

文章编号: 0253-2239(2010)09-2529-07

# 单芯光纤与双芯光纤的对接和熔接耦合效率分析

郑晶晶 郑凯 彭健 刘利松 范林勇 刘志明 宁提纲 简水生

(北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 单芯光纤和双芯光纤的耦合问题是限制双芯光纤研究和应用深度的关键问题之一。利用突变光波导的分析方法, 在高斯近似的模场分布下, 推导了单芯单模光纤和双芯单模光纤对接和熔接的耦合能量、总体耦合效率和两纤芯耦合能量比的数学表达式。利用这组关系定量地详细分析了单芯光纤和双芯光纤耦合中的模场匹配、双芯光纤的纤芯距和纤芯位置对耦合效果的影响。利用其中一个纤芯位于光纤中心的双芯光纤, 通过保偏熔接机进行辅助定位, 实测了单芯单模光纤与双芯单模光纤对接耦合的输出能量与纤芯位置的关系, 测量结果能够很好地与理论结果相符合。

**关键词** 光纤光学; 双芯光纤; 光纤耦合; 光纤熔接; 高斯近似

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2529

## Analysis of Splicing and Splicing Fusion Coupling Efficiency Between Single-Core Fiber and Dual-Core Fiber

Zheng Jingjing Zheng Kai Peng Jian Liu Lisong Fan Linyong

Liu Zhiming Ning Tigang Jian Shuisheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** The coupling between single-core fiber and dual-core fiber is one of the major obstacles to the further study and application of dual-core fibers. With Gaussian approximation for fundamental mode in fiber, the expressions of energy coupling into either of the two cores, overall coupling efficiency between the two fibers, and the ratio of energy coupling between the two cores are deduced. The quantitative characteristics of mode matching, the distance between the two cores in dual-core fibers, influence of core position on coupling effect, are discussed in detail. Experimental result shows a good agreement with calculated result.

**Key words** fiber optics; dual-core fiber; fiber coupling; fiber fusion; Gaussian approximation

## 1 引 言

双芯和多芯光纤在同一根光纤中排布了两根或两根以上相互平行的纤芯。当纤芯之间距离较小时, 各纤芯与包层支持的模式会随着传输长度的增加发生相互之间周期性的耦合, 这一特性可以被直接用于定向耦合<sup>[1,2]</sup>和滤波<sup>[3]</sup>, 并作为功能基础用于上下话路器件的构成<sup>[4]</sup>; 当纤芯之间距离较远时, 各纤芯与包层支持的模式之间可以认为不存在耦合作

用, 这种结构能够在令各模式独立传输的同时保证它们波导在纵向上的平行和一致性, 因而在光纤干涉仪构成<sup>[5]</sup>和光纤传感<sup>[6]</sup>方面都有很好的研究和应用价值; 掺杂的多芯光纤作为光纤激光器的增益介质, 在实现增益平坦<sup>[7,8]</sup>、提高吸收效率<sup>[9]</sup>、改善光束质量<sup>[10]</sup>和实现多种增益的共同作用<sup>[11]</sup>等方面, 也都有很好的应用潜力。此外, 通过特殊的参数设计, 双芯光纤还可以具有良好的保偏特性<sup>[12]</sup>或者负色散

收稿日期: 2009-12-07; 收到修改稿日期: 2010-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(60771008, 60837002, 60807013)、北京市自然科学基金(4082024)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0076)和北京交通大学校科技基金(2006XM003)资助课题。

作者简介: 郑晶晶(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事双芯光纤方面的研究。E-mail: jjzheng.c@gmail.com

导师简介: 简水生(1929—), 男, 中国科学院院士, 主要从事光纤通信关键器件方面的研究。E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

特性<sup>[13]</sup>。目前影响多芯光纤应用的其中一个最主要的问题是能量向多芯光纤的耦合。根据应用场合的不同,可能希望仅有一个纤芯受到激励,也可能希望所有的纤芯受到比较均匀的激励,或者仅激励其中的一部分纤芯。了解多芯光纤和单芯光纤的结构参数、对准情况对激励效果的影响,对于多芯光纤的结构和实验设计、器件性能预测等,都有一定的帮助。

本文主要针对单芯光纤与双芯光纤的对接及良好熔接状况,给出耦合效率的理论分析。以这个分析为基础,对不同的纤芯半径和折射率,讨论了单芯光纤与双芯光纤相对位置、双芯光纤纤芯距以及各纤芯支持单模的模场半径对光纤的耦合能量、两光纤总体耦合效率、双芯光纤各纤芯耦合能量比存在的影响。

