

文章编号: 1001-3806(2006)01-0037-03

塑料光纤耦合器的分析和研制

熊仁华, 姚寿铨

(上海大学 光纤研究所, 上海 201800)

摘要: 研究了一种新型的塑料光纤耦合器件。采用超声波熔接法制作塑料光纤耦合器, 制作过程方便可行。分析了这种耦合器的长度和压缩厚度的变化对耦合比的影响, 实验测试结果和计算机模拟分析基本一致。提出了降低工艺过程中的附加损耗的措施, 实际制得的塑料光纤耦合器的耦合比和附加损耗能满足短距离通信上的使用要求。

关键词: 光纤光学; 塑料光纤耦合器; 超声波熔接; 耦合比; 光线寻迹法

中图分类号: TN253 文献标识码: A

The analysis and manufacture of plastic fiber couplers

XIONG Ren-hua, YAO Shou-quan

(Institute of Optical Fiber Shanghai University, Shanghai 201800, China)

Abstract A novel plastic optical fiber (POF) power coupler manufactured with the ultrasonic welding method is investigated. The manufacture process is feasible and convenient. The relation is discussed between the coupling ratio and its main work variables including the length and thickness of the coupling section and the distance between two fiber axes. The experimental result is identical with the computer simulation result basically. Some measures are provided to reduce the excess loss. The manufactured plastic fiber coupler can satisfy the demand of short distance communication in coupling ratio and excess loss.

Key words fiber optics; plastic optical fiber coupler; ultrasonic welding; coupling ratio; ray tracing

引 言

随着计算机信息的高速发展, 人们一直在追求光端口到户, 塑料光纤无疑是最理想的从楼宇到户的传输媒质。塑料光纤 (plastic optical fiber, POF) 至今已有 30 多年的研究历史, 美国杜邦公司等 20 世纪 60 年代末期就开始对它进行研究。塑料光纤与石英光纤结构上类似, 但其纤芯和包层都是由塑料制成, 一般使用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 做纤芯, 含氟的透明树脂做包层。因开发初期所采用的聚合物透明性存在问题, 传输损耗很大, 所以当时 POF 主要用作照明。近年来, 随着 POF 传输损耗的降低和传输带宽的改善, 在汽车、消费电子、工业控制和通信领域的应用前景越来越良好^[1]。与石英光纤相比, 塑料光纤虽然在损耗、色散、带宽等传输特性方面不如石英光纤, 但它价格便宜, 特别是目前塑料光纤大都直径为 1mm, 所以它的抗拉、抗弯曲等机械强度方面远优于石英光纤, 并

且它的成缆远不需要像石英光纤那样复杂和昂贵, 连接成本低、处理容易、不易断裂; 与电缆相比, 塑料光纤具有抗电磁干扰、重量轻、理论传输带宽高等优点。这些良好的特性使塑料光纤在经济上优于石英光纤, 而在性能上又远远超越同轴电缆, 成为短距离通信系统中的最佳传输介质。塑料光纤适宜用于楼宇中的局域网、数据储存网络、内部通信和家庭内部网络, 在日本等一些先进国家, 塑料光纤已有用于校园网、公寓住宅和办公大楼, 应用前景一片光明。

随着塑料光纤在密集短距离通信网中的应用越来越广泛, 塑料光纤相关器件的研究也越来越重要。塑料光纤耦合器就是其中一种基本的器件。在塑料光纤网络中凡是需要分光束的地方都需要用到塑料光纤耦合器。塑料光纤耦合器的制作方法主要有: 研磨法, 混合棒法^[2], 侧面反射耦合法, 熔融拉锥法^[3], 超声波熔接法等。较常用的熔融拉锥法基本上和石英光纤耦合器的制作方法相同, 只是在制作过程中熔融的温度要求非常精确的控制, 温度稍高就会破坏塑料光纤内的分子结构, 造成损耗急剧上升, 温度稍低又会使两根塑料光纤不能熔合在一起。超声熔接法制造塑料光纤耦合器是一种非常适合的方法。它把两根去皮经过清洁的塑料光纤放在一个模具里, 用超声波发生器使得这两根塑料光纤超声振动, 由于振动摩擦在两根塑料光

基金项目: 上海市科委光科技专项基金资助项目 (022261047)

