

文章编号: 1001-3806(2006)01-0053-03

2 × 2 全光纤声光开关的实验研究

刘国祥¹, 胡力², 叶昆珍²

(1 中国科学技术大学 电子工程与信息科学系, 合肥 230027; 2 电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 610054)

摘要: 对基于光纤零耦合器的声光开关进行了实验研究, 制作了零耦合器, 并在此基础上设计和实现了工作波长为 1550nm, 损耗为 0.2dB, 耦合效率为 98%、驱动功率为 13.8mW 的光纤声光开关。结果表明, 此类器件可在光纤通信及光纤传感中得到应用。

关键词: 光纤光学; 光纤熔锥; 声光效应; 开关; 零耦合器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

The experimental study of the 2 × 2 all-optical fiber acousto-optic switch

LIU Guo-xiang, HU Li, YE Kun-zhen

(1. Department of EEIS University of Science & Technology of China Hefei 230027, China 2. School of Communication & Information Engineering University of Electronic Science & Technology of China Chengdu 610054, China)

Abstract The acousto-optic switch based on optical fiber fused null coupler is studied experimentally, a null coupler is fabricated, and a fiber acousto-optic switch with insertion loss less than 0.2dB at 1550nm and coupled efficiency of 98% is realized. Because of its advantages, it is applicable in fiber telecommunication and detection.

Key words fiber optics; optical fiber taper; acousto-optic effect; switch; null coupler

引 言

光纤通信和光纤传感系统需要大量的光无源与有源器件, 如光互联的实现主要依赖于光开关、光滤波器、光衰减器和光放大器等关键光电子器件和密集波分复用等系统技术的进展。光开关是实现光交换的关键元器件, 被广泛应用于光层的路由选择、波长选择、光交叉互连以及自愈保护等方面。新型全光纤声光(acousto-optic effect, AO)器件可实现可调滤波^[1]、衰减、频移^[2]和光开关^[3-6]等多种功能, 受到了广泛的关注。熔锥型全光纤声光开关是在光纤熔锥技术制作的零耦合器的基础上, 利用耦合区中声光效应实现的, 这种光器件具有开关时间短(μs)、低损耗(可小于 0.1dB)、低功耗(可小于 100mW)、全光纤等优点, 是一种新型的光开关^[1]。

作者对基于光纤熔锥零耦合器的声光开关和可变分束器进行了实验研究, 制作了零耦合器和超声换能器; 设计并实现了工作波长为 1550nm 的全光纤声光

开关。

1 光纤光开关的工作原理

熔锥单模光纤耦合器是用两根光纤在高温火焰加热拉伸而成, 其性质决定于工艺参数, 如光纤类型、熔融程度和几何尺寸等^[7]。一般的耦合器是由两根相同或稍有不同光纤制作而成的, 当两根光纤的直径之差大于或者等于标准光纤(125μm)的 1/4 时, 耦合器中的耦合臂没有光输出, 这样的耦合器称之为零耦合器^[1,2], 如图 1a 所示。假定耦合器过渡段绝热缓变

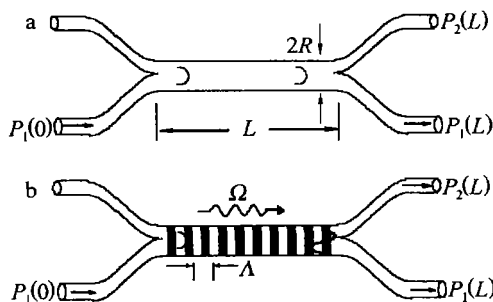


Fig 1 Acousto-optic switch mechanism
a—without modulation b—with modulation

且耦合区均匀对称, 则耦合区就成为新的复合波导, 在弱导近似下, 其总电场为导模和包层模式的组合^[8], 而耦合通常发生在相邻的两个低阶模式之间, 通常是基模(LP₀₁)和次阶模(LP₁₁)。零耦合器在没有

基金项目: 国防预研基金资助项目(98J2.5.6.DZ0203)

作者简介: 刘国祥(1969), 男, 博士后, 主要从事光波导理论与技术的研究工作。

E-mail: gxli@ustc.edu.cn

收稿日期: 2004-12-03 收到修改稿日期: 2005-03-15

声波的情况下,从一根光纤(半径较大)输入的光将在耦合区只激励起基模并从原来的光纤输出,而从另一根光纤(半径较小)输入的光将在耦合区激励次阶模(LP_{11})从同一根光纤输出,如图 1a所示。

当频率为 $\Omega = 2\pi f$ 的正弦弯曲声波经过裸光纤进入耦合区后,对于较低的声波频率(即 $\Lambda \gg R$),声波能量均匀地分布耦合区的横截面。声波弯曲模式在光纤熔锥耦合腰区域满足下列色散关系^[1]:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{K} = \left[\frac{\pi R c_{\text{ext}}}{f} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, K 为声波在光纤中的传播常数, R 为耦合区半径, c_{ext} 为光纤中的声纵波速度,对于熔融石英, $c_{\text{ext}} = 5760 \text{ m/s}$ 。这样,耦合区介质的折射率会以相同的波长周期性变化,其性质类似于长周期光纤光栅,如图 1b所示,这种变化可写为:

$$\Delta n^2(x, y, z) = \Delta n_0^2 \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right), \quad 0 \leq z \leq L \quad (2)$$