## 2 单芯与双芯光纤对接及熔接的耦合模型

高斯型光束向光纤的耦合、单芯单模光纤(SMF)向光纤的对接,以及接头质量良好的单芯SMF与光纤的熔接,都可以用突变光波导的分析方法分析<sup>[14]</sup>,光纤之间的耦合问题可以被转化为求激励场与被激励场之间的交叠积分。

### 2.1 突变光波导的耦合分析

为了下一步说明的方便,先从双芯光纤的结构(如图1所示)上给出讨论中会出现的几个参数。在该模型中,连接的单芯光纤与双芯光纤有相同的包层直径,两光纤对准后包层边界重合,不考虑由于端面错开或者包层直径差异造成的额外损耗。包层和所有纤芯都是正圆,单芯SMF的纤芯半径为 $r_s$ ,纤芯中心与光纤中心一致,即单芯SMF的纤芯位于光纤的正中央;双芯光纤的左右两个纤芯半径分别为 $r_1$ 和 $r_2$ ,纤芯中心分别位于坐标 $(d_1, 0)$ 和 $(d_2, 0)$ 处,如图1所示,纤芯距 $d = d_2 - d_1$ 。单芯SMF的

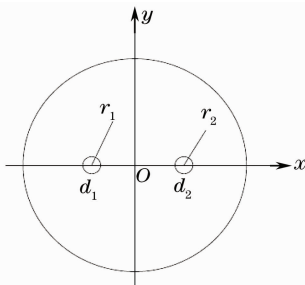


图1 双芯光纤横截面结构图

Fig. 1 Cross-section of dual-core

纤芯、双芯光纤的左右纤芯折射率分别是 $n_s, n_1$ 和 $n_2$ 。

用 $\psi_s$ 表示单芯SMF中传输的基模场分布, $\psi_1, \psi_2$ 分别表示双芯光纤中左右两纤芯支持的基模场分布,单芯SMF向双芯光纤两纤芯基模耦合的归一化功率可以表示为<sup>[15]</sup>

$$P_1 = \frac{\left( \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_s \psi_1^* dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_s^2 dx dy}, P_2 = \frac{\left( \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_s \psi_2^* dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_s^2 dx dy}. \quad (1)$$

利用两层正规圆光波导的模式求解办法,可以求出用贝塞尔函数表达的场分布解析解,但这个形式不利于下一步的推导。为了得到更简洁明了的关系,使用基模分布的高斯表达对上述关系做进一步的分析。

### 2.2 光纤基模的高斯近似

使用基模分布的高斯近似表达,在以各自的纤芯中心为中心的极坐标系上,基模的场分布可以被表示为<sup>[16]</sup>

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right), \quad (2)$$

式中 $w$ 为基模的模场半径, $r$ 为所求点在极坐标系中的坐标。对于折射率在横截面上圆对称分布的光纤,在这个波导上传输的基模场分布 $\psi$ 与对应的传输常数 $\beta$ 之间满足关系<sup>[17]</sup>

$$\beta^2 = \frac{\int_0^{\infty} [k^2 n^2(r) \psi^2 - (d\psi/dr)^2] r dr}{\int_0^{\infty} \psi^2 r dr}, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 是计算波长 $\lambda$ 在真空中的波数, $n(r)$ 为光纤横截面上的折射率分布方式。在 $\psi$ 可以用(2)式表达时, $\beta^2$ 转化为模场半径 $w$ 的函数 $\beta^2(w)$ 。 $w$ 的值可以通过求解等式

$$\frac{\partial \beta^2}{\partial w} = 0 \quad (4)$$

得出<sup>[17]</sup>,将 $w$ 代入(3)式,可以求出相应的传输常数 $\beta$ 。

对于阶跃型光纤,光纤横截面上的折射率可以被表示为

$$n(r) = \begin{cases} n_{\text{core}}, & r \leq r_0 \\ n_{\text{clad}}, & r > r_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $r_0$ 为纤芯半径。把(2)式和(5)式代入(3)式,

