

文章编号 : 0253-2239( 2001 )12-1498-03

# 光纤熔锥耦合器的声光调制特性\*

刘国祥 胡 力 叶昆珍 林为干

( 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统国家重点实验室, 成都 610054 )

摘要: 对光纤熔锥方向耦合器的声光强度调制特性进行了实验研究, 得到了工作波长为 1310 nm、声波频率为 20.19 kHz、电驱动功率为 2.6 mW、插入损耗为 0.5dB、调制深度为 64% 的声光强度调制特性。

关键词: 光纤熔锥耦合器; 声光效应; 调制

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

传统的强度调制器<sup>[1,2]</sup>与光纤组成的系统兼容性不理想, 从而导致插入损耗都比较大, 而全光纤强度调制器因其损耗低、背向反射低、与光纤组成的系统兼容性好等优点而倍受人们关注。全光纤弹光(声光)调制是最常用的方式之一, 用单面抛光的 D 形光纤在声波的作用下可获得声光强度调制特性<sup>[3]</sup>, 双折射光纤<sup>[4]</sup>和双模光纤<sup>[5]</sup>在周期性微弯或有声波时, 也可用来制作声光强度调制器。文献[6]中提出了一种以单根光纤熔锥为基础的新型全光纤声光器件, 该类器件是由标准单模通信光纤制作而成, 具有结构简单紧凑、兼容性好、低损耗、易于实现等优点。本文对光纤熔锥方向耦合器的声光调制特性进行了实验研究。

## 2 原 理

四端口的光纤熔锥方向耦合器是用两根相同的单模光纤制作而成的, 它的耦合腰是通过熔锥的过渡段与光纤未熔部分相链接的一段多模各向同性熔融圆柱型复合波导, 设它的半径为  $R_0$ , 长度为  $L$ , 折射率为  $n$ , 如图 1 所示。按复合波导理论<sup>[7]</sup>, 忽略残留芯子的作用, 只要耦合器的两过渡段光滑且缓慢变化, 则从一端口输入的光在耦合腰只激励传播常数为  $\beta_{01}$  的基模( $LP_{01}$ )和传播常数为  $\beta_{11}$  的次阶模( $LP_{11}$ ), 而其它的高阶模式均远离截止。耦合腰中的基模场  $\psi_{01}$  和次阶模场  $\psi_{11}$  的场激励过程可近似地表达为两单模光纤模场的线性组合:

$$\psi_{01} \leftrightarrow \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\sqrt{2}}, \quad \psi_{11} \leftrightarrow \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

其中  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为单模光纤 1、2 独立存在时的基模标量场, 基模与次阶模之间的拍长为

$$L_B = 2\pi(\beta_{01} - \beta_{11}).$$

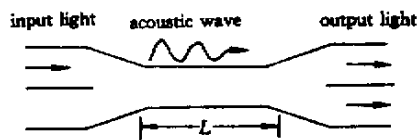


Fig. 1 Shape of a fused taper coupler

当频率为  $\Omega = 2\pi f$ 、在熔融石英中的传播常数为  $K = 2\pi/\Lambda$  的正弦挠曲声波沿  $z$  向传播而通过熔锥耦合腰时, 声波波长  $\Lambda$  可由挠曲声波在圆柱型耦合腰中的色散关系给出<sup>[8]</sup>, 在  $\Lambda \gg 2\pi R_0$  的较低频率范围内有

$$\Lambda = \left( \frac{\pi R_0 c_{ext}}{f} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中  $c_{ext} = 5600$  m/s 为熔融石英中的扩张波速,  $R_0$  为耦合腰的半径, 如果耦合腰的直径很小, 声波可以工作在几十兆赫兹的较高频段。在这种情况下, 声波能量均匀地通过耦合腰的横截面, 使介质折射率发生周期性的正弦型扰动, 它的折射率可写为下列形式<sup>[7]</sup>:

$$n^2(x, y, z) = n^2 + \Delta n^2(x, y) \sin(Kz), \quad (3)$$

式中  $|\Delta n^2(x, y)|$  正比于弹性应变  $S$ , 且满足  $|\Delta n^2(x, y)| \ll n^2$ , 声波波长  $\Lambda$  就是扰动的周期。声波与光波在耦合腰中同向传播, 由耦合模理论分析可知, 当无扰动时的基模和次阶模的传播常数满足谐振条件时, 他们之间会发生耦合而使两输出端的光功率进行再分配, 谐振条件可写为

