

传输可见光的空芯光子带隙光纤的研究*

苑金辉^{1)†} 侯蓝田^{1)‡} 周桂耀^{1)‡} 魏东宾¹⁾ 王海云¹⁾ 董世蕊¹⁾ 王清月³⁾ 刘博文³⁾ 胡明列³⁾

1) 燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

2) 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

3) 天津大学精密仪器与光电工程学院超快激光研究室, 天津 300072)

(2007 年 11 月 16 日收到, 2007 年 12 月 9 日收到修改稿)

利用全矢量平面波展开法(FVPWM)对采用改进的两次堆积法制备的空芯光子带隙光纤进行了数值模拟. 在特定传播常数 β 下, 光纤在 500—1000 nm 的波段内出现多条宽窄不同的有效光子带隙. 依据有效折射率的不同, 部分带隙中的空气-导模将以不同的形式存在. 经过实验测试, 发现测得的带隙位置相对于模拟结果向短波段发生了较明显的移动, 主要原因被认为是光纤结构的纵向不均匀性和包层节点处间隙孔的存在.

关键词: 空芯光子带隙光纤, 全矢量平面波展开法, 有效光子带隙, 空气-导模

PACC: 4270Q, 4280L, 4281C, 4281D

1. 引 言

空芯光子晶体光纤(HC-PCFs)因其独特的导光特性引起了人们广泛的注意. 它的导光机理应用光子带隙理论来解释^[1,2]. 根据波导理论, 传播常数 β 决定光在波导中是传播还是倏逝, 当 $kn_1 > \beta > kn_2$ 时(n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率), 高折射率层 n_1 起到了全内反射的波导作用, 光会在相邻高折射率层之间的共振隧道中发生泄漏. 如果具有不同宽度的某一高折射率芯层支持带隙内具有 β 的一个模, 则它不会与其他层发生共振, 通过隧道效应的光泄漏受到抑制, 因而该模会通过光子带隙的受抑隧道效应形式严格传导; 当 $\beta < kn_2$ 时, 光能够传播到的所有层中, 由于多重散射和干涉, 在满足布拉格条件处出现带隙^[3].

有关带隙传光的实验已有报道, 但传光波段均位于近红外区(850—1550 μm). 传输近红外波段的光波不仅不利于进行实验观测, 而且对其实际应用也具有极大的限制. 在本文中, 自行设计并成功制备了传输可见光的 HC-PCFs. 这不仅有利于超短光脉冲的传输^[4], 而且为可见光波段光通信的发展开辟了新的路径.

2. 数值模拟

图 1 是我们自行设计和采用改进的两次堆积拉制法制备的 HC-PCFs 的端面图. 图 1(a) 为整体端面图, 内径 $D_1 = 80 \mu\text{m}$, 外径 $D_2 = 320 \mu\text{m}$, 从图中可以看出采用改进的两次堆积拉制法可以较好地保持光纤结构的完整性^[5,6]. 由于制备工艺上存在的限制, 光纤的纵向均匀性不太好, 即沿着纵向的每个横向端面的结构参数具有一定的差别. 图 1(b) 和 (c) 分别为光纤的始端和尾端(在测试中加以区分)的结构参数. (b) 所示端面的结构参数, 包层空气孔孔径 $d = 3.9 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 4.16 \mu\text{m}$, 芯径 $D = 16.99 \mu\text{m}$; (c) 所示端面的结构参数, 包层空气孔孔径 $d = 4.02 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 4.57 \mu\text{m}$, 芯径 $D = 18.29 \mu\text{m}$.

2.1. 数值模拟中的合理近似

HC-PCFs 在制备过程中, 由于工艺上存在的一些限制因素(比如温度, 气压等), 难免会出现结构偏差和间隙孔. 由于这些因素, 若想对实际结构进行数值模拟是具有一定困难的. 为了便于进行模拟, 我们需要对实际结构进行合理的近似. 第一, 忽略光纤结构沿纵向的不均匀性, 即在模拟中认为光纤沿纵向每个端面的结构参数均相等; 第二, 不考虑包层中节

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2003CB314905)和国家自然科学基金(批准号: 60637010)资助的课题.

† E-mail: yjh81@yahoo.com.cn.