作者简介: 熊仁华 (1978), 男, 硕士, 现从事光纤通信器件的理论和应用研究。

Email: xlh14049@sina.com

收稿日期: 2004-09-07; 收到修改稿日期: 2004-10-10

纤相接触表面产生高温,从而熔合在一起。从 YUUKI 等^[4]报道的和作者实验样品横截面的照片都可看到,此种高温熔合使得塑料光纤表面厚度为 $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 的包层的塑料分子的结构遭到一定程度的破坏。而这种破坏使得包层的折射率上升正好使得直通光纤的光强能够比较顺利地耦合到另一根塑料光纤中去,而它们的纤芯及包层其它部分的分子结构丝毫未受到损伤。作者对超声波熔接法制作塑料光纤耦合器进行了不同耦合长度和不同压缩厚度与耦合比关系的实验,并用计算机进行光纤寻迹的模拟计算,所得到的结果和实验基本相同。

1 基本原理

由于目前生产的塑料光纤虽无明确的直径规定标准,但大都外径为 1mm ,纤芯直径为 $960\mu\text{m} \sim 980\mu\text{m}$,包层厚度为 $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$;并且超声波振动摩擦产生高温,破坏塑料光纤表面包层分子结构,使折射率提高,这样正好使接触界面上很薄的包层处不产生全反射,而使得直通光纤内的光能通过接触界面进入耦合光纤,这从作者的实验照片可以看出。YUUKI 等^[4]报道用干涉条纹法测得折射率相差 10^{-4} ,所以,忽略相接触面处折射率与纤芯的差别,建立超声波熔接型塑料光纤耦合器简单结构模型,如图 1 所示。

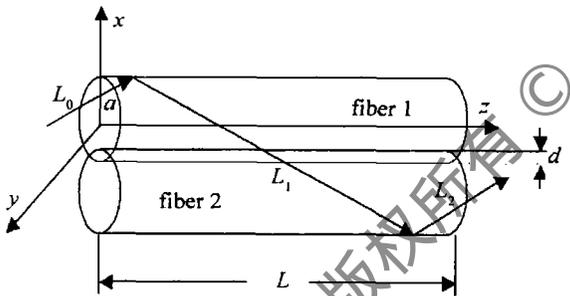


Fig 1 Plastic optical fiber coupler model and its coordinate system

常规石英单模光纤芯径约 $9\mu\text{m}$,对其分析多用波动理论;目前塑料光纤的纤芯直径大多为 1mm 左右,如此多的传播模式用波动理论很难进行处理,采用几何光学的方法更方便直观,所以,下面进行的计算机模拟采用几何光学的光线寻迹法。建立如图 1 所示的坐标系。坐标原点在光纤 1 轴上, a 为纤芯半径, d 为压缩厚度, L_0 为入射光线, L_1, L_2 为反射光线,则相接在一起的光纤纤芯表面方程可写为:

$$\text{光纤 1 } x^2 + y^2 = a^2, (d-a) \leq x < a \quad (1)$$

$$\text{光纤 2 } (x + 2 \times a - 2 \times d)^2 + y^2 = a^2, \\ (2 \times d - 3 \times a) \leq x < (d-a) \quad (2)$$

假定光从光纤 1 注入,其进入光纤内的能量为 P ,对其进行光线分割成 N 条,每条光线代表它附近一个“管导”光能量 P/N 传播的方向,显然采用的光线越多“管

导”截面越细计算就越精确。可按下面的方法进行光线分割,它对光线的分割均匀,并且把光纤中传播的子午光线与斜光线同时考虑进去了。在光纤 1 端面上取足够多的入射点,每个入射点处的入射方向与 z 轴夹角 γ 可在 $[0, \arccos(n_2/n_1)]$ 范围均匀间隔地取不同的值,角度不超过 $\arccos(n_2/n_1)$ 是满足全反射的约束条件。与 x 轴夹角 α 在 $(\pi/2 - \gamma, \pi/2 + \gamma)$ 范围均匀间隔地取值,与 y 轴夹角 β 为: $\pm \arccos\{[1 - (\cos\gamma)^2 - (\cos\alpha)^2]^{1/2}\}$ 。由初始入射光线 L_0 的入射方向向量和入射到光纤端面的位置坐标,根据斯涅尔反射定律,可算出光线在耦合长度为 L 的耦合区内发生折射曲折前进时从哪根光纤出射,由此分析出光功率的耦合分布情况。

