

高速光探测器模块中的耦合理论和模拟

陈诗育^{1,3} 王 钢^{1,2,3,†}

(1 中山大学光电材料和技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2 中山大学光电和功能复合材料研究院, 广州 510275)

(3 中山大学物理工程与技术学院, 广州 510275)

摘要: 高速光器件的封装工艺中,光耦合占据重要的地位.文中针对一种高速光探测器中常用的光耦合方式——倾斜端面光纤到倒装芯片的耦合,提出了光纤耦合的柱透镜光学模型,并通过理论和光学软件模拟了各种封装工艺条件对耦合效率的影响.模拟结果显示,耦合效率的大小由光纤位置、芯片透镜尺寸和激光光源光斑形状共同决定.

关键词: 光探测器; 倾斜端面光纤; 耦合效率; 耦合容许度

EEACC: 7230

中图分类号: TN305.94

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0275-05

1 引言

近年来随着光通信行业的迅猛发展,作为在光通信中扮演重要角色的光探测器也得到很快的发展.常用的高速光探测器模块由探测芯片如 APD 或 PIN 和放大电路及偏置电路组成.在芯片封装的过程中,光到芯片光敏面的耦合起着重要的作用,耦合效率的大小直接影响器件后续性能.目前光探测器的封装中采用的耦合方式有两种:一种是应用于侧面进光的芯片,即光从侧面直接或者通过透镜与芯片实现耦合;另一种是应用于光敏面朝上或者朝下的芯片,这种耦合方式是利用倾斜端面光纤使水平入射的光通过斜面反射垂直入射,并通过透镜到达芯片光敏面上实现耦合.

随着技术的发展,高速光探测器芯片的尺寸越来越小,光敏面的面积也相应变小,为了保证耦合效率,一般都会在芯片上方加工透镜以提高芯片接受光的面积.倾斜端面光纤的耦合方式解决了正面或者背面入光芯片的耦合问题,与侧面耦合的方式相比,它在封装过程中的合理性、可靠性都比较高,耦合性能上回波损耗小,所以它特别适用于高速光探测器中正面入光的 APD, PIN 光接受芯片的光耦合.

目前对倾斜端面的研究主要集中在研究倾斜端面光纤的原理^[1]和把它当成封装的一个流程从实验上研究其对最终耦合的影响^[2],并未给出耦合过程中倾斜端面光纤的移动对耦合造成影响的最终原

因.本文建立了封装过程中光纤到芯片耦合的光学模型——柱透镜模型,指出光纤左右移动对耦合的不同影响原因是光斑经过包层折射后被椭圆化,导致了在光纤偏移时,左右的耦合容许度不一样.本文还从理论上分析和模拟了各种因素对耦合效率的影响,并借助光学软件的模拟得到了一系列对生产工艺具有指导意义的结论.

2 倾斜端面光纤耦合的光学模型

2.1 倾斜端面光纤模型——柱透镜模型

光斑形状会影响耦合效率,所以有必要建立一个模型来分析到达芯片的光斑形状.如图 1 所示^[3]:光线在光纤内部以 θ_c 的角度入射,根据全反射定理:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1)$$

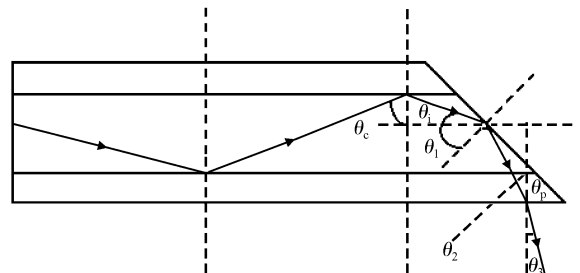


图 1 倾斜端面光纤工作原理示意图
Fig.1 Principle of angle-ended fiber

† 通信作者. Email: stswangg@mail.sysu.edu.cn

2006-06-23 收到, 2006-09-06 定稿

见图 1, $\theta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_c$; 光线在倾斜端面处发生全反射, 其入射角为: $\theta_i = \frac{\pi}{2} - (\theta_p - \theta_i)$; 再根据全反射定理 $n_1 \sin \theta_i = n_0$, 可最终确定可以在端面处实现全反射的倾斜角. 实际单模光纤中, 取 $n_1 = 1.454, n_2 = 1.45$, 其倾斜角度为 $\theta_p = 43.3^\circ$.

光从端面反射经过包层折射出光纤, 光纤包层起着柱透镜的作用, 它把高斯型的圆光斑整形成椭圆光斑输出, 如图 2 所示(以下各种描述坐标轴的选取均由图 2 给出).

