第 54 卷 第 1 期 2005 年 1 月
1000-3290/2005/54(01)/0006-06

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.54,No.1,January,2005
©2005 Chin. Phys. Soc.

一种分析三维楔脊形光波导与光纤耦合的方法*

刘敬伟 陈少武 余金中

(中国科学院半导体研究所光电研究发展中心,北京 100083)

(2003 年 12 月 28 日收到;2004 年 4 月 14 日收到修改稿)

和直波导的不同在于,三维楔脊形波导中的光场都是不稳定的. 分别对波导-光纤耦合、光纤-波导耦合两种情况,将三维楔脊形波导等效为多段短的直波导,利用束传播法同时对三维楔脊形波导内不稳定的入射、反射场,及它们在传播方向上的偏导进行处理,再用自由空间辐射模法计算透射率和反射率. 以 SOI 楔脊形波导和光纤的耦合为例,验证了该方法的可行性.

关键词:自由空间辐射模法,束传播法,耦合,透射,楔脊形光波导,绝缘体上硅(SOI)

PACC:0340K,4280L,8760F

1. 引 言

如图 1 所示的脊形光波导是一种重要的波导结构,在集成光学中得到了广泛应用. 大多脊形波导,如 SOI 脊形波导,其芯、包层的折射率差很大,为了承载单模,平板和条形结构的波导厚度必须做得很小. 在 Soref 等[1] 单模条件下,根据不同芯、包层材料的折射率 n_1,n_2 和 n_3,合理地选择条宽(w),内脊高(H)和外脊高(h),可以制成‘大截面’的单模波导. 但即便如此,波导的横向尺寸仍然要比光纤芯径小得多. 这样,波导和光纤耦合时,由于场模式失配造成的能量损耗就非常大. 为了提高耦合效率,通常将输入输出波导制作成楔形. 显然,对这类楔形波导和光纤耦合的情况进行理论上的分析就十分重要.

目前,分析波导和光纤耦合的方法有菲涅尔定律-重叠积分法[2,3]、双向 BPM 法[4] 和自由空间辐射模法[5—9] 等. 由于菲涅尔定律和重叠积分法只能分别单独计算反射率或透射率,所以需要同时使用. 但菲涅尔定律是在平面波的基础上发展起来的,只能用于对平面波或近平面波的计算;重叠积分法只分析了相互耦合的两模场之间的几何匹配情况,本身就不具备明确的物理意义. 双向 BPM 理论上可以同时计算任何波导的反射和透射模场,但是该方法的计算原理复杂,计算速度慢,而且,现在还没有真正稳定的双向三维广角 BPM 报道. 所以,上述方法都不能对三维的楔形波导和光纤耦合问题进行分析.

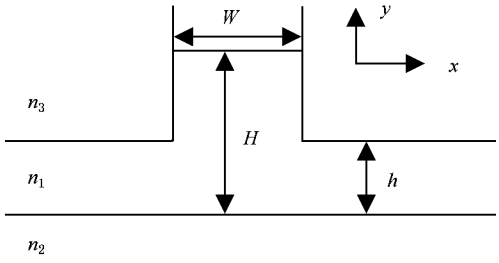


图 1 脊形波导结构示意图

1993 年,Kendall 等,利用自由空间辐射模法(FSRM)分析了光纤和二维平板波导(含楔形波导)的耦合情况[5]. 随后,FSRM 被用于分析光纤和三维条形波导(含楔形波导)的耦合[9]. FSRM 是一种半解析的方法,所以计算过程简单,计算时间短;FSRM 法本身就具有广角的特点,计算过程中所做惟一假设就是辐射模在均匀介质中传播[5]. 在芯层和包层折射率差不大时,FSRM 的计算结果可以和数值计算结果相比拟. 但对于如图 1 所示的脊形波导,往往芯层折射率和包层折射率差很大,所以一般 FSRM 法所做的假设就不再成立. 2002 年,Vukovic 用 FSRN 和 BPM 混合法进行了三维脊形波导和光纤

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312060),国家重点基础研究发展计划(批准号:G20000366)资助的课题.

