

单模光纤与单模平面波导 端面激励耦合的研究

徐敬舆 李 劬 吴旭峰 汪 健

(上海交通大学应用物理系)

提要: 本文研究了单模光纤与 Ti 内扩散 LiNbO_3 单模平面光波导的端面激励耦合问题。测量了它们的场强分布轮廓, 给出了两者位置失配影响耦合效率的实验数据。在光纤输出端用光致抗触剂制作一个微透镜, 缩小光纤输出的高斯光束束腰尺寸, 耦合效率提高了 1.47 倍, 与理论计算值相符。

Research on end fire coupling between single-mode optical fiber and single-mode planar waveguide

Xu Jingyu, Li Qu, Wu Xufeng, Wang Jian

(Applied Physics Department, Shanghai Jiaotong University)

Abstract The end fire coupling between the single-mode optical fiber and the Ti-diffused LiNbO_3 single-mode planar optical waveguide has been studied. Here we report our measurements of the field intensity distribution and the experimental results of coupling efficiencies under the influence of various alignment tolerances. Using a photoresist to produce a microlens directly at the end of a fiber. The Gaussian waist diameter of the fiber output is reduced and the coupling efficiency has been improved by 1.47 times, which is conformable with the theoretical values.

一、前 言

集成光学中广泛研究的调制器、开关器、频谱分析仪等器件, 都采用了扩钛 (Ti) LiNbO_3 光波导。为使这些器件实用化, 需要解决单模光波导与单模光纤的耦合问题, 即需解决这两个不同波导元件之间的耦合损耗。

目前已研究过的光学波导耦合方法可以分为两类——迅衰场耦合和直接激励耦合^[1]。迅衰场耦合的方法适用于折射率相近

的两个波导元件之间的耦合。直接耦合方法适用于折射率相差很大的两个波导元件之间的耦合, 耦合效率取决于这两个波导元件的场强横向分布的匹配情况以及它们之间的机械对准精度^[2]。

我们在实验中实现了国产单模光纤与 Ti 内扩散 LiNbO_3 平面光波导的端面直接耦合, 并在此基础上考察了单模光纤与扩钛 LiNbO_3 波导的对准精度和场形轮廓失配对耦合效率的影响。

收稿日期: 1982 年 10 月 13 日。

二、Ti 内扩散 LiNbO₃ 平面光波导 及近场轮廓的测量

本实验使用钛内扩散 LiNbO₃ 平面光波导。在 Y 切 LiNbO₃ 晶片表面真空淀积一层 300 Å 左右的金属钛薄膜,置于通 O₂ 的石英管中,1000°C 加温 6 小时,使钛离子全部扩散尽,形成单模波导,有效折射率为 $n_{eff} = 2.2003$ 。两端面进行严格光学加工、抛光,并用干涉法检查端面的光学平整度。

按有限源的扩散理论,钛离子浓度分布具有高斯分布函数形式,相应的波导折射率满足平方率分布规律。由波动方程可解得此波导的模式解为厄米-高斯函数的奇次式^[3]:

$$E/E_m = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}e}{W} y \exp\left[-\left(\frac{y}{W}\right)^2\right] & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$y=0$ 处即为 LiNbO₃ 与空气的交界面, $y>0$ 指向 LiNbO₃ 基板内部。

波导近场轮廓测量装置示意图见图 1。我们采用直角棱镜(金红石)将激光束耦合入波导形成导模,再用望远镜系统 9 将波导端面的出射导模成像,图 2 是成像的照片。我们感兴趣的是 TE₀ 模,即为照片上最亮的一根。用光电倍增管横向扫描,得波导近场轮廓分布曲线,见图 3 的曲线 a。再按(1)式, $y_1=W$ 时, $I/I_m=2/e$; $y_2=W/\sqrt{2}$ 时, $I/I_m=1$,从实验曲线 a 可定出 $W = \sqrt{2} (y_1 - y_2) / (\sqrt{2} - 1)$,再代入(1)式,即可计算得近场分布曲线 b。 $W=1.99$ 微米,称为光波导厄米-高斯场强分布的有效半宽度。实验与计算所得的两个场分布吻合程度,在数学上可以

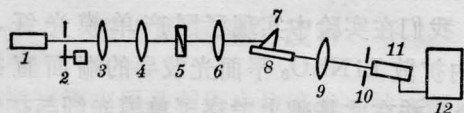


图 1 光波导近场轮廓测量装置示意图

- 1—He-Ne 激光器; 2—调制器; 3、4、6、9—透镜;
5—偏振器; 7—直角耦合棱镜; 8—Ti-LiNbO₃ 波导;
10— $\phi 50 \mu\text{m}$ 孔阑; 11—光电倍增管; 12—选频放大器



