

基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器 及其 CO₂ 激光调节*

江微微[†] 范林勇 赵瑞峰 卫延 裴丽 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2010年9月3日收到, 2010年11月18日收到修改稿)

基于光纤耦合器的波长特性, 分析了光纤耦合器作为梳状滤波器的光谱特性; 将长度不同的双芯光纤 (twin-core fiber, TCF) 熔接在两根单模光纤 (single mode fibers, SMF) 之间, 实验制得具有不同峰值波长间隔的基于双芯光纤耦合器的全光纤型梳状滤波器, 其消光比可达 25 dB. 首次使用 CO₂ 激光对其进行光谱调节, 调节导致光谱向长波方向漂移和消光比的变化. 这种调节是基于 CO₂ 与光纤相互作用时的残余应力释放和熔融变形机理, 使用氢载 TCF 可以在相同实验参数下得到更大的波长调节激光.

关键词: 双芯光纤耦合器, 梳状滤波器, CO₂ 激光, 残余应力

PACS: 42.81.Qb, 42.79.Gn

1. 引言

全光纤型梳状滤波器是一种重要的光纤器件, 在光纤通信系统和光纤传感等方面有着重要的应用价值, 近年来受到广泛的关注. 传统的全光纤型梳状滤波器有多种结构, 如 Michelson 型、Mach-Zehnder 型、Fabry-Perot 型和 Sagnac 型等^[1-4]. 这些器件是基于干涉原理, 容易受外界温度、压力等的影响, 导致器件的不稳定, 因而限制了这类梳状滤波器的应用. 近年来, 人们又提出了基于 TCF 的 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波器, 这种器件因结构简单, 容易制作, 稳定性好, 与光纤对熔接容易而引起人们极大的兴趣^[5].

本文基于光纤耦合器的波长特性, 从理论上分析了光纤耦合器的光谱特性, 给出了光谱相应谐振峰位置及谐振峰波长间隔与耦合系数及耦合区长度的关系, 指出只有当光纤耦合器两芯间隔 d 很小, 耦合区长度 z 较大时才能成为梳状滤波器. 相比于由两个 SMF 构成的光纤耦合器, 由 TCF 构成的耦合器有如下优势: 一是 TCF 的 d 和 z 可以根据实际需要任意设计, 进而得到不同峰值位置和间隔的梳状

滤波器; 二是这种滤波器是基于两个芯子之间的耦合, 可通过改善两芯子之间的匹配度来提高响应波长的消光比; 三是其插损主要取决于 SMF 与 TCF 一个芯子的熔接, 可以通过优化熔接参数降低插损. 实验中通过将一根 d 为 12 μm , L 分别为 12 和 28 cm 的 TCF 熔接在两根 SMF 之间, 实验制得插损分别为 5 和 6 dB, 消光比达到 20 和 25 dB 的全光纤型梳状滤波器.

为使滤波器的谐振波长满足实际应用要求, 必须对其进行波长调节. 传统的调节基于紫外曝光的方法, 已有的实验报道可使波长漂移 100 nm^[6,7], 但这种方法需要对紫外光敏感的掺锗光纤或氢载光纤. 基于 CO₂ 激光可以逐点写入长周期光纤光栅 (LPFG) 的实验原理, 本文提出使用 CO₂ 激光对滤波器进行波长调节, 从残余应力释放和熔融变形两方面解释了调节机理. 这种方法的优势在于不要求所使用的光纤具有光敏性. CO₂ 激光调节导致梳状滤波器波长向长波方向漂移和谐振峰峰值的降低, 激光功率越大, TCF 调节长度越长, 波长漂移现象越明显; 通过使用氢载 TCF 可以在相同实验参数下得到更大的波长调节范围.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60837002) 资助的课题.