可以得到在形如(2)式的高斯近似表达下,阶跃折射率光纤的基模传输常数满足

$$\beta^2 = \frac{\int_0^{r_0} k^2 n_{\text{core}}^2 \psi^2 r dr + \int_{r_0}^{\infty} k^2 n_{\text{clad}}^2 \psi^2 r dr - \int_0^{\infty} (d\psi/dr)^2 r dr}{\int_0^{\infty} \psi^2 r dr} = k^2 (n_{\text{clad}}^2 - n_{\text{core}}^2) \exp\left(-\frac{2r_0^2}{\omega^2}\right) - \frac{2}{\omega^2} + k^2 n_{\text{core}}^2, \quad (6)$$

把(6)式代入(4)式,可得

$$\omega = \frac{r_0}{\sqrt{\ln(kr_0 \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2})}} = \frac{r_0}{\sqrt{\ln V}}, \quad (7)$$

式中  $V$  是该光纤的归一化频率。在  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  时,  $n_{\text{clad}} = 1.444$ ,  $\omega$  与纤芯折射率  $n_{\text{core}}$  和纤芯半径  $r_0$  之间的变化关系如图 2 所示。

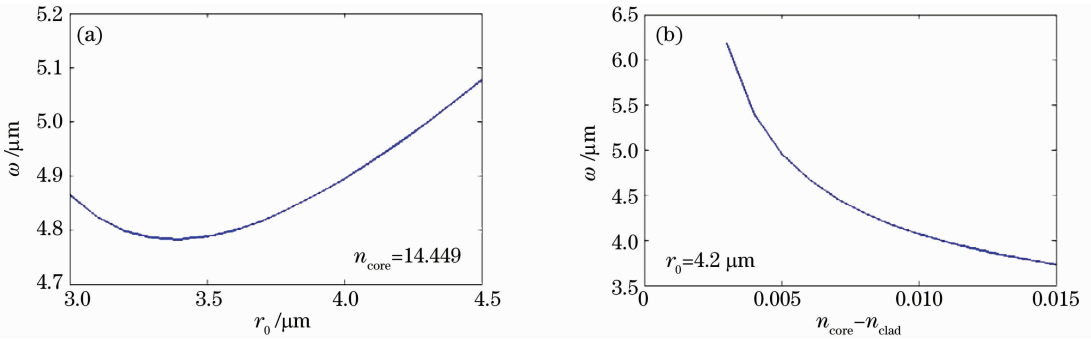


图 2 模场半径  $\omega$  与纤芯半径  $r_0$  和纤芯折射率  $n_{\text{core}}$  的关系

Fig. 2 Influences of core radius and index on mode-field radius

### 2.3 高斯近似下的单芯光纤与双芯光纤耦合关系

在该模型下,双芯光纤中两纤芯的基模表达需要在(2)式的基础上进行平移。在统一的直角坐标系(如图 1 所示)下,可以把这几个模式的表达写成

$$\begin{aligned} \psi_s &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_s} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega_s^2}\right], \\ \psi_1 &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_1} \exp\left\{-\frac{[(x - d_1)^2 + y^2]}{\omega_1^2}\right\}, \quad (8) \\ \psi_2 &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_2} \exp\left\{-\frac{[(x - d_2)^2 + y^2]}{\omega_2^2}\right\}, \end{aligned}$$

把这组表达式代入(1)式,对于双芯光纤的第  $i$  个纤芯,可以得到

$$P_i = \left[ \frac{2\omega_s \omega_i}{\omega_s^2 + \omega_i^2} \exp\left(\frac{\omega_s^2 d_i^4}{(\omega_s^2 + \omega_i^2)\omega_i^2} - \frac{d_i^2}{\omega_i^2}\right) \right]^2 = A_i^2 \exp(2\alpha_i), \quad (9)$$

式中

$$A_i = \frac{2\omega_s \omega_i}{\omega_s^2 + \omega_i^2}, \quad \alpha_i = \frac{\omega_s^2 d_i^4}{(\omega_s^2 + \omega_i^2)\omega_i^2} - \frac{d_i^2}{\omega_i^2},$$

式中  $A_i$  为耦合的两基模模场不匹配造成的损耗,  $\alpha_i$  为在已有模场分布下,纤芯偏移造成的损耗。引入参数  $\eta, \tau$  分别用于表示总体的能量耦合效率和双芯光纤两纤芯的耦合能量比,两参数分别定义为

$$\eta = P_1 + P_2 = A_1^2 \exp(2\alpha_1) + A_2^2 \exp(2\alpha_2),$$

$$\tau = \frac{P_1}{P_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2} \exp[2(\alpha_1 - \alpha_2)]. \quad (10)$$

