

doi:10.3788/gzxb20154406.0623003

氮氧化硅/聚合物混合集成低功耗可变光衰减器

宋倩倩¹, 雷建平², 陈开鑫¹

(1 电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 611731)

(2 四川省宜宾市 61902 部队, 四川 宜宾 644000)

摘 要: 利用具有相反热光特性的氮氧化硅与聚合物材料, 采用混合集成波导结构设计了一种低功耗 S 型可变光衰减器. 该衰减器以聚合物为芯层材料, 氮氧化硅为包层材料, 在弯曲波导上方制作加热电极从而通过热光效应来实现可调谐的衰减功能. 理论分析表明, 对于 1.55 μm 的工作波长, 衰减器实现 50 dB 的衰减仅需要 3.6 mW 的功率. 实验结果可实现 0~40 dB 的衰减范围, 相应的最大温度变化为 70.4 $^{\circ}\text{C}$, 器件插入损耗为 5.4 dB.

关键词: 可变光衰减器; 热光原理; 混合集成; 氮氧化硅; 聚合物; S 弯曲波导

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)06-0623003-6

Low Power Variable Optical Attenuator Utilizing Hybrid Integrated SiON/Polymer Channel Waveguide Platform

SONG Qian-qian¹, LEI Jian-ping², CHEN Kai-xin¹

(1 School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(2 61902 Unit of the PLA, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: By utilizing the opposite thermo-optic characteristics of silicon oxynitride and polymer materials, a hybrid integrated silicon oxynitride and polymer channel waveguide based variable optical attenuator with low power was proposed, which consisted of a polymer core and a silicon oxynitride cladding. A heater is deposited on the S-bend waveguide to form an active region so as to realize tunable optical power attenuation by utilizing thermo-optic effect. Theoretical results show that an optical attenuation of ~ 50 dB can be achieved with an applied electrical power of 3.6 mW. Experimental result shows an attenuation of 0~40 dB, correspondingly, a maximum temperature change of 70.4 $^{\circ}\text{C}$, and an insertion loss of 5.4 dB.

Key words: Variable optical attenuator; Thermo-optic effect; Hybrid integrated; Silicon oxynitride; Polymer waveguide; S-bend waveguide

OCIS Codes: 230.3120; 130.2755; 160.6840; 160.6840

0 引言

可变光衰减器 (Variable Optical Attenuator, VOA) 广泛应用于多信道波分复用网络中的信道功率均衡, 光自动增益均衡以及现代光纤通信系统中光接收机与光源的能量控制^[1-2]. VOA 器件根据制作技术可分为传统机械型^[3]、液晶型^[4]、微电机型^[5-6]和平面

光波导型^[7-13], 其中平面光波导 (Planar Lightwave Circuit, PLC) 型 VOA 是最近发展最快的分支, 具有速度快、体积小、更好的温度稳定性和易于集成的优点. 基于平面光波导技术的 VOA 可以有多种实现方式, 如马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometers, MZI)^[1,8]、电吸收调制^[9]、弯曲光波导^[10-12]等, 其中基于弯曲光波导的 VOA 更容易制作. 文献[10]提出的聚合

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61177054) 资助

第一作者: 宋倩倩 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为氮氧化硅与聚合物混合集成可变光衰减器. Email: 452344827@qq.com

导师 (通讯作者): 陈开鑫 (1972-), 男, 教授, 博士, 博导, 主要研究方向为集成光学. Email: chenlx@uestc.edu.cn

收稿日期: 2014-12-30; 录用日期: 2015-03-10

<http://www.photon.ac.cn>

物热光型 VOA 利用 S 弯曲波导结构来控制光传输,文献[11]中提出的基于弯曲波导的聚合物热光 VOA,需要 250 mW 驱动功率实现大于 40 dB 的衰减,文献[13]需要 20 mW 实现大于 20 dB 衰减。