[†]E-mail: 06111009@bjtu.edu.cn

2. 器件的理论分析

两平行光纤构成的光纤耦合器,其耦合比定义为

$$R(\lambda) = \sin^2(Cz), \quad (1)$$

其中 C 为耦合系数, z 为耦合区长度. 定义耦合比随波长变化曲线的斜率为波长灵敏度^[8]

$$\frac{dR(\lambda)}{d\lambda} = \cos(2Cz) \cdot z \cdot \frac{dC}{d\lambda}, \quad (2)$$

由(1)式可知,在 z 固定的情况下,耦合器光谱的峰值波长发生在满足下式的波长处:

$$C(\lambda)z = \frac{m\pi}{2}, \quad (3)$$

其中 m 为奇数. 由(2)式可知,波长灵敏度由耦合系数 C 及耦合区长度 z 决定,而 C 在光纤参数

固定的情况下主要由两芯间隔 d 决定. 图 1(a) 给出了两芯间隔 d 分别 15, 20, 25 μm 为时的 C 值,图 1(b) 给出的是 z 为 20 cm 时 d 分别为 15 和 20 μm 时的耦合器滤波光谱. 由图 1(a) 可知, d 越小, C 越大, C 随波长变化的斜率越大,由(2)式中 $\frac{dC(\lambda)}{d\lambda}$ 项可知波长灵敏度越大,因而导致

图 1(b) 中的峰值波长间隔越小;图 2 给出 $d = 15 \mu\text{m}$ 为时,耦合长度 z 分别为 8, 20 cm 时的滤波光谱响应. 结合(2)式可知, z 越长,波长灵敏度越大,因而导致图 2 中较长 z 值情况下相应的较小的峰值波长间隔. 从以上分析可知,光纤耦合器要成为梳状滤波器,两芯间隔必须很小,同时耦合区必须很长,只有基于 TCF 的光纤耦合器才能达到这两个条件.

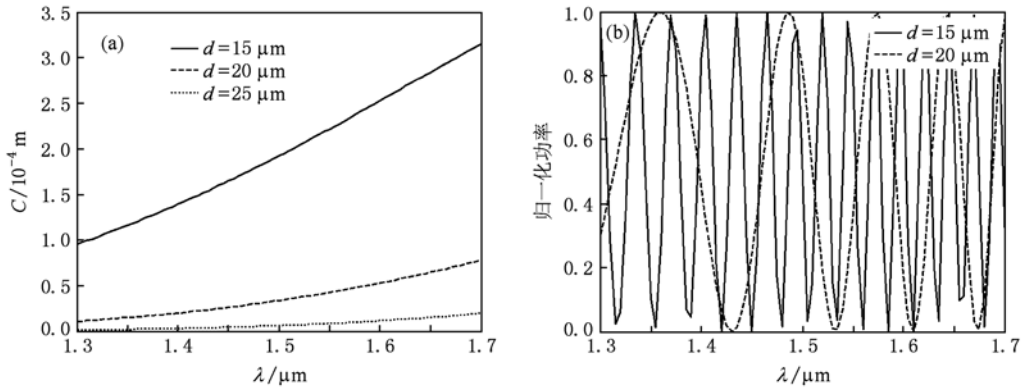


图 1 随光纤间隔 d 变化的耦合系数和滤波光谱 (a) 不同纤芯间隔 d 时的耦合系数; (b) 不同间隔 d 时的滤波光谱

3. 器件的实验制作及 CO_2 激光波长调节

3.1. 器件的实验制作

实验中首先制作 TCF, 由理论分析可知, 光纤耦合器两芯间隔越小, 其光谱响应的波长灵敏度越大, 因而采用了实验室自行设计制作的 d 为 12 μm , 外径为 125 μm 的对称圆截面双芯光纤, 其横截面如图 3(a) 所示. 实验中制作的基于 TCF 耦合器的梳状滤波器的结构如图 3(b) 所示. 将一根长度为 z 的 TCF 其中一个芯子的两端与 SMF 熔接, 两段 SMF 各接宽带光源 (broadband source) 和光谱仪 (OSA) 作为光源和监测设备. 图 4(a), (b) 分别是 z 为 12, 28 cm 时得到的滤波光谱, 其中 (a) 图插损约为 5 dB,

