至 1555 nm, 当同样程度的位错发生在离中心第二层的空气柱时, 零色散点移至 1571 nm. 原零色散点 1550 nm 处为负色散.

从上面两种缺陷对色散的影响可以得出这样

的结论, 空气柱的缺失和位错的缺陷会使零色散点向长波长移动. 并且缺陷离中心缺陷越近, 位错缺陷位错程度越大, 这种影响会越大.

图 7 显示当最内层空气柱缩小为原来的 80%, 次外层空气柱缩小为原来的 90% 时, PBG-PCF 的零色散点移到了 1543 nm 的位置, 也就是向短波长移动, 而在缩小 70%, 80% 时, 零色散点移动到 1528

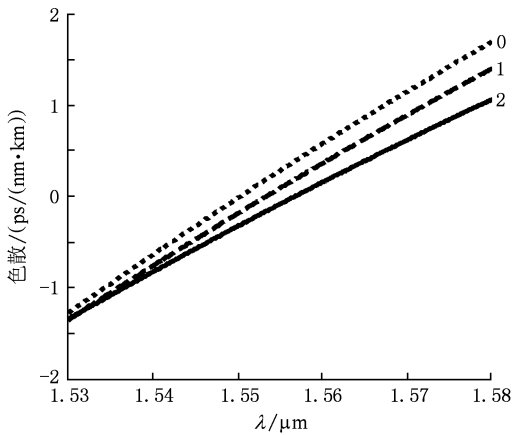


图5 有点缺陷时的色散曲线(完整结构(曲线0),边缘处出现点缺陷(曲线1),包层内部出现点缺陷(曲线2))

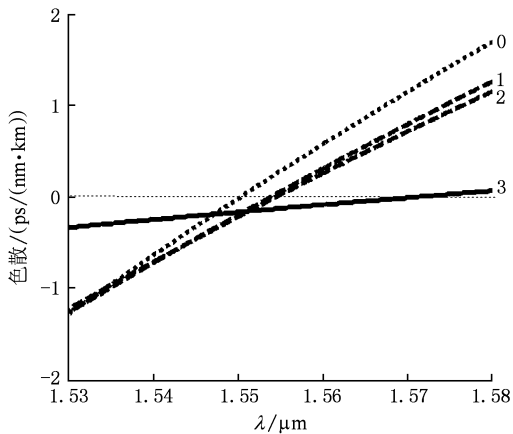


图6 空气柱发生位错时的色散缺陷(完整结构(曲线0),离纤芯第四层空气柱发生 0.1λ 位错(曲线1),第四层空气柱发生 0.2λ 位错(曲线2),第二层空气柱发生 0.2λ 位错(曲线3))

nm 的位置.原零色散点 1550 nm 处为正色散.

当然这种缺陷不能加剧到太大的程度,如图当最内两层空气柱缩小到 40% 和 50% 甚至更小时,用同样的方法算得的色散曲线不再服从上述规律逐渐向短波长移动,作者推断这可能是由于大尺寸的变化严重破坏了包层的周期性结构所致.再考虑极

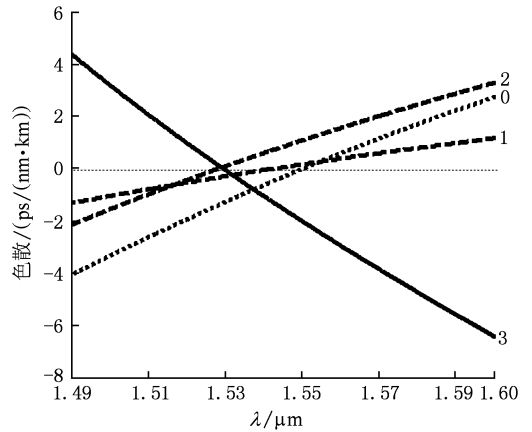


图7 空气柱形变时的色散曲线(完整结构(曲线0)最内两层缩小到原来的 80% 和 90% (曲线1), 70% 和 80% (曲线2), 40% 和 50% (曲线3))

限情况,当内层空气柱全部塌陷,那么包层内部将变成均匀的介质层,光会依靠全反射进行传输,这就失去了PBG-PCF的原有意义.

综上所述各种缺陷还发现,PBG-PCF包层中一定缺陷态的出现,会使色散曲线在一定程度上趋于平坦.

4. 结 论

本文利用时域有限差分法(FDTD),结合色散的理论公式,仿真计算了一条零色散点在 1550 nm 波段的PBG-PCF的色散曲线,并且考察了中心外缺陷对色散曲线的影响.发现空气柱缺失和位错会使零色散点向长波长移动,原零色散波长呈正色散,相反内层空气柱集体缩小会使零色散点向短波长发展,原零色散波长呈正色散.由此可以考虑是否对有缺陷的PBG-PCF进行色散补偿后使用.此外,中心外缺陷的出现会使PBG-PCF的色散曲线更趋于平坦,这对于平坦色散PBG-PCF的设计有一定的指导意义.

- [1] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Jian S S 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 3290 (in Chinese) [郭铁华、娄淑琴、李宏雷、简水生 2009 物理学报 **58** 3290]
- [2] Knight J C, Broeng J, Birks T A, Russell P St J 1998 *Science* **282** 1476
- [3] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, Birks T A, Russell P St J 1999 *Science* **285** 1537
- [4] Li L, Huang Y Q 1999 *Optical Fiber Communication Foundation*

(Volume 1) (Beijing: National Defense Industry Press) p105 (in Chinese) [李玲、黄运清 1999 光纤通信基础(北京:国防工业出版社)第105页]

- [5] Yee K S 1966 *IEEE Trans Antennas Propagate* **14** 302
- [6] Chen H M, Shi W H, Cao X F, Zou J H 2006 *Opt. Tech.* **32** 275 [陈鹤鸣、施伟华、曹祥凤、邹建华 2006 光学技术 **32** 375]
- [7] Mi Y, Hou L T, Zhou G Y, Wang K, Chen C, Gao F, Liu B

W, Hu M L 2008 *Acta. Phys. Sic.* **57** 3583 (in Chinese) [米
艳、侯蓝田、周桂耀、王 康、陈 超、高 飞、刘博文、胡明列

2008 物理学报 **57** 3583]

Effect of defects outside the centre on dispersive properties of photonic band gap guiding photonic crystal fibers*

Zhao Yan Shi Wei-Hua[†] Jiang Yue-Jin

(*Nanjing University of Posts & Telecommunication Optical Communications Research Institute Nanjing 210003, China*)

(Received 16 October 2009; revised manuscript received 8 December 2009)

Abstract

The dispersion properties of optical wave in photonic band gap guiding photonic crystal fibers (PBG-PCF) were analyzed by the finite differential time domain method. The result demonstrates that: the point defects and the dislocation of air holes make the zero-dispersion-point move to the long-wavelength side, but the change of the shape of the air column makes it move in the opposite direction. All kinds of defects make the dispersion curves flatten.

Keywords: PBG-PCF, FDFD, defect modes, dispersion

PACC: 4270Q, 4280L, 4281D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707006), the "Qing Lan" Program for Provincial Colleges and Universities of Education Bureau of Jiangsu Province, China (Grant No. TJ207015); the "Climbing" Program of Nanjing University of Posts and Telecommunication (Grant No. NY207054).

[†] Corresponding author. E-mail: njupt_shiwh@126.com