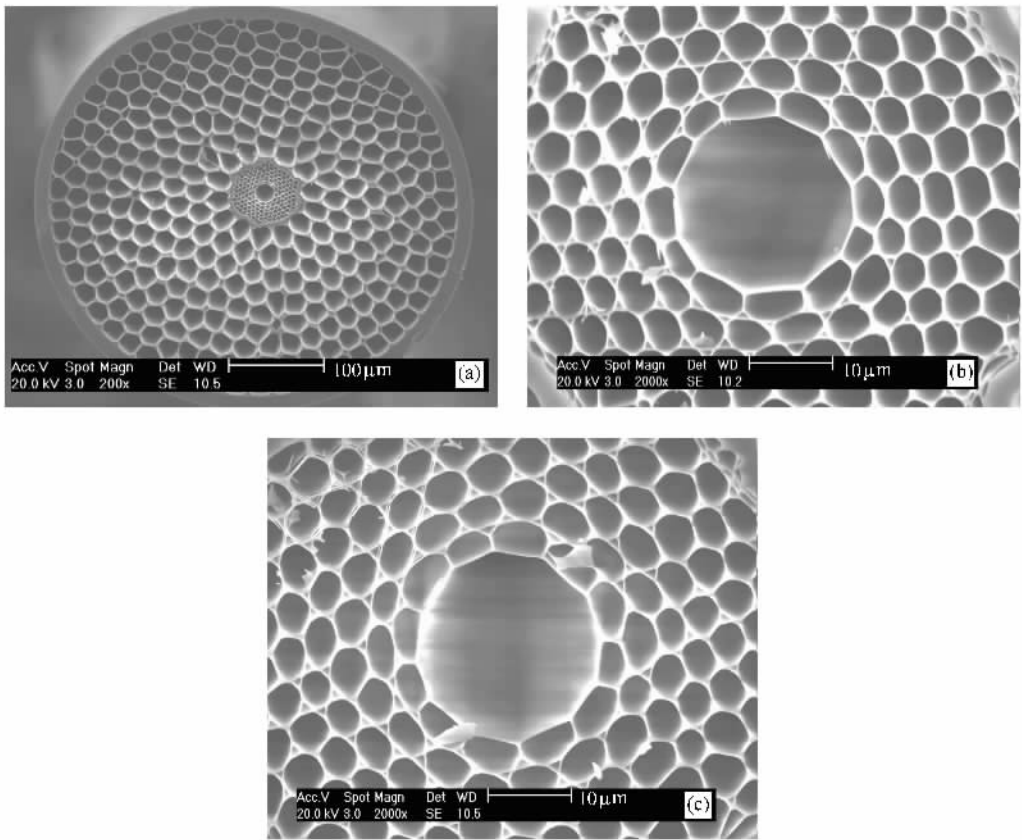


图 1 HC-PCF 端面的电子显微镜图

点处间隙孔的存在,这样就可以避免对类似于复杂的蜂窝结构进行模拟,而只需对规则的三角结构进行模拟即可.在模拟中,选取的结构参数为图 1(c)所示光纤始端的参数:包层空气孔孔径 $d = 3.9 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda = 4.16 \mu\text{m}$,芯径 $D = 16.99 \mu\text{m}$,空气填充率 $f = 0.85$.

在实验测试中我们发现,采用这些合理的近似对带隙的宽窄并未产生较大的影响,但却使带隙的位置发生了明显的偏移.下面基于全矢量平面波展开法^[7,8],我们对所制备的 HC-PCFs 的有效光子带隙的存在情况进行了模拟,深入地分析了光子带隙的传光特性.

2.2. 对有效光子带隙的模拟

对有效光子带隙而言,传播常数 β 的变化对应光的传播方向和传输模式有效折射率 n_{eff} 的变化.对于平面结构而言,不能实现光沿任何方向入射均存在带隙,而且带隙对光的作用也因其入射方向不同而存在差异.这样入射光方向的变化就会相应地改变带隙的位置和宽度.传输模式有效折射率 n_{eff} 的

不同,带隙中各种模式存在的形式也不一样.在后面我们主要研究空气-导模的存在情况.基于上述原因, β 值的选取一定要合理.对于不同的 β 值,带隙的位置会相应地发生变化: β 值越大,带隙会相应地向短波段移动;反之,则向长波段移动.分别选取 $\beta = 6.25$, $\beta = 7.7$ 和 $\beta = 10.9$ 时得到的模拟结果如图 2.