图 2 光波导端面的导模成像照片

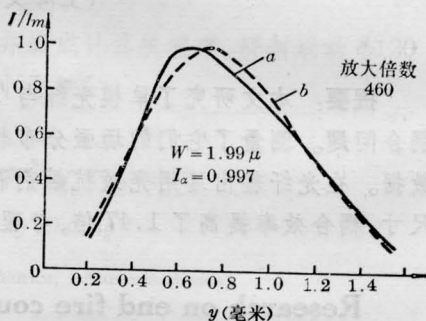


图 3 波导近场轮廓分布曲线
a—实验曲线; b—计算曲线

用归一化交叠积分来计算^[4]:

$$I_a = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{实}} I_{\text{计}}}{\left(\int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{实}}^2 \times \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{计}}^2 \right)^{1/2}} \quad (2)$$

经计算, $I_a = 0.997$ 。

三、单模光纤及远场轮廓测量

本实验采用上海科技大学和上海石英玻璃厂共同研制的单模光纤,纤芯为 8.5 微米, $\Delta = 0.2 \sim 0.7\%$ 。选取长度超过 2 米,可消除包层模;适当选取光纤弯曲半径,可使只有 HE₁₁ 模被激发。对此阶跃式折射率分布的光纤,场分布可用以下高斯分布形式表述^[5]:

$$E/E_m = \exp\left[-\left(\frac{\Delta x}{W_f}\right)^2\right] \quad (3)$$

W_f 称为高斯光束场强半宽度。

单模光纤远场轮廓分布测量装置示意图见图 4。光电倍增管在距光纤距离 z 处横向扫描,得图 5 的实验曲线 a。从曲线 a 的 $I/I_m =$

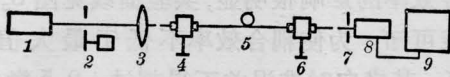


图4 单模光纤远场轮廓测量装置示意图

1—He-Ne 激光器；2—调制器；3—显微镜物镜；4、6—五维调节支架；5—单模光纤；7— $\phi 50$ 微米孔阑；8—光电倍增管；9—选频放大器

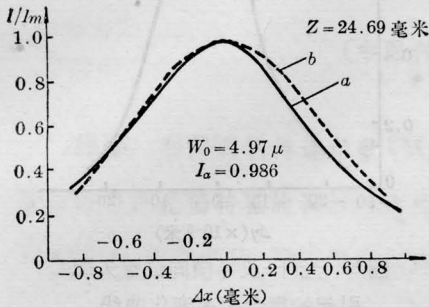


图5 光纤(无微透镜)远场轮廓分布曲线

a—实验曲线；b—计算曲线

1/e 处求得 W_f ，再按式(3)求得理论曲线 b 。同理可按(2)式求出此二曲线的 $I_\alpha = 0.986$ 。再按^[6]：

$$W_0 = \frac{\sqrt{0.347\lambda}}{\pi \operatorname{tg} \phi_{1/2}} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \phi_{1/2} = \left(\frac{FWHP}{2} \right) \frac{1}{z} \quad (5)$$

计算光纤高斯光束束腰 W_0 ，其中 FWHP 为按图5曲线 a 求得的远场半功率全宽度。 $W_0 = 4.97$ 微米。

为缩小单模光纤的高斯光束束腰 W_0 ，用 1:1 的日本 OMR 光致抗蚀剂在光纤端面按 P. D. Beak^[6] 的方法制作了一个微透镜。此时的 $W_0 = 3.04$ 微米， $I_\alpha = 0.999$ 。

四、单模光纤与单模平面波导端面直接耦合

直接耦合是在两个波导元件的发射端与入射端对接时所发生的能量转换过程。直接耦合效率取决于两个耦合场的场强分布轮廓以及它们的相对位置。单模光纤与单模平面波导直接耦合效率表达式为^[2]：

$$\eta = \frac{4W(W_0)^3}{\pi(W^2 + W_0^2)^2} \exp\left[-\left(\frac{W_0\sqrt{2}\alpha}{W}\right)^2\right]$$

$$\times \{\exp(-\alpha^2) + \alpha\sqrt{\pi} [1 + \operatorname{erf}(\alpha)]\}^2 \quad (6)$$