的耦合分析[10]．由于 BPM 法同时考虑了导模和辐射模，所以不需要假设波导中辐射模在一种均匀介质中传播．但 Vukovic 没有对波导呈楔形的情况进行分析，也只分析了光从波导传到光纤这种耦合形式，没有分析光从波导进入光纤的情况．楔形波导和直波导的不同在于，楔形波导中的光场不是稳定的．这样，Vukovic 提出的方法就不能直接使用．据作者所知，目前还没有稳定的三维楔脊形波导和光纤耦合分析方法的报道．

在实际应用中，波导和光纤耦合可以分为两种情况，既光从波导入射到光纤（我们称为波导-光纤耦合）和光从光纤入射到波导（称为光纤-波导耦合）．本文对 FSRM 和 BPM 混合法进行改进，分别对波导-光纤耦合和光纤-波导耦合两种情况，提出分析三维楔脊形波导和光纤耦合的方法，计算了透射率和反射率．并以 SOI 楔脊形波导和光纤的耦合为例，验证了该方法的可行性．

2. 理　论

图 2 和图 3 分别是楔形波导-光纤耦合和光纤-楔形波导耦合两种情况的示意图．w_1 为楔形波导中和单模直波导相接处的波导条宽，w_2 是和光纤相接处的波导条宽，一般情况下有 $w_1 < w_2$．L 是楔形波导在传播方向（z 方向）的长度．首先，将能量归一化，并设楔形波导和光纤相接处 $z = 0$．

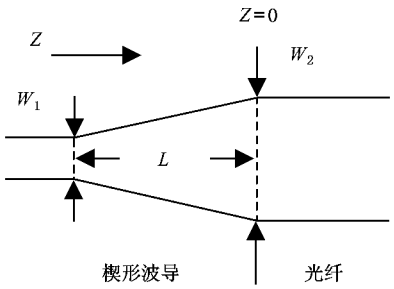


图 2　楔形波导-光纤耦合示意图

2.1. 楔形波导-光纤耦合

先讨论 $z < 0$（既图 2 中 $z = 0$ 以左）部分的光场传输的情况．可以认为在 w_1 处有一个稳定的光场，经过楔形部分后进入光纤．一般来说，楔形横向尺寸的变化要远远小于纵向传播的长度，所以可以认为楔形部分有效折射率是缓变的．如图 4 所示，将

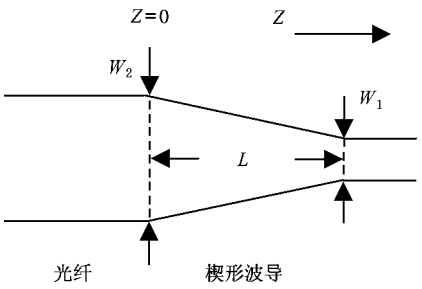


图 3　光纤-楔形波导耦合示意图

楔形部分离散成多段短的直波导，就可以利用 BPM 方法计算出楔形部分光场的传播．计算过程中，需要每经过一段距离（短的直波导段的长度），改变折射率的分布（和折射率有关的量也要改变）．可见，只要每段直波导的长度取的足够短，就可以精确逼近楔形波导．关于 BPM 的计算过程，在很多文献中都有详细介绍[11—15]，这里不再赘述．

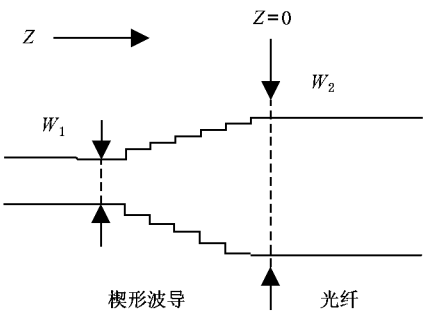


图 4　楔形部分用多段直波导离散示意图

在 $z = 0$ 处，光场必须连续，以电场分量为例（下同），可得

$$\left(E_s e^{-j\beta_s z} + E_r e^{j\beta_s z}\right)\Big|_{z=0} = \left(TE_f e^{-j\beta_f z} + \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} F_f e^{-jsx} e^{-jty} e^{-j\gamma z}\,ds\,dt\right)\Big|_{z=0}, \quad (1)$$