由图 2(a)可以看出,当 $\beta = 6.25$ 时,在归一化频率 $k\Lambda$ 为 26.5 至 31.5 之间出现了三条宽窄不同的带隙.由图 2(b)可以看出,当 $\beta = 7.7$ 时,在归一化频率 $k\Lambda$ 为 32.5 至 43 之间也出现了三条宽窄不同的带隙.由图 2(c)可以看出,当 $\beta = 10.9$ 时,在归一化频率 $k\Lambda$ 为 46.5 至 51 之间出现了两条不同宽窄的带隙.在上述三种情况下,由于基带隙较高阶带隙宽很多,因此我们只考虑基带隙的传光情况.考虑到只有当满足 $n_{\text{eff}} = \beta/k < 1$ 时,位于带隙中的光才可以在空芯中传播,否则,即使有带隙出现,光波也不会沿纵向传播,形成空气-导模,而只能以边界模或者泄漏模的形式存在.由 $\beta/k < 1$ 可有 $k\Lambda > \beta\Lambda$,即只有满足这个条件的带隙才是有效光子带隙.在

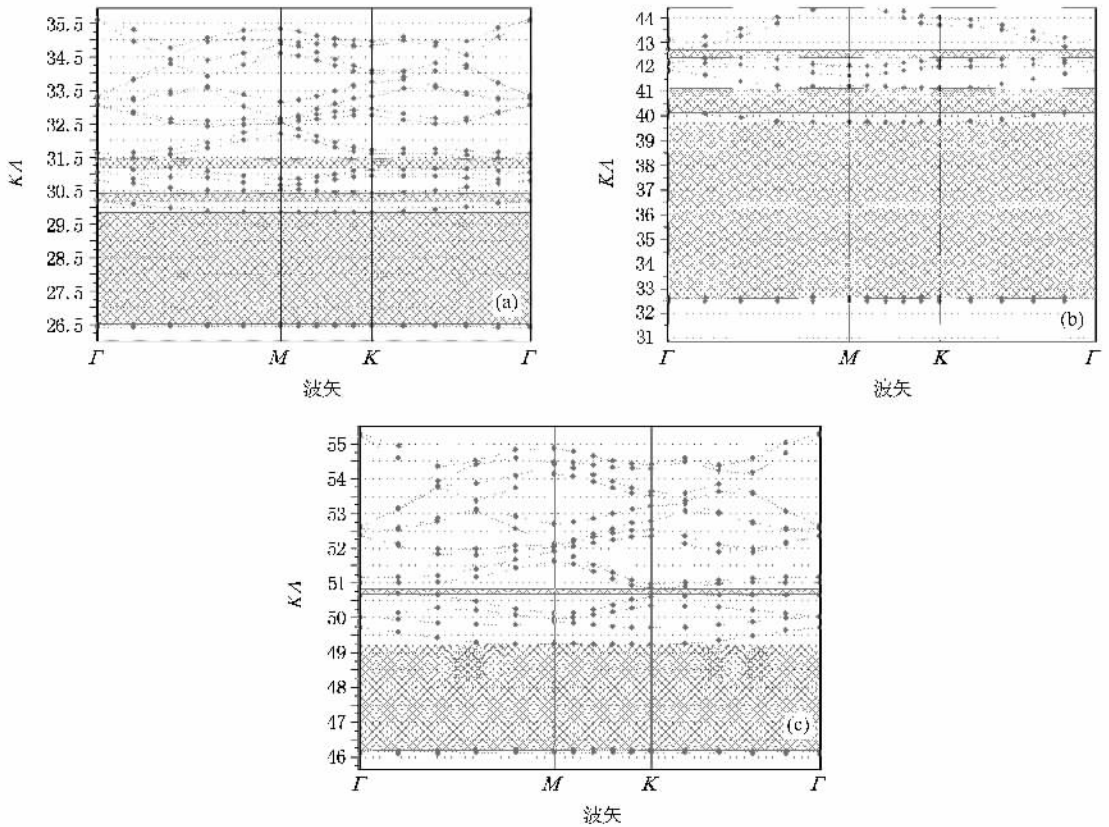


图 2 传播常数分别为 (a) $\beta = 6.25$ (b) $\beta = 7.7$ 和 (c) $\beta = 10.9$ 时得到的有效光子带隙结构图

图 2(a) 的模拟中, β 取为 6.25, 则只有当 $K\Lambda > 26$ 时, 位于带隙中的光波才可以在空芯中传播. 在图 2(a) 中, 三条带隙均满足此条件. 对于较宽的基带隙, 其位于能带 2 和 3 之间, 频率范围为 26.5—30, 相应波长范围为 871—986 nm. 在图 2(b) 的模拟中, β 取为 7.7, 则只有当 $K\Lambda > 32$ 时, 位于带隙中的光波才可以在空芯中传播. 在图 2(b) 中, 三条带隙也均满足此条件, 即频率位于这三条带隙中的光波均可以在空芯中传播. 对于较宽的基带隙, 其位于能带 4 和 5 之间, 频率范围为 32.5—39.7, 相应波长范围为 658—804 nm. 在图 2(c) 的模拟中, β 取为 10.9, 则只有当 $K\Lambda > 45.5$ 时, 才为传光带隙. 在图 2(c) 中, 两条带隙均满足此条件. 对于较宽的基带隙, 其位于能带 3 和 4 之间, 频率范围为 46.5—49.3, 相应波长范围为 530—568 nm.

