

文章编号: 0258-7025(2007)08-1110-05

全光纤热光型可变光衰减器

张云聪, 陈哲, 江沛凡, 刘林和, 曾应新, 白春河

(暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632)

摘要 根据光纤包层中的倏逝场机制, 将具有热光效应的聚合物材料直接覆盖在侧边抛磨光纤上, 进行了全光纤热光型可变光衰减器(VOA)的研究。根据理论分析, 确定了在侧边抛磨光纤的抛磨区上覆盖材料的折射率与纤芯中光衰减量之间的关系, 为选择适当折射率的热光材料提供依据。设计适当的侧边抛磨区, 利用先进的轮式侧边抛磨技术, 制备了侧边抛磨光纤, 以达到最佳可变光衰减效果。采用螺旋电极和优化封装, 制作出性能优良的全光纤热光型可变光衰减器。性能测试表明, 器件插入损耗小于0.1 dB, 衰减范围为0~80 dB, 偏振相关损耗小于0.02 dB, 背向反射大于70 dB。该方法制作的全光纤热光型可变光衰减器具有可用电驱动调控、可靠性高等优点。

关键词 光学器件; 可变光衰减器; 侧边抛磨光纤; 热光材料; 全光纤器件; 电极

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

All-Fiber Thermo-optical Variable Optical Attenuator

ZHANG Yun-cong, CHEN Zhe, JIANG Pei-fan,
LIU Lin-he, ZENG Ying-xin, BAI Chun-he

(Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract Based on evanescent wave theory, the all fiber thermo-optical variable optical attenuator (VOA) made of side-polished fiber overlaid with thermo-optical polymer material was studied. The relation between the refractive index of overlaid polymer material on the polished section of side-polished fiber and optical loss in the core was derived to help select thermo-optical material with suitable refractive index for VOA. Proper side-polished section was designed, and advanced wheel side-polished technique was used to fabricate side-polished fibers and achieve an optimal variable loss effect of VOA. An excellent all-fiber thermo-optical variable optical attenuator with helical electrode and optimized packing was fabricated. The test result of the all fiber thermo-optical VOA showed that it had insertion loss less than 0.1 dB, loss range of 0~80 dB, polarization dependent loss less than 0.02 dB, and back reflection over 70 dB. The all-fiber thermo-optical VOA fabricated by this means can be controlled electrically with high reliability.

Key words optical devices; variable optical attenuator; side-polished fiber; thermo-optical material; all optical fiber device; electrode

1 引言

可变光衰减器(VOA)是光纤通信中基本的无源器件之一, 广泛用于波分复用(WDM)光纤网络中, 主要是实现系统中各信道间光功率的均衡, 例如用平面波导制作的热光型可变光衰减器^[1,2]。可电

控的可变光衰减器对智能化光网络的运行管理维护具有很重要的应用价值。随着通信技术的发展, 追求低成本高性能的可变光衰减器成为研究的重点。全光纤器件为这种需要提供了一种优良的技术方案。制作全光纤器件的基础之一就是侧边抛磨光纤。侧边抛磨光纤是在普通通信光纤上, 利用光学

收稿日期: 2006-10-26; 收到修改稿日期: 2007-03-29

基金项目: 广东省科技攻关重大专项(2004A10602001)和声场与声信息国家重点实验室(2004001)资助项目。

作者简介: 张云聪(1982—), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 主要从事全光纤热光型可变光衰减器方面的研究。

E-mail: yuncong417@163.com

导师简介: 陈哲(1957—), 男, 广东人, 教授, 主要从事光纤无源器件、光纤通信、光纤传感技术、光电检测方面的研究。

E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

微加工技术,在一段长度上将圆柱形的光纤包层抛磨掉一部分所制成的光纤^[3]。

传统的制备侧边抛磨光纤方法主要是带弧型槽基底的光纤侧边抛磨法^[4~9]。这种方法由于需要用环氧树脂胶将光纤固定在 V 型槽中,因而工艺较复杂,而且抛磨工艺过程较长,不利于批量生产。先进的轮式侧边抛磨技术^[3,10,11]工艺简单,可按设计要求制备所需的光纤侧边抛磨区,可以满足多种全光纤器件的需要^[10,11]。