其中 $\alpha = Wd/W_0(W^2 + W_0^2)^{1/2}$ ， d 为光纤与波导的对准公差；当 $d = \frac{W}{\sqrt{2}}$ 时，即两个分布的峰值位置互相对准时，具有最大的耦合效率。 $\operatorname{erf}(\alpha)$ 为宗量等于 α 的误差函数。用前面已测得的 W 及 W_0 值代入(6)式，计算结果见表1。耦合效率的测定装置示意图见图6。测量结果也见表1。

光纤端面制作了一个微透镜后，耦合效率的理论提高值与实验值均为 1.47 倍。光纤端面有无透镜的耦合效率实验值均是计算值的 75.7%，这是因为实验值中计入了棱镜耦合效率。

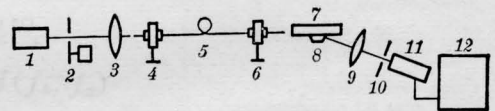


图6 光纤-波导端面耦合实验装置示意图

1—He-Ne 激光器；2—调制器；3—显微镜物镜；4、6—五维调节支架；5—光纤；7—波导；8—等腰棱镜；9—柱面透镜；10—狭缝光阑；11—光电倍增管；12—选频放大器；

表1 光纤-波导端面耦合效率

	光纤高斯光束束腰 W_0 (微米)	波导厄米-高斯有效半宽度 W (微米)	耦合效率		单模光纤-波导(0.7厘米)-棱镜系统插入损耗(分贝)
			$\eta_{\text{计算}}(\%)$	$\eta_{\text{实验}}(\%)$	
端面无透镜	4.97	1.99	47.4	35.9	7
端面有透镜	3.04	1.99	69.5	52.9	5.4

光纤与波导发生纵向(x 方向)位移时,由高斯光束的关系 $W'_0 = W_0[1 + (x/x_0)^2]^{1/2}$ 可知,随距离 x 的增大,在波导端面处高斯束斑的半径 W'_0 将逐渐增大,导致两个耦合场分布交叠面积减小,从式(6)中:

$$\exp\left[-\left(\frac{W_0 \sqrt{2\alpha}}{W}\right)^2\right] = \exp\left[-\left(\frac{2d^2}{W^2 + W_0^2}\right)\right]$$

当 W_0 增加时,此项迅速下降,使耦合效率降低。实验曲线见图7。

光纤相对于波导的横向(y 方向)位移对

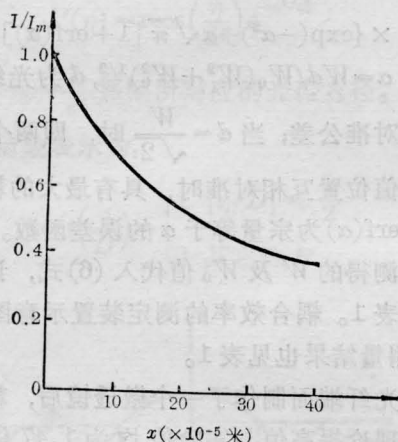


图7 光纤-波导纵向位置失配引起的耦合效率变化曲线

耦合效率的影响很明显,实验曲线见图8。由曲线可知,为使耦合效率不低于最大值的90%,其横向对准误差不得超过 ± 2.5 微米。

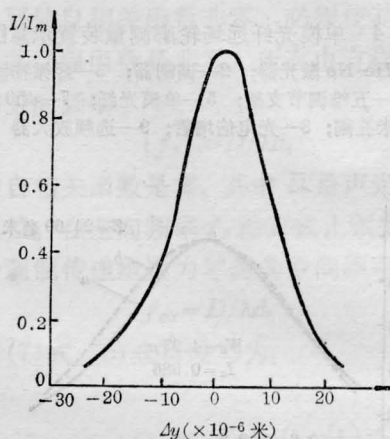


图8 光纤-波导横向位置失配引起的耦合效率变化曲线

参 考 文 献

- [1] H. P. Hsu et al.; *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**, 224.
- [2] R. Keil et al.; *Opt. Commun.*, 1979, **30**, 23.
- [3] H. Kogelnik; In *Integrated Optics*, ed. T. Tamir (Springer-verlag).
- [4] W. K. Burns et al.; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, 2048.
- [5] A. W. Snyder; *Proc. IEEE*, 1981, **69**, 6.
- [6] P. D. Bear; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, 2906.

更
正

“扭动光束钷玻璃棒状激光放大器”一文(Vol. 10, No. 5)中,第275页右栏第十三行的旋转速度应为“ $\omega = 30,000$ 转/分”,第十四行的“曲型实验结果如下表”应为“典型实验结果如下表”。特此更正,并向作者和读者致歉。

编 者