为了更清晰地了解有效光子带隙, 我们考虑其归一化频率 $K\Lambda$ 随归一化传播常数 $\beta\Lambda$ 的变化情况, 如图 3 所示.

由图 3 可以看出, $\beta\Lambda$ 从 24 变化到 52 之间的范围内, $K\Lambda$ 与 $\beta\Lambda$ 近似成斜率为 45° 的线性关系, 在空气线上方主要存在三条宽窄不同的带隙, 此三条带

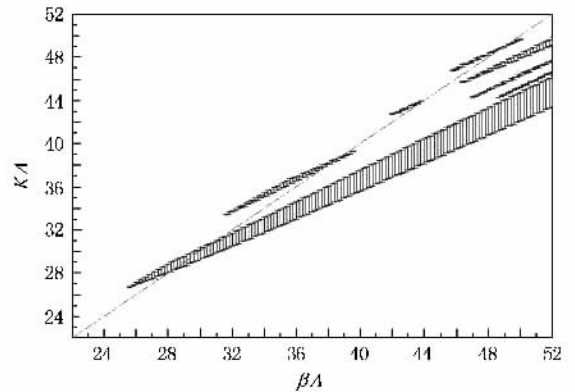


图 3 在 24 至 52 的范围内归一化传播常数 $\beta\Lambda$ 与归一化频率 $K\Lambda$ 的关系

隙即为有效光子带隙. 第一条带隙的 $K\Lambda$ 位于 26.5 与 30 之间, 对应的波长范围为 871—986 nm; 第二条带隙的 $K\Lambda$ 位于 32.5 与 39.7 之间, 对应的波长范围为 658—804 nm; 第三条带隙的 $K\Lambda$ 位于 46.5 至 49.3 之间, 对应的波长范围为 530—568 nm. 图 3 充分展示了有效光子带隙随归一化传播常数 $\beta\Lambda$ 的变化关系, 与图 2 三幅带隙图中所出现的传光波段相

对应.

2.3. 对部分带隙中空气-导模的模拟

在归一化传输常数 $\beta\Lambda$ 位于 27—28 的部分带隙中,我们着重研究空芯中空气-导模的存在情况,进而可以了解在光波传播过程中其在整个带隙中的存在情况.

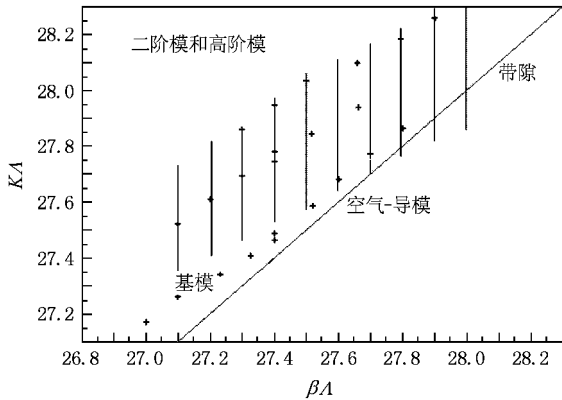


图4 归一化传输常数 $\beta\Lambda$ 为 27 至 28 的部分带隙中空气-导模以不同形式存在的情况

由图4可以看出,位于带隙内的空气-导模以三种形式存在,它们的有效折射率 n_{eff} 在 $\beta\Lambda$ 位于 27—28 之间的范围内呈现一定的变化:当 $\beta\Lambda$ 位于 27.5—27.8 时,出现的模式很接近空气线, n_{eff} 很接近于 1, 在 0.99 以上,此种模式可以被较好的限制在空芯中传播,即为基导模;而当 $\beta\Lambda$ 位于 27.1—27.65 时,模式逐渐远离空气线, n_{eff} 降至 0.99 以下,此时的模式则不再是基模,为二阶模,它将出现向外

泄露的趋势;当 $\beta\Lambda$ 位于 27.3—27.9 时,模式离空气线更远, n_{eff} 降至 0.98 以下,此时的模式为高阶模,将以边界模的形式存在,它相对于二阶模更易于向外泄漏,随着传输距离的增加,将不断与表面模发生耦合,泄露至包层中,再与包层微结构发生共振效应而逐渐衰减掉^[9,10]. 综上所述,空芯中存在的空气-导模具有不同的传输特性,基模可以较好的在空芯中传输,而二阶模和高阶模则随着传输距离的增加不断向外泄漏掉.在整个带隙中模式的存在形式可能会更复杂(可能出现不同形式的简并模和偏振模),但是它们在空芯中的传输情况应该与上面讨论的三种导模的形式是相似的.所以在实验中若想要观测不同模式的特性(包括基模,二阶模甚至高阶模),则所选取的光纤不可太长(最好不要长于 1.5 m).

