

文章编号: 0253-2239(2006)06-0806-6

光子晶体光纤接续损耗的理论分析*

方 宏 娄淑琴 任国斌 王 智 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 基于超格子构造法, 采用全矢量模型计算了光子晶体光纤的模场半径, 由此出发理论分析了光子晶体光纤与普通单模光纤之间接续损耗分别受横向偏移、轴向倾斜以及模场不匹配的影响, 给出了光子晶体光纤在部分常用结构参量区域 $\{\Delta, d/\Delta\}$ 内与 SMF-28 接续损耗的理论值, 讨论了光子晶体光纤各结构参量与接续损耗之间的关系。并简要分析了不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗。结果表明, 接续损耗对横向偏移和轴向倾斜都非常敏感; 孔距是决定接续损耗大小最主要的因素; 与普通单模光纤接续, 当光子晶体光纤的孔距比该单模光纤纤芯半径大一些时, 接续损耗比较小; 两种不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗大小最主要取决于它们孔距的差异。

关键词: 光子晶体光纤; 接续损耗; 全矢量模型; 模场半径

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

Theoretical Analysis on Splice Loss of Photonic Crystal Fibers

Fang Hong Lou Shuqin Ren Guobin Wang Zhi Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Based on the supercell overlapping method, the full vector model is adopted to compute the mode field radius of photonic crystal fibers (PCF). And then, the splice losses of PCF-single model fiber (SMF) under the influence of transverse offset, angular misalignment and mode field mismatch are analyzed, respectively. The theoretical values of PCF-SMF-28 in some conventional ranges of structural parameters $\{\Delta, d/\Delta\}$ are offered, and the effect of each structure parameter on the splice loss is discussed. The splice loss between two PCFs with different structures is analyzed in brief. It is concluded that the splice loss is very sensitive to transverse offset and angular misalignment, the most important structural parameter effecting splice loss is the pitch, Δ , of PCF, the splice loss of PCF-SMF is relatively low if the pitch of PCF is larger than the radius of SMF core, and the splice loss between two PCFs with different structures is mainly decided by the difference between their pitches.

Key words: photonic crystal fibers; splice loss; full vector model; mode field radius

1 引 言

自从 Knight 等人在 1996 年首次制造出无尽单模光子晶体光纤 (Photonic crystal fiber, PCF) 以来^[1], 这种新型光纤的研究一直受到人们的极大关注。由于光子晶体光纤较传统光纤拥有许多独特的性质^[2~5], 使其在光纤器件、光纤传感以及非线性光纤光学等方面都有着非常广泛的应用^[5~7]。近年来, 光子晶体光纤, 特别是全内反射导光型 (Total internal reflection, TIR) 光子晶体光纤的各方面特性在理论上已基本成型, 部分实验室也已经拉制出具有较低损耗的光子晶体光纤^[8,9], 人们的工作重

点逐渐向实用化转移。

然而, 从目前条件看来, 不管是在传输方面还是在特种光器件制作方面都必须基于和传统光纤的结合, 即使是对光子晶体光纤本身的特性测量, 也必须借助传统光纤作为过渡。另外, 随着光子晶体光纤的进一步应用, 多种特性光子晶体光纤的结合使用也必将给光通信系统和器件的设计带来新的希望。由此看来我们首要面对的问题就是光子晶体光纤和传统光纤以及不同结构光子晶体光纤之间的接续问题, 如何降低其接续损耗^[10,11]就成了目前一个急需解决的问题。

* 国家 863 计划 (2004AA31G200) 资助课题。

作者简介: 方 宏 (1982~), 男, 江西上饶人, 北京交通大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要从事光纤通信、新型光纤和光子晶体光纤的研究。E-mail: macrofang@263.net

收稿日期: 2005-05-10; 收到修改稿日期: 2005-12-06

2 理论模型

影响接续损耗最主要的参量是两侧光纤的模场半径,因此模场半径的计算精度直接决定了接续损耗估算的准确性,在此基于超格子构造法^[12],选用较精确全矢量模型对其进行分析。