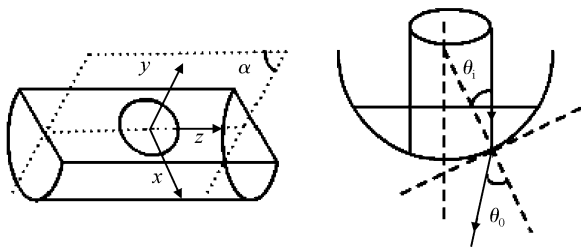


图 2 柱透镜的作用
Fig.2 Role of cylindrical lens

入射的光线由反射斜面垂直入射到包层中, 柱透镜的作用在于把圆光斑椭圆化, 当垂直入射的光线处于过光纤轴线的平面如图所示的 α 平面时, 光线不发生弯曲, 而其他地方的光线会在曲面处发生折射. 设光纤包层的半径为 r , 高斯光的半径为 $w_x = w_z = w$, 平面 yz 与 α 平面重合, 即在该平面内垂直入射的光线不发生偏折即 w_z 通过透镜以后还是 w_z . 由几何关系可以知道:

$$\theta_i = \arcsin \frac{w_x}{r}, n_2 \sin \theta_i = n_0 \sin \theta_0 \quad (2)$$

光纤离芯片上方透镜的距离为 g , 则到达透镜的光斑大小为:

$$x \text{ 方向的半径为: } w'_x = w_x - (g + r - r \cos \theta_i) \tan(\theta_0 - \theta_i) \quad (3)$$

即:

$$w'_x = w_x - (g + r - \sqrt{r^2 - w_x^2}) \times \tan\left(\arcsin\left(\frac{w_x n_2}{r n_0}\right) - \arcsin\left(\frac{w_x}{r}\right)\right) \quad (4)$$

z 方向的半径为:

$$w'_z = w_z \quad (5)$$

光斑到达透镜以后, 通过透镜的会聚作用到达芯片表面, 会聚作用将使整个光斑缩小. 如果知道光纤离芯片的距离、原始高斯光分布和芯片上方透镜的尺寸就可以算出到达芯片的光斑的形状.

2.2 光纤到芯片的耦合模型

耦合模型如图 3 所示. 在上述耦合模型中, 总的

耦合效率由光线通过透镜到芯片的一次耦合 η_1 和光线在芯片表面接收的二次耦合 η_2 组成, 其中光线和芯片表面接收的耦合过程中. 由于接收器芯片的光敏面表面上镀了抗反射的金属膜, 所以反射损耗可以忽略. 而且这一部分耦合对于光纤左右移动耦合效果基本是一样的, 相当于多乘一个固定的耦合系数, 在耦合过程中, 不影响总体趋势. 而一次耦合涉及到从光纤出来的光斑通过透镜以后能否到达芯片表面, 模拟显示它既跟光纤的位置有关系, 又跟透镜的结构有密切的关系, 所以研究这个耦合效率对于具体的耦合工作有指导性意义.

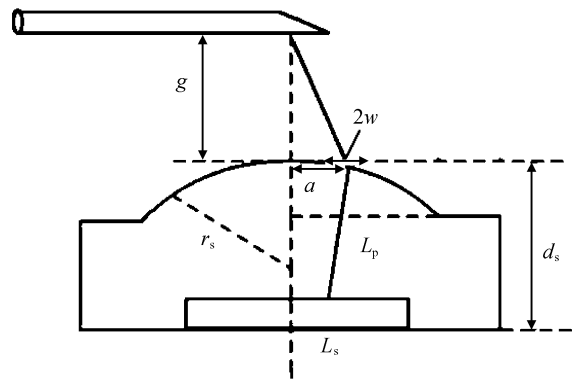


图 3 耦合模型
Fig.3 Coupling model

2.2.1 圆高斯光处理: 把从光纤出射的光当成圆高斯光处理

如图 3 所示的模型中, g 为从光纤到透镜顶端的距离; w 为在透镜上的光斑半径, 它跟光从光纤出来的发散角和光纤到透镜的距离有关系; a 为光斑偏离最佳位置的距离, 它分 z 方向和 x 方向的偏移. 根据耦合理论^[1,4]:

$$\eta_1 = 1 - \exp\left[-2(L_p - a)^2 / w^2\right] + \frac{4}{\pi w^2} \int_{L_p - a}^{L_p + a} \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + r^2 - L_p^2}{2ar}\right) \exp(-2r^2 w^2) r dr \quad (6)$$

光纤出射的高斯光束的光腰半径为 w_0 , 根据光纤理论:

$$\frac{w_0}{r_0} = \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6}\right), 0.8 \leq V \leq 2.5 \quad (7)$$

其中 L_p 为透镜的出光口径; $V = k_0 r_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$; k_0 为真空波矢; r_0 为光纤芯径; n_1, n_2 分别为纤芯和包层的折射率.

