

文章编号: 0258-7025(2010)04-1047-06

全光纤集成化光功率监控器

陈 哲^{1,2} 覃家荣² 潘 昊² 张 军^{1,2} 肖雅婷² 余健辉^{1,2}

(¹ 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室(暨南大学), 广东 广州 510632)

² 暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

摘要 根据侧边抛磨光纤(SPF)倏逝波场泄漏机理,将可变光衰减器(VOA)与光功率监测器(OPM)集成在一段光纤上,研制成功了全光纤集成化光功率监控器(OPMC)。采用普通通信光纤作为波导基底,设计了基于双孔侧边抛磨光纤的光功率监控器的基本结构和制作工艺。在双孔侧边抛磨光纤的第一个侧边抛磨孔制作全光纤可变光衰减器,第二侧边抛磨孔制作全光纤光功率监测器,将二者集成制作在一段光纤上,成为可同时实现光纤中光功率的监测和控制双功能的一个全光纤集成化光电器件。实验表明,器件的典型值为插入损耗 0.7 dB,衰减范围 0~52 dB,波长相关损耗 0.2 dB,偏振相关损耗 0.17 dB,光电转换效率大于 100 mA/W。该全光纤集成化器件具有制作工艺简单、体积小、成本低、可实现电子控制等优点。

关键词 光学器件;光功率监控器;侧边抛磨光纤;集成化;全光纤

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1047

All-Fiber Integrated Optical Power Monitor-Controller

Chen Zhe^{1,2} Qin Jiarong² Pan Hao² Zhang Jun^{1,2} Xiao Yating² Yu Jianhui^{1,2}

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Educational Institutes (Jinan University), Guangzhou, Guangdong 510632, China

² Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract Based on the leakage and measurement of evanescent wave in side-polished fiber (SPF), an all-fiber integrated optical power monitor-controller (OPMC) is fabricated by integration of variable optical attenuator (VOA) and optical power monitor (OPM). Using common optical fiber as a substrate of waveguide, the structure of OPMC based on dual side-polished areas of side-polished fiber is designed, and its manufacture technique is developed. A VOA and an OPM are fabricated in the first and second polished areas of side-polished fiber, respectively. Both VOA and OPM are integrated in a section of optical fiber so as to become an all-fiber integrated photoelectronic component that has two functions of both monitor and controller. Experiments show that the typical characteristics of the integrated component are as follows: insertion loss of 0.7 dB, attenuation range of 0~52 dB, wavelength dependent loss of 0.2 dB, polarization dependent loss of 0.17 dB, photoelectric transition efficiency of larger than 100 mA/W, and so on. The all-fiber integrated component has many advantages, such as easy fabrication, small size, low cost, electric control, etc.

Key words optical device; optical power monitor-controller; side-polished fiber; integrated; all-fiber

1 引 言

光功率监控器(OPMC)是光网络以及全光网所需的关键器件之一,它可以同时对光网络各信道的光功率进行监测和控制。在光网络应用中,光纤中的光功率管理是一项重要的技术内容。以密集波分

复用系统中的信道光功率均衡为例,随着信道数目的增加,所需的光功率监控器数目也会不断增加,因此将这些原本分立的器件组合成模块甚至集成化是必要的。随着高速光通信的发展,对光纤通信系统中光功率的管理技术和管理成本提出了更高的要

收稿日期: 2009-09-20; 收到修改稿日期: 2009-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(10776009, 60877044)和广州市科技计划项目(2007Z2-D0091)资助课题。

作者简介: 陈 哲(1957—),男,博士,教授,主要从事新型光纤无源器件、光纤通信、光纤传感技术、光电检测技术、光学设计及光电系统计算机仿真等方面的研究。E-mail: thzhechen@163.com

求。全光纤集成化光功率监控器具有集成度高、尺寸小、性能好、价格低等优点,是满足这些更高要求的较理想器件。

目前光纤通信的光功率监控器主要有三类结构:第一类是光机结构器件,一般是由分立的微机电系统可变光衰减器(VOA)和光纤 Tap 耦合器组成^[1~3]。但分立元件的光学插入损耗较大,耗用电功率较大,同时由于技术复杂,目前成本仍较高;第二类是光波导结构器件,它是将光波导器件制备在晶体或半导体等衬底材料上^[4,5],但器件的制作成本较高,与光纤的耦合较困难,连接损耗较大;第三类为全光纤结构器件,直接以通信光纤本身为波导基底,再利用特殊工艺和辅助材料,使光纤波导中产生电光、磁光、声光、热光和波导耦合效应,从而实现光无源器件的应用功能^[6]。目前已经有全光纤的独立器件研制成功,例如全光纤 VOA^[7]。本文利用双孔侧边抛磨光纤(SPF)技术制作全光纤热光型 VOA 和光功率监测器(OPM),并将二者集成制作在一段光纤上,可同时实现光纤中光功率的监测和控制功能,成为具有双功能的全光纤集成化光电器件。