2.1 全矢量模型

假设全内反射型光子晶体光纤沿传输方向(z 轴)均匀,在不考虑光纤损耗的情况下,其模式电场可以分解为

$$E(x, y, z) = [e_x(x, y) + e_z(x, y)] \exp(j\beta z), \quad (1)$$

其中 $e_x(x, y) = e_x \mathbf{x} + e_y \mathbf{y}$, $e_z(x, y)$ 分别为模式电场的横向分量与纵向分量, β 为传输常数。将(1)式代入矢量波动方程,可得到横向模式电场 $e_x(x, y)$, $e_y(x, y)$ 的全矢量耦合波动方程:

$$\begin{aligned} (\nabla_{\perp}^2 - \beta_j^2 + k^2 n^2) e_x &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right), \\ (\nabla_{\perp}^2 - \beta_j^2 + k^2 n^2) e_y &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

β_j 为第 j 阶模式的传输常数, $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ 为拉普拉斯算符的横向分量, k 为真空波数, n 为光纤横向折射率分布,为了求解方程(2),将模式电场和横向折射率分布用正交函数展开。由基模的对称

性,选取厄密-高斯函数将电场展开:

$$\begin{aligned} e_x(x, y) &= \sum_{a,b=0}^{F-1} \epsilon_{ab}^x \psi_a(x) \psi_b(y), \\ e_y(x, y) &= \sum_{a,b=0}^{F-1} \epsilon_{ab}^y \psi_a(x) \psi_b(y), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 F 为展开式项数, ϵ_{ab}^x 和 ϵ_{ab}^y 分别为 $e_x(x, y)$ 和 $e_y(x, y)$ 的厄密-高斯展开系数, $\psi_i(s)$ ($i = a, b, s = x, y$) 是正交归一化厄密-高斯函数。光子晶体光纤的横向折射率分布由两种周期性结构(PC1, PC2)叠加构成^[14],将其 n^2 和 $\ln n^2$ 分别展开为

$$\begin{aligned} n^2(x, y) &= \sum_{a,b=0}^{P-1} P_{ab} \cos \frac{2\pi ax}{l_x} \cos \frac{2\pi by}{l_y} + \\ &\quad \sum_{a,b=0}^{D-1} D_{ab} \cos \frac{2\pi ax}{ml_x} \cos \frac{2\pi by}{ml_y}, \\ \ln n^2(x, y) &= \sum_{a,b=0}^{P-1} P_{ab}^{\ln} \cos \frac{2\pi ax}{l_x} \cos \frac{2\pi by}{l_y} + \\ &\quad \sum_{a,b=0}^{D-1} D_{ab}^{\ln} \cos \frac{2\pi ax}{ml_x} \cos \frac{2\pi by}{ml_y}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $P_{ab}, D_{ab}, P_{ab}^{\ln}, D_{ab}^{\ln}$ 分别为两种周期性结构 PC1 和 PC2 的展开系数, P, D 分别为展开式项数, l_x, l_y 分别是周期性折射率分布在 x, y 两个方向的周期长度, m 为超格子的归一化大小。

将(3)式代入(2)式,可得到本征方程

$$L \begin{bmatrix} \epsilon^x \\ \epsilon^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)x} & I_{abcd}^{(4)x} \\ I_{abcd}^{(4)y} & I_{abcd}^{(1)} + k^2 I_{abcd}^{(2)} + I_{abcd}^{(3)y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^x \\ \epsilon^y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} \epsilon^x \\ \epsilon^y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中交叠积分 $I_{abcd}^{(1)}, I_{abcd}^{(2)}, I_{abcd}^{(3)}, I_{abcd}^{(4)}$ 都存在解析表达式,由于表达式比较复杂,本文中不再写出,可参考文献[14]。通过在特定波长处求解本征方程(5),得到对应的传输常数和模式电场展开系数,从而得出光子晶体光纤中的横向电场分布。光子晶体光纤的模场面积定义为

$$A_{\text{eff}} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2 / \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy \right], \quad (6)$$

