

文章编号: 0253-2239(2004)04-521-6

光耦合理论及其在通信元器件中的应用*

齐晓玲 蔡志岗 徐宇科 王福娟 邓广安 李宝军 江绍基
(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘要: 运用矩阵光学中变换矩阵的理论,并以重叠面积积分的方法为基础,推导出了普遍适用于计算光在光通信元器件中光耦合效率的理论公式,可通过设置边界条件计算单模光纤、扩束光纤、半导体激光二极管以及光波导等不同光学元器件之间的耦合效率。导出了计算单模光纤之间和单模光纤与扩束光纤之间存在横向偏移、轴向偏移时的耦合效率理论通用公式。阐述了扩束光纤的制作方法及其在扩束光纤中的传播,并根据所推导耦合效率理论公式计算结果与单模光纤间和单模光纤与扩束光纤间的耦合实验数据进行了比较。

关键词: 光波导; 光检测技术; 光耦合; 耦合效率; 光通信元器件

中图分类号: TN252 文献标识码: A

A Theoretical Study of Optical Coupling in Optical Components

Qi Xiaoling Cai Zhigang Xu Yuke Wang Fujuan Deng Guang'an
Li Baojun Jiang Shaoji

(The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies,
Zhongshan (Sun Yat-Sen) University, Guangzhou 510275)

(Received 24 March 2003; revised 13 May 2003)

Abstract: Based on the transformation theory of ray matrix and the overlap area integration method, a theoretical analysis has been performed and the coupling efficiencies of optical signal have been calculated in single-mode fiber, expanded fiber, laser diode, and optical waveguide etc, in taking into consideration of specific boundary condition in each case. The obtained formulation is applicable in many practical issues. A manufacture method of expanded fiber is presented and described with our newly formed theory. A comparison of theoretical with experimental results was made.

Key words: optical waveguide; optical detection technique; optical coupling; coupling efficiency; optical communication device

1 引 言

随着光纤通信技术和密集波分复用(DWDM)系统的广泛应用,全光交换已成为新一代全光通信网的核心。而光在光纤之间、光纤与波导之间、光纤与光源之间以及光纤与探测器等元器件之间的耦合是全光交换系统中的重要技术^[1]。对光在光通信元器件中耦合进行理论研究,可以有效地预测实验结果、拟合实验数据,对实现光的有效耦合

将起到关键性的作用。

光在单模光纤(SMF)、光波导、半导体激光二极管中的模场均可近似为高斯分布^[2~4]。而这些高斯光束通过不同光学元器件后的模场分布以及复杂光束的模场,如单模光纤和渐变多模光纤焊接后得到的扩束光纤的模场^[5],可以通过变换矩阵理论即光学系统对光线变换的作用计算出来^[6]。耦合效率的计算可采用目前普遍使用的重叠面积积分的方法^[7]。

本文将运用变换矩阵理论^[8],以重叠面积积分的方法为基础,推导普遍适用于计算光通信元器件中光耦合效率的理论公式,通过设置边界条件计算单模光纤^[9]、扩束光纤、半导体激光二极管以及光波导等不同光学元器件之间的耦合效率,将理论结果

* 广东省自然科学基金(980279、980346、001249)资助课题。

E-mail: lasers@netease.com

收稿日期:2003-03-24;收到修改稿日期:2003-05-13

与实验数据进行比较,并根据光耦合中存在轴向或横向偏移给出相应的计算光耦合效率的公式。

2 理论分析

2.1 变换矩阵^[6]