其中 E_s 为波导中的正向模场，因为在楔形波导中传播了一段距离，所以 E_s 并不是一个稳定的场，其中包含了导模和辐射模；β_s 为耦合处波导的传播常数；E_r 为波导中的反向模场，既反射模场，同样包含导模和辐射模场；E_f 为光纤中的导模场，T 为其振幅系数，F_f 为光纤中的正向辐射模场；β_f 为光纤的传播常数；γ 由(2)式表示为

$$\gamma = \begin{cases} \left((n_c k_0)^2 - s^2 - t^2\right)^{1/2} & |\, s^2 + t^2 \,| \leqslant (n_c k_0)^2, \\ -j\left(s^2 + t^2 - (n_c k_0)^2\right)^{1/2} & |\, s^2 + t^2 \,| \geqslant (n_c k_0)^2. \end{cases} \quad (2)$$

n_c 为光纤包层折射率；s，t 分别为横截面直角坐标

变量 x，y 相对应的傅里叶变换变量. 为了处理方便，将(1)式中各量均进行傅里叶变换，即在 $z=0$ 处

$$\tilde{E}_s + \tilde{E}_r = T\tilde{E}_f + \tilde{F}_f. \tag{3}$$

设波导中电场 E 对 z 的偏导为 $\mathrm{d}E$，则

$$\mathrm{d}E_s|_{z=0} = \mathrm{j}\frac{\partial E_s}{\partial z} + \beta_s E_s, \tag{4}$$

$$\mathrm{d}E_r|_{z=0} = \mathrm{j}\frac{\partial E_r}{\partial z} - \beta_s E_r. \tag{5}$$

电场对 z 的偏导仍然采用 BPM 计算，但为了适应广角的要求，例如采用二阶以上 Padé 近似[11—14]或利用最小平方展开在全区域内对传播算子进行逼近[15].

$z=0$ 处，电场对 z 偏导也应该连续，所以

$$\tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s + \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_r = T\beta_f\tilde{E}_f + \gamma\tilde{F}_f, \tag{6}$$

其中 $\tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}$ 为变量 $\mathrm{d}E$ 的傅里叶变换形式；(6)式右边考虑了光纤的弱导近似.

由(3)和(6)式，得到 $\tilde{F}_f$ 的表达式

$$\tilde{F}_f = \frac{T(\beta_f - 1)\tilde{E}_f + (\tilde{E}_s - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s) + (\tilde{E}_r - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_r)}{(1-\gamma)}. \tag{7}$$

在波导中，导模和辐射模必须正交，这样由 $\tilde{F}_f$ 和 $\tilde{E}_f$ 正交可得方程

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{F}_f\tilde{E}_f^*\,\mathrm{d}s\mathrm{d}t = 0. \tag{8}$$

将(7)式代入(8)式，可以得到 T 的表达式

$$T = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\dfrac{(\tilde{E}_s - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s) + (\tilde{E}_r - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_r)}{\gamma - 1}\tilde{E}_f^*\,\mathrm{d}s\mathrm{d}t}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\dfrac{1-\beta_f}{\gamma-1}\tilde{E}_f\tilde{E}_f^*\,\mathrm{d}s\mathrm{d}t}. \tag{9}$$

再由(3)和(6)式，可得

$$\tilde{E}_r = \frac{T(\gamma - \beta_f)\tilde{E}_f - (\gamma\tilde{E}_s - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s) + \tilde{d}\ \tilde{E}_r + \gamma_0\tilde{E}_r}{\gamma + \gamma_0}. \tag{10}$$

给 T 和 $\tilde{E}_r$ 赋上初值，反复地利用(9)和(10)式进行迭代，直到 T 收敛即可，(10)式中的 γ_0 是为了保证迭代过程收敛的任意非零复数. 收敛后，$|T|^2$ 就是耦合端面上的透射率. 整个“楔形波导-光纤”系统的透射率还要考虑光在楔形波导中的能量损耗.

