

文章编号: 1001-3806(2008)03-0302-03

高非线性光子晶体光纤接续损耗的数值研究

王润轩

(宝鸡文理学院 物理系, 宝鸡 721007)

摘要: 为了从理论上求解光子晶体光纤的接续损耗问题, 采用全矢量模型, 计算了全反射式光子晶体光纤、高非线性光子晶体光纤的模场半径, 给出了模场半径随空气孔间距、空气孔半径以及掺杂比例的变化关系, 并在此基础上分析了光子晶体光纤与普通单模光纤的接续损耗, 得到了理论上零损耗时的光子晶体光纤的模场半径。结果表明, 模场失配是高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤以及与一般全反射式光子晶体光纤接续损耗的最主要因素, 合理的设计有望实现模场匹配, 将接续损耗降到最小程度。

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 接续损耗; 全矢量模型; 模场半径

中图分类号: TN253 TN929.11 文献标识码: A

Numerical study of splice loss of high-nonlinearity photonic crystal fibers

WANG Runxuan

(Department of Physics, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007, China)

Abstract In order to solve the splice loss problem of photonic crystal fiber, the full vector model was adopted to calculate the mode field radius, air hole radius as well as its relation with doping concentration in total internal reflection fiber and high nonlinearity fiber. Based on the results, the splice loss of photonic crystal fiber and single mode fiber was analyzed in detail. The calculation indicates that the mode field unbalance is the main reason of splice loss for total internal reflection fibers and high nonlinearity fibers. An appropriate modification of mode field match can reduce the splice loss to a minimum value.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; splice loss; full vector model; mode field radius

引 言

自从英国南安顿大学的 KNIGHT 等人研制出世界上第一根光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 以来, 这种新型光纤的研究一直受到人们的极大关注。历经 10 年的发展, 目前已有多种类型 (高非线性、双折射、保偏等) 的单模光子晶体光纤实现了商用化^[1-3], 然而, 不管是在传输方面还是在特种器件制作方面都面临与普通单模光纤 (single mode fiber, SMF) 的结合, 即使对光子晶体光纤自身特性的测量, 也必须借助普通单模光纤的过渡。由于光子晶体光纤周期性的多孔包层结构, 造成其与普通单模光纤低损耗接续的困难, 这对芯径很细的高非线性光子晶体光纤尤为突出。近年来, 用高非线性光子晶体光纤产生超连续谱、受激喇曼放大、光参变放大以及波长变换等成为研究热点^[4-6], 预示着光子晶体光纤非线性光学技术在光信息系统中将会有重要应用。但是, 光子晶体光纤非

线性光学系数越大, 有效模场半径 (或芯径) 就越小, 因此, 降低与普通单模光纤接续损耗是光子晶体光纤推广应用中急待解决的问题^[7-10]。

1 光纤模型与计算方法

影响接续损耗的最主要因素是两侧光纤的模场失配, 因此, 模场分布的计算精度决定着接续损耗估算的准确性。在高非线性光子晶体光纤中, 通常采用纤芯掺锗或提高包层空气填充率来加强对光的限制、减小模场面积、增大非线性。在此选用空气孔呈三角型结构的光子晶体光纤, 纤芯按不同比例掺锗, 用全矢量模型对其进行分析。

1.1 全矢量模型

光在周期性介质中传输时, 满足下面的全矢量微分方程:

$$\begin{cases} \left[\frac{d^2}{dy^2} + \frac{d}{dx} \cdot \frac{1}{n^2} \frac{d}{dx} n^2 + n^2 k^2 - \beta^2 \right] E_x = \\ \left[\frac{d^2}{dx dy} - \frac{d}{dx} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{d}{dy} n^2 \right] E_y \\ \left[\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d}{dy} \cdot \frac{1}{n^2} \frac{d}{dy} n^2 + n^2 k^2 - \beta^2 \right] E_y = \\ \left[\frac{d^2}{dy dx} - \frac{d}{dy} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{d}{dx} n^2 \right] E_x \end{cases} \quad (1)$$