2 基本原理

通常,足够厚度的光纤包层保证了在光纤纤芯中传播的光场,以及在光纤包层中倏逝波场的能量不会泄漏到光纤外部。当用侧边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,可以利用倏逝波场来监测、控制光纤纤芯中传输光波的无损传播或泄漏^[8~10]。如果在抛磨区内覆盖聚合物材料,则聚合物材料、光纤剩余包层、光纤纤芯等构成复合波导。当聚合物的折射率变化时,复合波导的边界条件也随之改变,剩余包层中的倏逝波场会引起纤芯内传输光功率的泄漏,而泄漏的大小则与聚合物的折射率变化相对应,根据此原理,可以制作成可变光衰减器^[7,11~13],如图 1 所示。如果在

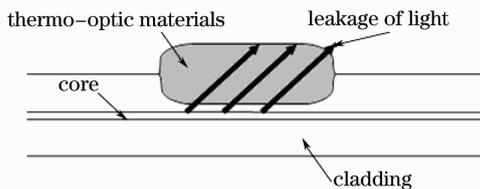


图 1 基于侧边抛磨光纤的 VOA 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the VOA based on an SPF

抛磨区附近放置光电探测器,通过特殊的封装技术,可以根据倏逝波场的变化监测纤芯内光场的变化,从而实时监测光纤中光功率的大小而制成 OPM^[14],如图 2 所示。

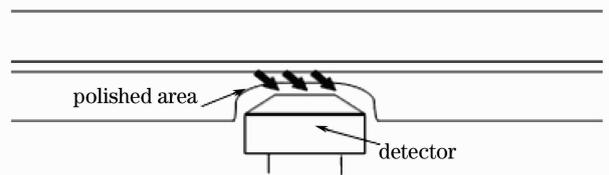


图 2 基于侧边抛磨光纤的 OPM 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the OPM based on an SPF

光功率监控器主要由 3 个元件构成:VOA,分光结构和光电探测器。光功率监控器的工作原理是:1) VOA 对光路内的光功率按照光功率管理要求进行衰减,从而实现对光路内光功率大小的控制;2)经过衰减后的光进入分光结构,分光结构把光路内传输光功率中的一小部分分离出光路,目前常用光纤耦合器来实现分光功能。分出来的这部分光作为光监测信号被耦合到光电探测器上,由于光监测信号的大小与光路内的传输光功率大小成固定比例关系,因此通过监测这一部分光信号就能有效地在线监测光路内光功率的大小;3)根据对光路内光功率的在线监测结果,实时对 VOA 的衰减量进行调节,从而使得光路内的光功率大小始终保持在光网络的设计要求范围内。如上所述,分光结构与光电探测器结合,能够实现对光路内光信号的监测,将分光结构与光电探测器这两个元件结合就构成了 OPM。因此光功率监控器也可看作是由 VOA 与 OPM 组合在一起构成的,通常这种方式的组合是利用光纤熔接的方式来实现的。

光功率监控器的集成化则是指在单一的基底上加工出实现光功率监控所需的衰减和监测两个不同功能的器件。本研究中提出的用于集成化的基底本身就是光纤,直接在光纤上制作 VOA 和 OPM。其中 OPM 的分光结构与传输光纤集成在一起,无需加入分立耦合器进行分光。研究中所采用的侧边抛磨光纤是用轮式光纤侧边抛磨法加工而成的^[15]。全光纤集成化光功率监控器是将 VOA 与 OPM 集成在一段光纤基底上的器件,它并不是简单地把分立的 VOA 和 OPM 用光纤熔接在一起,而是要在一段光纤上分别制作两段侧边抛磨光纤(SPF)——双孔侧边抛磨光纤,直接用侧边抛磨光纤替代集成光学方法中晶体、硅基或聚合物材料作为波导,制成的