3. 实验研究

3.1. 实验原理

实验中,采用了宽光谱的溴钨灯(连续光谱范围为 400—1750 nm)作为光源.通过一段尾纤,后经过准直透镜,使出射光束为平行光.该光束经过一非球面镜后通过耦合装置进入所要测试的 HC-PCFs,出射光先通过 CCD,并在监视器上成像,显示出耦合状态.待调整至最佳耦合状态后,去掉成像屏,使光通过一小孔光阑,此时只允许纤芯部分的光通过光阑,这就可以保证 PCF 的包层输出的能量全部被遮挡掉,只有通过纤芯的光才能进入光谱分析仪中.

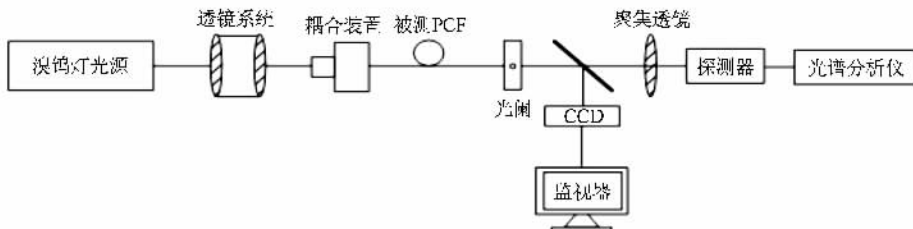


图5 测试所用的实验原理图

3.2. 白光光谱和测得的透射谱

实验中所用的光谱分析仪型号为 AQ6315A,测量范围为 350—1750 nm,测量精度一般均设定为 5—10 nm.由于测试中所用的光纤长度较短(约为 0.6 m),因此可以不计其传输损耗.在实验中我们测量

了光纤在 400—1750 nm 之间的透射谱.由图 6(a)可以看出,所用白光光源的频谱在 450—1650 nm 的范围内连续.而由图 6(b)则可以看出,在 515—560 nm, 715—790 nm, 905—975 nm 三个波段处传输谱带出现了分立,输出的光能量均较高,这就说明在这三个波段处出现了带隙透光.

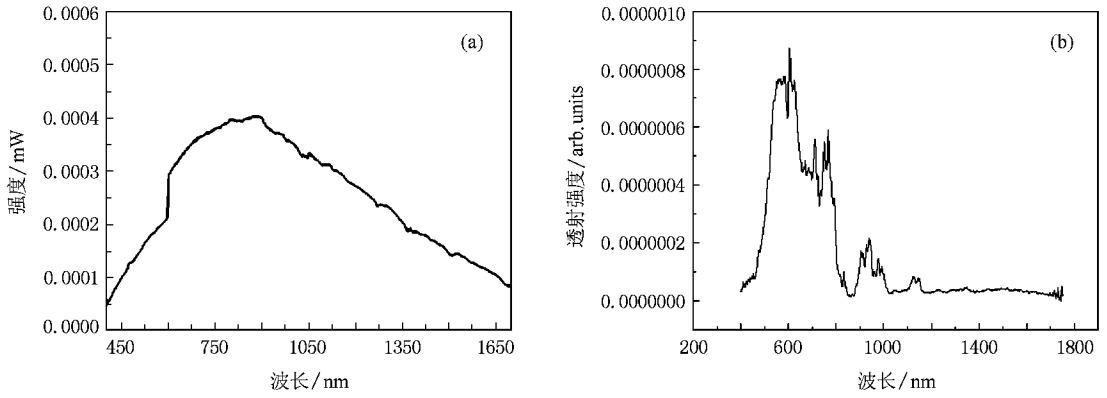


图 6 (a) 实验中所用光源的光谱图 (b) 空芯光纤中输出的光能量与波长的关系

在随后的实验中,我们果然在可见光波段观测到了显著的带隙传光现象.

图 7 中的四幅图为用线阵 CCD 观测到的光纤出射端面的近场图. 图 7(a) 和 (b) 与 (c) 和 (d) 分别为通过适当调节耦合系统, 得到的不同耦合效率下光纤的传光图. 在图 7(a) 和 (b) 中, 空芯中有显著的

绿光传出, 而在图 7(c) 和 (d) 中, 空芯中则有显著的红光传出, 这与我们的数值模拟和实验分析结果是较一致的. 由图 7(a) 和 (c) 可以看出, 入射光几乎覆盖整个端面, 说明此时的耦合效率不是很高, 仅为 50% 左右. 由图 7(b) 和 (d) 则可以看出, 入射光几乎全部位于纤芯之内, 耦合效率则可达到 90% 以上.