作者简介: 王润轩 (1953-), 男, 教授, 主要从事非线性光纤光子技术方向的研究工作。

Email: wangrunxuan53629@163.com

收稿日期: 2007-03-30 收到修改稿日期: 2007-04-05

式中, n 为材料的折射率, 在光子晶体光纤端面呈周期性变化, k 为波矢, β 是模式传播常数, 交叉项代表了两个正交光场 E_x 和 E_y 的相互耦合, 如果耦合很小, 则可忽略该项, 此时方程组 (1) 中的每一个方程可单独求解, 全矢量方程组 (1) 可简化为半矢量方程:

$$\left[\frac{d^2}{dy^2} + \frac{d}{dx} \cdot \frac{1}{n^2} \frac{d}{dx} n^2 + n^2 k^2 - \beta^2 \right] E_x = 0 \quad (2)$$

采用有限差分法数值求解上述方程, 可得光子晶体光纤中特定波长的横向电场分布。光场的有效面积定义为:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (3)$$

1.2 光纤的接续损耗的计算

光子晶体光纤与普通单模光纤模场失配引起的接续损耗可通过下式来计算:

$$\alpha = -10 \lg \left[\frac{2v_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right]^2 \exp \left[\frac{-2u^2}{w_1^2 + w_2^2} \right] \times \exp \left[\frac{-k^2 n^2 \theta^2 w_1^2 w_2^2}{w_1^2 + w_2^2} \right] \quad (4)$$

式中, w_1, w_2 分别为光子晶体光纤和普通单模光纤在同一工作波长处的模场半径, u, θ 分别为横向偏移量和轴向倾斜角, 假设两侧光纤排布得很好, 即 $u = 0, \theta = 0$ (4) 式简化为:

$$\alpha = -10 \lg \left[\frac{2v_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right]^2 \quad (5)$$

2 数值结果与分析

2.1 光子晶体光纤的模场面积

图 1 是利用全矢量模型求得的纤芯掺杂 $G\epsilon O_2$ 的质量分数 δ 分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 情况下, 空气孔半径 r 分别为 0.35 μm , 0.4 μm , 0.5 μm , 0.6 μm , 0.7 μm , 0.8 μm , 孔间距 $\Lambda = 2.5 \mu\text{m}$, 纤芯半径 $r' = 1.0 \mu\text{m}$ 时, 在中心波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 处光子晶体光纤的有效模场半径随空气孔半径变化的关系。图 1 中显示, 无论提高掺杂比例还是增大空气孔径时, 都能增强

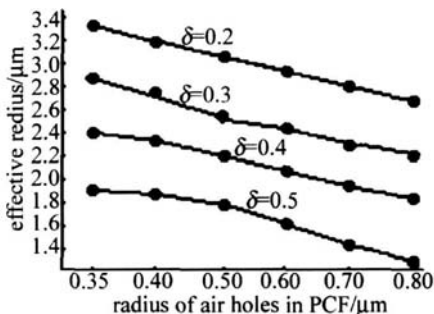


Fig 1 At the wavelength 1.55 μm , effective radius of PCF with different air holes size under four kinds of doped proportion

对光的束缚, 减小模场半径, 增大光子晶体光纤的非线性特性。计算结果与理论分析是一致的。

2.2 高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤之间的接续损耗

模场失配是造成高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤接续损耗的最主要原因, 也是光纤设计中必须考虑的首要问题。图 2 是与图 1 同样条件下, 利用