全光纤集成化光功率监控器结构如图 3 所示。

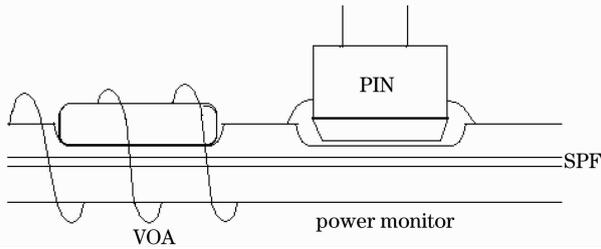


图 3 全光纤集成化光功率监控器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of all-fiber integrated OPMC

3 器件的实验制备

3.1 器件基底

作为全光纤集成化光功率监控器基底的双孔侧边抛磨光纤,对其结构进行设计时需要考虑 3 个因素:用于集成 VOA 的侧边抛磨区的形状和深度;用于集成 OPM 的侧边抛磨区的形状和深度;两个相邻侧边抛磨区之间的距离。实验证明^[7],侧边抛磨区内不同的包层剩余厚度决定了所制作出来的 VOA 的衰减范围,为了获得较大的衰减范围需要较小的包层剩余厚度(约数微米)以及一个较长的侧边抛磨区(1~2 cm)。而对于制作 OPM 的侧边抛磨区,它的侧边抛磨深度无需太深,长度也较短(小于 1 cm),但须确保侧边抛磨区在空气中衰减 0.3~0.5 dB,以便获得足够的分光。此外,对于 OPM,侧边抛磨区所泄漏的光功率在空间的分布中要尽可能集中,这样才能保证在侧边抛磨区泄漏光功率有限的情况下有足够的光功率投射到探测器的光敏面上。实验证明^[14],通过改进侧边抛磨区形状可以满足上述要求:在侧边抛磨区内制造一个“V”型凹陷区域,使得在泄漏光功率不变的情况下,泄漏光集中在凹陷区域内出射。

考虑到热光型 VOA 温场对 OPM 的影响以及光纤侧边抛磨质量的控制需要,选择两个抛磨区的间隔距离约为 15 mm,这样一方面可以减小 VOA 对 OPM 的影响,另一方面可以保证两个抛磨孔都可以采用光功率监控方法控制抛磨深度,以取得符合制作集成器件要求的优质侧边抛磨区。在一段光纤上制作一个侧边抛磨区已经有较成熟的技术^[15],然而在几十毫米的光纤长度范围内制作两个侧边抛磨区则需要新的工艺技术和设备,经过研究,解决了相关的工艺技术难题。所采用的是普通单模通信光纤,制作的双孔侧边抛磨光纤用细丝测厚仪测出来的剩余厚度曲线如图 4 所示。

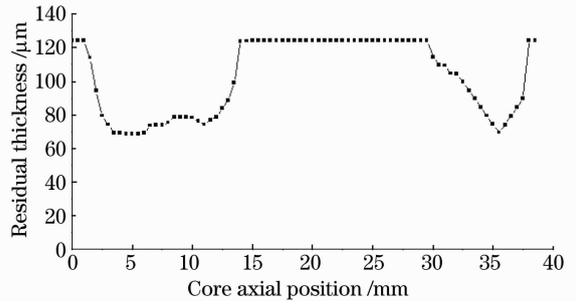


图 4 用于集成化光功率监控器基底的双孔侧边抛磨光纤的测厚曲线

Fig. 4 Measured curve of the side polished depth of a double-window SPF

图中左端的孔为制作 VOA 的侧边抛磨区,其底部到纤芯表面的距离为 1~8 μm ,可以保证有足够的光泄露出去,侧边抛磨区域长度大约为 11 mm,满足设计要求。右端的孔为制作 OPM 的抛磨区,为了使泄露的光功率分布集中,抛磨区设计得较短,且使得其剩余厚度分布如图 4 中所示呈“V”型凹陷状,抛磨后造成抛磨区损耗的光泄露主要存在于凹陷的区域,该区域集中了大部分的泄漏光功率,其抛磨区域的底部到纤芯的距离为 3 μm 。实验测试表明,这种结构的 OPM 抛磨区在空气中的衰减约为 0.4 dB,符合设计要求。