式中, Δn_0^2 为折射率调制振幅,声波长 Λ 就是扰动周期,其值与声波长相等, L 为耦合区长度。图 2 中给出

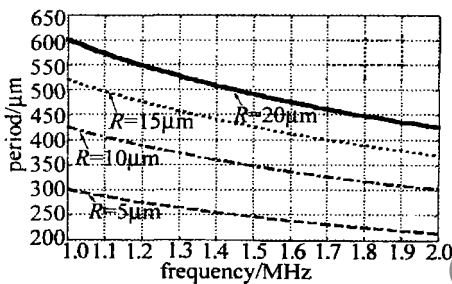


Fig 2 The period of the perturbation via the acoustic wave frequency

了耦合区半径分别为 $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$ 对应的扰动周期随声波频率的变化趋势,周期一般在 $200 \mu\text{m} \sim 600 \mu\text{m}$ 左右。假设波长为 λ 相应频率为 ω 的光从左端入射,其中的正向传播模式与反向传播模式之间由于相位失谐而不发生谐振耦合,耦合区的正向传播的两个临近模式之间只会在一小波长间隔范围内耦合,它们是传播常数为 β_1 的基模和传播常数为 β_2 次阶模。并假定从一根光纤输入单位光功率,而另外一根没有光输入(见图 1),通过解耦合模方程可得到直通臂和耦合臂的输出功率^[9]:

$$P_1(L) = \cos^2(\sqrt{C^2 + \delta^2}L) + \frac{1}{1 + \frac{C^2}{\delta^2}} \sin^2(\sqrt{C^2 + \delta^2}L) \quad (3)$$

$$P_2(L) = \frac{1}{1 + \frac{C^2}{\delta^2}} \sin^2(\sqrt{C^2 + \delta^2}L) \quad (4)$$

式中, C 为两个模式之间的耦合系数, δ 为失谐参数:

$$\delta = \frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2 - K) \quad (5)$$

从以上的分析可知,当耦合区的介质折射率受到声波的调制,使 $LP_{01} \leftrightarrow LP_{11}$ 模发生互相转变,转变的方向则取决于输入的光纤和声波的传播方向。并且满足相位匹配条件(失谐参数 $\delta = 0$)时,光功率由基模耦合到次阶模(或者相反),光可以完全从一个模式耦合到另外一个模式。假设输入的光从光纤 1 输入,则耦合光会从光纤 2 输出,如图 1b所示,这就是光纤声光开关的工作原理。如果只是部分耦合,则两个输出端均有光输出,调节 RF 电压,可获得功率可调的分束器。既然传播常数 β_1 和 β_2 是色散的, $\delta = 0$ 只在小波长间隔范围内成立,说明器件具有波长选择特性。

2 实验结果与讨论

将一根直径为 $125 \mu\text{m}$ 单模光纤加热拉伸使其直径为 $90 \mu\text{m}$ 左右,再与一根标准单模光纤一起制作耦合器,在制作过程中实时监测两个输出端口的功率变化。所作耦合器的腰长 20 mm ,两过渡段长分别为 25 mm 和 23 mm ,腰直径 $12 \mu\text{m}$,最大耦合比 $1:1000$ 损耗 0.2 dB ,图 3 是零耦合器在长度方向上的直径的变化。

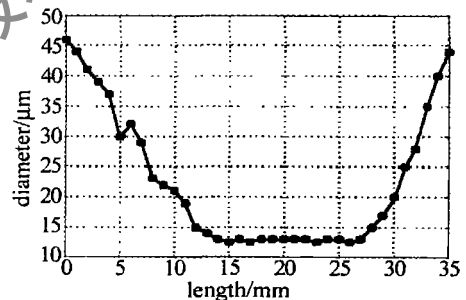


Fig 3 The profile of null coupler

图 4 是声光器件的实验与测试系统,弯曲声波由

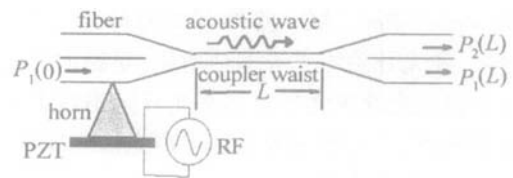


Fig 4 Setup of acousto optic switch

压电陶瓷片(PZT)通过锥形铝喇叭在耦合腰中激励并传播,PZT上加以正弦射频(RF)信号。通过铝喇叭与光纤连接,铝喇叭的顶点粘贴在离耦合器裸光纤一定距离处,并且声波的振动平面与形成耦合器的两根光纤在同一平面,这样可把声波的能量由过渡段集中到耦合腰。

光工作波长为 1550 nm ,调节声波频率 f ,当声频为 $f = 0.962 \text{ MHz}$ 时发生谐振耦合,然后输入电压直到耦合光达到最大为止,转换效率为 98% ,此时所需的电驱动功率为 13.8 mW 。两个输出端口的光功率与输入电压的关系如图 5 所示,说明调节声波 PZT 上的电压

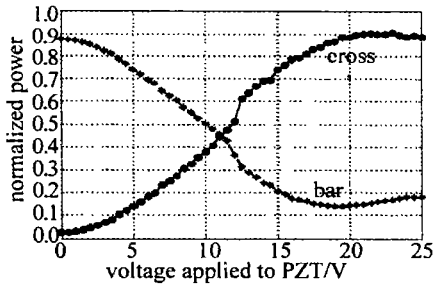


Fig 5 The throughput(*) and coupled(•) optical versus voltage applied to PZT

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 (< 0.01dB) 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] YUUK IH, 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.
- [17] SUN D F, LU L. Prospect of market and technology of plastic optical fiber [J]. World Telecommunications 2002, 15(8): 20~23 (in Chinese).
- [18] 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).
- [19] GE W P, LIZH H, YIN Z M *et al*. A novel 1×4 plastic optical fiber

(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, LIZH H, YIN Z M *et al*. A novel 1×4 plastic optical fiber