

# S 弯曲聚合物热光型可变衰减器的特性\*

张昊 江晓清\*\* 李鹰 杨建义 李锡华 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘要** 提出一种热光聚合物可变光衰减器 (VOA) 的设计分析, 利用 S 弯曲的波导提高衰减效率, BPM 法模拟中验证其衰减动态范围可达 60 dB, 实现 60 dB 的衰减计算功耗为 60 mW, 附加弯曲损耗小于 0.3 dB. 并且具有很好的极化独立性, 串扰低, 尺寸小, 易于集成.

**关键词** 光可变衰减器 (VOA); S 弯曲波导; 热光效应; 聚合物

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

## 0 引言

目前报道的可变光衰减器 (VOA) 器件有微光机械型 (MEMS)<sup>[1]</sup>、液晶型<sup>[2]</sup>、熔融型<sup>[3]</sup>、离子交换型<sup>[4]</sup>和平面光波回路 (PLC) 型等. 其中平面光波回路 (PLC) 型 VOA 是最近发展最快的分支, 具有速度快、体积小和易于集成的优点, 而且有更好的温度稳定性. 考虑到为了与各种波导器件、沟道监视器等集成在同一块晶片上, 易于集成的波导型可变光衰减器具有优势. 同时, 低损耗、价格低廉的光通信波段聚合物材料与硅基 VOA 相比, 由于其低热导系数和高热光系数, 故一些聚合物波导型 VOA<sup>[5]</sup>具有低插入损耗、低功耗、易于集成等优点.

本文提出一种基于弯曲波导辐射损耗原理的 S 弯曲波导热光型聚合物 VOA 器件. 根据模拟分析, 这种结构的 VOA 具有功耗低、插入损耗小、串扰低, 偏振无关, 可达到的衰减大, 易于集成等优点.

## 1 器件设计原理

波导热光型 VOA 主要包括截止型<sup>[6]</sup>、马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉仪型<sup>[7]</sup>、反射型<sup>[8]</sup>等, Sean M. 等人根据弯曲波导辐射损耗原理, 研制出弯曲波导热光型 VOA<sup>[9]</sup>, 通过 5 mm 长的电极作用区, 可实现大于 40 dB 的衰减. 根据弯曲波导理论, 沟道波导弯曲区域的切面上的折射率不是成阶跃型, 而可以等效为向外倾斜的斜线 (如图 1), 当 Y 增大时, 包层的折射率不断增加, 甚至比核芯区的更大, 电磁场分布也会向折射率增大的方向平移, 即偏向 Y 的正方向, 所以产生辐射损耗. 也可以理解为, 在波导的弯曲部分, 要求离波导较远的光场 (一直延伸到无穷) 以比光速更快的速度向前移动, 这当然是不可能的, 故

在较远区域的场就不再被约束在波导内, 其能量向外辐射.

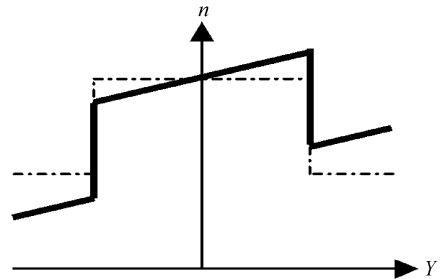


图 1 弯曲波导截面的折射率分布

Fig. 1 Index distribution of S-bend waveguide's cross section

基于弯曲波导辐射损耗原理, 利用聚合物材料, 本文提出采用 S 弯曲波导的热光型 VOA 结构 (如图 2), 通过对波导形状、电极位置的优化设计, 实现更小的插入损耗, 更低的串扰, 并且更易于集成. 器件包括一条表面垂直覆盖电极加热器的 S 形沟道波导. 电极未加电时, 光通过弯曲波导的损耗非常小. 当电极作用时, 在波导的垂直方向产生温度梯度, 由于聚合物材料的负热光系数, 形成相应的折射率梯度, 同时由于弯曲波导辐射损耗理论, 水平方向上的光线也会发生泄漏, 并且我们利用电极在水平方向的位移来加强这种泄漏. 垂直和水平方向两者共同作用的结果使芯区的模式限制减弱, 导致光在水平和垂直方向上的同时损耗, 实现了 VOA 的功能.