聚合物材料可通过简单的旋涂方式成膜,且薄膜的光学性能优良,波导制作工艺简单成熟^[14-15]。本文设计了一种氮氧化硅(Silicon Oxynitride, SiON)与聚合物混合集成的低功耗 VOA。SiON 是一种光学性能优良的光波导材料,其折射率可通过控制其中掺入 N 的量来进行调节,且调节范围较大^[16-17]。与聚合物材料所具有的负热光效应不同的是, SiON 材料具有正的热光效应,本文所提出的 VOA 正是利用了两相反的热光效应,将 SiON 与聚合物分别作为波导的包层与芯层混合集成,并采用 S 型弯曲波导结构实现。

1 器件原理及设计

1.1 衰减器结构与工作原理

本文提出的 VOA 的基本结构如图 1,由输入输出直波导、S 型弯曲波导以及覆盖在 S 型弯曲波导上方的电极组成。经优化设计 S 型弯曲波导的参量可以实现当电极上未施加电驱动功率时,光通过 S 型弯曲波导时几乎没有弯曲损耗。当对电极上施加电功率后,由于聚合物的热光系数为负, SiON 材料的热光系数为正,在波导的垂直方向上产生的温度梯度使得聚合物芯层材料折射率减小, SiON 包层材料的折射率增大,从而导致弯曲波导的损耗增大,光信号通过该弯曲波导时便将由于弯曲损耗而实现衰减。显然,通过调谐施加在电极上的电功率,便可以实现不同的衰减。

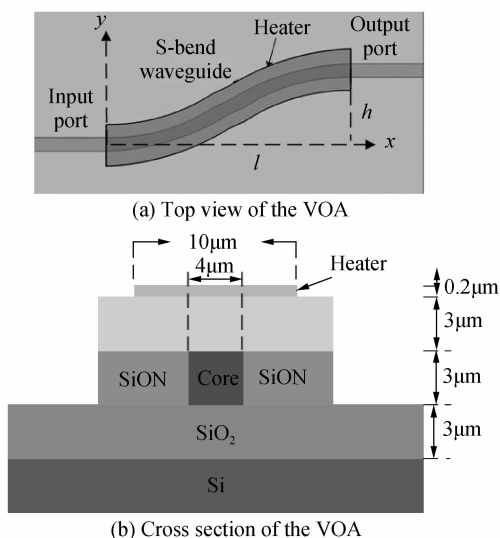


图 1 VOA 的结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed VOA

1.2 衰减器的基本结构设计

根据所提出的 SiON/聚合物混合集成可变光衰减

器的工作原理及图 1 中所示的波导截面结构,选择衰减器的中心工作波长为 1.55 μm。室温下,选择折射率为 1.559 0 的聚合物作为芯层材料,上包层为折射率为 1.540 0 的聚合物材料, SiON 为左右包层材料,由于 SiON 包层材料的折射率可通过控制其中掺入 N 的量来进行调节,且调节范围可从 1.45 到 2.0,因此对于给定的聚合物芯层材料,可通过调节 SiON 材料的折射率来优化器件设计从而降低功耗,聚合物芯层与 SiON 包层的相对折射率差为

$$\Delta_{13} = (n_1^2 - n_3^2) / (2n_1^2) \quad (1)$$

式中 n_1 为聚合物芯层材料折射率, n_3 为 SiON 包层材料折射率。根据器件工作原理及光波导弯曲损耗理论, Δ_{13} 越小,实现一定衰减所需的功耗越小,但相应的器件需要设计得越长以降低在无需衰减时的弯曲损耗,因此 Δ_{13} 的选取需要与器件的尺寸参量进行平衡。为此,选择 Δ_{13} 的值分别为: 0.008 9, 0.012 1, 0.015 3, 0.021 6, 其对应的 SiON 折射率分别是 1.545 0, 1.540 0, 1.535 0, 1.525 0, 利用有效折射率法设计得到对应聚合物单模波导的几何尺寸为: 高 3 μm, 宽 4 μm。根据所选取的单模波导尺寸,计算分析了如图 1(a) 所示的余弦型 S 弯曲波导的弯曲损耗特性。若弯曲波导的高度为 h , 长度为 l , 根据如图 1(a) 所示的坐标系,余弦型弯曲波导可以表示为

$$y(x) = \frac{h}{2} [1 - \cos(\pi x / l)] \quad (2)$$

相应的曲率半径为

$$R = \frac{2l^2}{\pi^2 h \cos(\pi x / l)} \quad (3)$$

弯曲波导损耗系数与半径的关系为^[18]

$$\alpha(R) = C_1 \exp(-C_2 R) \quad (4)$$

式中 C_1 与 C_2 是与半径 R 无关的常量。

$$C_2 = \frac{2\pi [2(N_{\text{eff}}^2 - n_3^2)]^{3/2}}{\lambda \sqrt{n_3}} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{2Z_c} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (6)$$