本文将热光材料与侧边抛磨光纤结合,即将具有热光效应的聚合物材料直接覆盖在侧边抛磨光纤上,构成可控制光纤芯中传输光泄漏的复合波导结构,制成了全光纤热光型可变光衰减器^[1]。

2 基本原理

通常,足够厚度的光纤包层保证了在纤芯中传播的光场,以及在光纤包层中倏逝波场的能量不会泄漏到光纤外部。当用抛磨的方法使光纤的包层厚度减小到倏逝波场存在的区域,也就是距纤芯仅几个微米的区域时,就形成了一个纤芯中传输光的倏逝波场的“泄漏窗口”。在此“窗口”处,人们就有可能利用倏逝场来激发、控制、探测光纤纤芯中的传输光波的无损传播或泄漏。因为是利用侧边抛磨光纤包层中的倏逝场原理做成器件或传感器,所以制成的器件也称为光纤倏逝场器件^[3,6~9]。

在侧边抛磨光纤的抛磨区域,用聚合物热光材料包裹住,并在其中埋入电极,通过电极加热改变温度可以引起器件中热光材料温场的改变,并由有机聚合物的热光特性引起波导的有效折射率随温度变化而变化,从而导致由光纤纤芯、光纤包层以及热光材料等共同构成的热光复合波导的传输特性的改变。依靠这种方法可以控制光纤芯模的传播和泄漏。其器件的工作原理如图 1 所示,图中在光纤的侧边抛磨区覆盖有热光材料,其折射率的改变,使纤

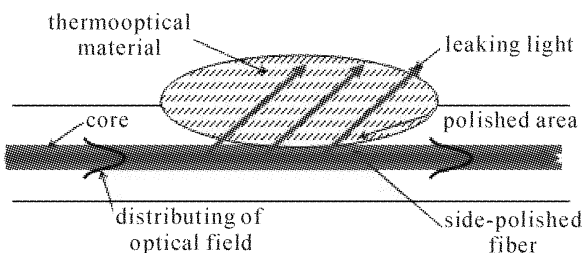


图 1 全光纤可变光衰减器原理示意图

Fig. 1 Schematic of all-fiber thermo-optical variable optical attenuator

芯中传输的光能泄漏到光纤外部。全光纤热光型可变光衰减器的器件结构如图 2 所示,图中在覆盖有热光材料的区域上缠绕着加热用的电阻丝。

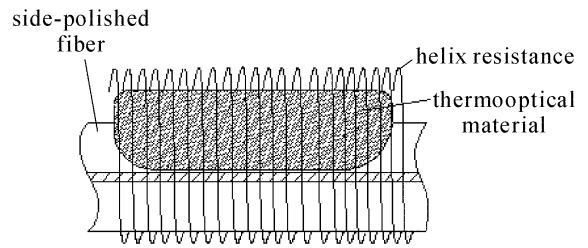


图 2 全光纤可变光衰减器结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of all-fiber thermo-optical variable optical attenuator

3 理论分析及实验

3.1 侧边抛磨光纤波导的理论分析

针对侧边抛磨光纤的 D 形边界条件,建立了全光纤热光型可变光衰减器的器件模型,用三维有限差分光束传输法计算了侧边抛磨光纤波导的光功率传输特性,分析了抛磨区域覆盖材料的折射率与透光衰减量之间的关系,理论计算曲线如图 3 所示^[12](抛磨长度为 9 mm,剩余包层厚度为 3 μm ,根据设计要求选择剩余包层厚度,不同的剩余包层厚度决定着器件的衰减范围)。

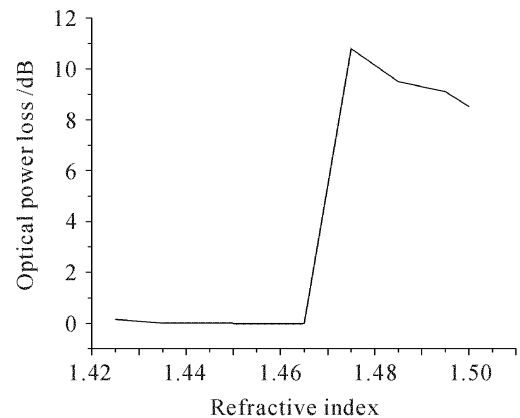


图 3 抛磨长度为 9 mm 时,光功率衰减随聚合物层折射率变化的理论计算曲线

Fig. 3 Calculated curve of optical power loss as a function of refractive index of overlaid polymer, as the polished fiber length is 9 mm