图 1 所示为多个元器件的光学系统,图中 z 表示光轴,RP₁ 为入射面,RP₂ 为出射面,T₁,T₂,⋯, T_m 分别为光学元器件。

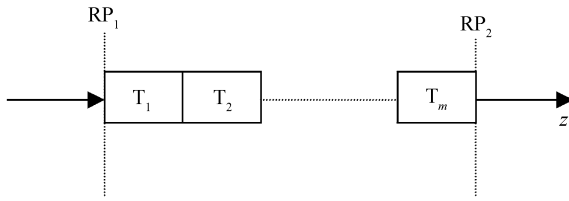


Fig. 1 Optical system

当光线从参考面 RP₁ 入射,通过 T₁, T₂, ⋯, T_m 多个元件的光学系统后,由参考面 RP₂ 出射。光学系统对光线的变换表示为:

$$\begin{bmatrix} r_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_m \mathbf{T}_{m-1} \cdots \mathbf{T}_1 \begin{bmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 r_0 为入射光线离开 z 轴的垂直距离, θ_0 为入射光线传播方向与 z 轴的夹角, r_m 为出射光线离开 z 轴的垂直距离, θ_m 为出射光线传播方向与 z 轴的夹角, $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \mathbf{T}_m \mathbf{T}_{m-1} \cdots \mathbf{T}_1$ 为变换矩阵。

2.2 高斯光束及其传播法^[6]

描述高斯光束的特性需要两个参量,即高斯光束光斑半径 $w(z)$ 和曲率半径 $R(z)$ 。轴线上某一点 z 处的高斯光束 $q(z)$ 定义为

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - \frac{i\lambda}{\pi w^2(z)n}, \quad (2)$$

其中 λ 为自由空间中的波长, n 为折射率。

若用 q_1 表示高斯光束在 RP₁ 的 q 参量, q_2 表示

RP₂ 的 q 参量,则 RP₁ 与 RP₂ 之间组成光学系统变换矩阵,经此光学系统变换前后的高斯光束 q 参量满足

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (3)$$

在 $z = 0$ 处的高斯分布的场分布为

$$\varphi(x, y, 0) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right), \quad (4)$$

1) 在均匀介质中传播,高斯光束的场分布最终表示为

$$\varphi(x, y, z) = \frac{w_0}{w(z)} E_0 \exp\left\{-i\left[kz - \eta(z) + \frac{kr^2}{2q(z)}\right]\right\}, \quad (5)$$

式中

$$w^2(z) = w_0^2 [1 + (z/Z_0)^2], \quad (6)$$

$$R(z) = z [1 + (Z_0/z)^2], \quad (7)$$

其中 w_0 为光腰半径, $k = 2\pi/\lambda$, $Z_0 = \pi w_0^2/\lambda$ 称为共焦参量。

将(6)式、(7)式代入(2)式,可得高斯光束在均匀介质中传播时不同 z 处 q 参量的关系为

$$q(z_2) = q(z_1) + (z_2 - z_1), \quad (8)$$

2) 在类透镜介质中,高斯光束的场分布最终表示为

$$\varphi(x, y, z) = \frac{E_0}{1 - iz/Z_0} \exp\left(-\frac{r^2/w_0^2}{1 - iz/Z_0}\right), \quad (9)$$

类透镜介质是具有折射率沿径向距离 r 二次分布的介质,其中

$$n(r) = n_0 (1 - \beta^2 r^2/2), \quad (10)$$

其中 n_0 是轴线的折射率, β 是大于零的常量。

高斯光束在类透镜介质中传播,不同 z 处 q 参量的关系为

$$q(z) = \frac{q_0 \cos(\beta z) + \beta^{-1} \sin(\beta z)}{-q_0 \beta \sin(\beta z) + \cos(\beta z)}, \quad (11)$$

2.3 重叠面积积分法

光耦合效率可以通过光耦合的两光学元件的模场重叠部分的面积积分来计算,即

$$\eta = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x, z) \varphi_2^*(x, z) dx \right|^2 / \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x, z) \varphi_1^*(x, z) dx \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_2(x, z) \varphi_2^*(x, z) dx \right], \quad (12)$$