式中各参量定义为

$$Z_c = \frac{n_3}{2\lambda} \left[a + 2\zeta \cos\left(\frac{k_x a}{2}\right) \right]^2 \quad (7)$$

$$\zeta = 1 / (k_0 \sqrt{N_{\text{eff}}^2 - n_3^2}), k_x = k_0 \sqrt{N_1^2 - N_{\text{eff}}^2} \quad (8)$$

$$\epsilon_1 = \frac{a}{2} + \frac{1}{2k_x} \sin(k_x a) + \zeta \cos\left(\frac{k_x a}{2}\right) \quad (9)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\zeta}{2} \cos^2\left(\frac{k_x a}{2}\right) \exp\left(\frac{a}{\zeta}\right) \quad (10)$$

弯曲波导的传输损耗为

$$\alpha = \frac{20}{Ln10} \frac{C_1 l}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left[-\frac{C_2 l^2}{2\pi h} \sec(x)\right] dx \quad (11)$$

式中 k_0 为自由传播常量, N_1 等效为 y 方向受限的平

板波导的有效折射率.

图 2 示意了以上选定的 Δ_{13} 在不同弯曲高度下的弯曲损耗与弯曲长度的关系. 根据图 2, 当 l 依次大于

4 500 μm , 2 500 μm , 1 800 μm , 1 400 μm 时, 弯曲损耗可以忽略不计.

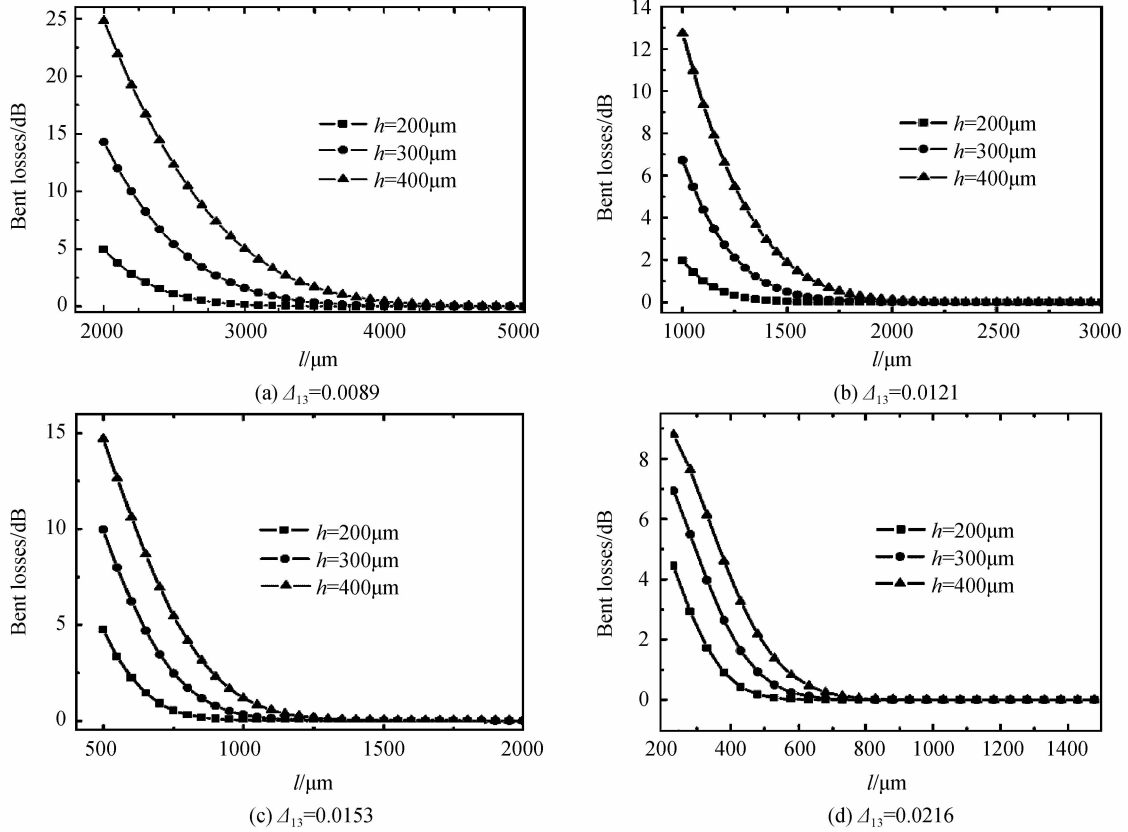
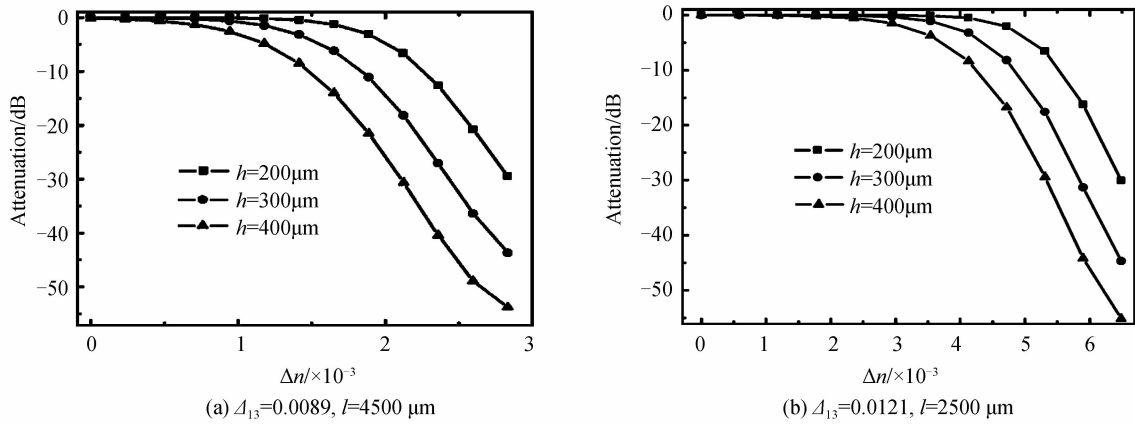