3.2 器件的制备及封装

在制作好的双孔侧边抛磨光纤基底的两个侧边抛磨区上分别制作 VOA 及 OPM。

研究中制作的 VOA 为基于侧边抛磨光纤的全光纤热光型 VOA,在侧边抛磨光纤的抛磨区域上覆盖折射率可变的材料可以将光纤内的传输光波耦合离光纤,不同折射率会产生不同的衰减量^[7,11]。将聚合物热光材料覆盖于侧边抛磨的抛磨区,并在抛磨区域缠绕热电极,利用热光效应改变聚合物的折射率实现光纤中传输光波的可调衰减。当改变热电极电流时,器件中聚合物热光材料的温场会随之改变,其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^[13,16]。依靠这种方法可以控制光纤芯模的传播和泄漏。实验中,选用“U”型槽作为光纤的固定和支撑架,将双孔侧边抛磨光纤的 VOA 抛磨区固定在“U”型槽上;将直径为 0.13 mm 的电阻丝螺绕在“U”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;将热光系数为 $dn/dt = -3.3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的聚合物材料注入“U”型槽,使抛磨区被聚合物材料彻底覆盖,并

用螺绕电极加温对热光材料进行固化。图 5 为上述工序完成后的器件实例图,图中左端为 VOA,右端为待加工 OPM 的抛磨区。

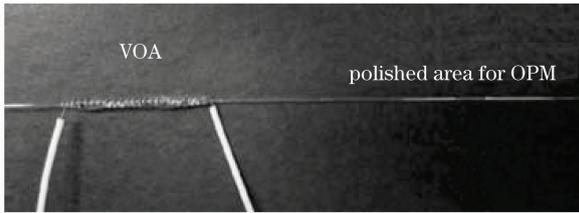


图 5 将 VOA 集成制作在第一个侧边抛磨窗口

Fig. 5 VOA integrated at the first side-polished window

随着抛磨区上方覆盖材料折射率的变化,抛磨区泄漏光功率相对于光纤轴向的出射角度也变化。当覆盖材料折射率接近于空气的折射率(1.0)时,出射角最大接近 80° ^[14]。根据上述原理,设计用于集成化的 OPM 的结构如图 2 所示,选用未封装光学窗口的光电探测器芯片的光敏面置于抛磨区正对光泄漏窗口,在抛磨区内寻找最佳光泄漏位置。找到最佳位置后,将光电探测器芯片的光敏面与光纤固定在一起,然后进行金属壳密闭封装,以保护光电探测器芯片和侧边抛磨光纤不受环境污染,减小噪声影响。制作的集成器件内部结构照片如图 6 所示。

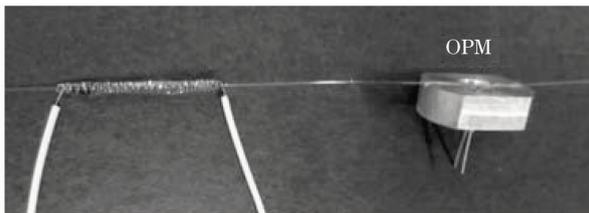


图 6 将 OPM 集成制作在第二个侧边抛磨窗口

Fig. 6 OPM integrated at the second side-polished window

热光型 VOA 是一种温控型器件,它通过控制覆盖于抛磨区的热光材料的温度来实现不同的衰减量,因此外界温场的变化对它的输出稳定性会造成影响。实验证明,通过封装可以有效减小这种影响^[7]。对于 OPM 而言,光纤与光电探测器相对固



图 7 封装完成后的光功率监控器

Fig. 7 Integrated OPMC

定是它输出稳定的关键,一旦光电探测器的光敏面偏离光泄漏区,OPM 的光电特性将受到很大影响,因此需要进行封装避免光纤和光电探测器受外界影响而产生相对位移。图 7 是器件完成整体封装后的示意图,通过外部接线可实现电子控制^[17]。

3.3 器件的测试及分析

对封装制作好的全光纤集成化光功率监控器进行了衰减范围、光电响应特性、波长相关损耗、偏振相关损耗的测试。

实验布置如图 8 所示,逐渐加大稳定电源对器件的输入电流,并记录光功率计显示的器件输出光功率值,得到图 9 中的曲线。图 9 表明,VOA 全通时所需驱动电流约为 150 mA;该全光纤集成化光功率监控器的最大衰减的典型值为 52 dB,最大可达 80 dB;插入损耗的典型值约为 0.7 dB,而分立器件 VOA 的典型插入损耗小于 0.3 dB,OPM 的插入损耗为 0.3~0.5 dB,因此认为集成化后的插入损耗就是两个器件的插入损耗之和,集成化过程并没有造成插入损耗的增加,该集成化全光纤光功率监控器的插入损耗在可接受范围内,已经可满足目前光网络系统的使用要求。