3 耦合效率

光通信器件中光纤连接和不同光学元件间的耦合是光通信系统中最困难的问题之一,为了估计耦合损耗和获得低损耗耦合,需要推导出普遍适用且

运算简单的耦合效率公式。根据上述变换矩阵理论和重叠面积积分法,可以得到不同光学元器件间的耦合效率公式。

3.1 存在轴向偏移的耦合效率

假设光耦合的两光学元件的场分布均为高斯分布

$$\varphi_1(x, z) = A(z) \exp\left[-\left(\frac{x}{w_1(z)}\right)^2\right] \exp\left(-i \frac{kx^2}{2R_1(z)}\right) \exp(-ikz), \quad (13)$$

$$\varphi_2(x, z) = B(z) \exp\left[-\left(\frac{x}{w_2(z)}\right)^2\right] \exp\left(-i \frac{kx^2}{2R_2(z)}\right) \exp(-ikz), \quad (14)$$

其中 w_1, R_1 是光学元件一模场分布的光斑半径和曲率半径, w_2, R_2 是光学元件二模场分布的光斑半径和曲率半径, z 表示轴向偏移的大小。则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(x, z) \varphi_1^*(x, z) dx = A^2(z) w_1(z) \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (15)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_2(x, z) \varphi_2^*(x, z) dx = B^2(z) w_2(z) \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (16)$$

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(x, z) \varphi_2^*(x, z) dx \right|^2 = \pi \left\{ \left[\frac{1}{w_1(z)^2} + \frac{1}{w_2(z)^2} \right]^2 + \left[\frac{n\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (17)$$

将(15)式、(16)式、(17)式代入(12)式,可得

$$\eta = \pi / w_1(z) \sqrt{\frac{\pi}{2}} w_2(z) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ \left[\frac{1}{w_1(z)^2} + \frac{1}{w_2(z)^2} \right]^2 + \left[\frac{n\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (18)$$

化简后,则得存在间隙损耗的耦合效率为

$$\eta = 2 / w_1(z) w_2(z) \left\{ \left(\frac{1}{w_1(z)^2} + \frac{1}{w_2(z)^2} \right)^2 + \left[\frac{n\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right] \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (19)$$

在具体计算中,需注意坐标的选定(参见下文中的例子)。

3.2 存在横向偏移的耦合效率

假设光耦合的两光学元件的场分布均为高斯分布,选 $z = z$ 光学元件二高斯分布的光腰半径处 $[w_2 = w_{20}, R_2(z) \rightarrow \infty]$, 其分布分别为^[7]

$$\varphi_1 = A(z) \exp\left[-\left(\frac{x - \Delta x}{w_1}\right)^2\right] \times \exp\left[-i \frac{k(x - \Delta x)^2}{2R_1(z)}\right] \exp(-ikz), \quad (20)$$

$$\varphi_2 = B(z) \exp\left[-\left(\frac{x}{w_{20}}\right)^2\right] \exp(-ikz), \quad (21)$$

其中 Δx 表示横向偏移的大小。

将(20)式、(21)式代入(12)式,得到存在横向偏移的耦合效率

$$\eta = \frac{\eta}{\sqrt{1 + \gamma}} \exp\left\{-\left[\frac{(w_{20}/w_1)\eta + 2\gamma}{1 + \gamma}\right] \frac{\Delta x^2}{w_{20}^2}\right\}, \quad (22)$$

$$\text{其中 } \gamma = \left[\frac{k}{2R_1(z)}\right]^2 \left(\frac{w_1 w_{20} \eta}{2}\right)^2, \quad (23)$$

