

文章编号: 0253-2239(2004)12-1603-4

# 长周期光纤光栅和双锥形光纤间的倏逝波耦合作用

罗爱平 高侃 刘峰 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市 201800)

**摘要:** 对长周期光纤光栅和双锥形光纤之间的倏逝波耦合作用进行了研究。理论分析和实验研究表明,由于锥形光纤和长周期光纤光栅物理边界外倏逝波之间的交叠,长周期光纤光栅产生的包层模,可以耦合到锥形光纤的包层模并从锥形光纤的纤芯输出。要获得高的耦合效率,应满足模式匹配的条件,同时要尽量减小两光纤之间的距离。耦合特性还与长周期光栅和双锥形光纤的相对位置有关,为获得高的耦合效率,耦合区应位于长周期光栅区的后面。这种倏逝波耦合作用,为监测实际应用系统中长周期光纤光栅的特性提供了一种新方法;为利用锥形光纤和长周期光纤光栅开发新型光纤器件,提供了一种可能的方案。

**关键词:** 导波与光纤光学; 倏逝波耦合; 长周期光纤光栅; 双锥形光纤

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Evanescent-Field Coupling Based on Long-Period Grating and Tapered Fiber

Luo Aiping Gao Kan Liu Feng Qu Ronghui Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 26 December 2003; revised 29 April 2004)

**Abstract:** Evanescent-field coupling based on long-period fiber grating (LPG) and bi-conical tapered fiber is proposed and investigated both theoretically and experimentally. The light coupled to the cladding modes by LPG can be transferred to a bi-conical fiber. In order to obtain high coupling efficiency, the phase-matched condition should be satisfied and the two fibers should be close enough. The characteristics of the coupling also depend on the position of the coupling region. To get higher coupling efficiency, the coupling region should locate after LPG. This kind of evanescent-field coupling can be used to monitor the characteristics of the LPG which is used in the devices or systems on line.

**Key words:** guided-wave and fiber optics; evanescent-field coupling; long-period fiber grating; bi-conical fiber

## 1 引言

锥形光纤能有效地提高在光纤中传输的光功率密度,增强非线性效应,可应用于诸如超连续光源的发生等领域。锥形光纤能大大缩小光斑线度,可以应用于近场显微镜技术中。在双锥形光纤中,随着光纤外径的缩小,纤芯模的有效折射率减小,当减小到低于光纤包层材料的折射率时,在光纤中只能传输包层模的光波<sup>[1]</sup>。在这种情况下,光纤四周产生明显的倏逝波。这种倏逝波的特性是一个值得深入研究的课题,对这种倏逝波的应用,也还有待开发。

长周期光纤光栅是一种将纤芯模耦合到包层模

的器件<sup>[2,3]</sup>。这种包层模在光栅区外传输时,就没有条件再耦合回纤芯,在传输谱中形成相应的损耗峰,通常就是利用这一特性作为陷波滤波器。在长周期光纤光栅及其后续的光纤段的四周,存在着由包层模支持的倏逝波。如果这些倏逝波能够被耦合出来,则可以构成一些新的应用。

本文提出一种建立在长周期光纤光栅和双锥形光纤之间倏逝波耦合的方法,通过理论分析和实验测量了解这种耦合的特性。

## 2 理论分析

### 2.1 工作原理

双锥形光纤是由熔融拉锥法制作的一种直径逐渐变化的光纤,在中间区域,直径最小,称为腰部。

E-mail: luoaiping2003@126.com

收稿日期:2003-12-26;收到修改稿日期:2004-04-29

当光纤的直径小于一定值时,整个光纤的结构只能支持包层模<sup>[1]</sup>。从而在光纤中的传输模式经历由纤芯模到包层模再到纤芯模的演化,如果光纤的直径变化满足绝热近似条件,传输模式可以无损耗地演化。光纤模式的波动方程为

$$\nabla^2 \psi + k^2 n^2(r, \theta, z) \psi = \beta^2 \psi, \quad (1)$$

其中  $\psi$  是模场分布,  $\beta$  是模式的传输常数,  $n^2(r, \theta, z)$  是光纤横截面的折射率分布,同时它又是光纤轴向位置的函数。对于外径缓慢变化的锥形光纤,即认为  $n^2(r, \theta, z) \approx n^2(r, \theta)$ 。图 1 给出了用有限差分法数值求解方程(1)得出的光纤基模的有效折射率在 1.55  $\mu\text{m}$  波长处随光纤直径变化的曲线,图中也给出了相应的光纤外的能量与光纤内的能量比,定义为

$$\eta = \frac{\int_{r > r_{cl}} \psi \psi^* r dr d\theta}{\int_{r < r_{cl}} \psi \psi^* r dr d\theta}, \quad (2)$$

