

熔锥型光纤反射器特性研究^{*}

余有龙^{1)2)†} 曹 雪²⁾ 刘盛春²⁾ 陈雪峰²⁾

1) (合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

2) (黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2007 年 3 月 1 日收到, 2007 年 3 月 25 日收到修改稿)

分析并验证了光纤反射器的透过率在 $[0, 1]$ 范围内与耦合器耦合比偏离 50:50 的程度呈二次曲线关系. 环形腔中光纤的弯曲对透过率的影响不大, 然而径向挤压和扭转通过双折射对透过率的影响比较明显, 环境温度则通过耦合比来影响透过率. 宽带 3 dB 耦合器构成的反射器, 对宽带光波几乎具备“全反射”功能. 透过光形成的初期会出现一个脉冲, 脉冲的上升沿时间和下降沿时间随入射光强的增加而缩短, 脉宽与稳态输出光强则随入射光强的增加而增大.

关键词: 光纤反射器, 光纤无源器件, 光纤双折射, 耦合器

PACC: 4281, 4281W, 4281M, 7820F

1. 引 言

将熔锥型 3 dB 耦合器的两输出端熔接在一起, 构成的环形腔装置可导致入射光束沿原路返回, 它等效于一个反射镜, 因此称之为“熔锥型光纤反射器”(简称为“光纤反射器”). 该现象是 Mortimore 等人报道的^[1,2], 虽然他们注意到窄带耦合器搭建成的反射器的波长响应特性, 且从理论上预期反射器的反射率与耦合比成二次曲线关系^[2], 然而, 随着 Meltz 报道了光纤光栅 (FBG) 侧写技术^[3], 人们将更多的注意力转移到 FBG 及其应用方面, 以致对光纤反射器的认识仅停留在现象观察和简单应用阶段^[1,2,4,5]. 尽管本征型、波长编码的 FBG 具备良好的带阻滤波功能, 是非常重要的光子器件, 但目前的主流成栅技术 (掩模法) 还缺乏灵活性, 所成光栅很难同时满足宽带和高反射率的需求, 不同波长的光波往往对应不同的传输距离 (如啁啾光栅中), 何况 $1\ \mu\text{m}$ 以下波段的光栅一时还无法获得, 因此有些场合 (如可调光纤激光器端镜) 还得借用介质膜、金属膜或光纤反射器等. 全光纤的熔锥型光纤反射器结构简单, 附加损耗小, 它的获得并不像研制 FBG 或反射膜那样需要复杂的工艺和过程, 仅需一个经良好

封装了的分光比为 50:50 (即 3 dB) 的耦合器, 何况宽带耦合技术^[6] 日渐成熟, 因此有必要对该无源器件的性能进行全面了解.

本文利用不同耦合比的耦合器搭建光纤反射器, 用实验验证反射器透过率对耦合比的依赖关系, 并通过对环形腔局部进行挤压、扭转以及弯曲, 观测三种作用对透过率的影响, 还对宽带耦合器组成的反射器的波长依赖性进行了实验研究, 对透射光的时间响应特性进行了研究, 分析了耦合器的封装质量对反射器性能的影响.

2. 原 理

若熔锥型光纤耦合器的分光比偏离 50:50, 成为 $(50 + \delta) : (50 - \delta)$, 用它构成的光纤反射器的环形腔长度为 L_0 , 假设强度为 I_{in} 的入射光束由端口 1 输入 (图 1 所示), 不考虑附加损耗和回波损耗, 耦合后直通臂输出光强 I_3 与耦合臂输出光强 I_4 分别为

$$I_3 = \frac{50 - \delta}{100} I_{\text{in}}, \quad (1a)$$

$$I_4 = \frac{50 + \delta}{100} I_{\text{in}}, \quad (1b)$$

两者在腔中分别按顺时针和逆时针方向传输, 再次至耦合区时假设其光强分别为 I'_3 和 I'_4 , 反射器输

^{*} 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目 (批准号 JNCET-04-0828) 和广东省自然科学基金重点项目 (批准号 D4105843) 资助的课题.