其中 $E(x, y)$ 为模式电场横向分量。再由 $A_{\text{eff}} = \pi \omega_{\text{eff}}^2$ 就可以计算出光子晶体光纤的模场半径 ω_{eff} 。需要注意的是 ω_{eff} 是与工作波长相关的,在以下讨论中选取最常用的通信波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。

2.2 光纤接续损耗

造成光纤接续损耗的主要因素有光纤对准时的横向偏移[如图 1(a)]、轴向倾斜[如图 1(b)]、两侧光纤的模场不匹配[如图 1(c)]以及在进行切割、接

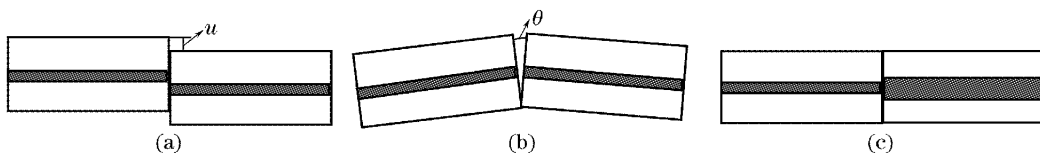


图 1 影响光纤接续损耗的三种主要因素。(a)横向偏移,(b)轴向倾斜,(c)模场不匹配

Fig. 1 Three factors affecting splice loss. (a) Transverse offset, (b) angular misalignment, (c) mode field mismatch

续操作时对光纤端面的损坏等影响。这里主要对前三种因素进行理论分析。

利用传统光纤的理论,光纤的接续损耗可以用下式进行推算^[13],式中小括号内三项分别对应模场不匹配、横向偏移、以及轴向倾斜三个因素的影响。由于该式是基于入射光为高斯光束导出的,而普通三角格子光子晶体光纤的基模也可以近似地看作高斯型分布,因此下式对于光子晶体光纤接续损耗的推算也同样成立。

$$\alpha_{\text{splice}} = -10 \lg \left[\left(\frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right)^2 \exp\left(\frac{-2u^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}\right) \times \exp\left(\frac{-k_0^2 n_s^2 \theta^2 \omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}\right) \right], \quad (7)$$

其中 ω_1 和 ω_2 分别为接续点两侧光纤在同一工作波长处的模场半径, u 为横向偏移量, θ 为轴向的倾斜角度, k_0 为自由空间的波数, n_s 为二氧化硅的折

射率。

3 数值模拟与分析

3.1 光子晶体光纤模场半径

图 2 (a) 为利用全矢量模型求得的三角格子光子晶体光纤的基模电场分布,其中结构参数为:孔距 $\Lambda = 6 \mu\text{m}$,孔径孔距比 $d/\Lambda = 0.45$ 。图 2 (b) 为光子晶体光纤模场半径随 Λ 的变化关系。当 d/Λ 一定时,即纤芯与包层等效折射率差一定,也可以理解为等效包层对模场的束缚能力一定,此时增大 Λ 相当于等比例放大光子晶体光纤的横向折射率分布,这时模场半径也将以相同比例放大,由图中反映出的模场半径随 Λ 线性增加正好与理论分析相一致。随着 d/Λ 的减小,曲线上移,这也反映了包层对模场的束缚能力逐渐减小,模场半径增大。