在  $\omega_s = \omega_1 = \omega_2 = \omega$  时,单芯 SMF 与双芯光纤各纤芯支持的基模场分布相同,此时有  $A_i = 1, \alpha_i = (d_i^4 - 2d_i^2)/2\omega^2, P_i, \eta, \tau$  有最简形式

$$\begin{aligned} P_i &= \exp[(d_i^4 - 2d_i^2)/\omega^2], \\ \eta &= \exp\left(\frac{d_1^4 - 2d_1^2}{\omega^2}\right) + \exp\left(\frac{d_2^4 - 2d_2^2}{\omega^2}\right), \quad (11) \\ \tau &= \exp\left[\frac{(d_1^2 - d_2^2)(d_1^2 + d_2^2 - 2)}{\omega^2}\right]. \end{aligned}$$

通常双芯光纤的结构会设计成如图 1 所示,令两纤芯连线经过光纤中心。在这样的模型中,每个纤芯的位置仅具有  $x$  坐标  $d_i$  一个可变参量。在纤芯的  $x, y$  坐标均可变化时,通过类似的过程可以把上述结果外推至双芯光纤纤芯处于任意位置的情况。在同样的坐标系下,令第  $i$  个纤芯的中心坐标为  $(x_i, y_i)$ ,可以得到(9)式更一般的外推形式

$$\begin{aligned} P_i &= \left\{ \frac{2\omega_s \omega_i}{\omega_s^2 + \omega_i^2} \exp\left[\frac{\omega_s^2 (x_i^4 + y_i^4)}{(\omega_s^2 + \omega_i^2)\omega_i^2} - \frac{(x_i^2 + y_i^2)}{\omega_i^2}\right] \right\}^2, \\ A_i &= \frac{2\omega_s \omega_i}{\omega_s^2 + \omega_i^2}, \quad \alpha_i = \frac{\omega_s^2 (x_i^4 + y_i^4)}{(\omega_s^2 + \omega_i^2)\omega_i^2} - \frac{(x_i^2 + y_i^2)}{\omega_i^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

与(9)式相比,模场匹配造成的损耗  $A_i$  相同,仅在纤芯偏移造成的损耗  $\alpha_i$  上增加了另一维度上偏移量的影响。

### 3 单芯与双芯光纤的耦合效率讨论

以前述的理论为基础,针对各纤芯的结构参数以及双芯光纤中两纤芯的位置,估计各纤芯的激励状况。首先对图 1 所示的双芯光纤与 SMF 的耦合效率加以讨论:对于各基模模场半径相同的情况,关注的是双芯光纤纤芯与单芯光纤纤芯相对位置以及双芯光纤的纤芯距对耦合效果的影响;对各基模模场半径不同的情况,增加关于模场半径差异造成影响的讨论。最后利用两纤芯处于任意位置时的关系,结合实际的对接实验数据,做相应的分析和讨论。

#### 3.1 各基模模场分布相同时的耦合效率分析

在  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $n_{\text{core}} = 1.449$ ,  $r_0 = 4.2 \text{ }\mu\text{m}$  时,可以得到(2)式中基模的模场半径  $w = 4.96 \text{ }\mu\text{m}$ 。把这个数值代入(12)式,可以得到双芯光纤纤芯坐标对耦合效果的影响。图 3 中为左侧纤芯的耦合能量随纤芯中心横坐标  $d_1$  变化的曲线,右侧纤芯

的耦合能量随纤芯中心横坐标  $d_2$  变化的曲线与此对称。为了较好表现位置偏移的影响,图中对  $P_1$  采用 dB 为单位。从图上可以看出,在纤芯位置相同时,模场半径越大,双芯光纤的纤芯偏离中心造成的损耗越小。

对于  $w = 4.96 \text{ }\mu\text{m}$  的情况,图 4(a)给出了双芯光纤的纤芯距从  $60 \text{ }\mu\text{m}$  变化到  $20 \text{ }\mu\text{m}$  时双芯光纤的总体耦合效率  $\eta$ ,图 4(b)给出了相应的两纤芯耦合能量比  $\tau$ 。