文中采用了 10^4 条光线进行模拟,光纤纤芯直径为 1mm ,纤芯折射率 $n_1 = 1.492$,包层折射率 $n_2 = 1.402$,对不同压缩厚度 d 分别为 0.1mm , 0.06mm 和 0.04mm 的耦合器在不同耦合长度 L 下的耦合比作出仿真曲线。见图 2。由曲线可见,在光纤压缩厚度 d 一定时,随着耦合长度的增加,耦合比开始增加较快,大概在 10mm 以后增长速度变慢,缓慢地逐渐趋近 0.5 (即 3dB 的耦合比);随着 d 值的增大,两光纤耦合程度越大,这和预计情况相符。

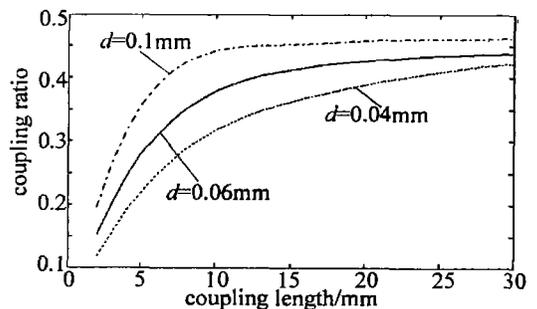


Fig 2 The relation between the coupling ratio and the coupling length

2 实验

实验中使用的是美国 DiMount GmbH 公司的塑料光纤,其纤芯直径为 $980\mu\text{m}$,包层厚度为 $10\mu\text{m}$,包层外覆有一层塑料皮保护。采用超声波熔接法制作过程是:先将两根塑料光纤去掉包层上的保护皮,对包层表面进行清洁处理,然后叠放进特制的模具中,放入经适当调整输出功率的超声波熔接机进行熔接,最后从模具中取出已经熔合的耦合器用胶水固定在石英基片上,经初步测量合格后再封入不锈钢管,见图 3。其中主要是对放置耦合光纤的衬底模具进行加工,在两块表面平整的长方形铁块上刻槽,见图 4 为了制作简便,可以在铁块的两边各开一个槽,槽的长度 L_1, L_2 不同,用螺丝把刻有槽的一面相拼接,从而制得两条不同长度尺寸的槽。

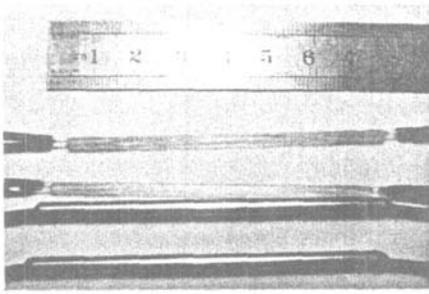


Fig 3 The photo of the couplers

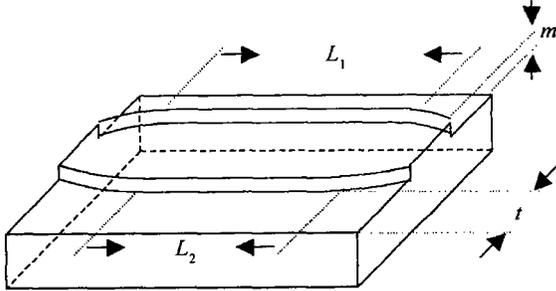


Fig 4 The diagrammatic sketch of the die

槽的宽度 m 、深度 t 和长度尺寸要精确控制。槽宽为塑料光纤的半径，两块刻槽铁块相拼接使槽宽为光纤直径，以使两根光纤刚好能叠放其中，槽宽不能太大，否则在超声波熔接器的加工过程中会使两根叠放的光纤产生滑动错位，导致耦合器变形，损耗增加。槽的深度用来控制耦合器压缩厚度，为了制得更多不同压缩厚度的耦合器但又省去重新制作不同深度的模具，可以在槽中平垫上细纸条，从而达到调节槽的深度的目的，对超声波熔接机的操作也稍会影响光纤压缩厚度的大小。槽的长度用来控制耦合器的耦合长度，但在槽长 L 的两端要有一定缓变的坡度至边缘，如图 4 所示，因为槽的两端部加上缓慢变化的一段长度能克服光纤在熔压之后边缘突然形变而引起的大损耗。并且槽内表面尽量磨平整，减少内表面的毛糙、毛刺，否则它们在光纤熔压过程中会破坏光纤表面，引起光的泄露，也会导致附加损耗增加。实验中，加工了几个模具，以制得不同耦合长度、不同压缩厚度的耦合器。