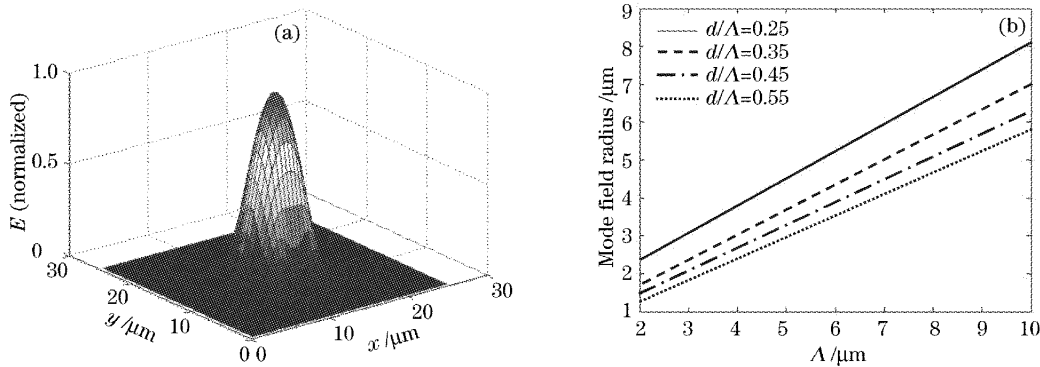


图 2 在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, (a) $d/\Lambda = 0.45, \Lambda = 6 \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤的电场分布图, (b) 光子晶体光纤 ($d/\Lambda = 0.25 \sim 0.55$) 模场半径随孔距 Λ 的变化关系

Fig. 2 (a) Electrical-field distribution of a PCF with $d/\Lambda = 0.45, \Lambda = 6 \mu\text{m}$, (b) PCF's ($d/\Lambda = 0.25 \sim 0.55$) mode field radius as a function of pitch Λ for wavelength of $1.55 \mu\text{m}$

3.2 光子晶体光纤和普通单模光纤之间的接续损耗

利用(7)式可以对光子晶体光纤与普通单模光纤(SMF-28)的接续损耗进行分析,则 ω_1 和 ω_2 分别为光子晶体光纤和 SMF-28 的模场半径。SMF-28 纤芯半径为 $4.1 \mu\text{m}$, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场半径为 $5.2 \pm 0.4 \mu\text{m}$ ^[15], 以下按 $5.2 \mu\text{m}$ 进行计算。

3.2.1 横向偏移对接续损耗的影响

图 3(a) 所示为六种不同孔径孔距比 ($d/\Lambda = 0.2 \sim 0.45, \Lambda = 6 \mu\text{m}$) 的光子晶体光纤与 SMF-28 的接续损耗随 u 的变化关系。结果显示,随着 d/Λ 的增大曲线大致趋势是上移,这是由于两侧光纤模场半径匹配程度不同引起的。可以看到在 $u = 0$ 处, $d/\Lambda = 0.25$ 这条曲线的值接近零,也就是说该结构光子晶体光纤的模场与 SMF-28 基本匹配。更重要的是,该图显示接续损耗随横向偏移量 u 的增加而

迅速增大,即使是在两侧光纤模场基本匹配的情况下 ($d/\Lambda = 0.25$), 当横向偏移量增大到 $3 \mu\text{m}$ 左右时,由其引起的接续损耗也达到 1.5 dB 左右。

3.2.2 轴向倾斜对接续损耗的影响

同样分析了六种结构光子晶体光纤和 SMF-28 的接续损耗随倾斜角度增大而增大的关系 [图 3(b)]。结果显示,接续损耗对轴向倾斜非常敏感,即使是在两侧光纤模场基本匹配的情况下 ($d/\Lambda = 0.25$), 当存在很小的角度倾斜时,接续损耗就会急剧地恶化。在理论上可以解释为,因为纤芯尺寸极小,略微的角度倾斜都将导致前侧光纤的出射光大量地入射到后侧光纤的包层中,从而迅速衰减。