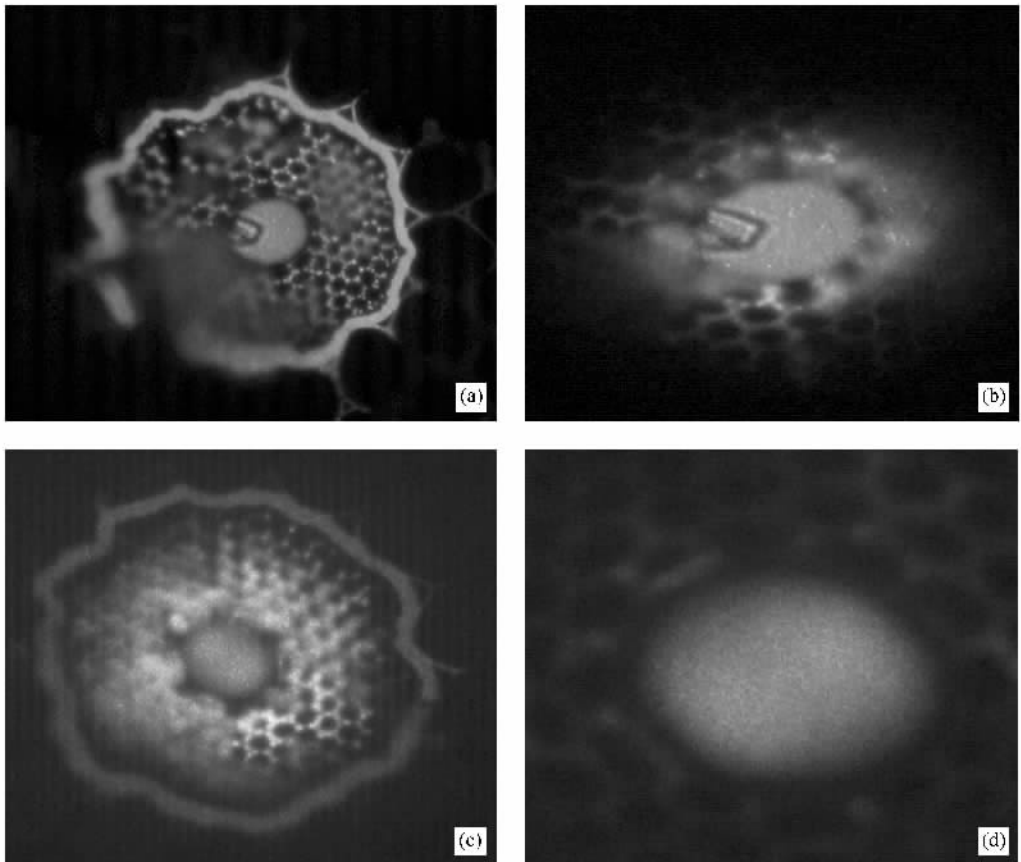


图 7 观测到的传输光的近场图

4. 讨 论

图 1(b) 与图 3 的模拟结果较符合, 但与图 3 相比, 带隙位置明显地向短波段发生了移动, 尤其是图 1(b) 中光能量输出最高处对应的波段为 515—560 nm (图 3 中对应为 530—568 nm). 之所以会发生这样的移动, 我们认为其主要原因是由于光纤在纵向存在不均匀性, 但为了便于模拟, 我们取其初始端的结构参数作为模拟参数, 即图 1(b) 中始端光纤的结构参数(包层空气孔孔径 $d = 3.9 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 4.16 \mu\text{m}$, 芯径 $D = 16.99 \mu\text{m}$). 而实际上, 在纵向每个光纤端面的结构尺寸均会产生一定的变化, 如图 1(c) 中测得的末端的结构参数(包层空气孔孔径 $d = 4.02 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 4.57 \mu\text{m}$, 芯径 $D = 18.29 \mu\text{m}$) 就与图 1(b) 存在一定偏差, 而且在模拟中我们忽略

了节点处空气孔的存在, 以上一系列理想化近似就会使模拟结果与实际情况(实验结果)产生一定的偏差. 模拟时包层孔的直径小于实际值(模拟时取 $d = 3.9 \mu\text{m}$, 而实际上 d 可达到 $4.02 \mu\text{m}$); 孔间距也小于实际值(模拟时取 $\Lambda = 4.16 \mu\text{m}$, 而实际上 Λ 可达到 $4.57 \mu\text{m}$); 将节点处空气孔忽略则会使空气填充率减小. 以上可能就是带隙位置移向短波段的原因: 第一, 研究表明随着包层孔直径的增大带隙的位置会相应的向短波区移动; 第二, 随着孔间距的增大, 带隙的位置也会向短波区发生移动; 第三, 间隙孔的出现可以较大地增加光纤的空气填充率, 而空气填充率的增大势必会使零色散波长点向短波段移动, 相应的其反常色散区也会向短波段移动^[11-12]. 而研究表明, 带隙只能出现在反常色散区, 所以带隙的位置也会相应地向短波段移动. 带隙的位置随孔径、孔间距和空气填充率变化的关系如图 8 所示.