式中  $r_{cl}$  为光纤外径。从图中可知,当光纤的直径小于 50  $\mu\text{m}$  时,光纤所支持的模式的有效折射率小于光纤包层材料的折射率,即光纤只能支持包层模;且随着光纤直径的减小,在光纤包层外的倏逝波所占的能量比例越来越大。

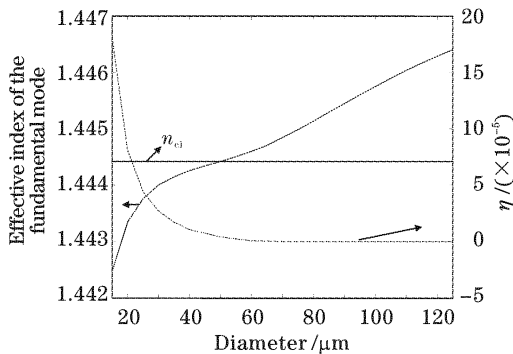


Fig. 1 The effective index (solid line) of the fundamental mode versus the diameter of the tapered single mode fiber ( $\rho_{\infty} = 4.5 \mu\text{m}$ ,  $\rho_{cl} = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n = 4.5 \times 10^{-3}$ <sup>[4]</sup>) at wavelength 1.55  $\mu\text{m}$  and the corresponding ratio  $\eta$  of the external energy to the internal energy of the fiber (dashed line)

如果长周期光纤光栅谐振波长处的包层模与双锥形光纤腰部所支持的包层模具有相同的传输常数,则当两光纤的包层足够靠近时,根据倏逝波的相互作用原理,两根光纤的包层模之间会发生能量耦合。图 2 给出了这种倏逝波耦合的示意图。图中  $L_c$  为锥形光纤腰部的长度,  $D$  为耦合发生的起点离开光栅的距离,  $d$  为耦合区两光纤之间的距离。当光从包含长周期光栅的光纤输入时,经过长周期光栅,在谐振波长处激发出该光纤的包层模 1,包层模

1 在与双锥形光纤的接触区域(耦合区)传输时,在双锥形光纤中激发出相似的包层模 2,包层模 2 在双锥形光纤中经过绝热演化,从输出端口 2 输出,从而实现了能量的转移,其余波长的光不受影响的从端口 1 输出。反之,如果光从双锥形光纤的输出端口 2 输入,在谐振波长处的能量通过耦合区耦合到包含长周期光栅的光纤中的包层模,该包层模经过长周期光栅,耦合到光纤的纤芯模输出。

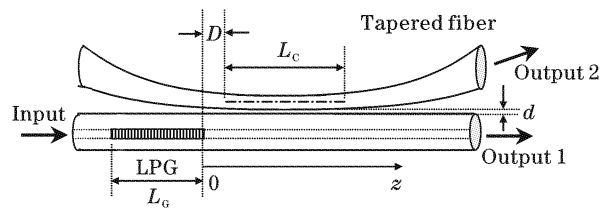


Fig. 2 The schematic of the evanescent-field coupling based on LPG and tapered fiber

当两光纤的位置一定时,能量耦合的大小与耦合区的长度以及在耦合区两光纤之间的距离有关。在一定范围内,耦合区的长度越长,能量耦合越大;同时两光纤之间的距离越小,倏逝波的叠加越大,能量耦合也越大。但当两光纤的相对位置不同时,倏逝波耦合作用的特性不一样。