综上所述,在接续过程中应尽量避免出现横向偏移和轴向倾斜。

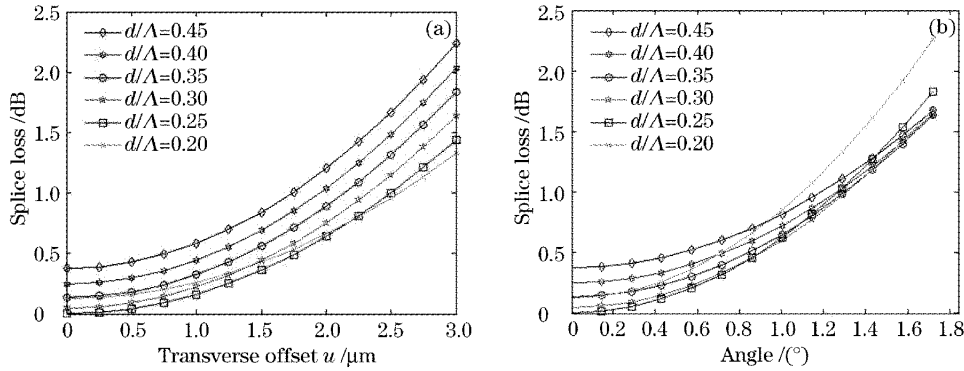


图 3 在波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 时,光子晶体光纤($\Lambda=6\ \mu\text{m}, d/\Lambda=0.20\sim 0.45$)和 SMF-28 之间的接续损耗随 (a)横向偏移 u , (b)轴向倾斜 θ 的变化关系

Fig. 3 PCF ($\Lambda=6\ \mu\text{m}, d/\Lambda=0.20\sim 0.45$)-SMF-28 splice loss as a function of transverse offset u (a) and tilt angle θ (b) for wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$, respectively

3.2.3 模场匹配对接续损耗的影响

模场匹配因素是决定光纤接续损耗大小最根本的因素,由其引起的损耗可以认为是接续损耗的极小值,因此模场匹配问题必须在光纤结构参量设计时就加以考虑。

假设两侧光纤排布得非常好,即 $u=0, \theta=0$ 。图 4(a)所示为不同 d/Λ 的光子晶体光纤与 SMF-28 接续损耗随 Λ 的变化关系。结果显示,对于每一种 d/Λ ,都存在着一个和 SMF-28 最佳匹配的孔距值,即接续损耗理论值为零的最优点,这个最优点随着 d/Λ 的增大而增大。在理论上可以理解为,由于 SMF-28 的纤芯与包层折射率差比较小,也就是包层对模场的束缚能力比较小,所以当光子晶体光纤的 d/Λ 较小时,其等效包层对模场的束缚能力与 SMF-28 相当,因此在两者纤芯半径相近时模场匹配(通常可以将 Λ 近似看作光子晶体光纤的纤芯半径),如图 4(a)中 $d/\Lambda=0.2$ 曲线的最优点在 $\Lambda=$

$4.5\ \mu\text{m}$ 处,接近 SMF-28 的纤芯半径 $4.1\ \mu\text{m}$ 。当 d/Λ 逐渐增大时,等效包层对模场的束缚能力增大,此时如果还要保证与 SMF-28 的模场面积相同就需要光子晶体光纤有更大的纤芯半径,即更大的 Λ 。

图 4(b)给出了光子晶体光纤在部分结构参量区域 $\{\Lambda, d/\Lambda\}$ 内与 SMF-28 接续损耗理论值的大概范围,这为光子晶体光纤的参量设计提供了一定的参考。图中接续损耗值的大致分布显示,决定光子晶体光纤与普通单模光纤接续损耗大小最主要的结构参量是孔距 Λ 。特别,在与 SMF-28 接续时,当光子晶体光纤的孔距值设置在 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ 区域内,对于各种常用的 $d/\Lambda(0.25\sim 0.45)$,其接续损耗相对较小,此时光子晶体光纤的等效纤芯半径比该单模光纤要大一些,这也是由光子晶体光纤等效包层对模场的束缚能力要强于普通单模光纤的原因所致。