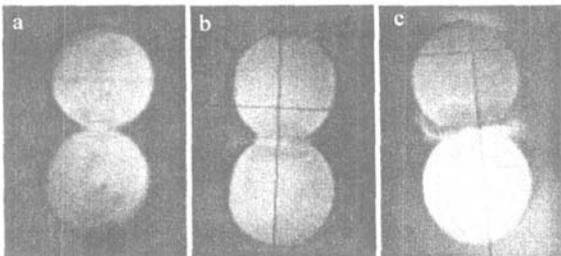


Fig 5 The photo of the coupler cross sections

图 5 为在显微镜下拍摄的 3 张不同压缩厚度的耦合器剖面图。图 5a 中，压缩厚度最小，光纤几乎没有发生什么形变，测试结果其损耗很低，然而对光的耦合能力也差，耦合比很低；图 5c 中，压缩厚度最大，耦合器剖面由于压缩厚度太大，在熔接部分很明显有挤压

出来的突出物，这大大影响到传光性能，实验测试也发现其附加损耗很大；图 5b 中，压缩厚度适中，既满足了较大的耦合比，也保证了附加损耗不是太高。表 1 为压缩厚度 $d = 0.08\text{mm}$ 时所测试的耦合器样品数据。

Table 1 Coupler samples experimental data for $d = 0.08\text{mm}$

	input power/ μW	coupling length/mm	coupling power/ μW	throughout power/ μW	coupling ratio	excess loss/dB
sample 1	750	26.64	187	201	0.4820	2.8623
sample 2	750	23.40	236	287	0.4512	1.5656
sample 3	750	20.30	238.5	293.7	0.4481	1.4893
sample 4	750	17.20	241.2	329.4	0.4227	1.1873
sample 5	750	15.10	240	333.6	0.4184	1.1645
sample 6	750	14.54	244.3	340.9	0.4175	1.0776
sample 7	750	10.76	227.2	384.5	0.3714	0.8857
sample 8	750	8.70	214.7	406.6	0.3456	0.8175

根据表中数据在坐标系图中描点和计算机仿真曲线进行对照，见图 6。

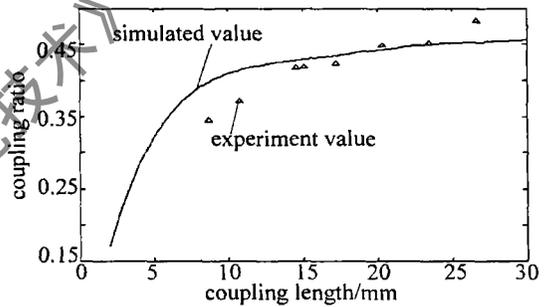


Fig 6 The comparison of the experiment and simulated value

实验结果和计算机模拟值基本一致。实验中发现，控制耦合区长度可以得到要求的分光比。在压缩厚度 $d = 0.08\text{mm}$ 时，当耦合长度为 17.20mm ，耦合比约为 42% ，损耗为 1.18dB ；当耦合长度为 20mm 时，耦合比可以增到 44% ，损耗为 1.48dB ，所以在压缩厚度 $d = 0.08\text{mm}$ 时，耦合长度为 20mm 左右能制得在耦合比和损耗方面满足通信要求的超声波耦合器。实验值和仿真值之间的偏差主要是测量误差和超声波熔接机工作的略微不稳定性造成的。

3 结束语

制作了许多不同耦合长度和压缩厚度的超声波熔接型塑料光纤耦合器，并在理论和实验上分析了塑料光纤耦合器的耦合比随耦合长度和压缩厚度的增加而增大的关系，但这两个参数不能取得过大，因为在实际的耦合器制作工艺过程中，无论是增加耦合长度还是压缩厚度都会相应地增加对光纤原来结构形状的破坏，也就相应增加了附加损耗，所以，在需要的大耦合比和小

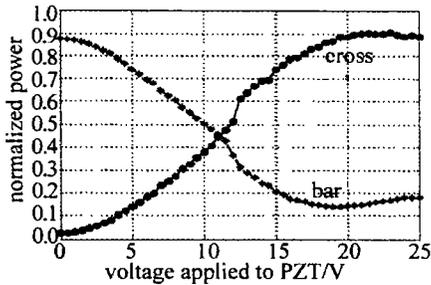


Fig 5 The throughput(*) and coupled(•) optical versus voltage applied to PZT

就可以使两个端口的输出功率改变, 当电压为 12V 时, 耦合器的分光比恰好达到 50:50, 继续增大输入电压, 耦合的光功率还将增大, 当电压达到 22.5V 时, 耦合的功率最大。调节电压就可以实现声光可调功率分配而成为可变分束器, 声波的通断可以作为光开关, 它的消光比为 17dB。