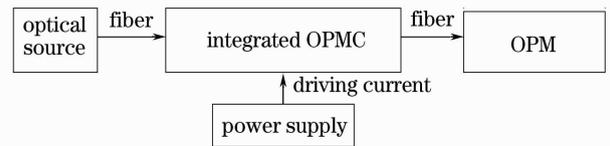


图 8 衰减特性测试示意图

Fig. 8 Setup for measurement of attenuation of component

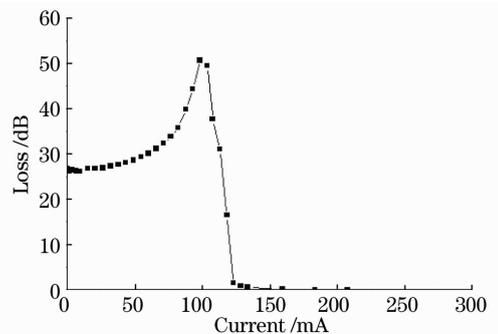


图 9 控制电流与衰减的关系曲线

Fig. 9 Attenuation of component versus the electric current of electrode to control the component

为评价全光纤集成化光功率监控器的光电特性——光电转换效率(η),定义全光纤集成化光功率监控器的光电转换效率为光电探测器收集侧边抛磨区泄漏光功率所产生的电流与光功率监控器中光传输功率损耗的比值,其数学表达式为

$$\eta = \frac{i}{P_{in} - P_{out}} = \frac{V}{R(P_{in} - P_{out})}, \quad (1)$$

式中 i 为探测器由光电效应产生的光电流, P_{in} 和 P_{out} 分别为集成化器件输入端和输出端光功率, 此二者之差即为插入损耗(等于器件的分光光能与器件的附加损耗之和), R 为光电探测器串联电阻, V 为光功率监控器输出响应电压。光电转换效率的单位为 A/W, 可见, 光电转换效率越大, 则光功率监控器的光电探测器从侧边抛磨区收集的泄漏光功率越多, 收集效率也就越高, 因此监控器性能越好; 反之器件性能较差。本测试中的光电转换效率使用(1)式这一定义, 在已知光电探测器串联电阻($R = 100 \text{ k}\Omega$)、集成器件输入光功率($P_{in} = 2.5 \text{ mW}$)的情况下, 对 V, P_{out} 进行测量, 根据(1)式计算出全光纤集成化光功率监控器的光电转换效率, 测量结果得到光电转换效率大于 100 mA/W 。从图 10 可以看出光电探测器件对光纤中传输光功率的测量线性特性好, 这说明光电探测器与光纤抛磨区封装对准好, 且位置固定、耦合效率一致, 探测器的光电输出能够随光功率输入同时变化, 此全光纤集成化光功率监控器可很好地应用于监测光纤中传输的光功率。

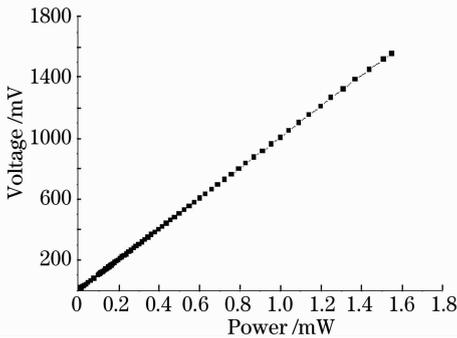


图 10 监控器的光电响应曲线

Fig. 10 Output optical power of component versus detected optoelectric voltage from the component

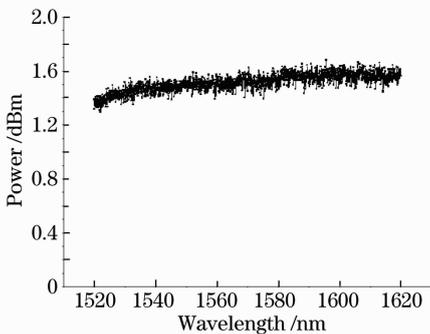


图 11 不同波长下的输出光功率曲线

Fig. 11 Output optical power of component versus wavelength of light in the fiber core