[†] E-mail: youlongyu@163.com

出光强 I_{out} 便是 I'_3 和 I'_4 经再次耦合后的总输出。

耦合将导致耦合光束的相位较直通光束要滞后 $\pi/2$; I_{out} 中来自 I'_4 的贡献实际上经过两次耦合,而 I'_3 的贡献虽然也两次经过耦合区域,但均为直通,因此前者的相位较后者总滞后量为 π 。

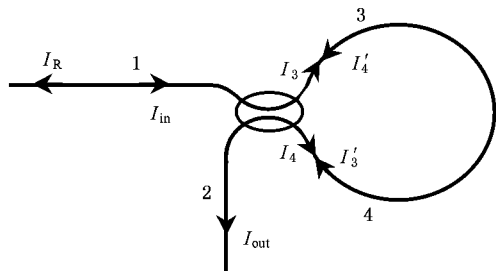


图1 熔锥型光纤反射器原理图

t 时刻入射光场可表示为 $E_{\text{in}} = E_0 \exp[i(kL - \omega t) + \phi]$, 其中 E_0 为振幅, k 为波矢, ω 为角频率, ϕ 为初相位。若光纤中没有双折射等非线性效应,且传播过程中偏振方向不变,耦合区域的尺寸为 l ,则 4 和 3 端输入光场分别为

$$E'_3 = E_3 \exp(ikL_0) = \sqrt{\frac{50 - \delta}{100}} E_0 \times \exp\{[k(L + l + L_0) - \omega t' + \phi]\},$$

$$E'_4 = E_4 \exp(ikL_0) = \sqrt{\frac{50 + \delta}{100}} E_0 \times \exp\left\{i\left[k(L + l + L_0) - \omega t' + \frac{\pi}{2} + \phi\right]\right\},$$

其中, E_i 和 E'_i 分别为 I_i 和 I'_i 对应的光场 ($i = 3, 4$), t' 为第二次耦合的时刻。设 E_{out} 为 I_{out} 的光场,考虑 E_{out} 为 E'_4 和 E'_3 贡献的叠加,即

$$E_{\text{out}} = \left[\frac{50 - \delta}{100} + \frac{50 + \delta}{100} \exp(i\pi) \right] E_0 \times \exp\{[k(L + 2l + L_0) - \omega t'' + \phi]\},$$

其中, t'' 为 2 端输出时刻,这样

$$I_{\text{out}} = \frac{E_{\text{out}} \cdot E_{\text{out}}^*}{2} = \left(\frac{2\delta}{100} \right)^2 \frac{E_0^2}{2}. \quad (2)$$

定义 2 端输出与 1 端输入之比为透过率 (T_r), 1 端输出与输入之比为反射率 (R_r), 则

$$T_r = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} \times 100\% = \left(\frac{2\delta}{100} \right)^2 \times 100\%, \quad (3a)$$

而

$$R_r = \frac{I_R}{I_{\text{in}}} \times 100\% = 1 - T_r$$

$$= \left[1 - \left(\frac{2\delta}{100} \right)^2 \right] \times 100\%. \quad (3b)$$

上式反映出透过率与偏离量 δ 呈二次曲线关系, $\delta = 0$ 时, $T_r = 0$, 而 $R_r = 1$; $\delta = 50$ 时, $T_r = 1$, 而 $R_r = 0$ 。

环形腔中光纤的弯曲、扭转或沿径向挤压均将引起纤芯内出现双折射现象^[7-9], 它势必影响第二次耦合输出光束间的相位差, 从而影响反射器的输出。

3. 实验与结果分析

所用耦合器为自行研制的熔锥型宽带光纤耦合器, 其工作波长位于 1550 nm 通信窗口, 带宽 > 80 nm, 附加损耗 ≤ 0.17 dB. 它是在室温下用 Coning SMF 28 光纤经氢氧焰(温度 1100—1200℃)加热打结拉制而成。拉制过程中, 同一耦合比可能会出现在不同的振荡周期中, 为了获得较小的插入损耗, 应确保所需耦合比第一次出现时终止拉锥。

将耦合器输出端两光纤对芯熔接(损耗 ≤ 0.03 dB), 形成腔长为 3 m 的光纤反射镜。所用光源为 Ando AQ4321D 激光器, 工作波长 (λ) 设置为 1550 nm, 输出光经隔离度为 32 dB、插入损耗为 0.45 dB 的隔离器后进入反射器。保持 $I_{\text{in}} = 1$ mW 不变, 监测 I_{out} 便可确定透过率 T_r 的大小。