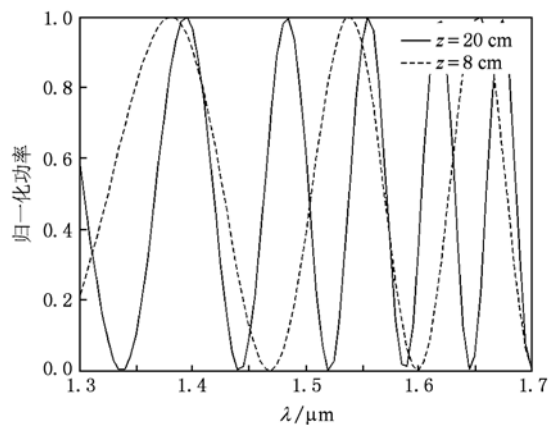


图 2 不同耦合区长度时的滤波光谱

消光比约为 20 dB, 1550 nm 处峰值波长间隔约为 35 nm; (b) 图插损约为 6 dB, 消光比约为 25 dB, 1550 nm 处峰值波长间隔约为 15 nm. 滤波器的插损主要

源于 SMF 与 TCF 的熔接,插损的降低有待于对 TCF 熔接端面的处理和熔接参数的优化;同时由于这种滤波器是基于两个芯子之间的耦合,可通过改善两

芯子之间的匹配度来提高响应波长的消光比;另外,可以通过使用更长的 TCF 获得更小的峰值波长间隔.

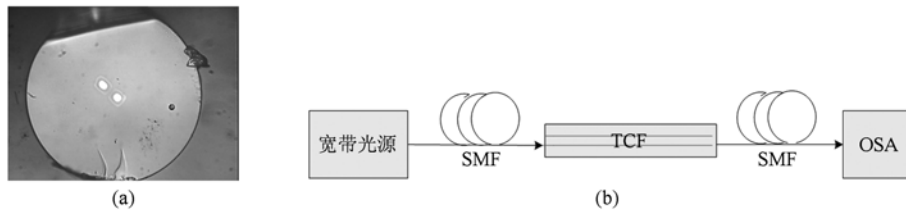


图3 实验光路图及所使用的 TCF (a) 实验中所用 TCF 横截面图;(b) 基于 TCF 耦合器的梳状滤波器结构

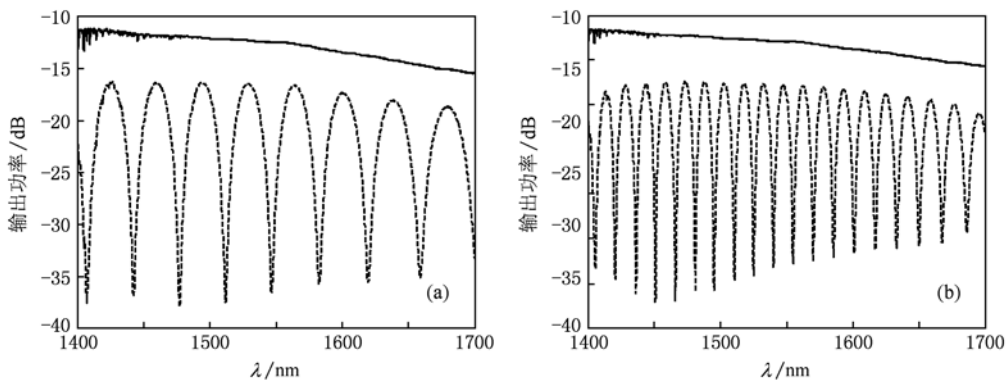


图4 不同 TCF 长度时梳状滤波器的滤波光谱 (a) TCF = 12 cm;(b) TCF = 28 cm

3.2. CO₂ 激光调节实验

在滤波器的调节实验中,将去涂敷后的双芯光纤固定在铜板上,激光位置是固定的,由高精度电机带动铜板移动从而实现 TCF 的纵向曝光.电机移动速度为 0.01 mm/s,使用的是高频 CO₂ 脉冲激光器,使用刀口法^[9]测得其束腰光斑为 2 mm × 2 mm,由于所使用的双芯光纤外径为 125 μm,因而可

以保证激光光斑能够完全覆盖光纤.实验中发现调节结果导致光谱向长波方向移动和响应波长峰值的降低,并且这种结果与激光功率及双芯光纤的纵向曝光长度有关.图 5(a) 给出了激光功率为 7.5 W 时曝光长度分别为 1 mm 和 3 mm 的光谱响应,与调节之前相比,光谱在 1550 nm 处向长波方向分别漂移了 2 nm 和 4 nm,光谱峰值基本没有变化,部分波长的消光比略有变化.图 5(b) 给出了激光功率为