图 11 为集成器件在不同波长下测得的光功率曲线, 算得波长相关损耗为 0.2 dB , 且测得器件偏振相关损耗为 0.17 dB 。

4 结 论

通过轮式光纤侧边抛磨法, 可以制备一段光纤上的双孔侧边抛磨光纤, 并以此为基底, 成功制作同时集成可变光衰减器和光功率监测器功能的全光纤集成化光功率监控器。所制备的双孔侧边抛磨光纤两孔之间的间隔约为 15 mm , 可有效避免 VOA 和 OPM 之间的不利影响。第一个侧边抛磨孔其底部到纤芯的距离为 $1 \sim 8 \mu\text{m}$, 侧边抛磨区域约为 11 mm , 保证了制作 VOA 可有效地进行光纤芯中的光功率衰减。第二侧边抛磨孔其抛磨区域底部到纤芯的距离为 $3 \mu\text{m}$, 抛磨区剩余厚度分布呈“V”型凹陷状, 保证了光纤中大部分的泄漏光集中在凹陷区域, 并被光电探测器芯片接收, 因此可有效地进行光功率监测。通过慎密的器件封装, 有效地减小了 VOA 和 OPM 之间的热互扰, 提高了集成化器件的机械强度, 保证了光电耦合效率的一致, 可实现泄漏光功率的线性测量。测试表明, 该器件典型值为: 插入损耗 0.7 dB , 衰减范围大于 50 dB , 光电转换效率大于 100 mA/W , 波长相关损耗 0.2 dB , 偏振相关损耗 0.17 dB 。

该全光纤集成化光功率监控器直接以普通通信光纤替代集成光学方法中所用的晶体、硅基或聚合物等材料作为波导基底, 用侧边抛磨方法加工出双孔侧边抛磨光纤, 实现了热光型 VOA 和 OPM 的集成化, 成功制作出全光纤的集成化器件。该器件具有体积小、成本低、可电动控制等优点, 在光网络在线监控中具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 H. Cai, X. M. Zhang, C. Lu *et al.*. MEMS variable optical attenuator with linear attenuation using normal fibers [C]. Proceedings of the 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. 1171~1174
- 2 H. Veladi, R. R. A. Syms, H. Zou. Low power, high extinction electrothermal MEMS iris VOA [C]. *SPIE*, 2006, **6186**: 61860J
- 3 F. N. Ghauri, N. A. Riza. Super high-performance MEMS fiber optic variable optical attenuator (VOA) for aerospace & commercial applications [C]. *SPIE*, 2005, **5814**: 159~165
- 4 Liu Jiayong, Xu Ping, Xu Haidong *et al.*. Design and analysis of novel planar integrated optical correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1735~1739
- 刘加勇, 徐平, 徐海东等. 新型平面集成光学相关器件设计与分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1735~1739
- 5 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical

- attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674
 殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 671~674
- 6 I. P. Giles, M. Mondanos. Integrated all-fibre VOA power monitor module for fibre channel power control using a novel fibre substrate approach[C]. *SPIE*, 2005, **5825**: 593~601
- 7 Zhang Yuncong, Chen Zhe, Jiang Peifan *et al.*. All-fiber thermo-optical variable optical attenuator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1110~1114
 张云聪, 陈 哲, 江沛凡等. 全光纤热光型可变光衰减器 [J]. 中国激光, 2007, **34**(8): 1110~1114
- 8 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, China, 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
- 9 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
- 10 K. R. Sohn, J. W. Song. Thermo-optically tunable side-polished fiber comb filter and its application[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11): 1575~1577
- 11 Chen Zhe, Cui Fei, Zeng Yingxin. Theoretical analysis on optical propagation characteristics of side-polished fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 918~923
 陈 哲, 崔 菲, 曾应新. 侧边抛磨光纤波导传输特性的理论分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 918~923
- 12 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
- 13 Chen Zhe, Zeng Yingxin. Design of electrode for thermo-optic variable optical attenuator based on side polished fiber [C]. *SPIE*, 2009, **7157**: 715717
- 14 Zhang Lingtong, Chen Zhe. Spatial distribution of the optical power leaked from the side-polished fiber [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(1): 57~59
 张凌童, 陈 哲. 侧边抛磨光纤泄漏光功率空间分布研究[J]. 激光杂志, 2008, **29**(1): 57~59
- 15 Jiang Peifan, Chen Zhe, Zeng Yingxin *et al.*. 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
- 16 Chen Zhe, Liu Linhe. Temperature compensation of fiber Bragg grating based on side polishing and overlay [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 889~892
 陈 哲, 刘林和. 基于侧边抛磨与覆盖材料的光纤光栅温度补偿新方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 889~892
- 17 Pan Hao, Che Zhe, Zhang Yuncong *et al.*. Closed-loop control of all-fiber thermo-optical variable optical attenuator [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, **32**(3): 36~39
 潘 昊, 陈 哲, 张云聪等. 全光纤热光型可变光衰减器的闭环控制[J]. 光通信技术, 2008, **32**(3): 36~39