第 25 卷第 5 期　　半 导 体 学 报　　Vol. 25, No. 5
2004 年 5 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　May, 2004

聚合物热光可变光衰减器*

李 鹰[1] 江晓清[1] 李锡华[1] 唐 奕[1] 王明华[1] 张 涛[2] 沈玉全[2]

(1 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)
(2 中国科学院理化技术研究所, 北京 100101)

摘要: 提出一种旁路结构聚合物热光可变光衰减器(variable optical attenuator, VOA)的设计, 采用旁路波导可提高衰减效率并降低串扰. 软件模拟验证, 无间距旁路 VOA 衰减可达 28dB, 比未加旁路波导的相同结构 VOA 增加 10dB, 但同时插入损耗增加 0.3dB, 串扰低于- 44dB, 理论功耗为 40mW. 采用倒脊形结构研制了原理性的热光聚合物 VOA, 测得衰减大于 11dB, 相应输入电流为 66mA, 具有明显的热光效应.

关键词: 可变光衰减器; 旁路波导; 聚合物; 热光效应
PACC: 4280L; 4280S; 4282; 7820N
中图分类号: TN256　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253-4177(2004)05-0557-05

1 引言

密集波分复用(DWDM)技术在商业和技术上已成为全光网(AON)的主流. 可变光衰减器(VOA)可以在 DWDM 网络中进行多信道间的功率均衡, 并且可以对光放大器进行增益控制和增益展平. VOA 按实现技术分, 有传统机械型[1]、熔融光纤型[2]和集成型[3~5]等. 国内 VOA 产品主要是传统机械型, 体积大、功耗大、不易于集成. 集成平面光波回路 VOA 能克服这些缺点, 实现灵活的波导结构设计, 是最具应用前景的光器件制作技术. VOA 的原理一般是通过电光或热光效应改变波导层和芯层之间的折射率差, 使传输的导模能量耦合到截至模和辐射模中去, 其中热光波导器件具有电光器件无法比拟的偏振无关性, 驱动功率也较 MEMS 器件小的多, 具有很好的实用前景. 近年来, 低损耗、低价格的光通信波段聚合物材料越来越广泛地应用于光波导器件[6,7]. 与硅基 VOA 相比, 聚合物材料具有低热导系数和高热光系数, 因此基于聚合物的 VOA 也就具备了低损耗、低功耗的优点. 聚合物波导易于制作, 和硅基器件有良好的兼容性. 我们在 Noh 等[3]人的电极偏角型热光 VOA 设计基础上, 加入抛物型过渡区和旁路波导, 软件模拟结果证实在相同条件下, 这种结构能提高单个 VOA 衰减效率, 并降低阵列 VOA 之间的串扰. 在旁路与多模区无间距的情况下, 插入损耗和衰减范围分别比未加旁路波导的相同结构 VOA 增加 0.3dB 和 10dB. 可以根据不同应用场合 VOA 性能要求, 调节旁路间距, 在插入损耗和衰减范围间进行折中. 无间距时功耗较后者降低约 10mA, 衰减曲线的线性比没有旁路的 VOA[8]有较大提高, 目前对 VOA 的研究很少涉及阵列 VOA 之间的相互串扰, 我们软件模拟的串扰低于- 44dB, 比优化前提高- 6dB 左右. 我们在经过湿法刻蚀的硅衬底上匀涂了热光系数较大的聚合物, 制作出倒脊形结构的 VOA, 测试出明显的热光效应, 并给出了初步测试结果.

2 旁路结构的电极偏角型热光 VOA 器件分析

本文提出的一种低损耗、低串扰、衰减范围大的热光聚合物 VOA 如图 1 所示. 该结构在 Noh 等人的电极偏角型热光 VOA[3]设计基础上, 将输入过渡

* 国家自然科学基金(批准号: 60177012), 浙江省重点科技研究(批准号: G20030190)资助项目
李 鹰 男, 1976 年出生, 硕士研究生, 现从事热光 VOA 器件方面的研究.
2003-05-09 收到, 2003-07-08 定稿
©2004 中国电子学会

区轮廓改为抛物型,增加了一个旁路引光波导.

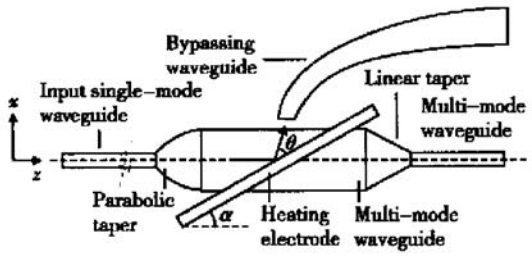

图 1 有旁路波导的 VOA 示意图

Fig. 1 VOA with a bypassing waveguide

不同截面尺寸波导之间的耦合方法有很多种,其中各种宽度渐变的楔形是能够有效实现模式绝热变化的最简单的连接结构. 在单模波导向多模波导过渡时,如果能满足绝热变化条件(在一定空间波导轮廓或折射率逐渐变化,所引起的局部模功率变化在此空间上可以忽略),则从单模区的基模能量向多模区基模能量的转化率最大. 为达到这个条件,Milton 等[9]比较了线性、抛物型和指数型过渡区,指出在基模和相邻的 2 阶模之间的相位差改变一定时,抛物型的基模功率保持得最好. 本文中采用了他们给出的这种抛物线的轮廓方程,具体参数见文献[7].