### 2.2 长周期光纤光栅与双锥形光纤相对位置对耦合特性的影响

长周期光栅与双锥形光纤的相对位置可分两种情况考虑,一是耦合区在长周期光栅区;二是耦合区在长周期光栅后。

当双锥形光纤和长周期光栅的耦合区位于长周期光栅区时,存在三个模式之间的耦合作用,即长周期光栅纤芯模和包层模之间的耦合、长周期光栅的包层模与锥形光纤包层模的耦合,根据耦合模理论,其效应可以由下列方程组描述<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = -j\kappa B_1(z) \exp(j\delta_1 z), & (3a) \\ \frac{dB_1(z)}{dz} = -j\kappa A_1(z) \exp(-j\delta_1 z) - jC_{12} B_2(z) \exp(j\delta_2 z), & (3b) \\ \frac{dB_2(z)}{dz} = -jC_{21} B_1(z) \exp(-j\delta_2 z), & (3c) \end{cases}$$

式中  $A_1$  和  $B_1$  分别为长周期光纤光栅纤芯模和包层模的幅度,  $B_2$  为双锥形光纤包层模的幅度;  $\kappa$  和  $\delta_1$  分别为长周期光栅纤芯模和包层模之间的耦合系数和失谐参量;  $C_{12}$  和  $C_{21}$  为光栅和锥形光纤的两包层模之间的耦合系数,其值正比于两光纤包层模场的交叠积分,且与两光纤的距离  $d$  有关,  $d$  越小,其值越大;  $\delta_2 =$

$\beta_1 - \beta_2$ , 为两包层模之间的失谐参量。从输出端口 1 和 2 输出的光功率可以由方程(3a)~(3c)解析获得, 但解析表达式很复杂, 下面计算中只给出数值结果。

当耦合区位于长周期光栅区后时, 倏逝波的耦

合效应可直接由方程(3a)~(3c)变为只有两个包层模耦合的普通耦合模方程<sup>[5]</sup>。对于图 2 所示的光路, 假设耦合系数和失谐参量在光传输方向为常量时, 可推导出输出功率的简单的解析表达式:

$$\begin{cases} I_{1\text{out}} = \frac{\delta_1^2 + \kappa^2 \cos^2(L_G \sqrt{\kappa^2 + \delta_1^2})}{\kappa^2 + \delta_1^2} |A_1(0)|^2, & (4a) \\ I_{2\text{out}} = \frac{C_{12}^2}{\gamma^2} \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \delta_1^2} \sin^2(\gamma L_C) \sin^2(L_G \sqrt{\kappa^2 + \delta_1^2}) |A_1(0)|^2, & (4b) \end{cases}$$

式中  $\gamma = \sqrt{\delta_2^2 + 4C_{12}C_{21}}/2$ ;  $A_1(0)$  是长周期光纤光栅输入端口纤芯模的初始幅度。公式(4a)和(4b)成立的条件是长周期光栅包层模在传输过程中的损耗可以忽略, 因此,  $D$  的取值范围不能太大, 一般在 cm 量级。在耦合长度  $L_C$  一定的条件下, 为获得大的耦合效率: 1) 应当满足相位匹配条件  $\delta_2 = 0$ , 若  $\delta_2 \neq 0$ , 耦合效率降低; 2) 耦合系数  $C_{12}$ 、 $C_{21}$  越大越好, 这就要求在耦合区两光纤之间的距离  $d$  尽量小, 当两光纤的包层紧密贴合时,  $d = 0$ ,  $C_{12}$ 、 $C_{21}$  的值最大。

图 3 是根据公式(3a)~(4b)计算得出的双锥形光纤和长周期光栅相对位置不同时, 两输出端口的输出光谱。在计算中, 假定在耦合区两光纤的包层紧密贴合 ( $d = 0$ ),  $L_G = 4$  cm, 周期为  $450 \mu\text{m}$ , 双锥形光纤的均匀腰部长  $L_C = 5$  mm。同时, 根据长周期光栅的参量, 由相位匹配条件, 选取双锥形光纤的腰部直径为  $20 \mu\text{m}$ 。

分析图 3 中的曲线可知, 对输出端口 2, 当双锥形光纤与长周期光栅的相对位置不同时, 输出光谱的形状、耦合效率不一样。这与锥形光纤腰部耦合发生的起点离开光栅的距离  $D$  有关。在曲线(a)和