图 2 参量 Δ_{13} 与 h 取不同值时弯曲损耗与 l 的关系
Fig. 2 The relationship between bending loss and l at different Δ_{13} and h

当对 S 形弯曲波导上方的调谐电极施加一定电流后, 电极下方两种材料的温度都将增加. 由于 SiON 材料的热光系数大约是 1.08×10^{-5} , 而聚合物材料的热光系数大约是 -1.18×10^{-4} , 因此根据热光效应, SiON 的折射率将增加, 而聚合物材料的折射率将减小, 并且聚合物材料的折射率改变量 Δn 比 SiON 材料的折射

率改变量大约高一个数量级. 利用式 (2) ~ (11) 可计算得到, 对于不同的 Δ_{13} 对应的弯曲波导长度与不同的弯曲波导高度, 聚合物材料的折射率改变量 Δn 与 VOA 衰减量的关系如图 3. 由图 3 可知, 若取弯曲波导高度 h 为 400 μm , 在一定 Δn 下, 衰减范围可大于 50 dB.



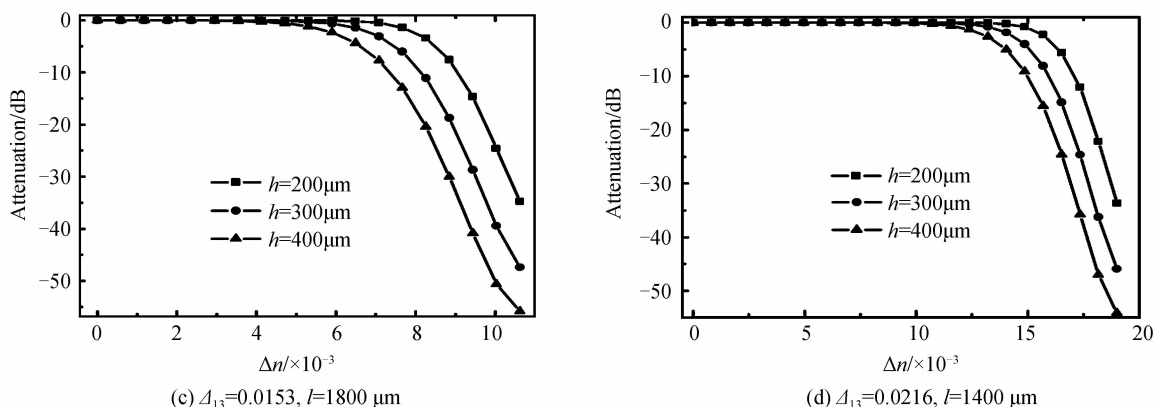


图 3 参量 Δl_3 , l 与 h 均取不同值时 VOA 衰减量与 Δn 的关系
 Fig. 3 Relationship of the attenuation of the VOA and Δn at different Δl_3 , l and h

图 4 给出了在 $h = 400 \mu\text{m}$ 时不同 Δl_3 及相应 l 对应的 VOA 衰减量与 Δn 的关系. 根据图 4, Δl_3 越小, 实现相同衰减量所需聚合物折射率变化量 Δn 越小, 对应的功耗也越小, 这与之前的理论预期是相符合的. 为了降低功耗, 但不至于极大地增大器件尺寸, 选择 $\Delta l_3 = 0.0089$, 其对应 SiON 折射率 $n_3 = 1.5450$, 此时器件的功耗将较小, 对应的 $l = 4500 \mu\text{m}$.

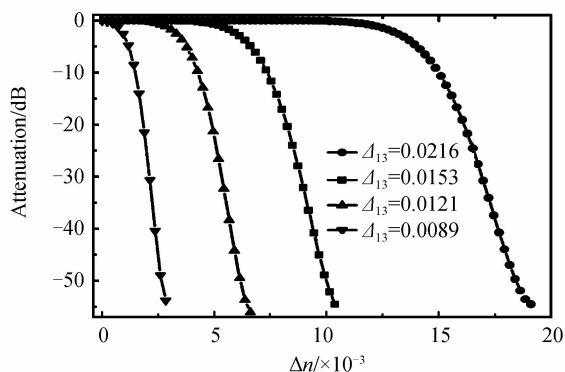


图 4 在 $h = 400 \mu\text{m}$ 时不同的 Δl_3 对应的 VOA 衰减量与 Δn 的关系
 Fig. 4 Relationship of the attenuation of the VOA and Δn at different Δl_3 and $h = 400 \mu\text{m}$

2 器件的功耗分析及仿真

根据图 1(b) 所示 VOA 的光波导截面图, 利用仿真软件建立热传导模型^[19], 模拟给定加热功率时, 横截面处的热分布特征, 见图 5. 此时电极所加功率为 3.6 mW , 聚合物芯层温度为 44.6°C , 模拟时电极的结构参量为长 $4500 \mu\text{m}$, 宽 $10 \mu\text{m}$, 厚 $0.2 \mu\text{m}$. 根据材料的热光系数可得加热电功率与聚合物材料折射率改变量 Δn 的关系, 如图 6. 由图 6 可知, Δn 与所加电极功率成正比. VOA 的衰减量与施加功率 P 之间的关系见图 7, 当电极上施加 3.6 mW 功率时, 器件能实现 50 dB 的衰减. 由于光波导的有效折射率具有波长相关性, 因此, VOA 的衰减特性也是波长相关的. 图 8 分别示意了不同工作波长下的衰减特性. 由图 8 可见在 C 波段

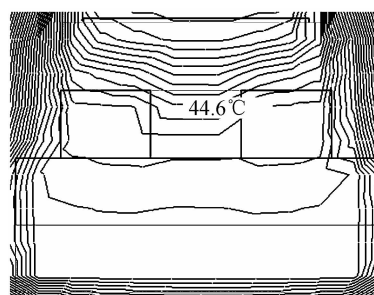


图 5 VOA 器件的光波导横截面热分布
 Fig. 5 Thermal profile of the cross section of the VOA waveguide