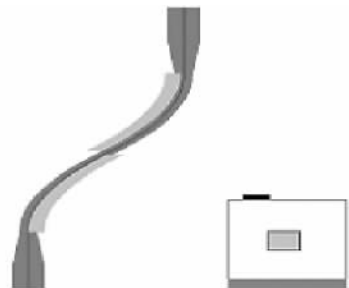


图 2 VOA 的俯视图和横切面设计

Fig. 2 Top view and cross section of VOA design

## 2 器件特性模拟与分析

### 2.1 弯曲波导的半径

\*浙江省重点科技计划 (G20030190) 和国家自然科学基金资助项目 (No: 60177012)

\*\* Tel: 0571-87951706 Email: iseejqx@zju.edu.cn

收稿日期: 2003-07-14

本文采用 Rsoft 公司的光束传输法(BPM)波导分析软件 BeamPROP™进行模拟, 整个波导 VOA 为掩埋式沟道波导. 选取覆盖层折射率  $n = 1.529/1.521$ (TE/TM), 以下模拟中输入光均以 TE 模式为例. 芯层、覆盖层折射率差为  $\Delta n = 0.5\% n$ , 热光系数为  $-2.5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ , 芯层厚度为  $7 \mu\text{m}$ . 其他条件固定的情况下, 弯曲波导选取较大的曲率半径时能减小弯曲损耗, 但却降低电极作用时的衰减效率, 因此需要在弯曲损耗和衰减之间建立平衡. 如图 3, 波导半径越大, 所需的曲率半径越小. 弯曲部分波导为  $7, 5, 3 \mu\text{m}$  时, 实现  $0.3 \text{ dB}$  的插入损耗, 曲率半径应分别为  $7000 \mu\text{m}$ 、 $7500 \mu\text{m}$ 、 $14500 \mu\text{m}$ .

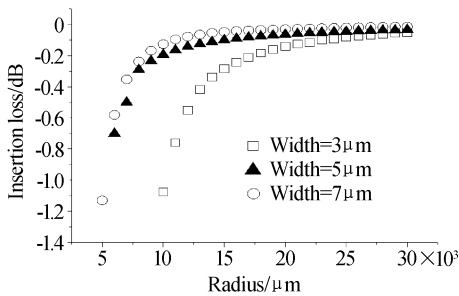


图 3 宽度不同的弯曲波导, 曲率半径与插入损耗的关系图  
Fig. 3 The relationship of radius and insertion loss for varying bend widths

在器件中, 输入输出部分直波导为  $7 \mu\text{m}$  宽, 由直波导到 S 弯曲波导的锥形过渡区长度为  $1 \text{ mm}$ . 经过模拟, 得知 S 弯曲部分和直波导之间的横向微移可以微小的减小整个插入损耗.

## 2.2 电极的位置

电极的主要作用是实现加热, 我们采用钛-金双层金属作为电极, 由于电极与芯层之间有  $5 \mu\text{m}$  厚的上覆盖层间隔, 所以覆盖金属电极的折射率对波导的折射率分布几乎没有影响. 下面主要讨论电极位置的偏移对器件特性的影响. 将电极向弯曲内侧偏移一定的量, 这样可增加折射率内外倾斜度, 增加光在水平方向泄漏的程度, 提高可调范围. 当 S 弯曲波导宽度为  $5 \mu\text{m}$  时, 得到两端电极分别向内平移  $5 \mu\text{m}$  时最佳, 电极优化前后的衰减曲线图的比较如图 4.