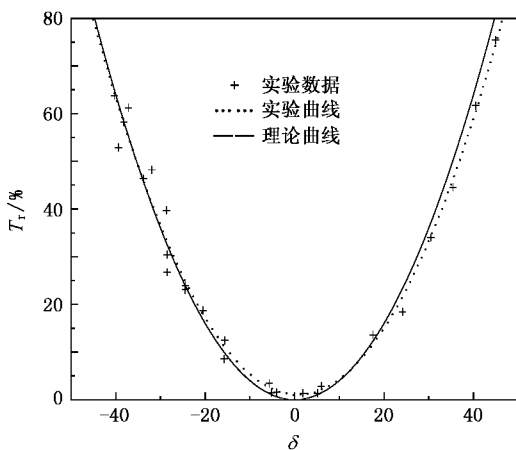


图2 T_r 随 δ 变化关系曲线

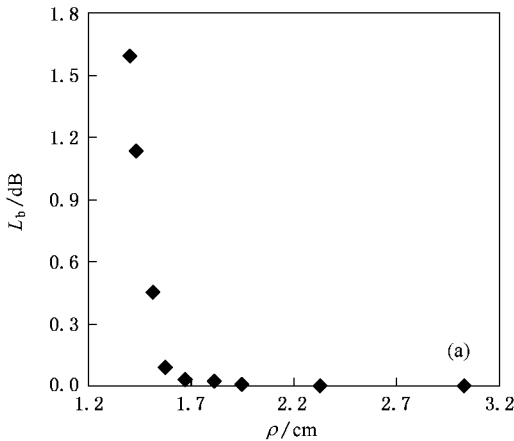
3.1. 透过率与耦合比的关系

用不同耦合比的耦合器构成光纤反射器, 观察到透过率在 $[0, 1]$ 范围内随偏离量的增加而迅速增大, 两者的实验关系如图 2 所示, 其中实线是 (3a) 式确定的二次曲线, 可见实测结果与理论预期基本一致, 少量偏离主要源于环形腔局部受挤压和扭转所致。当然, 根据能量守恒的原理, 反射率 R_r 将随 δ 的增加而迅速减小。

$\delta = 0$ 时, E_{out} 中 E'_4 和 E'_3 贡献相等, 相消干涉导致 $I_{\text{out}} = 0$, 而端口 1 的反射输出光强 $I_{\text{R}} = I_{\text{in}}$.

3.2. 透过率对双折射的依赖性

验证双折射现象对反射器性能的影响, 需排除弯曲损耗(L_b)的影响. 图 3 (a) 是所用光纤的 L_b 与曲率半径(ρ)变化关系的实验曲线, 可见 $\rho > 1.6 \text{ cm}$



时, 弯曲损耗几乎可忽略, 因此验证弯曲引起的双折射对透过率的影响时, 曲率半径不得低于 1.6 cm . 图 3 (b) 为两者间的实验关系, 可见弯曲并未造成透过率的明显变化, 这是由于弯曲发生时, 光纤横截面的一侧受到挤压, 而另一侧收到拉伸, 虽然两侧产生的双折射现象均影响干涉输出, 但彼此相消, 以至于对透过率的影响不大.

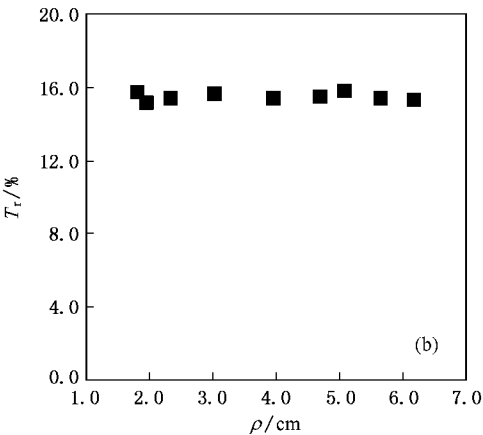


图 3 (a) L_b 与 ρ 的实验关系 ;(b) T_r 与 ρ 的实验关系

为了解径向挤压对反射器反射性能的影响, 将环形腔中光纤的局部与同型号号一光纤平行放置, 将载波片对称地置于上方, 在载波片的中间部位添置砝码, 观测到透过率随压力 N (砝码重量之半) 的变化呈周期性变化规律, 局部结果如图 4 所示. 此乃径向挤压引起的双折射效应, 导致第二次耦合输出的干涉光束间相位差发生变化, 影响输出光强所致.