由模型中的几何关系:

$$z = (g^2 + a^2)^{1/2} \quad w(z) = w_0 \left(1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right)^{1/2} \quad (8)$$

设模拟的参数为^[1]：

$$\begin{aligned} n_1 &= 1.454, n_2 = 1.45, r_0 = 4.46\mu\text{m}, \\ \lambda &= 1.55\mu\text{m}, g = 30\mu\text{m}, L_p = 25\mu\text{m}, \\ L_s &= 14\mu\text{m}, r_s = 55\mu\text{m} \end{aligned}$$

模拟结果如图 4 所示。

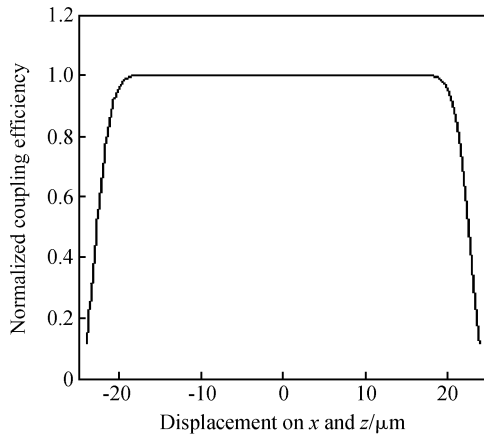


图 4 模拟结果

Fig.4 Result of simulation

从图 4 可以看出,按照图 3 的模型实现光纤耦合时,可以获得 z 和 x 方向接近 $20\mu\text{m}$ 的耦合容许度。

2.2.2 椭圆高斯光处理:把从光纤出射的光当成椭圆高斯光处理

同样如图 3 的模型所示,此时 z, x 的耦合效率发生改变,不再相同,根据耦合理论^[1,4]：

$$\eta_{1x} = 1 - \frac{(2/\pi)^{1/2}}{w_x} \int_{L_p-a}^{L_p+a} \exp(-2x^2/w_x^2) \text{erf}[2^{1/2}(L_p^2 - (x-a)^2)^{1/2}/w_z^2] dx \quad (9)$$

$$\eta_{1z} = 1 - \frac{(2/\pi)^{1/2}}{w_z} \int_{L_p-a}^{L_p+a} \exp(-2y^2/w_z^2) \text{erf}[2^{1/2}(L_p^2 - (z-a)^2)^{1/2}/w_x^2] dz \quad (10)$$

同样的参数下,得到了如图 5 所示的模拟结果。

实际情况中,由于光斑不是严格的圆斑,而是 z 和 x 方向上光腰半径不同的椭圆光斑.从模拟的结果可以看出,由于光斑形状的影响, z 和 x 方向上耦合效率也会发生变动,如图 5 所示, z 方向的耦合容许度要比 x 方向的多 $2\mu\text{m}$ 左右。

从两种处理的结果可以看出,如果不把光纤的包层当成一种柱透镜,所得到的 z 和 x 方向的耦合容许度是一样的.而实际上实验得到的数据如图 6 所示,图中是将得到的耦合效率归一化.该耦合装置在 z 和 x 方向上也有接近 $20\mu\text{m}$ 的耦合容许度但是存在偏差,这跟图 5 比较相近,将出射光斑当成椭圆光斑更加符合实际情况.而且这在光纤偏离最佳位置的时候两个方向的耦合效率偏差都更明显,这由下面的软件模拟可以得出。