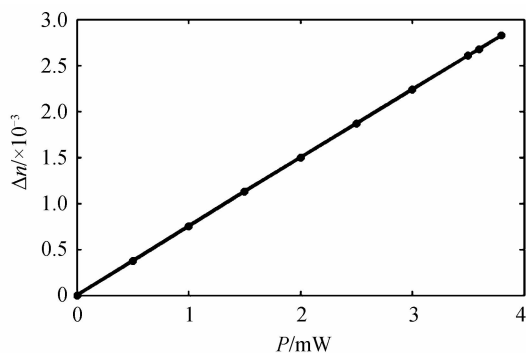


图 6 折射率改变量 Δn 与电极上施加功率 P 的关系
 Fig. 6 Relationship of Δn and the heater power P

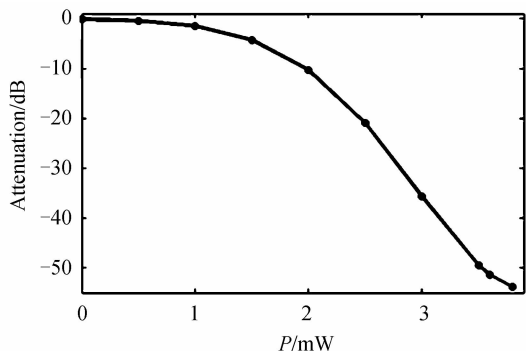


图 7 VOA 衰减量与电极上施加功率的关系
 Fig. 7 Relationship of the attenuation of VOA and the heater power

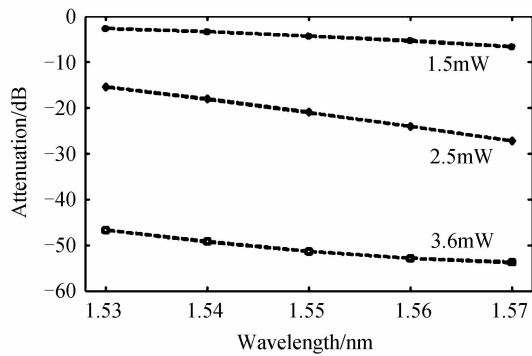


图8 在不同施加功率下,器件衰减与波长(1.53 μm ~1.57 μm)之间的关系

Fig. 8 The simulated attenuation in operating wavelength range of 1.53~1.57 μm for different heater power (1.53~1.57 μm),电极上施加功率为 1.5 mW 时,该 VOA 的衰减量随波长的最大变化值为 3 dB 左右,施加功率为 3.6 mW 时,衰减量随波长的最大变化值为 7 dB 左右.

当 VOA 输入输出直波导为 100 μm ,弯曲波导的长度 $l=4\ 500\ \mu\text{m}$,高度 $h=400\ \mu\text{m}$,电极未施加电压时,用 Rsoft BeamPROP 软件模拟得到 VOA 信号光功率的传输特性见图9(a),由图可见可实现较小的传