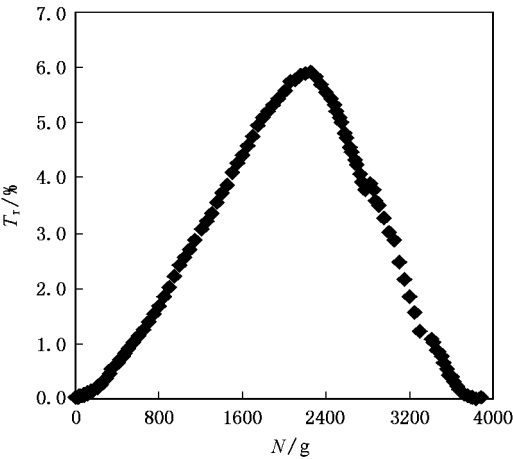


图 4 T_r 随 N 变化关系的实验曲线

用环形腔中的一段光纤组成光纤环, 不难发现光纤反射器透过率的大小与环的取向(θ)和环的曲

率半径(ρ')有关. 规定环所在的面转向耦合器一侧 θ 值为正, 转离耦合器时为负, 则不同曲率半径时获得的透过率随 θ 变化关系的实验曲线如图 5 所示, 可见 T_r 可在 $0-15.51\%$ 的范围内调节, 就是说反射率可在 $100\%-84.49\%$ 之间进行调节 (未计各种损耗). 这是由于取向的改变引起环中光纤出现扭转, 造成纤芯出现应力的有序分布, 从而产生双折射, 进而影响透过率的值. 曲率半径的变化, 造成应力双折射出现的程度不同, 从而影响透过率变化的程度.

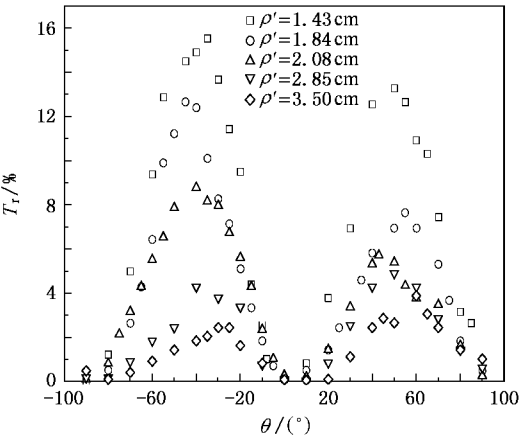


图 5 不同曲率半径时 T_r 随 θ 变化关系实验曲线

3.3. 透过光强的时间响应特性

实验中还观察到透过光 I_{out} 建立伊始会出现一个脉冲,脉冲下降至一定程度达稳定值(图 6(a)所示).记上升至最大值的 90% 所需时间为“上升沿时间”(t_r),下降至下降沿高度的 10% 所需时间为“下降沿时间”(t_f),随着 I_{in} 的增大, t_r 和 t_f 均呈下降趋

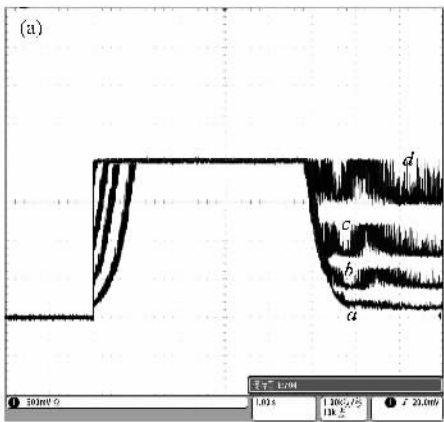


图 6 (a)不同 I_{in} 对应透过光建立的过程 (曲线 a 为 $I_{in} = 0.065\text{ mW}$, b 为 $I_{in} = 0.2\text{ mW}$, c 为 $I_{in} = 0.4\text{ mW}$, d 为 $I_{in} = 0.8\text{ mW}$);(b) t_r 和 t_f 与 I_{in} 间的实验关系