2.2. 光纤-楔形波导耦合

此时，反射模只存在光纤中，和 2.1 所述过程相似，在图 3 所示 $z=0$ 处，电场必须连续，所以

$$\tilde{E}_f + R\tilde{E}_f + \tilde{B}_f = \tilde{E}_s, \tag{11}$$

式中，R 为光纤中反射导模的振幅系数，$\tilde{B}_f$ 为光纤中反向辐射模 B_f 的傅里叶变换形式.

由光场在传播方向上的偏导连续可以得到

$$\beta_f\tilde{E}_f - R\beta_f\tilde{E}_f - \gamma\tilde{B}_f = \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s. \tag{12}$$

由(11)，(12)式，得到 $\tilde{B}_f$ 的表达式

$$\tilde{B}_f = \frac{\beta_f\tilde{E}_s - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_r - 2R\beta_f\tilde{E}_f}{(\beta_f + \gamma)}. \tag{13}$$

由于 $\tilde{B}_f$ 和 $\tilde{E}_f$ 正交，即满足方程

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{B}_f\tilde{E}_f^*\,\mathrm{d}s\mathrm{d}t = 0. \tag{14}$$

将(13)式代入(14)式，可以得到 R 的表达式

$$R = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\dfrac{\beta_f\tilde{E}_s - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s}{\beta_f + \gamma}\tilde{E}_f^*\,\mathrm{d}s\mathrm{d}t}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\dfrac{2\beta_f}{\beta_f + \gamma}\tilde{E}_f\tilde{E}_f^*\,\mathrm{d}s\mathrm{d}t}. \tag{15}$$

再由(11)和(12)式，可得

$$\tilde{E}_s = \frac{(\gamma + \beta_f)\tilde{E}_f + R(\gamma - \beta_f)\tilde{E}_f - \tilde{\mathrm{d}}\ \tilde{E}_s + \gamma_0\tilde{E}_s}{\gamma + \gamma_0}. \tag{16}$$

给 R 和 $\tilde{E}_s$ 赋上初值，反复地利用(15)和(16)式进行迭代，直到 R 收敛即可，(16)式中的 γ_0 是为了保证迭代过程收敛的任意非零复数. R 收敛后，反射导模的能量即是 $|R|^2$，再利用(13)式和反傅里叶变化，计算反射辐射模 B_f 除去反射导模 RE_f 和反射辐射模 B_f 后，剩下的光场 E_s 经过楔形波导传输，进入单模直波导的光场仍然不是稳定的场，所以还要经过足够长距离的传输才能稳定下来，稳定后的能量才是整个“光纤-楔形波导”系统的透射能量. 光在楔形和直波导中的传输用 BPM 计算，在楔形波导中，仍然是利用多段短直波导近似的方法.

将 2.1 和 2.2 所介绍的原理和推导过程加以推广，对其他材料和结构波导之间的耦合均可进行分析.

3. 结果和讨论

3.1. 楔形 SOI 波导-光纤耦合形式

脊形波导结构如图 1 所示. 以 SOI 材料为例，芯层 Si 折射率取 3.5，上、下包层 SiO_2 折射率取

1.45，H 为 5μm，h 取 3.5μm，单模直波导（图 2 中 w_1 处以左部分）条宽 $w_1 = 4\mu$m，楔形波导长度为 1000μm. 光纤直径为 8.7μm，包层折射率为 1.4516，芯层折射率为 1.4473. 以 TE 模为例，波长 1.55μm（下同），图 5(a)是利用 BPM 计算 $w_2 = 8\mu$m 时，楔形波导中光场的分布（$x - z$ 平面）. 计算时，选用完全匹配边界条件（PML），x 和 y 方向上的网格划分单位为 0.1μm，在 1000μm 的楔形波导内，每传播 25μm 条宽增加 0.1μm. 图 5(b)是 w_1 处光场分布（$x - y$ 平面），图 5(c)是 w_2 处光场分布（$x - y$ 平面）.