$$\eta = 2w_1 w_{20} / (w_1^2 + w_{20}^2), \quad (24)$$

(24) 式表示 $\Delta x = 0$ 且 $z = 0$ 时的耦合效率,也就是两光学元件对准耦合时的最佳耦合效率。

4 耦合效率计算举例及实验比较

光通信器件中的光耦合主要是单模光纤之间、

光纤与波导、某些特殊光纤之间的耦合。下面举例说明运用上述公式计算常见光耦合的耦合效率,并将计算出的理论值与实验数据进行比较。

4.1 两单模光纤的耦合

单模光纤的模场可用高斯分布表示,两单模光纤的耦合如图 2。

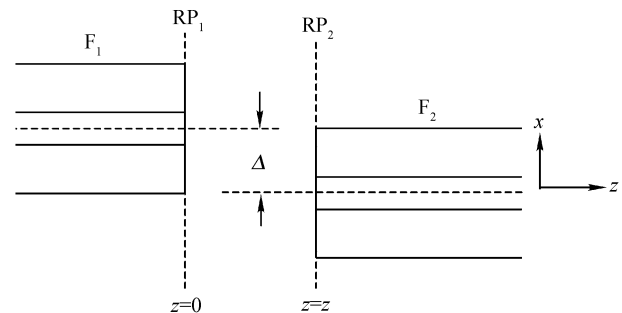


Fig. 2 The coupling of two single-mode fibers

参考面 $RP_1 - RP_2$ 组成的变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

RP_1 在高斯光束光腰处,由(6)式、(7)式可知,单模光纤 F_1 出射光束在均匀介质中传播 z 后到达参考面 RP_2 处,其光斑半径 w_1 和曲率半径 R_1 分别为

$$w_1^2(z) = w_0^2 [1 + (z/Z_0)^2], \quad (26)$$

$$R_1(z) = z [1 + (Z_0/z)^2], \quad (27)$$

单模光纤 F_2 高斯光束场分布在 RP_2 处的光斑半径

$w_2 = w_0$, 曲率半径 $R_2 \rightarrow \infty$ 。将所得 w_1, R_1, w_2 和 R_2 代入(19)式,(22)式,(24)式可得到单模光纤间存在轴向偏移、横向偏移和对准耦合的耦合效率。

实验中,我们采用参量相同的两根单模光纤对接耦合,测量其耦合效率。所用单模光纤(康宁公司制造)芯径为 $9 \mu\text{m}$,其高斯光束的光腰半径 $w_0 = 4.5 \mu\text{m}$,实验所用波长 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 。则存在轴向偏移和横向偏移的单模光纤间耦合效率分别如图 3、图 4。

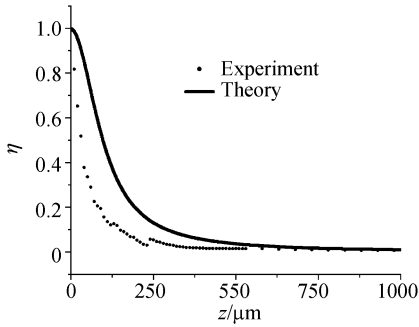


Fig. 3 The axis offset of two single-mode fibers

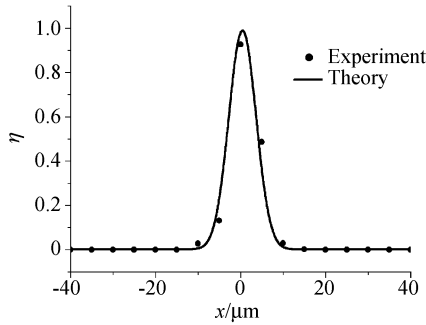


Fig. 4 The transverse offset of two single-mode fibers

可见,根据推导出的耦合效率公式计算的理论与实验结果是相一致的。值得注意的是,由于半导体激光二极管出射的光束也可近似为高斯分布,因此,上述耦合效率的计算方法也适用于半导体激光二极管与单模光纤的耦合。

4.2 单模光纤与扩束光纤间的耦合

为了得到单模光纤与单模光纤、各种波导,以及光纤阵列之间的有效耦合,可以通过在单模光纤端面焊接渐变型多模光纤(Gradient index fiber, GIF)来扩大光纤出射光斑的方法来实现。这种扩束光纤与其他光学元件的耦合效率同样可以采用变

换矩阵理论和重叠积分的方法来计算。

假设扩束光纤的构造如图 5 所示,构造扩束光纤所用的渐变型多模光纤是平方律型多模光纤,则其折射率分布为

$$\begin{aligned} & \text{当 } 0 \leq r \leq a, \\ & n_1(r) = n_0(1 - g^2 r^2)^{1/2} \approx n_0(1 - g^2 r^2/2), \end{aligned} \quad (28)$$