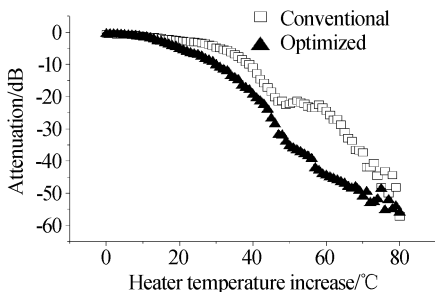


图 4 优化电极位置前后 VOA 衰减曲线的比较

Fig. 4 Attenuation response for varying electrode's position

## 2.3 结果比较

经过对波导形状、电极位置的优化, 将最终所得到的结果与 Sean. M 等人的结果进行比较. 两种 VOA 器件的参数选取一致: 覆盖层折射率为  $n = 1.329$ , 芯层、覆盖层折射率差  $\Delta n = 0.5\% n$ , S 弯曲波导宽度为  $5 \mu\text{m}$ 、总长度为  $5 \text{ mm}$ , 曲率半径选取  $10400 \mu\text{m}$ , 则插入损耗都为  $0.3 \text{ dB}$ . 得到的结果为: 在同样的温度变化下, S 弯曲波导热光型 VOA 能实现更大的衰减. 当衰减量为  $40 \text{ dB}$  时, 两者所需的温度相差  $10^{\circ}\text{C}$  左右.

利用电极温升与电极功耗的关系<sup>[10]</sup>

$$\Delta T = \frac{P_A h}{LWK(1 + 0.88 \frac{h}{W})}$$

式中  $\Delta T$  为电极温升,  $L$  为电极长度 ( $5 \text{ mm}$ ),  $W$  为电极宽度, 取为  $5 \mu\text{m}$ ,  $K$  为材料热导系数 ( $0.17 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ),  $h$  为芯层与覆盖层总厚  $19 \mu\text{m}$ . 衰减曲线与消耗能量关系见图 5. 可以看出, Sean. M 等人的结果实现  $40 \text{ dB}$  需要  $50 \text{ mW}$ , 我们改进过的 VOA 只需要  $40 \text{ mW}$ .

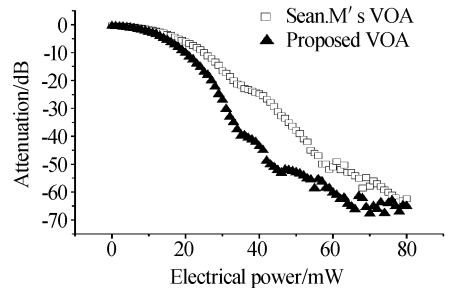


图 5 优化后的 VOA 与 Sean, M 的 VOA 衰减曲线与消耗能量关系的比较

Fig. 5 Measured attenuation characteristics against applied electrical power of the proposed VOA and Sean, M's VOA  
这种 VOA 器件同时具有良好的偏振相关特性. 经模拟, 偏振相关损耗(PDL)几乎为 0. 在衰减较小时, 波谱平坦性较好; 当衰减  $> 30 \text{ dB}$  以上时, VOA 器件的波长敏感度较大, 如图 6.

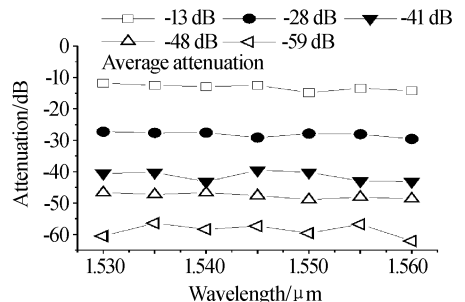


图 6 VOA 在不同衰减水平上的波长敏感度

Fig. 6 VOA's wavelength sensitivity for several attenuation levels

为了模拟器件集成时的串扰情况, 选取 S 弯曲波导的曲率半径为  $7500 \mu\text{m}$ , 波导总长为  $3700 \mu\text{m}$ , 此时插入损耗为  $0.3 \text{ dB}$ . 横向宽度为  $250 \mu\text{m}$ . 尺寸较小, 易于实现集成. 将数个这样的 VOA 器件相距

250  $\mu\text{m}$  同时进行动态衰减时,由于泄漏光是从 S 弯曲波导的两个弯曲外侧面发射出去,没有一定的扩散角,成放射状出射. 故对邻近的 VOA 器件的影响比较小. 串扰也很小,模拟结果显示器件串扰低于  $-50$  dB.