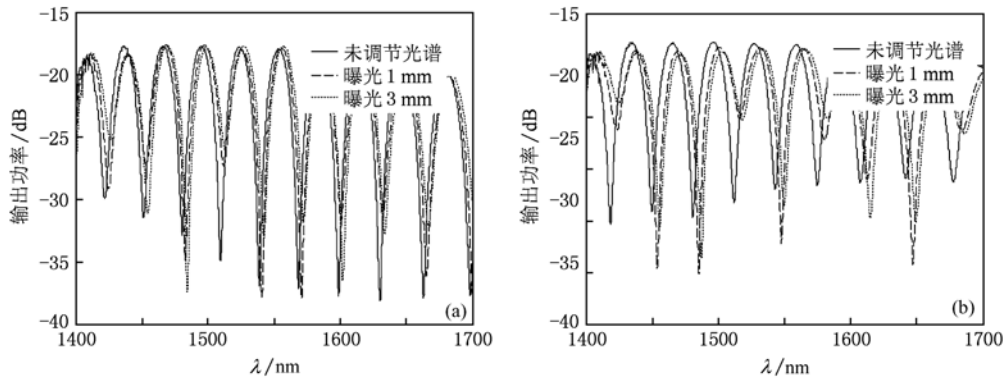


图5 不同激光功率时分别曝光 1 和 3 mm 的滤波光谱 (a) 激光功率为 7.5 W;(b) 激光功率为 12.16 W

12.16 W 时曝光长度分别为 1 mm 和 3 mm 的光谱响应,与调节之前相比,光谱在 1550 nm 处向长波方向分别漂移了 6 nm 和 8 nm,波长峰值降低 0.4 dB,部分波长消光比变化较大.

3.3. CO₂ 激光调节原理

本文提出的 CO₂ 激光调节方法是基于 CO₂ 激光写入 LPFG 的方法. 至目前为止,对于 CO₂ 激光与光纤的相互作用机理的解释尚不完善也不统一,主要有残余应力释放,密度变化,掺杂剂热扩散和熔融变形四个方面^[10]. 由于本文所使用的是没有特殊掺杂的普通 TCF,且密度变化机理只在 810 nm 处的红外光和 248 nm 的紫外光中得到验证,因此本文只从残余应力释放和熔融变形两个方面进行研究. 光纤中的残余应力是热应力和机械应力的叠加,而氢载提高了光纤中的 OH⁻浓度,OH⁻浓度越大的区域机械应力越大^[11],因而能够增强 CO₂ 激光与氢载光纤的相互作用. 为验证这一点,图 6 给出了氢载 TCF 在与图 5(a) 相同激光功率下的调节结果,与图 5(a) 相比,曝光长度为 1 和 3 mm 时光谱分别向长波方向漂移了 4 和 6 nm,因而在光谱调节实验中,残余应力释放是一个主要机理. 另外,对比图 5(a) 与 (b),在激光功率为 7.5 W 的(a)图中,调节后的峰值基本无变化;而在激光功率为 12.16 W 的(b)图中,波长峰值降低 0.4 dB. 这是因为在激光能量足够大时,光纤可能发生熔融变形,导致光纤的插损增加^[12],因此在激光能量较大时,CO₂ 激光与光纤的相互作用主要是残余应力释放和熔融变形两种机理.

由于残余应力的存在通过光弹效应使纤芯折射率减小,CO₂ 曝光后使得残余应力得以释放,导致纤芯折射率增加及芯包折射率差变大,进而导致耦合系数 C 变小. 结合(3)式和图 1(a),长波较短波

处耦合系数大,因此当外界条件导致 C 变小时,需要更长的波长满足(3)式,因而残余应力释放的结果是导致光谱响应向长波处漂移. 另外,由于我们制作的 TCF 不能保证两个芯子是完全相同的,而 CO₂ 激光曝光会影响两个芯子之间的匹配度,因而使部分响应波长的消光比发生变化.