当 $r > a$,

$$n_2(r) = n_2$$

式中 n_0 是平方律型光纤轴线的折射率, n_2 是包层折射率, a 是平方律型多模光纤的纤芯半径, g 是聚焦参量,则聚焦参量可表示为

$$g = \sqrt{2\Delta}/r, \quad (29)$$

Δ 是平方律型多模光纤 r 处折射率和包层折射率的相对折射率差

$$\Delta = \frac{n_1^2(r) - n_2^2}{2n_1^2(r)}, \quad (30)$$

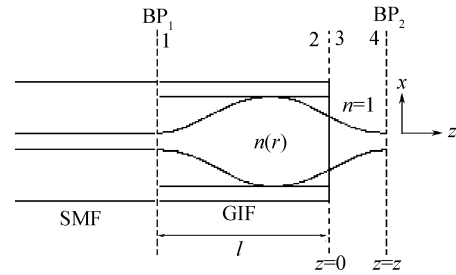


Fig. 5 The expanded fiber

参考面 $RP_1 - RP_2$ 组成的变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{34} \mathbf{M}_{23} \mathbf{M}_{12}, \quad (31)$$

其中

$$\mathbf{M}_{12} = \begin{bmatrix} \cos(gz) & g^{-1} \sin(gz) \\ -g \sin(gz) & \cos(gz) \end{bmatrix}, \quad (32)$$

$$\mathbf{M}_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_0/n \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$\mathbf{M}_{34} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

所以

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(gl) - \frac{n_0 z g}{n} \sin(gl) & \frac{1}{g} \sin(gl) + \frac{n_0 z \cos(gl)}{n} \\ -\frac{n_0}{n} g \sin(gl) & \frac{n_0}{n} \cos(gl) \end{bmatrix}, \quad (35)$$

RP₂ 是光腰处 ($R_2 \rightarrow \infty$), w_2 是单模光纤的光腰半径 w_0 , 空气折射率 $n=1$, 且由(2)式、(3)式, 可得

$$w'_1(z) = w_1 \left(n_0 \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AD - BC} \right)^{1/2}, \quad (36)$$

$$R'_1(z) = \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AC + \alpha^2 BD}, \quad (37)$$

其中

$$\alpha = \frac{\lambda}{\pi w_1^2 n_0}.$$

计算出扩束光纤出射光束到达参考面 RP₂ 的 w'_1 和 R'_1 , 通过同样的方法计算与扩束光纤耦合的光学元件光束的 w_2 和 R_2 , 并代入(19)式、(22)式、(24)式可得到扩束光纤与其他光学元件耦合时存在轴向偏移、横向偏移和对准耦合的耦合效率。

实验中, 采用单模光纤与扩束光纤对接耦合。单模光纤芯径为 $9 \mu\text{m}$, 其高斯光束的光腰半径 $w_0 = 4.5 \mu\text{m}$ 。扩束光纤是由单模光纤焊接长 $l = 1 \text{ mm}$ 的平方律型多模光纤构成, 其聚焦参量 $g = 6.26 \text{ mm}^{-1}$, 轴线折射率 $n_0 = 1.471$, 实验所用波长 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 。存在轴向偏移和横向偏移的单模光纤(SMF)与扩束光纤(EF)间的耦合效率分别如图 6、图 7 所示。可见, 理论值与实验数据基本吻合。