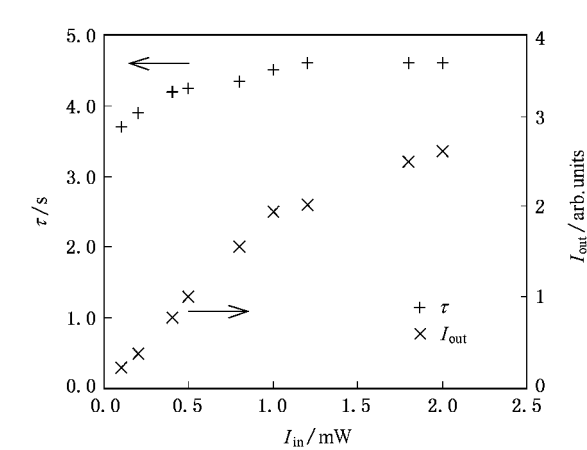
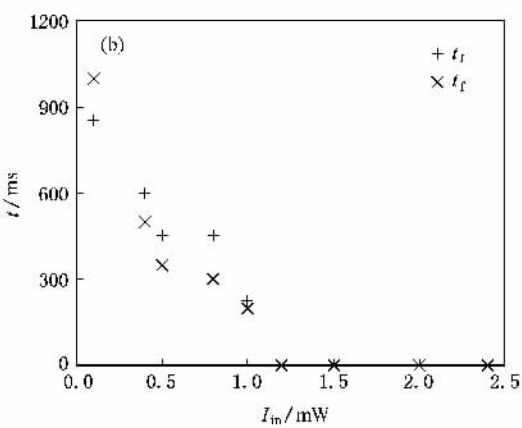


图 7 τ 以及 I_{out} 与 I_{in} 的实验关系

3.4. 透过率的温度响应特性

实验中还观察到环境温度对光纤反射器的反射性能有一定的影响,分析表明该影响主要取决于耦合器的封装质量.对于良好封装的耦合器,在其许可的工作温度范围内,温度对反射器透过率的影响不大(图 8(a)所示).对于不良封装的耦合器,其耦合比受温度的影响不一致,因此透过率变化的趋势以

势(图 6(b)所示).另外,还可观察到脉宽 τ (最大值的 90% 处宽度)和透过光的稳定输出值 I_{out} 均与 I_{in} 有关,实验关系如图 7 所示.该现象显然区别于传统的“反射”现象,这是由于光纤反射器的反射光束源于两次耦合后的相长干涉,而耦合的建立是有过程的,在此过程中 I_{out} 的输出相消不彻底,只有进入稳定状态,才能获得最大程度的相消.

及范围也不同.图 8(b)和(c)分别为一般封装和不良封装的 3 dB 耦合器搭建的光纤反射器透过率对环境温度依赖关系的实验曲线,可见耦合器的封装质量关系到光纤反射器的性能和工作的稳定性.

3.5. 透过率的波长响应特性

为验证光纤反射器的波长依赖性,改用 Net Test Tunics-plus CL 激光器为光源,其输出波长在 1525—1640 nm 内连续可调.继续保持 $I_{in} = 1\text{ mW}$ 不变,调节输出波长,得到 T_r 随 λ 变化关系的实验曲线如图 9(a)所示,而 9(b)则为耦合比随波长变化关系的实验曲线.

$\lambda = 1550\text{ nm}$ 时,所用耦合器的耦合比为 49.19:50.81.图 9(a)显示 1525—1605 nm 波长范围内, $T_r \leq 0.1\%$,就意味着此波长范围内,该反射器呈现良好的全反射性能(R_r 高于 99.9%). $\lambda > 1605\text{ nm}$ 时,耦合比偏离 50:50,造成透过率快速增加.图 9(b)中 1640 nm 波长处 T_r 的实测值为 0.66%,而此时 $\delta = 4.1$,由(3a)式确定的理论值为 0.67%,两者几乎一致.这从侧面也证明了耦合比偏离 50:50 时将引起反射器反射率的降低.