光开关的转换时间为 $60\mu\text{s}$ 在驱动信号开关时, 输出状态的转换时间由声波前通过耦合器腰所用的时间决定的, 实际上, 声波必须通过换能器才能到达耦合腰, 此时的时延由组成声路的各种元件共同决定。

3 结 论

对基于单模光纤零耦合器的声光开关进行了理论分析和初步的试验研究, 制作了零耦合器, 在其基础上设计并实现了工作波长为 1550nm, 损耗为 0.2dB, 耦合

效率为 98%、驱动功率为 13.8mW、转换时间为 $60\mu\text{s}$ 的光纤声光开关和可变分束器。这类器件可用于 DWDM 光纤通信系统和光纤传感系统中。

参 考 文 献

- [1] BIRKST A, RUSSELL P S J, CULVERHOUSE D O. The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(11): 2519~2529.
- [2] BIRKST A, FARWELL S G, RUSSELL P S J *et al*. Fourport fiber frequency shifter with a null taper coupler [J]. Opt Lett 1994, 19(23): 1964~1966.
- [3] BIRKST A, CULVERHOUSE D O, FARWELL S G *et al*. 2×2 single-mode fiber routing switch [J]. Opt Lett 1996, 21(10): 722~724.
- [4] CULVERHOUSE D O, LAM NG R I, FARWELL S G *et al*. A 11 fiber 2×2 polarization insensitive switch [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1997, 9(4): 455~457.
- [5] FARWELL S G, ZERVAS M N, LAM NG R I. 2×2 fused fiber null couplers with asymmetric waist cross sections for polarization independent ($< 0.01\text{dB}$) switching [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(9): 1671~1679.
- [6] CULVERHOUSE D O, BIRKST A, FARWELL S G *et al*. 3×3 all fiber routing switch [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1997, 9(3): 333~335.
- [7] BILODEAU F, HILL K O, FAUCHER S *et al*. Low-loss highly over-coupled fused coupler fabrication and sensitivity to external pressure [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(10): 1476~1482.
- [8] SNYDER A W, LOVE J D. Optical waveguide theory [M]. New York: Chapman and Hall 1983. 542~552.
- [9] YARIV A. Coupled-mode theory for guide-wave optics [J]. IEEE JQE, 1973, 9(9): 919~933.
- [10] LI Y, LI Y. M. Ring-rod power coupling for large core polymer optical fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(8): 961~963 (in Chinese).
- [11] YUUKI H, ITO T, SUGIMOTO T. Plastic star coupler [J]. SPIE, 1991, 1592: 2~11.
- [12] MOTO K, SANO H, MAEDA M. Plastic optical fiber star coupler [J]. Appl Opt 1986, 25(19): 3443~3447.
- [13] LI Y, WANG T, FASANELLA K. Cost-effective side-coupling polymer fiber optics for optical interconnections [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(5): 892~901.
- [14] AI J, LI Y. M. Ring-rod power coupling for large core polymer optical fibers [J]. Opt Engng 1999, 38(60): 1024~1028.
- [15] BERGH R A, KOTLER G, SHAW H J. Single-mode fiber optic directional coupler [J]. Electron Lett 1980, 16(7): 260~261.
- [16] XU B J, DRIVER R D, GANIS J *et al*. Direct bonding yields low-cost plastic star couplers [J]. Laser Focus 1988, 24(4): 180~190.

(上接第 39 页)

附加损耗之间存在一个折中。实验结果表明, 压缩厚度 $d = 0.08\text{mm}$ 、耦合长度为 20mm 左右可以使得耦合比和损耗性能指标满足在短距离通信和传感方面的应用要求。

参 考 文 献

- [1] SUN D F, LU L. Prospect of market and technology of plastic optical fiber [J]. World Telecommunications 2002, 15(8): 20~23 (in Chinese).
- [2] YANG Ch, SUN X H, WANG Y M *et al*. 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler [J]. Acta Optica Sinica 2001, 21(9): 1116~1122 (in Chinese).
- [3] GE W P, LI Zh H, YIN Z M *et al*. A novel 1×4 plastic optical fiber