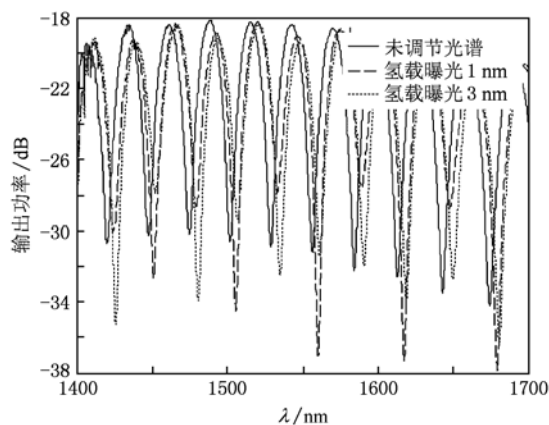


图 6 氢载 TCF 在激光功率为 7.5 W 时曝光 1 和 3 mm 的滤波光谱

4. 结 论

本文基于光纤耦合器的波长特性,从理论上分析了基于光纤耦合器的梳状滤波器的光谱特性,使用不同长度的、两芯间隔 12 μm 的 TCF 制作了不同峰值波长间隔的梳状滤波器,其消光比可以达到 25 dB. 首次提出使用 CO₂ 激光对其进行调节,这种调节会使滤波光谱向长波方向漂移,同时消光比和峰值幅度也可能发生变化. 通过使用氢载光纤及比较不同功率的调节结果,得到残余应力释放和熔融变形是本文中调节实验的两种主要机理的结论.

[1] Yuan L B, Yang J, Liu Zh H, Sun J X 2006 *Opt. Lett.* **31** 2692
 [2] Huang Y L, Dong X F, Li J, Dong X Y 2005 *Chineses J. Lasers* **32** 423 (in Chinese) [黄勇林、兴法、李杰、董孝义 2005 中国激光 **32** 423]
 [3] Rao Y J, Deng M, Duan D W, Zhu T 2008 *Sensors and Actuators A: Physical* **148** 33
 [4] Fang X J, Richard O. Claus 1995 *Opt. Lett.* **20** 2146
 [5] Feng S C, Xu O, Lu S H, Jian S S 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 064208

[6] Ashby S J, Charters R B, Love J D, Ladouceur F, Elisa M C 1997 *Electron. Lett.* **33** 1696
 [7] Atkins G R, Arkwright J W, Hewlett S J 1994 *Electron. Lett.* **30** 2165
 [8] Liu C Y, Ye H A, Cao X 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1623 (in Chinese) [柳春郁、叶红安、曹雪 2006 光学学报 **26** 1623]
 [9] Fan X M, Zheng Y, Sun Q B, Wang G J, Zeng H X, Bing P B, Ren H Y 2008 *Laser and Infrared* **38** 541 (in Chinese) [樊心民、郑义、孙启兵、王冠军、曾灏宪、邴丕彬、任怀远 2008

- 红外与激光 38 541]
- [10] Wang Y P 2003 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing, Chongqing University) (in Chinese) [王义平 2003 博士学位论文 重庆: 重庆大学]
- [11] Kim B H, Park Y, Kim D Y, Paek U C, Han W T 2002 *OFC WA3* 173
- [12] Kakarantzas G, Dimmick T E, Birks T A, Le Poux R, J Russell P St 2001 *Opt. Lett.* **26** 1137

Comb-filter based on two core fiber coupler and its CO₂ laser trimming*

Jiang Wei-Wei[†] Fan Lin-Yong Zhao Rui-Feng Wei-Yan Pei-Li Jian Shui-Sheng

(*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing 100044, China*)

(Received 3 September 2010; revised manuscript received 18 November 2010)

Abstract

According to the wavelength characteristic of fiber coupler, its spectrum characteristics was analysed as a comb filter, and all-fiber comb-filter based on fiber couplers with different wavelength intervals were experimentally fabricated by splicing a section of single mode twin-core fiber (TCF) of different lengths between two single mode fibers (SMFs), and the extinction ratio is 25 dB. CO₂ laser was used to trim the wavelength firstly, which results in the spectrum shifting to long wavelength and the change of extinction ratio. The trimming is based on the mechanism of residual stress and melting deformation between fiber and CO₂ laser, and hydrogen-loaded TCF was used to improve the trimming efficiency.

Keywords: two core fiber coupler, comb-filter, CO₂ laser, residual stress

PACS: 42. 81. Qb, 42. 79. Gn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60837002).

[†] E-mail: 06111009@bjtu.edu.cn