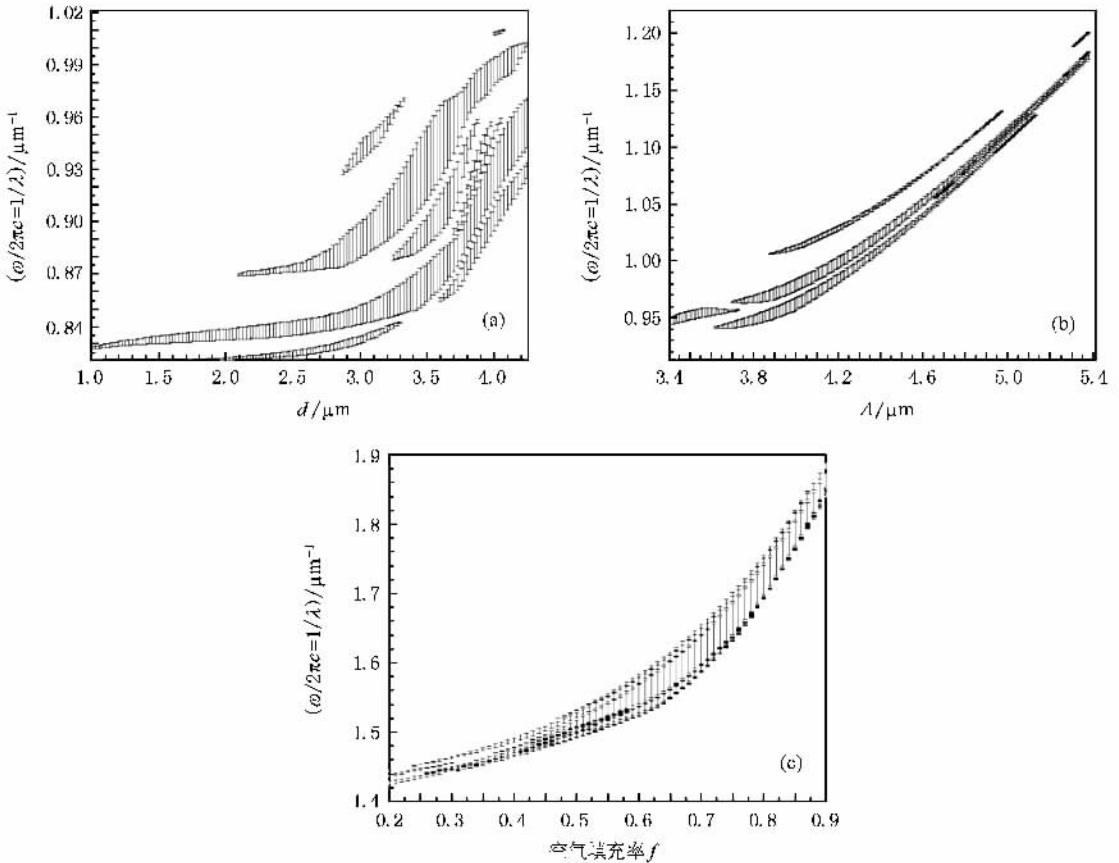


图 8 带隙位置随 (a) 包层孔径 d , (b) 孔间距 Λ 和 (c) 空气填充率 f 变化的关系

由图 8(a) 可以看出, 随着包层孔直径的增大, 带隙位置会向短波段移动, 当包层孔直径较小时带

隙位置随包层孔径的增大而变化不大, 但是当其大于 $3.5 \mu\text{m}$ 时, 带隙位置与包层孔径近似成线性关

系,而且斜率很大,即随着孔径的变化带隙位置变化很明显.由图 8(b)可以看出,随着孔间距的增大,带隙位置也会向短波段移动,当孔间距较小时带隙位置随其变化不太明显,而在其大于 $3.8 \mu\text{m}$ 时,带隙位置随孔间距变化也会产生很大的变化,也近似成斜率较大的线性关系.由图 8(c)也可以看出,随着空气填充率的增大,带隙位置会移向短波段,尤其是当空气填充率大于 0.7 时,带隙位置随空气填充率变化的幅度很大,相应地带隙位置就会向短波段产生较大的移动.除了上述原因,我们认为还有一些其他的原因:在制备过程中,芯径发生了大幅度的膨胀,而研究表明,芯径的增大会使传输模式增多,而且,也会使光纤的其他结构参数变得难以控制(如孔径、孔间距等),而这是否会对带隙宽度和位置产生一定的影响,目前还在研究中.最后,我们在前面已经说明,HC-PCFs 主要研究有效光子带隙,即主要考虑传播常数 $\beta > 0$,且 $\beta < k$ 时位于带隙中的光波在纵向传播的情况.前面已经分析指出,模拟中 β 的

取值对带隙的位置也会产生一定的影响.