### 3 结论

提出了一种新型基于聚合物的 S 弯曲波导热光型 VOA 结构. 电极作用区采用 S 弯曲波导,电极位置向弯曲内侧偏移  $5 \mu\text{m}$ . 弯曲附加损耗为  $0.3$  dB,衰减动态范围大于  $60$  dB,实现  $40$  dB 衰减时需要功耗为  $40$  mW,偏振独立(PDL 为几乎 0),低串扰(小于  $-50$  dB). 如果能进一步解决波谱平坦性和响应速度问题,必将广泛应用于未来的光通信网络中.

### 参考文献

- 1 Marxer C, Griss P, Rooij N F. A variable optical attenuator based on silicon micromachines. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1994, **11**(2): 233 ~ 235
- 2 Hirabayashi K, Wada M, Amano C. Liquid crystal variable optical attenuators integrated on planar lighthwave circuits. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(6): 609 ~ 611
- 3 Morozov V, Fan H, Eldada L, et al. Fused fiber optical variable attenuator. Optical Fiber Communication Conference, 2000, 4: 22 ~ 24
- 4 Orignac X. First ion-exchanged dual thermo-optic variable optical attenuator. International Conference on Transparent Optical Networks, 1999. 89 ~ 92
- 5 李鹰,江晓清,李锡华,等. 新型聚合物光可变衰减器阵列. 光学仪器, 2002, **24**(4-5): 111 ~ 114  
Li Y, Jiang X Q, Li X H, et al. *Optical Instrument*, 2002, **24**(4-5): 111 ~ 114
- 6 Lee S S, Jin Y S, Son Y S. Variable optical attenuator based on a cutoff modulator with tapered waveguides in polymers. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(12): 2556 ~ 2661
- 7 Kawai T, Koga M, Okuno M, et al. PLC type compact variable optical attenuator for photonic transport network. *Electronics Letters*, 1998, **34**(3): 264 ~ 265
- 8 Kowalczyk T C, Finkelshtein I, Kouchnir M, et al. Variable optical attenuator with large dynamic range and low drive power. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, **3**: WR5-1 ~ WR5-4
- 9 Garner S M, Caracci S. Variable optical attenuator for large-scale integration. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(11): 1560 ~ 1562
- 10 Hida Y, Onose H, Imamura S. Polymer waveguide thermo-optic switch with low electric power consumption at  $1.3 \mu\text{m}$ . *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, **5**(7): 782 ~ 784

## Characteristic of Polymer Thermo-optic VOA with S-bend Waveguide

Zhang Hao, Jiang Xiaoqing, Li Ying, Yang Jianyi, Li Xihua, Wang Minghua

Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2002-07-14

**Abstract** A polymer thermo-optic variable optical attenuator (VOA) is designed and demonstrated for dense waveguide device integration. The device is optimized the compromise between integration capability, integration cost, and attenuation efficiency. With only  $60$  mW of drive power, optical attenuation of  $60$  dB has been achieved. The loss of the bent waveguide is less than  $0.3$  dB. The polymer VOA is attractive in practice due to its compact size, low insertion loss, low cost and low power consumption. In addition, it shows good polarization independence.

**Keywords** Variable optical attenuator (VOA); Waveguide bends; Optical polymers; Thermo-optic effect



**Zhang Hao** was born in November, 1980, in Anhui Province, China. He received his B. S. degree from the Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University in 2002, where presently he is a M. S. degree candidate. His research is mainly focused on integrated optics.