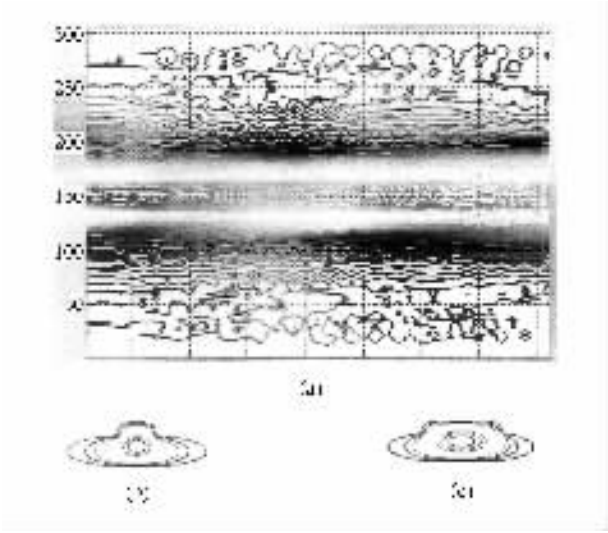


图 5　波导内的光场分布图　(a)楔形波导内 $x - z$ 平面光场分布图；(b) $w_1 = 4\mu$m 处光场横截面（$x - y$ 平面）；(c) $w_2 = 8\mu$m 处光场横截面（$x - y$ 平面）

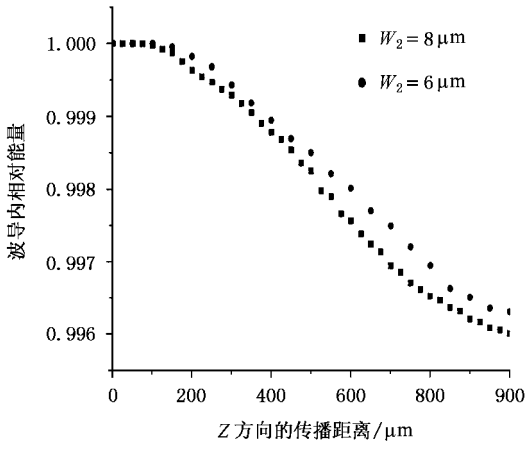


图 6　楔形波导内能量的变化

图 6 是 w_2 分别等于 6 和 8μm 时，楔形部分计算窗口内（除去 PML 区）能量的变化. 可见，在楔形部分，能量逐渐略有减小. 这里正是将经过楔形波导后剩下的光场，作为耦合面入射光场进行计算. 图 7 是利用(9)，(10)式进行迭代的次数和所得透射率的关系（$w_2 = 8\mu$m），可见经过足够次数的迭代后，即可得到收敛的透射率. 这里透射率是仅考虑耦合后在光纤中稳定下来的导模场的能量，而整个系统的透射能量还要考虑耦合前在楔形波导中损失的能量. 表 1 列出了 $w_2 = 6$ 和 8μm 时的计算结果.