为了验证该方法计算接续损耗理论值的准确性,将其与 Hoo 等^[16]给出的实验值进行比较。他

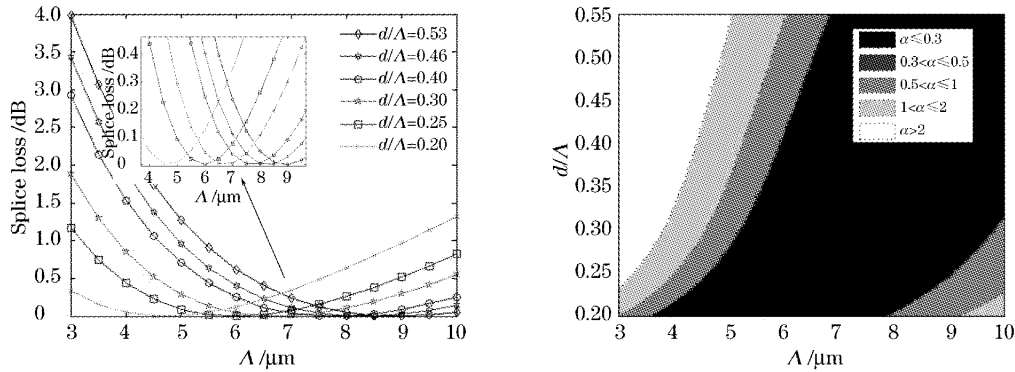


图 4 在波长为 $1.5\ \mu\text{m}$ 时,(a)光子晶体光纤($d/\Lambda=0.20\sim 0.53$)和 SMF-28 之间的接续损耗随孔距 Λ 的变化关系, (b)在部分结构参量区域 $\{\Lambda, d/\Lambda\}$ 光子晶体光纤和 SMF-28 接续损耗的理论值范围

Fig. 4 (a) PCF ($d/\Lambda=0.20\sim 0.53$)-SMF-28 splice loss as a function of pitch Λ , (b) theoretical value of the splice loss in some ranges of $\{\Lambda, d/\Lambda\}$ for wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$

们用丹麦晶体光纤公司提供的 PCF-LMA5 ($\Lambda = 3.13 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.53$) 和 PCF-LMA10 ($\Lambda = 6 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.46$) 分别与 SMF-28 进行接续实验, 测得接续损耗分别为 3.62 dB 和 0.54 dB。我们的理论值分别为 3.72 dB 和 0.40 dB, 由此说明使用该模型对接续损耗的计算是比较准确的。造成理论值与实验值略微偏差的主要原因有: 1) 实际拉制出的光子晶体光纤在结构上与理论模型必然存在一定的差异; 2) 理论模型中将光子晶体光纤基模看作高斯分布存在少量误差; 3) 计算时设定横向偏移和轴向倾斜为零, 实际接续中很难做到; 4) 接续过程中对光纤端面的破坏导致损耗加大等。

3.3 不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗

同样, 可以通过(7)式对不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗进行分析, 这里仅考虑两侧光纤模

场不匹配的影响, 即令 $u=0$, $\theta=0$ 。图 5(a) 所示为假设两侧光子晶体光纤的 Λ 相等, 接续损耗随 d/Λ 差异的变化关系, 其中令 $d_1/\Lambda_1 = 0.35$ 。结果显示, 当 Λ 较大时, 接续损耗受 d/Λ 差异的影响不显著。例如两侧光子晶体光纤的 Λ 都为 $6 \mu\text{m}$, 其中一侧光纤的 d/Λ 为 0.35, 另一侧光纤的 d/Λ 在 $0.2 \sim 0.5$ 范围内变化, 它们之间的接续损耗总在 0.3 dB 以下。图 5(b) 所示为假设两侧光子晶体光纤的 d/Λ 相同, 接续损耗随 Λ 差异的变化关系, 其中 $\Lambda_1 = 6 \mu\text{m}$ 。可以看出, 随 Λ 差异的增大, 其接续损耗的变化幅度比较大。而对于不同的 d/Λ , 损耗变化曲线的差异并不大, 这也再次说明, 决定接续损耗最主要的参量是光子晶体光纤的孔距 Λ , 对于两种不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗大小最主要取决于它们孔距的差异。