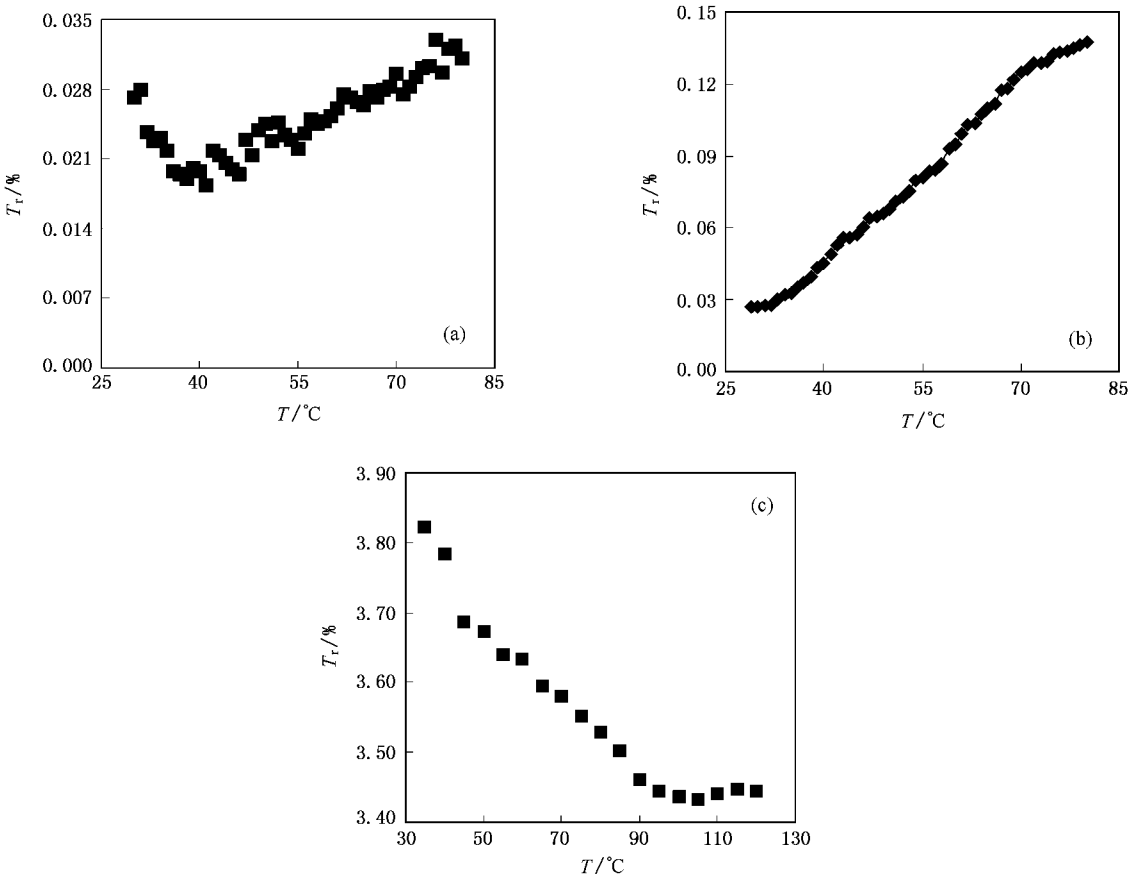


图 8 不同封装质量下 T_r 随 T 变化实验关系 (a)良好封装 ;(b)一般封装 ;(c)不良封装

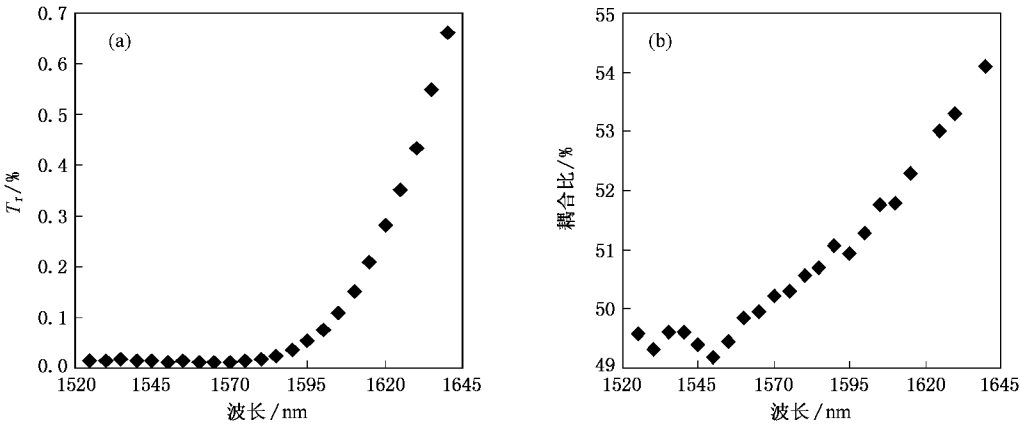


图 9 (a) T_r 与 λ 间实验关系 ;(b)耦合比与 λ 间的实验关系

4. 结 论

由熔锥型 3 dB 宽带光纤耦合器构成的光纤反射器,对宽带光波都有很强的反射能力,有点类似“全反射”.耦合比偏离 50:50 时,随着偏离程度的增加,透过率也快速增加,两者呈二次曲线关系.耦合