$$\beta_{01} - \beta_{11} = |K| \quad \text{or} \quad L_B = \Lambda. \quad (4)$$

\* 国防科技预研基金资助课题。

耦合系数  $C$  与折射率的扰动和两模场的重叠程度有关,可表达为

$$C = \frac{\frac{k}{2n} \int_A \psi_{01}(x, y) \Delta n^2(x, y) \psi_{11}(x, y) dx dy}{\int_A \psi_{01}^2(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  是真空中光传播常数。当(4)式得到满足时,两模式发生谐振耦合。

对于各向同性介质来说,由于弹性应变  $S$  直接与声波的强度  $I_a$  有关<sup>[9,10]</sup>,它与声强度的关系为

$$S = \sqrt{2I_a(\rho v_a^3)},$$

其中  $v_a$  是挠曲声波在耦合腰中的传播速度,  $\rho$  为熔融石英的密度,所以耦合系数  $C$  也与声强度  $I_a$  的平方根成正比,而声强  $I_a$  正比于  $\cos^2(\Omega t)$ ,这样,两输出端口输出的光强度也随声波按  $\cos^2(\Omega t)$  或  $\sin^2(\Omega t)$  的形式变化,如果声强受到调制,则两输出

光的强度也受到调制。

### 3 实验与结果

实验中采用标准单模通信光纤制作耦合器,光纤外径为  $125 \mu\text{m}$ ,芯径为  $9 \mu\text{m}$ 。耦合器总长度为  $59.5 \text{ mm}$ ,腰长为  $23.5 \text{ mm}$ ,每个过渡段长为  $18 \text{ mm}$ ,耦合腰直径为  $40 \mu\text{m}$ ,在工作波长  $1310 \text{ nm}$  处的插入损耗为  $0.5 \text{ dB}$ ,两输出端口的分光比为  $1:1$ 。

将圆形压电陶瓷片 PZT 与玻璃圆锥形喇叭粘在一起,压电陶瓷片厚度为  $2 \text{ mm}$ ,半径为  $3 \text{ mm}$ ,中心频率为  $4 \text{ MHz}$ ,圆锥形喇叭半径为  $2.5 \text{ mm}$ ,高度为  $3.5 \text{ mm}$ 。调节喇叭的位置使其顶端粘合在耦合器的裸纤上,如图 2 所示。以  $1310 \text{ nm}$  的半导体激光(LD)作为光源,将输出端经过光电转换的电信号输入到示波器中去。由压电陶瓷片激励的声波经由喇叭传播到光纤熔锥耦合腰中,光纤熔锥耦合器的过渡段起到声波能量集中器的作用。

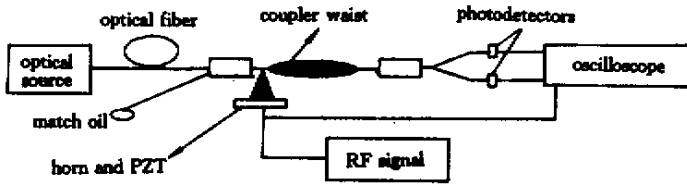


Fig.2 Experimental apparatus of acousto-optic modulation

首先通过调节声波频率寻找谐振点,然后调节声波的强度使耦合达到最大。

实验中发现,在以  $f = 20.19 \text{ kHz}$  为中心的一定频率范围内可观察调制波形,图 3(a)是声波频率为

$19.85 \text{ kHz}$  时两输出端的光强度随时间变化的波形,这是非谐振时的情况,图 3(b)是谐振耦合即耦合效率最大的情况,此时,所需激励压电陶瓷的电功率为  $2.6 \text{ mW}$ ,调制度为  $64\%$ 。