图 3 中,当聚合物折射率小于 1.465 时,光功率的衰减近似为零,而当聚合物折射率逐渐增大至 1.475 时,曲线逐渐上升至最高点,光功率衰减开始增大至最大值,当聚合物折射率大于 1.475 时,曲线下降,衰减逐渐减小。图 3 的理论曲线表明,选择折

射率在1.45~1.48范围内变化的材料覆盖在光纤的侧边抛磨区,纤芯中会产生变化衰减量的效应。因此,可利用具有可变化折射率的材料以及侧边抛磨光纤制备光纤可变光衰减器。

3.2 抛磨区域折射率变化实验

为选定在抛磨区覆盖适当的热光材料,采用在由轮式侧边抛磨法^[10]制备的侧边抛磨光纤的抛磨区域覆盖折射率液体的方法,进行折射率变化对光能量影响的实验(抛磨长度为22 mm,剩余包层厚度为3 μm),所得曲线如图4所示。

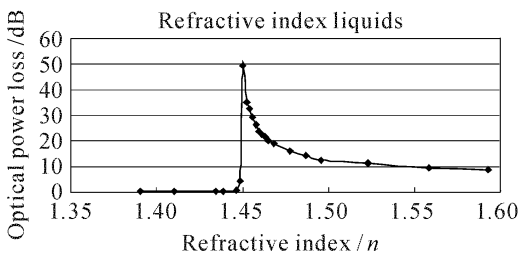


图4 侧边抛磨光纤覆盖折射率液滴的实验曲线

Fig. 4 Experimental result of the optical power loss of the fiber as a function of refractive index with refractive index liquids overlaid on the side-polished fiber

图4中,当覆盖材料的折射率在 $n = 1.45$ 时,衰减量到达峰值,可达50 dB以上。当折射率自 $n = 1.45$ 减小时,衰减量迅速下降,在 $n = 1.43$ 时衰减量几乎变为0,即几乎完全通光。当折射率自 $n = 1.45$ 增大时,衰减量下降较缓,在 $n = 1.59$ 时衰减量仍有9 dB。该实验曲线与图3的光纤中光功率衰减趋势相吻合,二者在具体数值上的不同是所取器件的参数不同引起的,但这并不影响二者趋势的比较(由于理论工作和实验工作分别由不同工作者完成,理论工作在先,实验工作在后,理论工作所采用的参数在实验中难以实现,所以只能将其变化趋势作为理论依据)。因此,选取折射率在 $n = 1.45$ 附近的热光材料来制作全光纤可变光衰减器。经过大量筛选,选取了热光系数为 $dn/dT = -3.3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (当工作波长为1554 nm,温度为22 $^\circ\text{C}$ 时折射率为1.4600)的固体聚合物材料制作可变光衰减器^[13,14]。

3.3 器件的制作及测试

为达到最佳可变光衰减效果,设计适当的侧边抛磨区,利用先进的轮式侧边抛磨技术,制备了侧边抛磨光纤。选用V型槽作为光纤的固定和支撑架,在其中放入侧边抛磨光纤,并用具有热光特性的聚

合材料覆盖。将电极螺绕在V型槽外部,作为聚合物固化热源及引起热光效应的温度控制装置。固化后的器件如图5所示,器件长30 mm,直径3 mm。

对固化后的器件进行光纤中传输光功率的衰减测试。首先,利用恒温箱控制器件温度,测量衰减量,获得了器件温度与衰减量之间的关系。器件的衰减量随覆盖材料的温度变化的实验结果如图6所示,在室温时,器件已经具有35 dB的衰减量,随着温度的逐渐增加,器件的衰减量也增加,但增加值小于10 dB。当温度大于30 $^\circ\text{C}$ 以后,衰减迅速增加,到40 $^\circ\text{C}$ 达到最高值(约70 dB),其后,温度继续增加,衰减量又迅速减小,温度大于50 $^\circ\text{C}$ 以后,衰减降到几乎为零,成为通光状态。