曲线(b)的情况下, 只利用了部分长周期光栅包层模的特性, 从输出端口 2 输出的光谱形状取决于耦合发生的起点之前的长周期光栅的特性, 当其长度很短时, 谱宽很宽, 没有边峰出现, 耦合效率低, 随着其长度变长, 谱宽也由宽变窄, 并出现边峰, 耦合效率增大。在曲线(c)情况中, 由于耦合区位于长周期光栅后, 整个长周期光栅包层模的能量被利用, 端口 2 的输出光谱的特性“复制”了整个长周期光栅的特性, 耦合效率也进一步增大了。对端口 1, 输出光谱的特性几乎不受影响。对比(a)~(c)三条曲线可知, 倏逝波之间的能量耦合效率取决于两光纤的相对位置, 当耦合区位于长周期光栅后时, 耦合效率最大。因此, 在实际应用中, 在耦合区长度一定的条件下, 要获得大的耦合输出, 两光纤放置的位置应使耦合区位于长周期光栅区后(如图 2 所示), 即紧接在长周期光栅区后几厘米的范围内。

### 3 实验结果和分析

在写入长周期光栅前, SMF-28 光纤在 120 个大气压、室温下载氢一个星期。制作的长周期光栅的周期为  $450 \mu\text{m}$ , 长 4 cm, 峰值波长为  $1551.8 \text{ nm}$ , 透射损耗峰幅度为 9.8 dB。由火焰加热熔融拉锥制作的双锥形光纤长 4.5 cm, 均匀腰部长约 5 mm, 直径约为  $20 \mu\text{m}$ 。先将双锥形光纤的均匀腰部放置在长周期光栅区, 包层和包层紧密贴合, 在放置过程中引入的双锥形光纤的微弯损耗可以忽略不计, 因为弯曲半径很大。然后移动双锥形光纤, 改变其均匀腰部与长周期光栅的纵向距离, 测量输出端口 1 和 2 的光谱特性。图 4 是双锥形光纤与长周期光栅的相对位置不同时, 光从长周期光栅输入, 在输出端口 1 和 2 测得的输出光谱曲线。

对图 4 中的曲线进行分析, 结果与第二部分理论分析一致: 1) 从包含长周期光栅的光纤入射的光功

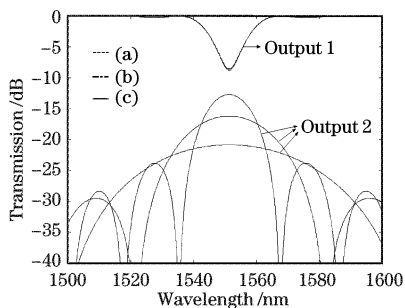


Fig. 3 The calculated transmission spectra in output 1 and 2, (a)  $D = -3$  cm, (b)  $D = -2$  cm, (c)  $D = 0$ . The period of LPG is  $450 \mu\text{m}$ ,  $L_G = 4$  cm,  $\kappa L_G = 1.2$ , the diameter of the uniform waist of the tapered fiber is  $20 \mu\text{m}$  and  $L_C = 5$  mm,  $C_{12} \approx C_{21} = 0.49 \text{ cm}^{-1}$ ,

$$\beta_1 = \beta_2$$

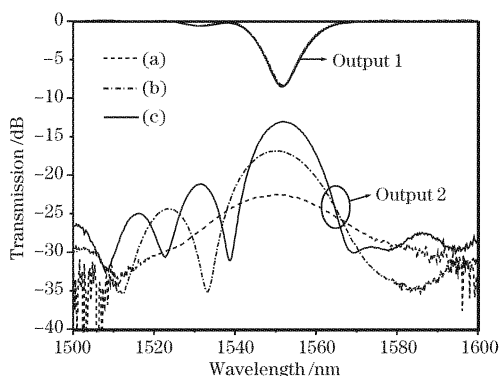


Fig. 4 The measured transmission spectra in output 1 and 2 with light injected in the input port; (a)  $D \approx -3$  cm, (b)  $D \approx -2$  cm, (c)  $D \approx 0$ . The period of LPG is  $450 \mu\text{m}$ ,  $L_C = 4$  cm, the waist diameter of the designed tapered fiber is about  $20 \mu\text{m}$  and  $L_C \approx 5$  mm