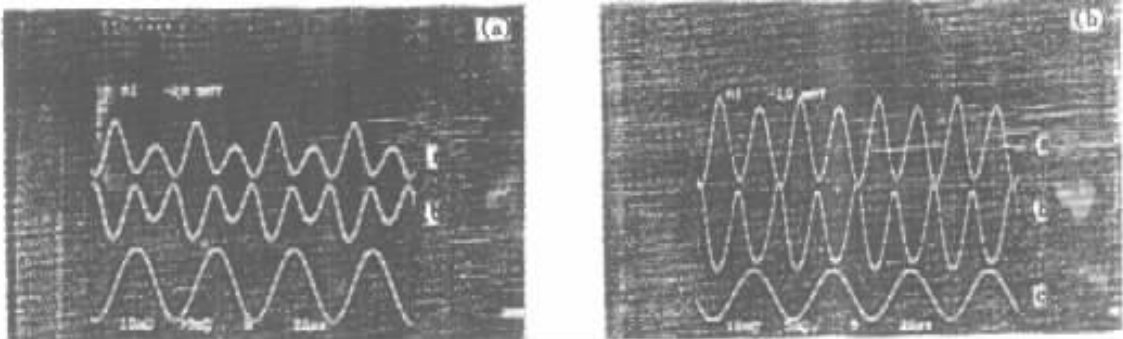


Fig.3 Optical intensity-modulated outputs as function of time emerging from two ports for RF signal applied to acoustic transducer.

(a) The output waveforms of without resonant coupling; (b) The output waveforms of resonant coupling. a :output of port 1; b :output of port 2; c :RF drive signal

从实验结果不难得出,压电陶瓷片(PZT)激励的正弦声波使耦合腰介质的折射率发生周期性微扰,声波与光波同向传输。对于适当的声波频率,当谐振条件得到满足时,引起两低阶模之间发生谐振耦合,一模式就被耦合到另一模式中去。两端口输出的光强取决于耦合系数和声波的强度,进而取决

于换能器的驱动电压。光强受到调制且按  $\cos(2\Omega t)$  或  $\sin(2\Omega t)$  的形式随着时间变化,它们输出是反相的,这表明一模式的功率降低恰好等于另一模式的功率增加。所得到的调制度仅为  $64\%$ ,这是由于耦合腰的半径大小及其均匀对称性对声光相互作用产生直接影响。另外,声波的换能也影响调

制特性。

结束语 对光纤熔锥耦合器的声光强度调制特性进行了实验研究,获得了损耗为 0.5 dB、调制度为 64%、驱动压电陶瓷的电功率为 2.6 mW 的调制特性波形。此类器件的调制度可达到 100%,射频信号能够达到几十兆赫兹,插入损耗可小于 0.1 dB。本工作为进一步研究全光纤声光器件提供了实验指导。

### 参 考 文 献

- [1] Farwell M L, Lin Z Q, Wooten E. An electrooptic intensity modulator with improved linearity. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(9):792~795
- [2] Kuti C, Turi I, Li Yan *et al.*. High-efficiency diffraction modulation of light by strain-optic effect of piezoelectrically induced standing acoustic waves in bulk LiNbO<sub>3</sub> crystal. *Microwave & Optic. Technol. Lett.*, 1990, **3**(6):193

~ 195

- [3] Zürrn M, Ulrich R. Elasto-optic loss modulation on side-polished fiber. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(14):829~830
- [4] Risk W P, Kino G S. Acousto-optic polarization coupler and intensity modulator for birefringent fiber. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(1):48~50
- [5] Kreit D, Younquist R C, Davies D E N. Two-mode fiber interferometer/amplitude modulator. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(23):4433~4438
- [6] Birks T A, Russell P St J, Pannell C N. Low power acousto-optic device based on a tapered single-mode fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(6):725~727
- [7] Snyder A W, Love J D. 周幼威 等译. 光波导理论. 北京:人民邮电出版社, 1991
- [8] Blake J N, Kim B Y, Engan H E *et al.*. Analysis of intermodal coupling in a two-mode fiber with periodic microbends. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4):281~283
- [9] Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York: Wiley, 1984
- [10] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用. 北京:科学出版社, 1982

## Characters of Acousto-Optic Intensity Modulation Based on Optical Fiber Fused Taper Coupler

Liu Guoxiang Hu Li Ye Kunzhen Lin Weigan

(National Key Lab of Optical Fiber Transmission and Communication System,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

(Received 24 August 2000; revised 28 February 2001)

**Abstract:** Based on couple-modes theory and acoustic optic effect, a monolithic single-mode fiber acousto-optic intensity modulation based on fused taper coupler is demonstrated at a wavelength of 1310 nm. About 64% modulation was achieved at a modulation frequency of 20.19 kHz, for an electrical drive power of about 2.6 mW.

**Key words:** fused taper coupler; acousto-optic effect; modulation