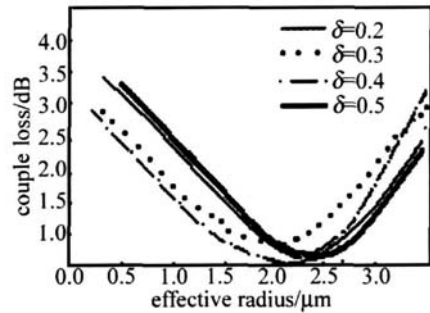


Fig 2 At the wavelength 1.55 μm , couple loss of PCF and SMF

(5) 式计算的纤芯掺杂 $G\epsilon O_2$ 的高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤接续损耗随有效模场半径的变化关系。结果表明, 在纤芯每一种掺杂 $G\epsilon O_2$ 质量分数不同的条件下, 高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤都有一接续损耗最小值, 理论上可以认为, 由于普通单模光纤的纤芯与包层相对较小的折射率差使其对光的束缚能力较小, 也即包层对光模场的束缚能力较小, 类似于光子晶体光纤纤芯掺杂 $G\epsilon O_2$ 质量分数较小、空气孔径较小时的情形, 二者有效模场最为接近处, 出现一相应的接续损耗最小。而接续损耗理论值为 0 的最优点是在模场半径为 2.2 μm 处 (光子晶体光纤纤芯掺杂 $G\epsilon O_2$ 的质量分数 $\delta = 0.4$, 空气孔半径 $r = 0.5 \mu\text{m}$), 此时光子晶体光纤与普通单模光纤模场半径完全相等。对比图 1, 纤芯掺杂 $G\epsilon O_2$ 的质量分数 $\delta = 0.3, r = 0.8 \mu\text{m}$ 与 $\delta = 0.4, r = 0.5 \mu\text{m}$ 时, 光子晶体光纤的模场半径较为接近, 而两种条件下的接续损耗理论最小值却相差较远, 这样的结果理论分析之中也已料到, 模场失配是导致接续损耗的最直接、最主要的原因, 只有二者模场完全匹配, 才可使接续损耗降为 0。

2.3 高非线性光子晶体光纤与光子晶体光纤之间的接续损耗

图 3 是纤芯不掺杂的光子晶体光纤模场半径随孔间距的变化关系。当 r/Λ 一定时, 意味着纤芯与包层等效折射率差一定, 亦即等效包层对光模场束缚一定, 这时增大 Λ 相当于等比增大光子晶体光纤的横向折射率, 其实光的模场半径也将同比例增大, 图中计算结果与理论分析相符。相应 r/Λ 减小, 关系曲线上移, 说明随着包层对模场束缚力的减弱, 模场半径随之增大。图 4 是纤芯不掺杂的光子晶体光纤 (其它参数与图 1

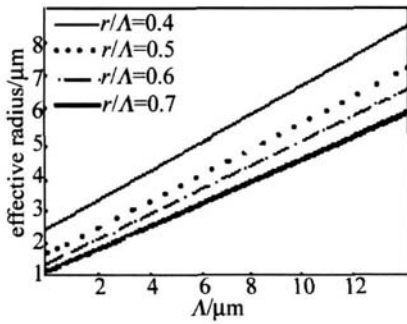


Fig. 3 PCF's effective radius as a function of pitch Λ for wavelength of $1.55\mu\text{m}$

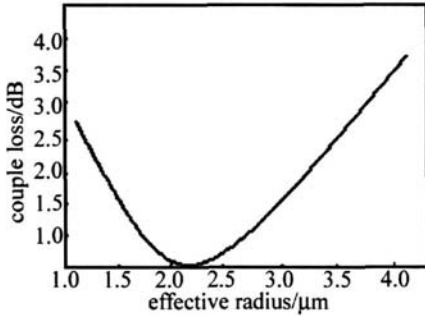


Fig. 4 At the wavelength $1.55\mu\text{m}$, couple loss of PCF's ($\delta = 0.4, r = 0.5\mu\text{m}$) when the cores are doped with GeO_2 and PCF