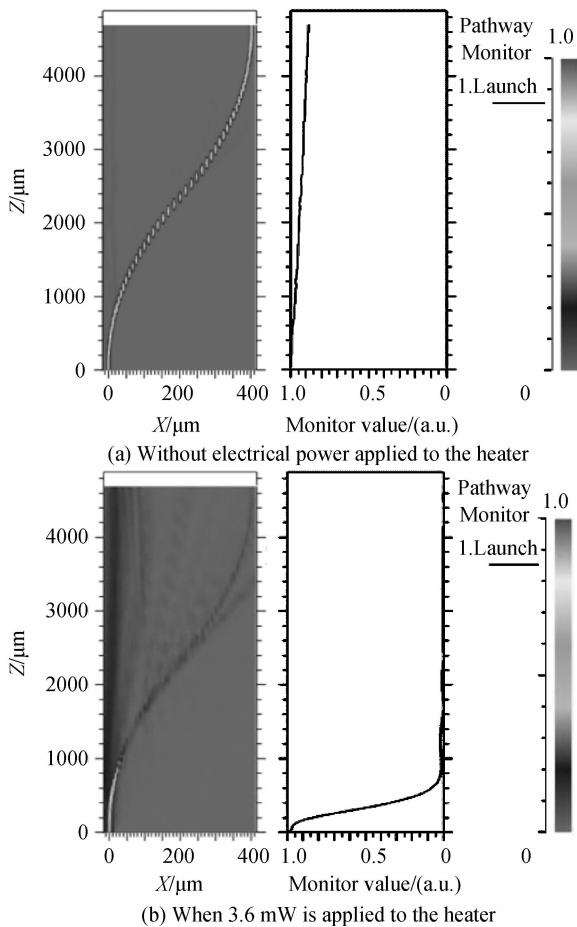


图9 BeamPROP 模拟 VOA 中光信号的传输

Fig. 9 BeamPROP simulation for the propagation of the optical signal

输损耗,其值 $\sim 0.5\ \text{dB}$.当电极施加功率 3.6 mW 时,由于热光效应以及弯曲波导辐射特性,光被限制在波导芯层的能力大大减弱,此时光信号在 VOA 中的传输特性如图 9(b),可见绝大多数光在弯曲波导处向外辐射,通过器件的光信号几乎衰减完全.

3 器件制作与测试

利用标准的光刻工艺并结合感应耦合离子刻蚀(ICP),制作了所建议的衰减器.首先在外协获得的含有 SiO_2 与 SiON 层的基片上利用光刻得到完整的衰减器的图形,之后通过 ICP 刻蚀将该图形转移到 SiON 层上并形成深 3 μm ,宽 4 μm 的槽,然后在槽内填充聚合物 Epoclad 形成波导芯部分.去除了多余的波导芯后旋涂上包层 BCB 形成厚度为 3 μm 的上包层.最后,通过改变环境温度的办法对制作的器件进行测试.图 10 示意了器件衰减量与环境温度变化量 ΔT 之间的关系.可见该器件可实现衰减范围为 0~40 dB,对应的最大温度变化为 70.4 $^\circ\text{C}$,插入损耗为 5.4 dB.由于测试的是环境温度的变化,所以没有获得功率与衰减量的关系.但是,初步制作的器件衰减量随温度变化趋势与理论结果是比较接近的.

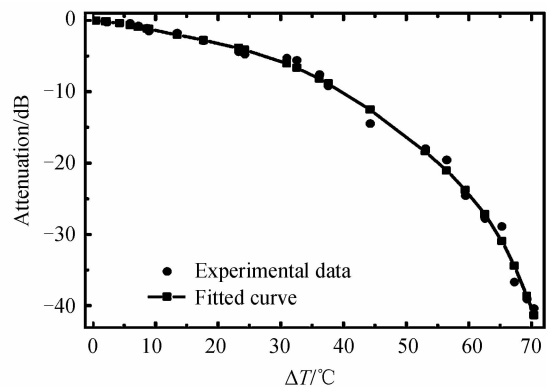


图 10 初步制作的 VOA 衰减量与 ΔT 的关系

Fig. 10 Relationship of the attenuation of the VOA and ΔT

4 结论

利用 SiON 与聚合物相反的热光效应,采用混合集成的方法,设计了一种低功耗的 S 型可变光衰减器,该衰减器具有较低的功耗,理论分析表明,在中心工作波长 1.55 μm ,器件实现 50 dB 的衰减仅需 3.6 mW 功率.初步制作的器件的衰减范围为 0~40 dB,对应的最大温度变化为 70.4 $^\circ\text{C}$,插入损耗为 5.4 dB.该器件具有衰减范围大、低功耗、插入损耗小、结构紧凑、便于集成等优点,这种低功耗的混合集成 VOA 器件在光通信网络中将具有良好的应用前景.