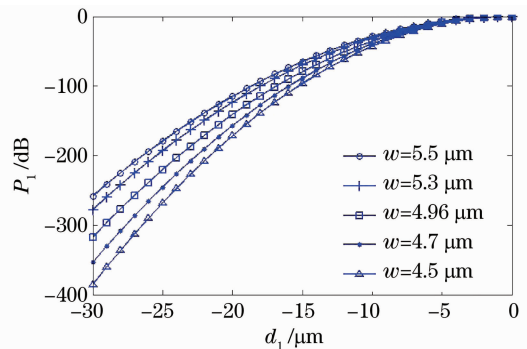


图 3 双芯光纤左侧纤芯的耦合能量随纤芯中心坐标的变化曲线

Fig. 3 Energy coupled into the left core of dual-core fiber versus its centre's  $x$ -coordinate  $d_1$

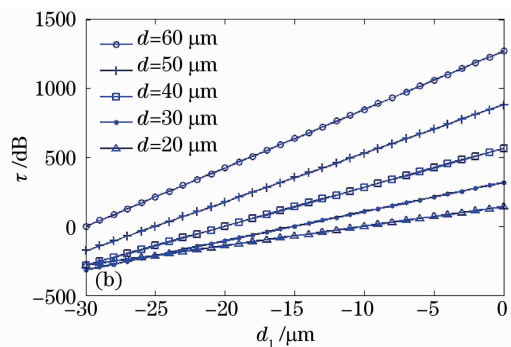
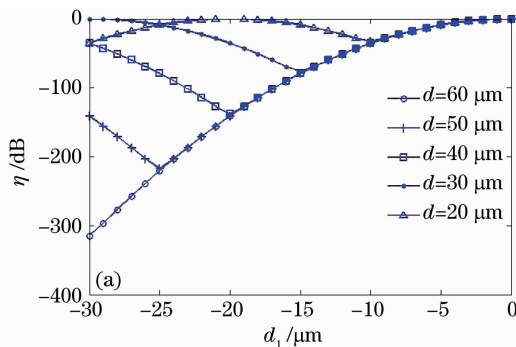


图 4 总体能量耦合效率  $\eta$  (a)和两纤芯耦合能量比  $\tau$  (b)随左侧纤芯中心坐标的变化

Fig. 4 Overall energy coupling efficiency  $\eta$  (a) and ratio of coupled energy  $\tau$  between the two cores (b) versus the left core's  $x$ -coordinate  $d_1$

在给定纤芯距时,随着两纤芯连线中点的左移(在图上表现为左侧纤芯坐标的左移),总体耦合效率  $\eta$  会经历先减小到一个谷值再增大,然后再减小的过程,它对应着左侧纤芯与单芯 SMF 纤芯对准、两纤芯中点与单芯 SMF 纤芯对准、右侧纤芯与单芯 SMF 纤芯对准、双芯光纤芯区逐渐偏离单芯 SMF 纤芯范围的过程。双芯光纤两纤芯在单芯 SMF 基模激励下的耦合能量比  $\tau$  同时也表明了两纤芯在这个激励下的隔离度。曲线上的点离开  $\tau = 0 \text{ dB}$  越远,就说明两纤芯被激励的程度差异越大,正值表示激励较好的是左侧纤芯,负值与此相反。

因为在这个讨论中所有纤芯支持的基模场分布都相同,所以在双芯光纤的任意一个纤芯与单芯 SMF 纤芯对准,两光纤之间有 100% 的耦合效率;在单芯光纤纤芯对准双芯光纤两纤芯连线中点时,双芯光纤的两纤芯支持的基模被 1:1 的激发。在需要单芯激励时,令双芯光纤的其中一个纤芯位于光纤中央,按照需要的隔离度从  $\tau - d_1$  关系找到对应的纤芯距;在需要两纤芯同等程度激发时,把两个纤芯对称的安排在光纤中心的两侧,按照要求的耦合系数从  $\eta - d_1$  关系获得相应的结构参数。除了帮助设计双芯光纤的结构以外,以上关系对实验设

计和实验现象的分析也有很大帮助。

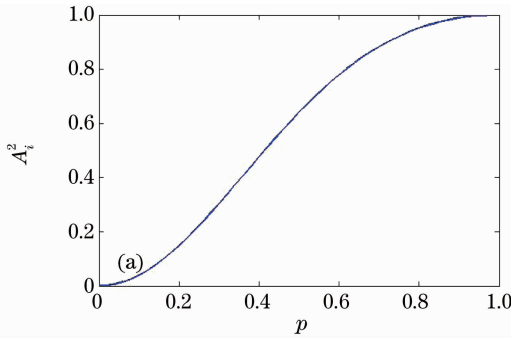
### 3.2 各基模模场分布不同时的耦合效率分析

为了在双芯光纤的纤芯上写入光栅,通常用在纤芯中掺锗(Ge)的办法提高纤芯的光敏性,这种处理同时会提高掺杂区的折射率,为了保证单模还可能需降低纤芯半径。芯区折射率的增加和纤芯半径的下降都会导致高斯近似下模场半径的减小,影响单芯 SMF 向双芯光纤的耦合。