图5 固化后的器件实物图

Fig. 5 Picture of the attenuator after solidification

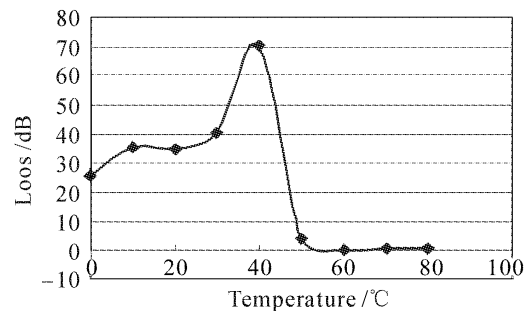


图6 可变光衰减器件衰减量随器件温度变化实验
(测试器件编号为VOA06051001ZY)

Fig. 6 Experimental result of attenuation of a VOA as a function of temperature
(the serial number of attenuator is VOA06051001ZY)

其次,通过控制电阻丝中的电流来控制覆盖的聚合物热光材料的折射率,从而获得控制电流与衰减量之间的关系。对其中一个器件的电流控制实验如图7所示。采样间隔为0.04 A。由于该材料为负热光系数材料,因此随着电流的增大,器件温度上升,覆盖材料的折射率下降,即图中横轴正方向为折射率减小的方向。由于采用的光功率计最大读数为-80 dB,所以实际器件的衰减可以达到80 dB以上。该实验结果与3.1节的计算和3.2节中的折射率液实验结果的趋势相吻合,三者在具体数值上的不同是所取器件的参数不同引起的。实验表明,不同的

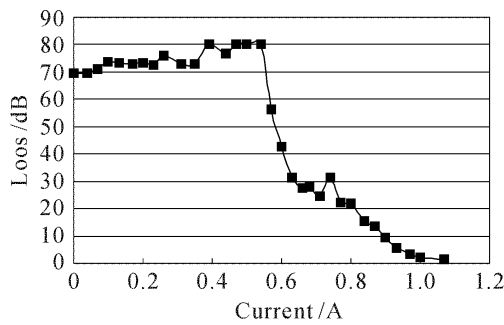


图7 可变光衰减器件衰减量随电阻丝中的电流变化实验

(测试器件编号为 VOA06062301ZY)

Fig. 7 Experimental result of attenuation of a VOA as a function of electrical currents in resistance wire (the serial number of attenuator is VOA06062301ZY)

电极尺寸,产生热光效应的效率是不同的。

实验结果表明,由此方法制作的全光纤热光型可变光衰减器可以达到的指标是,器件插入损耗小于0.1 dB,衰减范围大于0~80 dB,偏振相关损耗小于0.02 dB,背向反射大于70 dB(器件的性能经信息产业部通信产品防护性能质量监督检验中心鉴定)。

3.4 器件封装及测试

为提高器件的可靠性和稳定性,对器件进行了特殊的外封装设计。将图5中完成聚合物材料固化的器件封装在充满导热胶的金属外壳内,并引出光纤两端和电极引脚,器件的外形尺寸根据具体的使用要求确定。

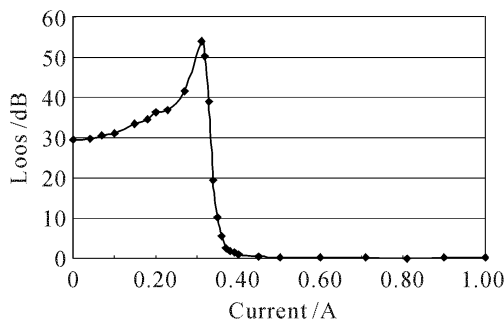


图8 封装后的器件性能测试曲线

(测试器件编号为 VOA06051001ZY)

Fig. 8 Test results of VOA device after packaging (the serial number of attenuator is VOA06051001ZY)

对进行了特殊外封装后的器件之一进行测试,测试结果如图8所示,与封装前的器件相比,封装后器件受外界的影响显著减小,衰减量变化稳定。当器件中所加的电流超过0.33 A时,衰减量稳步下降,通光功率逐步上升,最终达到插入损耗为0.1 dB