率在长周期光栅的谐振波长范围内可以转移到双锥形光纤中输出;2) 双锥形光纤与长周期光栅的相对位置不同时,从输出端口 2 耦合出来的光功率谱形状和峰值都不一样;对曲线(a),在整个波长范围内都有光耦合输出,如理论部分的分析,这主要是由耦合区前的一段长周期光栅的特性所决定,光栅长度越短,光谱越宽,当长周期光栅的长度为  $1 \text{ cm}$  ( $D = -3 \text{ cm}$ ) 时,其光谱范围很宽,没有边峰出现且损耗峰低,因此从输出端口 2 耦合出来的光的光谱宽且峰值强度较低;当耦合区前的长周期光栅的长度增加时,其光谱范围变窄、出现边峰,损耗峰增大,从而在曲线(b)中,端口 2 的输出光谱变窄,并出现边峰;当耦合区位于长周期光栅后时,整个长周期光栅光谱的特性完整地反映在端口 2 的输出光谱上,如曲线(c)所示,输出光谱的主峰和边峰与长周期光栅的谐振波长对应,且耦合效率增加,因此为获得大的耦合输出,耦合区应位于长周期光栅区后;3) 图中端口 2 的输出光谱两边边峰不对称,这是由长周期光栅损耗谱本身的不对称引起的,在短波长方向,边峰较明显,而长波长方向的边峰被较好地抑制了。要获得无边峰的输出光谱,可以采用变迹技术制作长周期光栅;同时光栅的长度与耦合效率无关,因为这种倏逝波的耦合是充分利用损耗到包层模的能量;4) 当耦合区位于不同位置时,端口 1 的输出曲线基本重合,这表明这种倏逝波耦合作用几乎不影响长周期光栅的输出特性。

另外,由实验测得的整个耦合效率偏低,这是由于双锥形光纤的均匀腰部长度较短,以致未被耦合的长周期光栅包层模的能量在包层中继续传输一定距离后,被辐射损耗掉。如果采用更长均匀腰部的双锥形光纤<sup>[6]</sup>,可以获得更大的耦合效率,也即从长周期

光栅谐振波长处的能量转移到双锥形光纤中的能量更大,这取决于不同的用途。从公式(4b)可知,当双锥形光纤均匀腰部的长度  $L_C$  (即耦合区的长度)满足关系式  $\gamma L_C = m\pi/2$  ( $m$  为奇数) 时,则长周期光栅谐振波长处的能量可以完全转移到双锥形光纤中输出。

因为长周期光纤光栅的特性容易受外界环境的影响,从而影响了器件或系统的性能,如何真实地反映长周期光纤光栅的特性变化变得重要。如果将双锥形光纤紧贴在长周期光栅区后放置,通过倏逝波的耦合作用,从双锥形光纤输出的光谱与长周期光栅的损耗谱一致,因此可检测长周期光纤光栅的特性变化,比如性能劣化等,进一步反应出器件或系统性能的变化。这是一种非侵入式检测方案,充分利用了损耗到包层模的能量而不消耗有用的信号能量,且不增加器件或系统的插入损耗。

**结论** 提出了一种建立在长周期光栅和双锥形光纤基础上的倏逝波耦合作用,并从理论和实验两方面进行了研究。合理设计长周期光栅和双锥形光纤的参量,当它们的包层密切贴合时,由于长周期光栅的作用损失到包层模的能量,可以从双锥形光纤中耦合出来。耦合特性取决于两光纤的位置。实验研究获得了近  $1550 \text{ nm}$  波段长周期光栅与锥形光纤耦合的输出。输出光谱与长周期光栅损耗谱符合良好;测量了不同耦合位置下耦合效率的变化,与理论分析一致。对这种倏逝波耦合作用的研究,为监测实际应用系统中长周期光纤光栅的特性提供了一种新方法;为利用锥形光纤和长周期光栅开发新型光纤器件,提供了一种可能的方案。

**致谢** 感谢上海大学光纤技术研究所的姚寿铨教授提供了锥形光纤。

### 参 考 文 献

- 1 Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4): 432~438
- 2 Vengsarkar M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~65
- 3 Chen Genxiang, Liu Chunling, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(5): 624~628 (in Chinese)
- 4 Daxhelet X, Lacroix S, Gonthier F. Fibre mode expansion for 2-D waveguide calculations. *Opt. Quant. Electron.*, 1997, **29**: 139~150
- 5 Snyder A W, Love J D. *Optical Waveguide Theory*. London, U. K., Chapman and Hall, 1983
- 6 Dimmick T E, Kakarantzas G, Birks T A *et al.*. Narrow-band acousto-optic tunable filter fabricated from highly uniform tapered optical fiber. *Proc. OFC'2000*, 2000, FB4