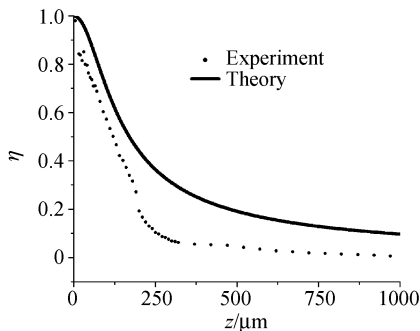


Fig. 6 The axis offset of SMF and EF

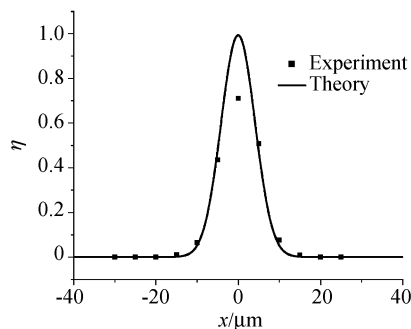


Fig. 7 The transverse offset of SMF and EF

为了更清楚地比较单模光纤与扩束光纤间耦合(SMF-EF)和单模光纤间的耦合(SMF-SMF), 由图 8、图 9 可见, 虽然要以最佳耦合效率为代价, 但

是采用扩束光纤可以有效地增加耦合对准时在轴向和横向偏移的冗余度。这充分说明, 采用扩束光纤将对光无源器件中的耦合封装以及光纤阵列对准等具有重大的意义。

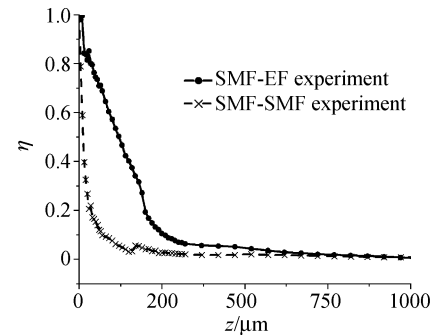


Fig. 8 A comparison of the axis offset of SMF-SMF with that of SMF-EF

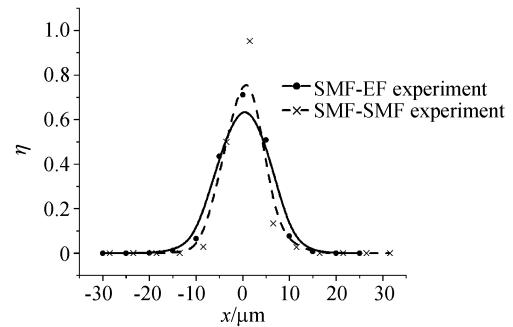


Fig. 9 A comparison of the transverse offset of SMF-SMF with that of SMF-EF

结论 我们在变换矩阵理论以及重叠面积积分法的基础上, 推导出了普遍适用于计算光通信器件中单模光纤、扩束光纤、光源以及光波导等不同光学元器件之间光耦合的耦合效率公式, 给出了计算单模光纤之间和单模光纤与扩束光纤之间耦合效率的方法, 并通过理论结果与实验数据的比较说明了所得耦合效率公式的正确性。运用该理论公式, 可以有效预测实验结果、拟合实验数据, 为提高光在光通信器件中的耦合效率提供理论基础和依据。

参 考 文 献

- 1 Peter Y A, Gonté F, Herzig H P *et al.*. Micro-optical fiber switch for a large number of interconnects using a deformable mirror. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, **14**(3):301~303
- 2 Burns W K, Hocker G B. End fire coupling optical fibers and diffused channel waveguides. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(8):2048~2050
- 3 She Shouxian, Wang Jian, Zhang Sijiong *et al.*. Algebraic recursion formulas for perturbation calculation of

- propagation characteristics of graded-index optical waveguides. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1):24~29 (in Chinese)
- 4 Botez D, Ettenberg M. Beamwidth approximated for the fundamental mode in symmetric double-heterostructure junction lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **14**(11):827~830
- 5 Chanclou P, Thual M, Lostec J *et al.*. Collective microoptics on fiber ribbon for optical interconnecting devices. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **17**(5):924~928
- 6 Kogelnik H. Imaging of optical modes-resonators with internal lenses. *Bell Syst. Technol. J.*, 1965, **44**(3):455~494
- 7 Hall D G, Rice R R, Zino J D. Simple Gaussian-beam model for GaAlAs double-heterostructure laser-diode-to-diffused-waveguide coupling calculations. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(9):292~294
- 8 Zhong Ming, Zuo Yan, Han Kai *et al.*. The calculation of intracavity Raman shift laser beam parameters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(3):268~271 (in Chinese)
- 9 Dong Hui, Wu Chongqing. Effect on polarization mode dispersion due to eccentricity of refractive index distribution in a single-mode fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11):1312~1317 (in Chinese)