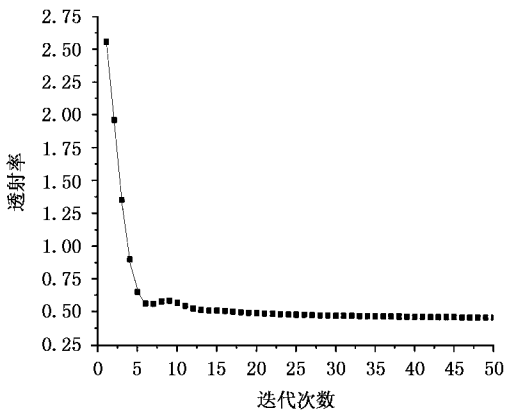


图 7　不同迭代次数下的透射率的收敛情况

表 1　SOI 楔形波导-光纤耦合透射率

	经过楔形部分后剩余能量	耦合面透射能量	系统透射率
$w_2 = 6\mu$m	0.9963	0.4366	0.4350
$w_2 = 8\mu$m	0.9960	0.4573	0.4555
$w = 4\mu$m（直波导）*	—	—	0.4274
$w = 6\mu$m（直波导）*	—	—	0.4540

* 利用文献[10]介绍方法计算的结果.

比较表 1 第 1，2 和 3 行，说明选择适当的几何参数可以提高透射率（在此不讨论具体的优化）. 第 3，4 行的计算结果利用了文献[10]介绍的方法，从第 1，3，4 行的结果来看，光纤和楔形波导耦合时的透射率，大于光纤与条宽为 w_1 的直波导，且小于光纤与条宽为 w_2 的直波导耦合时的透射率. 显然，这样的计算结果是合理的，这也说明改进方法的合理性和可行性.

3.2. 光纤-SOI 楔形波导耦合形式

波导和光纤的物理和几何参数同 3.1. 图 8 是利用(15)，(16)式进行迭代的次数和所得反射率的关系（$w_2 = 8\mu$m）. 同样，经过足够次数的迭代后，即

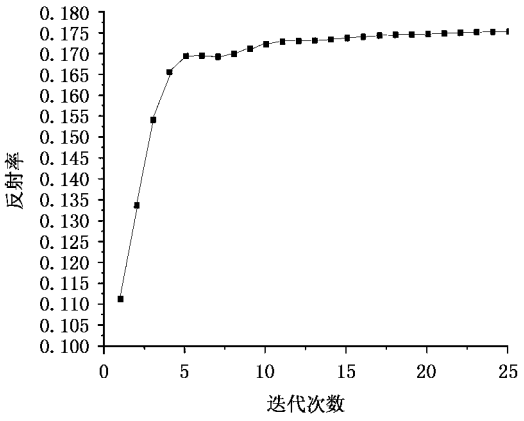


图 8 不同迭代次数下反射率的收敛情况

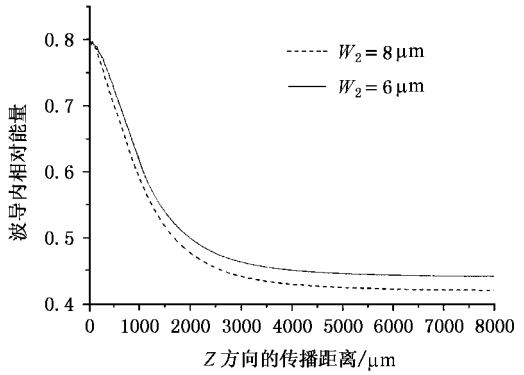


图 9 传播不同长度时,波导内的能量变化

可得到收敛的反射率. 该反射率是最后能够在光纤中稳定下来的反射导模场的能量. 除去反射导模和辐射模场后的光场,将继续在楔形波导和单模直波导中传播,并进一步辐射能量. 经过足够长距离的传播后,辐射模将全部辐射掉,此时,稳定的导模场将留在波导中,该导模场的能量就是最后的透射能量. 图 9 表示了在端面经过反射和辐射后的光场,在波导中传播时能量的变化,这也反映出不同位置对应光场的稳定情况. 其中,前 $1000\mu m$ 波导是楔形波导,这段波导内的能量迅速减少. 进入直波导后,仍需要继续传播 $6000\mu m$ 以上,光场能量(导模场)才能稳定. 表 2 列出 $w_2=6$ 和 $8\mu m$ 时的计算结果.