如果单芯光纤的模场半径  $w_s$  与双芯光纤的两模场半径  $w_i$  之间满足关系  $w_i = pw_s$ , 耦合能量表达式(9)式中的参数  $A_i$  和  $\alpha_i$  可以表示为

$$A_i = \frac{2p}{(1+p^2)}, \alpha_i = \frac{d_i^2 - (1+p^2)d_i^2}{p^2(1+p^2)w_s^2}. \quad (13)$$

在这个耦合过程中,  $A_i^2$  为能够达到的最大耦合,  $2\alpha_i$  为在这个最大耦合的基础上,纤芯位置改变造成的耦合能量附加衰减。最大耦合仅与两模场的相似程度有关,附加衰减还与位置和模场半径的实际值有关。因为纤芯的偏移量仅在  $10^{-5}$  m 量级,有  $d_i^2 \ll d_i^2$ , 所以  $\alpha_i$  可以近似的表示为  $\alpha_i = -(d_i^2/w_s^2)/p^2 =$



$-(d_i/w_s)^2$ , 可以认为位置造成的附加损耗仅与纤芯位置跟对应基模模场半径之比有关。图 5 给出了最大耦合和附加损耗与模场半径比  $p$  的关系。各模场半径均相等的情况是本处  $p=1$  的特例。这时最大耦合为 1, 耦合损耗由位置造成的附加损耗决定。

在双芯光纤两纤芯支持的模场半径相同时,模场的不匹配会引入更大的损耗,但耦合的  $\eta$  和  $\tau$  变化趋势与图 4 所有基模的模场半径均相同的情况非常类似:当单芯光纤与双芯光纤的任意一个纤芯对准时,总体耦合效率  $\eta$  达到相同的最大值,两纤芯耦合比  $\tau$  达到正向和负向的最大值;当单芯光纤正对双芯光纤两纤芯连线中点时,总体耦合效率达到极小值,耦合比为 0 dB。

在双芯光纤两纤芯支持的基模模场半径不同时,这种良好的对称性会受到破坏。当  $w_1 = 0.95 w_s, d=30 \mu\text{m}, w_s=5 \mu\text{m}$  时,图 6 给出了  $w_1$  和  $w_2$  不同比例下对应的  $\eta$  和  $\tau$  与  $d_1$  的关系。

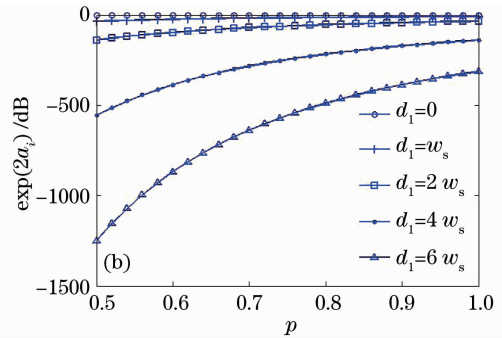


图 5 其中一个纤芯的最大耦合(a)和附加损耗(b)与模场半径比  $p$  的关系

Fig. 5 Maximum coupling (a) and additional loss (b) versus mode-field radius  $p$

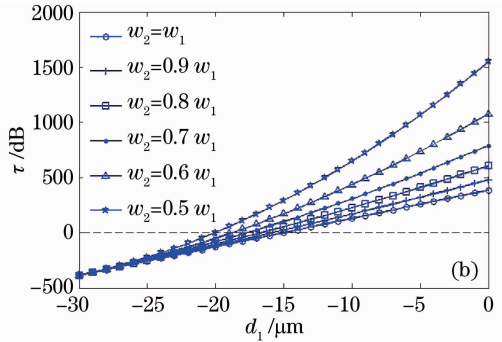
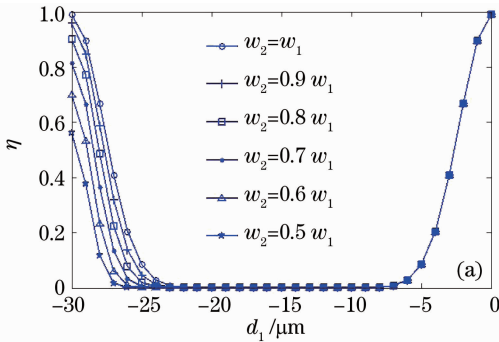