5. 结 论

综上所述,我们采用改进的两次堆积控制法成功制备了性能良好的 HC-PCFs.应用全矢量平面波展开法对其进行了数值模拟,发现其在 500—1000 nm 的范围内具有多条宽窄不同的有效光子带隙.从对部分带隙内空气-导模的讨论中可以看出其在整个带隙内存在的形式:依据有效折射率的不同,空气-导模可以分为基模、二阶模和高阶模.基模可以较好地被限制在空芯中沿纵向传输,而二阶模和高阶模则通过不断与表面模耦合而泄漏至包层中,再与包层结构发生共振效应而衰减掉.在光纤透射谱的测试中,发现测得的带隙位置相对于模拟结果向短波段发生了较明显地移动,我们认为这主要是光纤结构沿纵向不均匀和包层节点处间隙孔的存在的影响.

- [1] Knight J C , Broeng J , Birks T A , Russell P S J 1998 *Science* **282** 1476
- [2] Pottage J , Bird D , Hedley T , Knight J , Birks T , Russell P , Roberts P 2003 *Opt. Express* **11** 1854
- [3] Digonnet J F , Kim H K , Kino G S , Fan S 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 4169
- [4] Li Y F , Wang Q Y , Hu M L , Li S G , Liu X D , Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1396 (in Chinese) [栗岩锋、王清月、胡明列、李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1396]
- [5] Zhou G Y , Hou Z Y , Hou L T 2006 *Appl. Opt.* **45** 1
- [6] Zhou G Y , Hou Z Y , Pan P F , Hou L T , Li S G , Han Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1271 (in Chinese) [周桂耀、侯峙云、潘普丰、侯蓝田、李曙光、韩颖 2006 物理学报 **55** 1271]
- [7] Birks T A , Bird D M , Russell P S J 2004 *Opt. Express* **12** 69
- [8] Mortensen N A , Nielsen M D 2004 *Opt. Lett.* **29** 349
- [9] Foteinopoulou S , Rosenberg A , Sigalas M M , Soukoulis C M 2001 *Journal of Appl. Phys.* **89** 824
- [10] Smith C M , Venkataraman N , Gallagher M T , Müller D , West J A , Borrelli N F , Allan D C , Koch K W 2003 *Nature* **424** 657
- [11] Yan M , Shum P 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **30** 465
- [12] Li Y F , Wang C Y , Hu M L , Liu B W , Sun X W , Chai L 2005 *Opt. Express* **13** 6

Investigation of hollow-core photonic band-gap fiber at visible wavelengths^{*}

Yuan Jin-Hui^{1)†} Hou Lan-Tian¹⁾²⁾ Zhou Gui-Yao¹⁾²⁾ Wei Dong-Bin¹⁾ Wang Hai-Yun¹⁾ Dong Shi-Rui¹⁾
Wang Qing-Yue³⁾ Liu Bo-Wen³⁾ Hu Ming-Lie³⁾

¹⁾ *Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China*

²⁾ *Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China*

³⁾ *Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

(Received 16 November 2007 ; revised manuscript received 9 December 2007)

Abstract

Based on full-vector plane-wave method (FVPWM), the hollow-core photonic band-gap fiber (HC-PBGF) fabricated using the improved twice stack-and-draw technique has been simulated. Under given values of propagation constant β , some valid photonic band-gaps (PBGs) with different sizes will emerge within the wave band of 500—1000 nm. For different values of the effective refractive index, the air-guided modes can exist in different forms in part of PBGs. Comparing the experimental data with the simulation result, we have discovered that the measured positions of PBGs are shifted to shorter wavelengths distinctly. The primary reasons are considered to be the structure asymmetry along longitudinal direction and the existence of interstitial holes at nodes in the cladding region.

Keywords : hollow-core band-gap fiber, full-vector plane-wave method, valid photonic band-gaps, air-guided modes

PACC : 4270Q, 4280L, 4281C, 4281D

^{*} Project supported by the National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant No. 2003CB314905) and the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60637010).

[†] E-mail : yjh81@yahoo.com.cn.