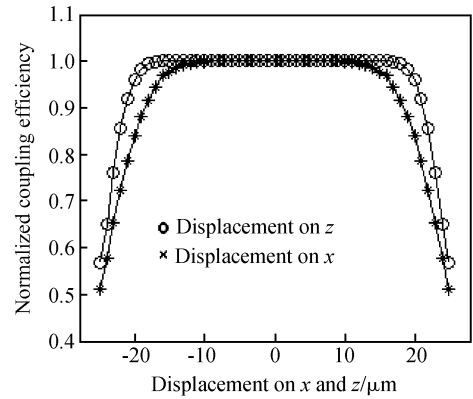


图 5 模拟结果

Fig.5 Result of simulation

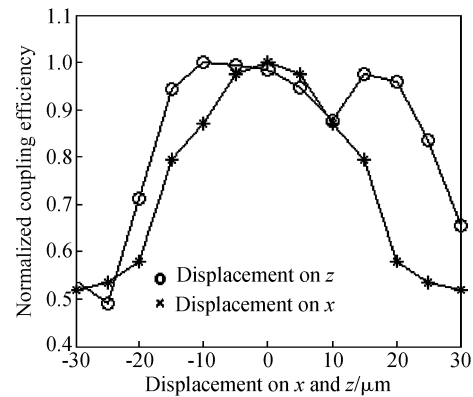


图 6 实验结果

Fig.6 Result of experiment

3 光学软件模拟

前面我们用理论公式模拟了简单的模型,得出结论:把光纤包层当成柱透镜,即把光纤出射的光斑当成椭圆高斯光来处理更加符合实际.下面我们结合商用光学软件,采用光线追踪的办法对耦合时发生的各种实际情况进行模拟,理论模型仍由图 3 给出,模拟的各个参数仍跟理论模型的参数相同。

3.1 光纤上下移动对耦合造成的影响

光纤到透镜的距离分别为 $50, 70, 120$ 和 $200\mu\text{m}$.如图 7 所示,耦合曲线基本重叠,即光纤上下移动对耦合的影响比较小.原因在于:从光纤出来的光基本上呈垂直状态入射到透镜上面,且发散角度很小,在有限的范围内光斑的面积不会发生太大的变化。

3.2 光纤左右移动对耦合造成的影响

如图 8 所示,在 $20\mu\text{m}$ 的位置曲线开始向下偏移,这是由于透镜的孔径只有 $25\mu\text{m}$,光斑到达

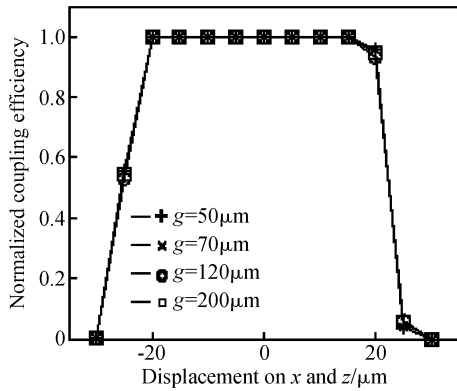


图 7 光纤到透镜的距离对耦合的影响

Fig. 7 Influence of the distance between the fiber and the lens on the coupling

$20\mu\text{m}$ 的位置就不能全部覆盖透镜,导致耦合效率开始下降.设原始光斑的半径为 $2\mu\text{m}$,被整形后到达透镜的光斑大小 x 方向上为 $3.5\mu\text{m}$ 左右, z 方向上仍为 $2\mu\text{m}$ 左右.与 x 方向相比,更多光线能够通过透镜聚焦在芯片上,即: z 方向上的耦合容许度要比 x 方向上的耦合容许度大.

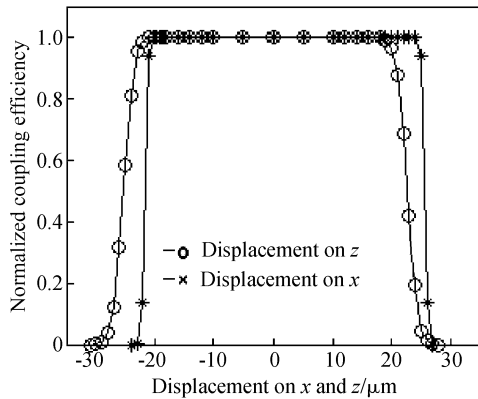


图 8 光纤左右移动对耦合的影响

Fig. 8 Influence of the shift of the fiber on the coupling

通过大量的模拟数据发现:透镜的孔径大小和高斯光斑的形状在耦合过程中起着很重要的作用,它决定了耦合过程中光纤左右偏移的容许度.设光源高斯光腰半径为 w_0 ,透镜孔径大小为 L_p ,则耦合偏离的耦合容许度大概在:

$$(L_p - w_0) \pm (1 \sim 2\mu\text{m}) \quad (11)$$

加减 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 是考虑到光斑变成椭圆光斑这一因素.

3.3 芯片偏离水平位置对耦合的影响

其对耦合的影响有如下两个原因.

(1)如图 9 所示,横轴是芯片偏离水平位置的角度,调节光纤的位置,使光垂直入射,角度的偏离可

以达 20° 左右.原因是:不管角度如何的变化,只要保证入射光斑能够落在耦合透镜上面就可以将光聚焦到芯片上,当角度偏离 20° 的时候,光斑不能完全落在透镜上,耦合效率就会降下来.