相同)与纤芯掺杂 GeO_2 的质量分数 $\delta = 0.4$ 空气孔半径 $r = 0.5\mu\text{m}$ 的高非线性光子晶体光纤之间的接续损耗随其模场半径的变化关系。这里的计算对于将光子晶体光纤作为高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤连接的过渡都是很有意义的。图 4 显示,高非线性光子晶体光纤与光子晶体光纤的模场越接近,两者因模场失配产生的接续损耗就越小。在实际熔接时,考虑到高非线性光子晶体光纤气孔大、壁更薄,在弧光放电的高温作用下,气孔收缩使模场扩大的作用非常有限,甚至完全失效,同时越薄的气孔壁在高温下越容易塌陷,使得这种依靠气孔轻微收缩使模场扩大的技术难以控制,一旦熔接参数选择不当,很容易造成气孔的完全塌陷,反而会导致更大的熔接损耗。对于高非线性光子晶体光纤,纤芯掺杂的锗在高温条件下有横向扩散,使得模场有些许扩大。而纤芯不掺杂的一般光子晶体光纤相比纤芯掺杂的高非线性光子晶体光纤来说,气孔壁较厚,高温下,气孔收缩使模场稍微扩大较易实现。高非线性光子晶体光纤与光子晶体光纤熔接时,都因是气孔结构,防止塌陷,选好参数少几次弧光放电即可熔接好。而作为过渡的光子晶体光纤的另一端与普通阶跃型单模光纤熔接时(因过渡光子晶体光纤气孔壁较厚,高温下气孔收缩使模场稍微扩大),可以经受多次放电与普通阶跃型单模光纤熔接。为此,采用过渡光纤的模场匹配方法,即在高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤之间插入一段有效模场半径

与其两侧都接近的光子晶体光纤,可以解决高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤直接熔接时需要多次放电引起的气孔塌陷而导致的更大损耗问题。从而较好地解决高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤接续时因纤芯差距悬殊以及熔接时空气孔收缩对模场匹配的影响,使接续损耗降到最小。

3 结 论

采用全矢量模型计算了光子晶体光纤以及纤芯掺杂的高非线性光子晶体光纤的有效模场半径,基于此分析了纤芯掺杂的高非线性光子晶体光纤与普通单模光纤以及光子晶体光纤之间的接续损耗。分析结果显示,模场失配是造成接续损耗的最主要因素。对于高非线性光子晶体光纤无论是纤芯掺杂比例还是空气孔径的大小,都能影响着有效模场半径的大小;光子晶体光纤的孔距 Λ 也是影响有效模场半径的重要因素;只有合理搭配,尽量使得两侧光纤的模场半径(面积)接近,最好是相等,将接续损耗降低到最小程度。本文中的分析和计算将为光子晶体光纤的设计和接续提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] WANG JY, GAO M Y, JIANG Ch *et al* Design and parametric analysis of dispersion-flat photonic crystal fibers [J]. Chinese Optics Letters 2005, 3(7): 380-382.
- [2] REN G B, LOU Sh Q, WANG Zh *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).
- [3] WANG R X, DOU Ch Sh, YUE X Ch Numerical study on a femtosecond laser pulse in photonic crystal fiber [J]. Laser Technology 2006, 30(5): 555-557 (in Chinese).
- [4] WANG R X, DOU Ch Sh, ZHOU Ch L, *et al* Dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics 2005, 26(3): 249-252 (in Chinese).
- [5] WANG R X, DOU Ch Sh, YUE X Ch Mode characteristics of photonic crystal fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics 2006, 27(4): 437-440 (in Chinese).
- [6] ZHANG W, ZHANG L, CHEN Sh *et al* Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber [J]. Chinese Journal of Lasers 2006, 33(10): 1389-1392 (in Chinese).
- [7] FANG H, LOU Sh Q, REN G B, *et al* Theoretical analysis on splice loss of photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica 2006, 26(6): 806-812 (in Chinese).
- [8] YANG G Q, ZHANG X, REN X M, *et al* Experimental research on all optical switch based on photonic crystal fiber [J]. Chinese Journal of Lasers 2005, 32(12): 1650-1653 (in Chinese).
- [9] GUO Sh Q, HUANG Zh M. Performance studies on photonic crystal fiber [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics 2004, 21(2): 265-268 (in Chinese).
- [10] LIY F, LIU B W, WANG ZH, *et al* Influence on photonic crystal fiber dispersion of the size of air holes in different rings within the cladding [J]. Chinese Optics Letters 2004, 2(2): 75-77.