参考文献

[1] KE Xian-jun, WANG M R, LI Da-qun. All-optical controlled variable optical attenuator using photochromic sol gel material [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(9): 1025-

- 1027.
- [2] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Rong-qing. A variable optical attenuation based on liquid optical wedge [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1478-1481.
陈陶, 梁忠诚, 徐荣青. 可变透镜边沿模拟顶角可调棱镜的可变光衰减器[J]. 光子学报, 2013, **42**(12): 1478-1481.
- [3] BENNER A, PRESBY H M, AMITAY N. Low-reflectivity in-line variable attenuator utilizing optical fiber tapers [J]. *Lightwave Technology*, 1990, **8**(1): 7-10.
- [4] XU Y, UDDIN M A, CHUNG P S, *et al.* Fabrication of a polymer based variable optical attenuator using liquid crystal cladding on inverted channel waveguide structure [C]. Optoelectronics and communications conference, the 2008 Australian conference on optical fiber technology, OECC/ACOFT 2008, 1-2.
- [5] ZHANG X M, LIU A Q, LU C, *et al.* MEMS variable optical attenuator using low driving voltage for DWDM systems [J]. *Electronics Letters*, 2002, **38**(8): 382-383.
- [6] UNAMUNO A, UTTAMCHANDANI D. MEMS variable optical attenuator with vernier latching mechanism [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(1): 88-90.
- [7] NOH Y O, YANG M S, WON Y H, *et al.* PLC-type variable optical attenuator operated at low electrical power [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(24): 2032-2033.
- [8] HASHIZUME Y, INOUE Y, KOMINATO T, *et al.* Low-PDL 16-channel variable optical attenuator array using silica-based PLC [C]. Optical Fiber Communication Conference, OFC 2004, 1, WC4-WC4.
- [9] HAN Xiao-feng, WU Ya-ming. A novel variable optical attenuator based on SOI material [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2004, **10**(3): 355-358.
韩晓峰, 吴亚明. 一种基于 SOI 材料的直波导可调谐光衰减器 [J]. 功能材料与器件学报, 2004, **10**(3): 355-358.
- [10] LU Ying-Tsung, GUO Huang-chen, WANG Hseng-tsong, *et al.* Polymer-based waveguide VOA suitable for ultra-broadband network [C]. Lasers and electro-optics, Pacific Rim conference, CLEO/pacific Rim 2003, 2003, **2**(8): 621-621.
- [11] SEAN M G, STEVE C. Variable optical attenuator for large-scale integration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(11): 1560-1562.
- [12] ZHANG Hao, JIANG Xiao-qing, LI Ying, *et al.* Characteristic of polymer thermo-optic VOA with S-bend waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 920-922.
张昊, 江晓清, 李鹰, 等. S 弯曲聚合物热光型可变光衰减器的特性 [J]. 光子学报, 2004, **33**(8): 920-922.
- [13] OH M C, CHO S H, NOH Y O, *et al.* Variable optical attenuator based on large-core single-mode polymer waveguide [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(9): 1890-1892.
- [14] WANG Wei, SUN Xiao-qiang, WANG Xi-bin, *et al.* Low power consumption polymer thermo-optic switch with Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 610-613.
王微, 孙小强, 王希斌, 等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关 [J]. 光子学报, 2010, **39**(4): 610-613.
- [15] CHEN Kai-xin, CHAN Hau-ping, CHEN Fu-shen, *et al.* Realization of polarization-insensitive interleaver using multilayer waveguide structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(16): 1154-1156.
- [16] MENG Xiang-sen, YUAN Jun, MA Qing-song, *et al.* Study on the preparation methods of silicon oxynitride thin films [J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, **17**(4): 10-13.
孟祥森, 袁俊, 马青松等. 氮氧化硅薄膜制备方法的研究 [J]. 材料科学与工程, 1999, **17**(4): 10-13.
- [17] BONA G L, GERMANN R, OFFREIN B J. SiON high-refractive-index waveguide and planar lightwave circuits [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 2003, **47**(2.3): 239-249.
- [18] ZHENG Hong-lin, CHEN Fu-shen. Bending loss of two kinds of Y-Branch optical waveguides [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(1): 30-33.
郑宏林, 陈福深. 两种不同 Y 分支光波导的弯曲损耗研究 [J]. 半导体光电, 2005, **26**(1): 30-33.
- [19] ZHANG Yan, CHEN Kai-xin, ZHANG Jun-kai. Hybrid integrated SiON/polymer low power thermo-optic switch with total internal reflection effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(11): 1117001.
张燕, 陈开鑫, 郑军凯. 基于氮氧化硅与聚合物混合集成低功耗全内反射热光开关 [J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 117001.