器的封装质量对反射器工作的稳定性影响比较明显,环境温度的变化通过影响耦合比,进而引起反射器透过率的改变.环形腔的弯曲会产生一定的传输损耗,但对透过率的影响不大.而径向挤压以及扭转对透过率的影响就比较明显(详细规律待进一步报道),借此可以方便地调节反射器的反射率,从而增加该器件使用的灵活性.另外,透过光形成时会产生

一个脉冲,其上升沿和下降沿随入射光强的增加而变陡,而脉宽与稳态输出光强却随入射光强的增加

而增大.本文工作有利于进一步了解该无源器件的工作机理,并对其应用有一定的指导意义.

- [1] Miller I D, Mortimore D B, Urquhart P, Ainslie B J, Craig S P, Millar C A, Payne D B 1987 *App. Opt.* **26** 2197
- [2] Mortimore D B 1988 *J. of Lightwave Technol.* **6** 1217
- [3] Meltz G, Morey W W, Glenn W H 1989 *Opt. Lett.* **14** 823
- [4] Chen H, Wang D G, Yan Z 2000 *J. of Shanghai Univ.* (Natural Science) **6** 177 (in Chinese) [陈 华、汪道刚、严 震 2000 上海大学学报(自然科学版) **6** 177]
- [5] Doran N J, Wood D, 1988 *Opt. Lett.* **13** 56
- [6] Zhang R F, Ge C F, Wang S H, Hu Z Y, Li S C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 390 (in Chinese) [张瑞峰、葛春风、王书慧、胡智勇、李

- 世忱 2003 物理学报 **52** 390]
- [7] Yao M Y, Xu Q F, Huang K P 2001 *Chin. High Technol. Lett.* **11** 45 (in Chinese) [姚敏玉、徐千帆、黄开平 2001 高技术通讯 **11** 45]
- [8] Jin Y L, Dou Q Y, Liu Y G, Zhang H, Yuan S Z, Dong X Y 2006 *Laser & Infrared* **36** 498 (in Chinese) [金艳丽、窦清影、刘艳格、张 昊、袁树忠、董孝义 2006 激光与红外 **36** 498]
- [9] Gu Y, Pan Y J, Huang S L 1997 *Acta Photon. Sin.* **26** 703 (in Chinese) [古 渊、潘英俊、黄尚廉 1997 光子学报 **26** 703]

Properties of the fused silicon fiber-reflector^{*}

Yu You-Long^{1)2)†} Cao Xue²⁾ Liu Sheng-Chun²⁾ Chen Xue-Feng²⁾

1) (School of Instrument Science and Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

2) (Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

(Received 1 March 2007; revised manuscript received 25 March 2007)

Abstract

Within the range from 0 to 1, the transmissivity of fused tapered fiber reflector as a conic function of the departure of the coupling-ratio from 50:50 was examined theoretically and experimentally. Bending the fiber in loop-cavity causes no obvious change. However, twist and the radial pressure change the transmissivity, obviously, producing birefringence in the fiber core. Temperature changes the transmissivity through the induced departure of the coupling-ratio. Constructed with a broad-band 3 dB fused tapered fiber coupler, the reflector shows total reflection. A pulse was observed at the beginning of the formation of the transmitted beam. Increasing the input intensity causes, the rise-time and the fall-time of the pulse to decrease, while the width of the pulse and the steady state value of the transmitted power to increase.

Keywords: fiber reflector, passive device of fiber, birefringence in fiber, coupler

PACC: 4281, 4281W, 4281M, 7820F

^{*} Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of the Chinese Ministry of Education (NCET-04-0828) and the Key Project of the Science Foundation of Guangdong Province, China (04105843).

[†] E-mail: youlongyu@163.com