图 6  $w_1$  与  $w_2$  不同比例下总体能量耦合效率  $\eta$ (a)和两纤芯耦合能量比  $\tau$ (b)随左侧纤芯中心坐标  $d_1$  的变化

Fig. 6 Overall energy coupling efficiency  $\eta$  (a) and ratio of coupled energy  $\tau$  between the two cores (b) versus the left core's  $x$ -coordinate  $d_1$  under different rates of  $w_2$  to  $w_1$

在设定的参数下,当  $d_1=0$  时,左侧纤芯与单芯光纤的纤芯正对,  $d_1=30 \mu\text{m}$  时,右侧纤芯与单芯光纤的纤芯正对。随着右侧纤芯支持单模的模场半径

的减小,单芯光纤接近右侧纤芯时两光纤的总体耦合效率  $\eta$  逐渐减小,双芯光纤两纤芯能量比  $\tau$  为 0 dB 时对应的  $d_1$  逐渐减小,在双芯光纤纤芯距给定

的前提下,说明为了在双芯光纤的两纤芯得到相同的能量,两纤芯的连线中点相对光纤中心来说要逐渐左移,以使单芯光纤的纤芯更靠近模场半径较小的纤芯。

### 3.3 实验分析和讨论

用图 7 所示的测试系统进行了单芯 SMF 和双芯光纤对接的耦合实验。实验中所用双芯光纤的结构参数包括:光纤直径  $140\ \mu\text{m}$ ,纤芯直径  $5\ \mu\text{m}$ ,纤芯距  $30\ \mu\text{m}$ ,其中一个纤芯位于光纤中央。利用保偏熔接机调整两光纤端面的对准情况。在一个方向上调整到正对后,在与它垂直的方向上移动单芯光纤,使它在该方向上从双芯光纤的一侧移动到另一侧,并记录过程中光功率计接收到的功率值。如果能够找到图 1 中的两个坐标轴方向,就可以记录到类似图 6 所示的功率变化过程。双芯光纤轴向的找准非常困难,借助保偏熔接机的帮助,通过多次实验找出了规律性较好的一组记录值如图 8 所示。在这个移动过程中,精确的距离定位非常困难,但熔接机在该方向上每前进一步经历的距离是相等的,用第一个和最后一个功率计可以探测到的点作为开始点和结束点,用点数代替距离以降低额外的人为误差。

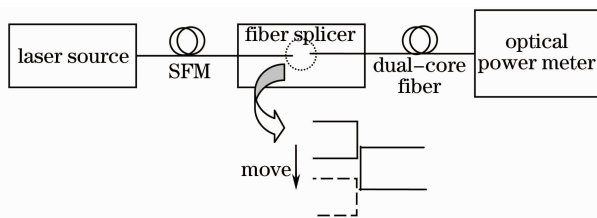


图 7 实验系统示意图

Fig. 7 Schematic of coupling test system

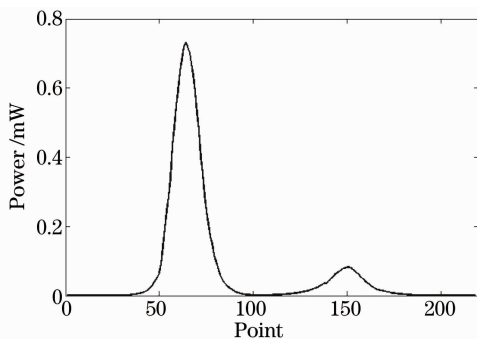


图 8 单芯与双芯光纤对接的实验实测数据

Fig. 8 Measured data in single-core fiber and dual-core fiber coupling test

实验所用的窄带激光光源输出功率  $1\ \text{mW}$ ,通过旋转和调整对准,选择出能测得较大第二峰值的光纤位置,并在该方向上移动 SMF 得到了如图 8 所示的一组数据。在实验系统中,能够保证一个纤芯

中心基本位于移动方向上,另一个纤芯则有程度不同的偏移。把这个偏移量转化为两纤芯中心连线与移动方向的夹角  $\theta$ ,可以根据(12)式得到如图 9 所示的一组关系。计算用到的其他参数包括: $\omega_s = 5\ \mu\text{m}$ , $\omega_i = 0.6\ \omega_s$ 。可以看到,实验数据与  $\theta = 6^\circ$  时的计算数据非常相似。