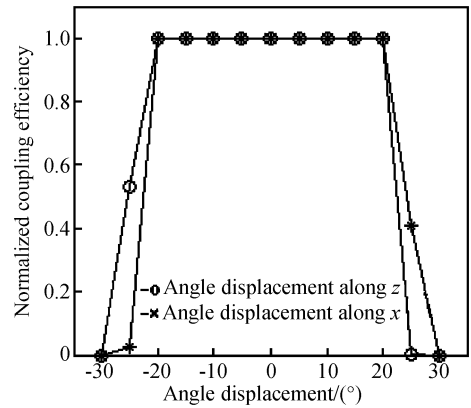


图 9 角度变化对耦合的影响

Fig. 9 Influence of the variation of angle on the coupling

(2)如图 10 所示:当芯片不水平放置时,光纤左右移动的容许度是不一样的,由大量模拟的结果可知:当芯片偏离水平度达到 5° 时,光纤左右移动的耦合容许度就损失 $5\mu\text{m}$ 左右.

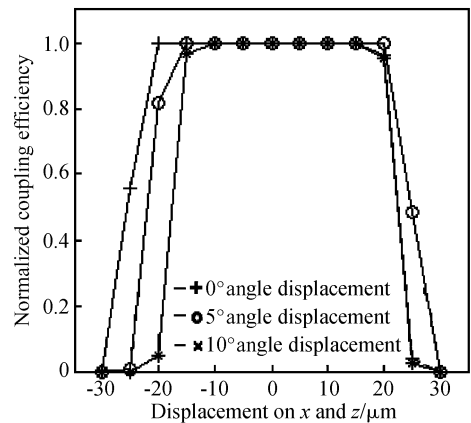


图 10 角度变化和光纤移动对耦合的影响

Fig. 10 Influence of the variation of angle and the fiber on the coupling

4 小结

光纤到器件的耦合在封装过程中占据重要的地位,耦合效率的大小直接影响到光接受模块的灵敏度等后续工作性能,所以对耦合效率的研究就显得比较重要.本文针对一种高速光探测器件中常用的耦合方式——倾斜端面光纤到正装芯片的耦合,提

出光纤耦合模型——柱透镜模型,给出了光纤偏离最佳位置容许度左右不同情况的合理解释,结合光学软件模拟并分析了各种情况对耦合效率的影响.耦合过程中,偏离最佳位置的容许度的判断对封装工艺有很好的指导作用,本文得出的几个结论可以提前预判耦合的容许度,更好地指导耦合的操作.

致谢 本文在实验过程中得到广州南沙慧视通讯科技有限公司大力支持和帮助.慧视公司提供了实验平台和参考资料等各种便利条件,使我方可以更好地实现各种光耦合实验,同时也受到公司热情的招待和工程师们给予的无私帮助,在此作者对慧视公司表示衷心的感谢.

参考文献

- [1] Oikawa Y, Kunwatsuka H, Yamamoto T, et al. Packaging technology for a 10-Gb/s photoreceiver module. *J Lightwave Technol*, 1994, 12: 343
- [2] Hamano H. 10Gb/s optical front end using Si-bipolar preamplifier IC, flipchip APD, and slant-end fiber. *Electron Lett*, 1991, 27: 1602
- [3] Gao Cheng, Farrell Gerard. Numerical aperture characteristics of angle-ended plastic optical fiber. *Proc SPIE, Opto-Ireland*, 2002, 4876: 404
- [4] Yamada J, Murakami Y, Sakai J, et al. Characteristics of a hemispherical microlens for coupling between a semiconductor laser and single-mode fiber. *IEEE J Quantum Electron*, 1980, 16: 1067

Coupling Theory and Simulation of a High Speed Optical Receiver Module

Chen Shiyu^{1,2} and Wang Gang^{1,2,3,†}

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

(2 Institute of Optoelectronic and Functional Composite Materials, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

(3 School of Science & Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: We propose an optical model of a cylindrical lens for fiber coupling based on the method of coupling an angle-ended fiber to the front facet of a chip that is used in high-speed optical receivers. We also study the effect of the packing process on coupling efficiency with the optical model and software simulation. The simulation results show that the optical coupling efficiency is determined by fiber position, the lens design of the photodiode chips, and the shape of the light source.

Key words: optical receiver; angle-ended fiber; coupling efficiency; coupling tolerance

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2007)02-0275-05

† Corresponding author. Email: stswangg@mail.sysu.edu.cn

Received 23 June 2006, revised manuscript received 6 September 2006