表 2 光纤-SOI 楔形波导耦合透射

	耦合面反射能量(含导模和辐射模能量)	经过楔形波导和直波导传播后稳定的能量(系统透射率)
$w_2=6\mu m$	0.1755	0.4206
$w_2=8\mu m$	0.1752	0.4414

4. 结 论

波导和光纤耦合可以分为波导-光纤和光纤-波导耦合两种情况. 楔形波导和直波导的不同在于,楔形波导部分的光场并不是稳定的模场. 本文将 BPM 和 FSRM 混合法进行了改进,分别对波导和光纤的两种耦合情况,提出了分析三维楔脊形波导和光纤耦合的方法,计算了透射率和反射率. 并以 SOI 楔脊形波导和光纤的耦合为例,验证了该方法是可行的.

[1] Soref R A, Schmidtchen J and Petermann K 1997 *IEEE J. Quant. Electron* **27** 1971

[2] Burns W K and Hocker G B 1997 *Appl. Opt.* **10** 2048

[3] Hauffe R, Siebel U, Petermann K, Moosburger R, Kropp J R and Arndt F 2001 *IEEE Trans. Adv. Packag.* **24** 450

[4] Rao H, Scarmozzino R and Osgood 1999 *IEEE Photon. Technol. lett.* **11** 830

[5] Kendall P C, Roberts D A, Robson P N, Adams M J and Robertson M J 1993 *IEEE Photonics Technology Letters* **5** 148

[6] Kendall P C, Roberts D A, Robson P N, Adams M J and Robertson M J 1993 *IEEE Proceeings* J 1401 49

[7] Smart C J, Benson T M and Kendall P C 1993 *IEE Proceedings* J **140** 56

[8] Sewell P, Benson T M, Re[illegible]and Kendall P C 1997 *IEEE Photonics Technology Letter* **9** 70

[9] Reed M, Swell P, Benson T M and Kendall P C 1998 *IEE Pro. Optoelectron* **145** 53

[10] Vukovic A, Sewell P, Benson T M and Bozeat R J 2002 *IEE Journal of Selected Topic in Electronics* **8** 1285

[11] Huang W P and Xu C L 1993 *IEEE J. Quantum Electron* **29** 2639

[12] Liu P L and Li B J 1992 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **28** 778

[13] Hsueh Y, Yang M and Chang H 1999 *Journal of Lightwave Technology* **17** 2389

[14] Ilie I, Scarmozzino R and Osgood R M Jr 1997 *J. Lightwave Technol.* **14** 2813

[15] Xia J S and Yu J Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 515 (in Chinese) [夏金松、余金中 2003 物理学报 **52** 515]

A method for analyzing the coupling of 3-D tapered rib waveguides with Fibers*

Liu Jing-Wei　Chen Shao-Wu　Yu Jin-Zhong

(*Research and Development Center of Optoelectronics*, *Institute of Semiconductor*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100083, *China*))

(Received 28 December 2003; revised manuscript received 14 April 2004)

Abstract

The fields in 3-dimensional tapered waveguides are unstable compared with the fields in the straight waveguides. In the case of waveguide-to-fiber coupling and fiber-to-waveguide coupling, a sequence of short straight waveguides has been modeled to approximate the 3-dimensional tapered waveguide; and the unstable incident and reflected fields, as well as their derivatives, were determined by the beam propagation method(BPM). Then free space radiation mode(FSRM) was employed to calculate the reflected and transmitted powers. Analysis results of the coupling of fiber with silicon-on-insulator(SOI) tapered rib waveguides showed the feasibility of the method.

Keywords: free space radiation mode, beam propagation method, coupling, transmission, tapered rib waveguides, silicon-on-insulator

PACC: 0340K, 4280L, 8760F

* Project supported by the National High Technology Development Program of China(Grant No.2002AA312060) and by the State key Development Program for Basic Research of China(Grant No.G20000366).