的通光状态。由于采用的电源精度为0.01 A,下降沿的采样点有限。如果选用更高精度的电源,将会使光功率衰减得到很好的控制。

4 结论

用侧边抛磨光纤替代了集成光学方法的晶体、硅基或聚合物波导材料,对光纤纤芯无破坏、光路中无插入元件,可与光纤系统直接融接,制成的全光纤热光型可变光衰减器既具有集成光学热光型可变光衰减器件可电控的优点,又没有机械型可变光衰减器对光纤纤芯的切断和机械驱动机构,提高了器件的可靠性,降低了成本,减小了器件的封装体积。

致谢 感谢张小康、叶晓靖对本实验工作的帮助。

参 考 文 献

- Li Ying, Jiang Xiaoqing, Li Xihua *et al.*. Polymer-based variable optical attenuator [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2004, **25**(5):557~561
李 鹰,江晓清,李锡华 等. 聚合物热光可变光衰减器[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(5):557~561
- Xie Xiaoqiang, Dai Xuhan, Zhao Xiaolin *et al.*. Research on an offset-type micro mechanical variable optical attenuator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):717~718
谢晓强,戴旭涵,赵小林 等. 位错型微机械可变光衰减器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):717~718
- Chen Zhe, Li Fengli, Zhong Jingang *et al.*. Side-polished fiber and its applications [C]. *Proceedings of National 12th Conference of Optical Fiber Communication and 13th Integrated Optics*, 2005. 407~412
陈 哲,李丰丽,钟金钢 等. 侧边抛磨光纤及其应用[C]. *全国第十二次光纤通信暨第十三届集成光学学术会议论文集*, 2005. 407~412
- Ni Ming, Hu Yongming, Chen Zhe *et al.*. A model and analysis of five layer optical waveguide of polarization maintaining fiber polarizer with metallic coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2):142~146
倪 明,胡永明,陈 哲 等. 金属覆层保偏光纤偏振器的五层波导模型及理论分析[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2):142~146
- Hu Yongming, Liao Yanbiao, Chen Zhe *et al.*. Manufacture of a double polarization structure of polarization maintaining fiber polarizer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6):741~743
胡永明,廖延彪,陈 哲 等. 双偏振结构保偏光纤偏振器的研制[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6):741~743
- Chen Zhe, Liao Yanbiao, Zhang Gongli *et al.*. In situ investigations of thermal poling process of optical fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):169~173
陈 哲,廖延彪,张工力 等. 光纤热极化过程的实时测试研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):169~173
- K. T. Kim, H. W. Kwon, J. W. Song. Polarizing properties of optical coupler composed of single mode side-polished fiber and multimode metal-clad planar waveguide [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**(6):37~42
- K. R. Sohn, J. W. Song. Thermooptically tunable side-polished fiber comb filter and its application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11):1575~1577
- K. H. Kim, S. Y. Shin, D. S. Choi. Vertically integrated

- thermo-optic waveguide switch using optical polymers [J]. *光学学报*, 2003, **23**(Suppl.):359~360
- 10 Jiang Peifan, Chen Zhe, Zeng Yingxin *et al.*. Investigations on optical propagation characteristics of side-polished fibers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(5):578~581
江沛凡, 陈 哲, 曾应新 等. 侧边抛磨光纤的光传输特性研究 [J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5):578~581
- 11 Zeng Yingxin, Chen Zhe, Jiang Peifan *et al.*. Thermal distribution of waveguide based on side-polished fiber surrounded by thermo-optic polymer [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(1):29~34
曾应新, 陈 哲, 江沛凡 等. 侧边抛磨光纤聚合物热光复合波导的稳态温场分析[J]. *应用激光*, 2006, **26**(1):29~34
- 12 Zeng Yingxin. Simulations and analysis of optical fiber devices based on side-polished fiber [D]. *Dissertation of Master's Degree of Jinan University*, 2006. 45~48
曾应新. 侧边抛磨光纤器件的仿真分析[D]. 暨南大学硕士学位论文, 2006. 45~48
- 13 Zheng Guoliang, She Weilong. A temperature insensitive design for electro-optic modulator and variable optical attenuator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1077~1080
郑国梁, 佘卫龙. 温度不敏感光电调制器和保偏光衰减器设计 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1077~1080
- 14 Yongsheng Zhang, Hui Ma, Tao Zhang *et al.*. Technical study of visible light wavelength division multiplexing using polymer optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(10):577~578