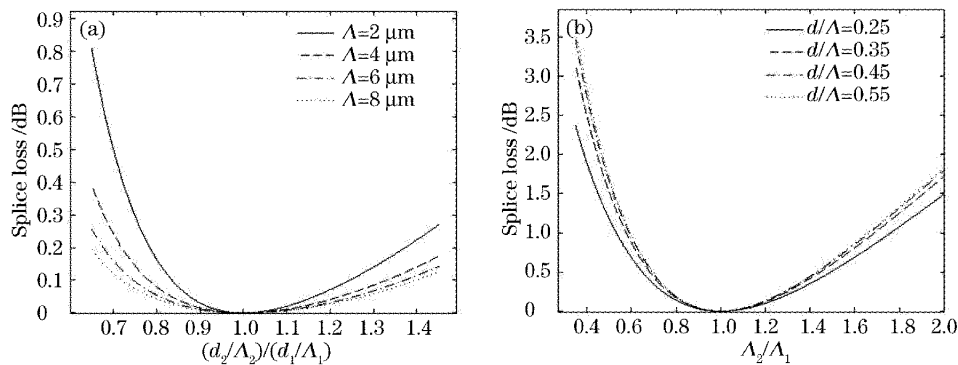


图 5 在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, (a) Λ 相同的两光子晶体光纤之间的接续损耗随 $(d_2/\Lambda_2)/(d_1/\Lambda_1)$ 的变化关系, (b) d/Λ 相同的两光子晶体光纤之间的接续损耗随 Λ_2/Λ_1 的变化关系

Fig. 5 Splice loss of two PCFs with the same pitch Λ as a function of the ratio of their relative hole diameter $(d_2/\Lambda_2)/(d_1/\Lambda_1)$ (a) and with the same relative hole diameter d/Λ as a function of the ratio of their pitches Λ_2/Λ_1 (b) for wavelength of $1.55 \mu\text{m}$

5 结 论

基于超格子构造法, 采用全矢量模型计算了光子晶体光纤的模场半径, 基于此分析了光子晶体光纤与普通单模光纤以及不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗。分析结果显示, 接续损耗对横向偏移和轴向倾斜都非常敏感, 实际接续时应尽量避免; 光子晶体光纤的孔距 Λ 是决定接续损耗大小最主要的因素; 与普通单模光纤接续, 当光子晶体光纤的孔距比该单模光纤纤芯半径大一些时, 接续损耗比较小; 两种不同结构光子晶体光纤之间的接续损耗大小最主要取决于它们孔距的差异。本文的分析和数据为光子晶体光纤结构参量的设计提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Ren Guobin, Lou Shuqin, Wang Zhi *et al.*. Study on dispersion properties of photonic crystal fiber by equivalent-index model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 319~323 (in Chinese)
- 任国斌, 娄淑琴, 王 智 等. 等效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 319~323
- 3 Yanfeng Li, Bowen Liu, Zihan Wang *et al.*. Influence on photonic crystal fiber dispersion of the size of air holes in different rings within the cladding[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2): 75~77
- 4 Lou Shuqin, Ren Guobin, Wang Zhi *et al.*. Propagation properties of high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 441~445 (in Chinese)
- 娄淑琴, 任国斌, 王 智 等. 高双折射光子晶体光纤的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 441~445
- 5 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362

- 6 W. J. Wadsworth, R. M. Percival, G. Bouwmans *et al.*. High power air-clad photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(1): 48~53
- 7 J. Maeda, M. Yoshida. Photonic crystal fiber amplifiers[C]. *Proce. OFC 2005*, 2005, OFB1
- 8 B. J. Mangan, L. Farr, A. Langford *et al.*. Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber[C]. *Proce. OFC 2004*, 2004, PDP24
- 9 K. Kurokawa, K. Tajima, J. Zhou *et al.*. Penalty-free dispersion-managed soliton transmission over 100 km low loss PCF[C]. *Proce. OFC2005*, 2005, PDP21
- 10 A. Ishikura, Y. Kato, T. Ooyanagi *et al.*. Loss factors analysis for single-mode fiber splicing without core axis alignment[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(4): 577~583
- 11 D. Andrew Yablon, T. B. Ryan. Low-loss high-strength microstructured fiber fusion splice using GRIN fiber lenses[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 118~120
- 12 Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin *et al.*. Supercell lattice method for photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(9): 980~991
- 13 Wu Chongqing. *Theory of Optical Waveguide* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 107~110 (in Chinese)
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 107~110
- 14 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(11): 1310~1321
- 15 Corning SMF-28 fiber. <http://www.bjcorning.com/product/content.asp?pid=3>
- 16 Y. L. Hoo, Wei Jin, Jian Ju *et al.*. Loss analysis of single-mode fiber/photonic-crystal fiber splice [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2004, **40**(5): 378~380