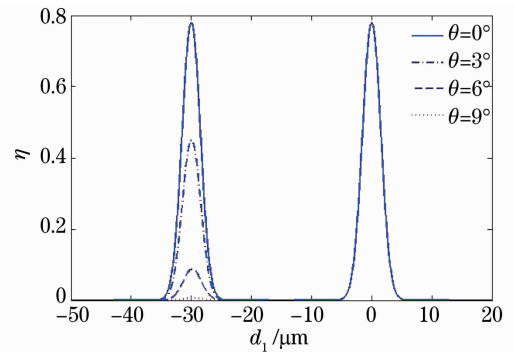


图 9 夹角  $\theta$  对总体能量耦合效率  $\eta$  的影响

Fig. 9 Effect of angle  $\theta$  on overall energy coupling efficiency  $\eta$

## 4 结 论

利用突变光波导的分析方法,在高斯近似的模场分布下,推导了单芯 SMF 和双芯 SMF 对接和熔接的耦合能量、总体耦合效率和两纤芯耦合能量比的数学表达式。在这组公式的基础上,定量地详细讨论了单芯光纤和双芯光纤耦合中的模场匹配、双芯光纤的纤芯距和纤芯位置对耦合效果的影响。这组关系及其导出结论在双芯光纤的结构和器件设计,以及实验设计和分析上都具有指导意义。

### 参 考 文 献

- 1 Denis Drolet, Réal Vallée. Dual-core fiber as a tunable directional coupler[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6): 408~410
- 2 Chen Mingyang, Zhang Yongkang, Zhu Yuanfeng *et al.*. Broadband directional coupler based on asymmetric dual-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 635~639
- 3 陈明阳, 张永康, 祝远锋 等. 基于非对称双芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 635~639
- 4 K. Okamoto, J. Noda. Fibre-optic spectral filters consisting of concatenated dual-core fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(4): 211~212
- 5 F. Bakhti, P. Sansonetti, C. Sinet *et al.*. Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg grating in a fused 100% coupler[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9): 803~804
- 6 Dong Xiaowei, Design and Fabrication of All-Fiber Add/Drop Filter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006
- 7 董小伟. 全光纤型上下话路滤波器的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2006
- 8 G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson, J. S. Barton *et al.*. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 387~389

- 7 R. I. Laming, J. D. Minelly, L. Dong *et al.*. Twincore erbium-doped fibre amplifier with passive spectral gain equalization[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(6): 509~510
- 8 Yi Bin, Lu, Chu, P. L.. Gain flattening by using dual-core fiber in erbium-doped fiber amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1616~1617
- 9 Wang Chuncan, Zhang Fan, Tong Zhi *et al.*. Enhancing in-phase supermode selection for multicore fiber laser [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1594~1599  
王春灿, 张帆, 童治等. 多芯光纤激光器中共相位模式功率的提高[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(10): 1594~1599
- 10 L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor *et al.*. Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1668~1670
- 11 L. Di Labio, Willy Lüthy, Valerio Romano *et al.*. Broadband emission from a multicore fiber fabricated with granulated oxides [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1581~1584
- 12 Fu Yongjun, Jian Wei, Zheng Kai *et al.*. The birefringence characteristics of high numerical aperture twin-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 297~301
- 傅永军, 简伟, 郑凯等. 高数值孔径双芯光纤的双折射研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 297~301
- 13 Wang Honghua, Xue Wenrui, Zhang Wenmei. Negative dispersion properties of photonic crystal fiber with dual core and composite lattice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 27~30  
王红华, 薛文瑞, 张文梅. 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 27~30
- 14 Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* (2nd edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005, 133~137  
吴重庆. *光波导理论* (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005, 133~137
- 15 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Liu Zhihai *et al.*. Coupling theoretical model between single-core fiber and twin-core fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(23): 5235~5239
- 16 M. Young. *Optics and Lasers-Including Fibers and Optical Waveguides* (5th edition) [M]. Beijing: Science Press, 2007, 287~289  
M. Young. *光学与激光——光纤和光波导* (第五版) [M]. 北京: 科学出版社, 2007, 287~289
- 17 Allan W. Snyder, John D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. New York: Chapman and Hall, 1983, 336~339