另一个改进是利用全内反射的原理附加旁路波导,将由于热光效应在多模波导区产生全内反射的光束,在适当位置通过旁路波导引导出去,剩下的多模光波再利用锥形过渡波导的泄漏,可达到提高可调范围,并隔离泄漏光束而降低阵列 VOA 间相互串扰的目的(优于- 40dB). 为兼顾衰减效率和低插入损耗,旁路波导与多模区间隙应在几个微米左右,采取窄口宽腹结构,以线性分段模拟弯曲渐变的轮廓.

我们采用了 Rsoft 公司开发的 BeamPROP™ 软件对器件的重要参数进行了模拟. 此软件在加热电极下的热扩散特性只能按层表示,所以其热学系数也只能按层定义,我们将器件简化为埋入式沟道波导,可以证实改进器件原理上的优越性. 芯层和覆盖层热导系数、热扩散系数、热光系数均相等,可以等效为各平板传热层. 输入波长为 1.55μm 的单模光纤模式,为了使波导与该模式的失配损耗最低,输入输出单模波导截面尺寸设计为 7μm×7μm,模式失配损耗为 0.8dB. 出于提高热量利用率的考虑,加热电极与芯层上表面之间的包层厚度取 2μm,这个厚度已足够隔离电极微波特性对光场的影响,包层与硅衬底之间的厚度为 7μm. 其它模拟参数为 $\Delta n=0.007$,热光系数 $dn/dT=-0.0001$,热导系数 $\kappa=0.17\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{℃}^{-1}$. 电极下方聚合物截面的温升分布如图 2(电极横截面温度场)所示. y 轴表示波导深度方向,x 轴表示电极宽度方向(x 轴如图 1),$y=0$ 平面是聚合物包层与硅衬底的交界面,聚合物波导芯层中心位置为 $y=10.5\mu\mathrm{m}$,设电极下表面处($y=16\mu\mathrm{m}$)温度升高值为 1. 硅的热导系数 $\kappa=140\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{℃}^{-1}$,比聚合物大 3 个数量级,所以衬底基本保持室温. 波导中心水平截面对应于 $y=10.5\mu\mathrm{m}$,这里电极正下方的温升 ΔT_x 大约相当于电极下表面温升 ΔT_0 的 0.6 倍.

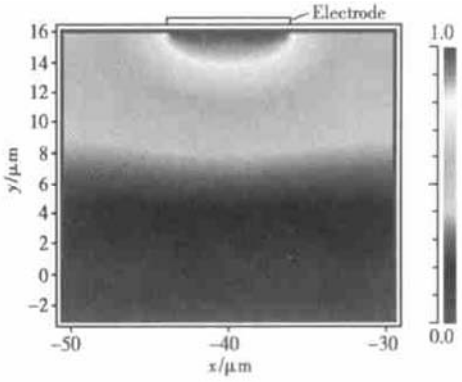

图 2 波导截面的温度分布

Fig. 2 Temperature profile of waveguide cross section

旁路波导入口截面保持与多模波导侧壁平行,以增大有效吸收面积. 温度越高,光线出射处的 z 坐标越小,旁路入口也随之调整. 旁路波导和多模区间距越小,对衰减性能的改善越明显,但也会增加插入损耗. 图 3 中间距分别为 0, 1, 2μm,由图可见,没有旁路吸收波导时最大衰减为 18dB,加入后衰减明显增加. 旁路波导和多模区间距为 0 时,VOA 在 48℃ 的衰减为 28dB 左右,插入损耗比间距为 1, 2μm 时增加约 0.4dB,此时功耗根据[10]

$$P = LW\kappa\left(1+\frac{0.88h}{W}\right)\frac{\Delta T}{h} \qquad (1)$$

计算得 40mW 左右,比文献[3]中的功耗(约 70mW)大大降低,也比文献[7]降低了 10mW 左右,衰减的温度曲线更为平滑. 其中 ΔT 为电极温升,L 为电极长度,W 为电极宽度,κ 为材料热导系数,h 为芯层与覆盖层总厚.

这种旁路结构可以在阵列 VOA 中有效降低串

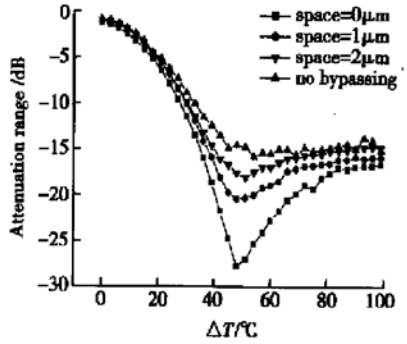

图 3　旁路波导与多模式不同间距时的衰减范围比较

Fig. 3　Attenuation range of different space between bypassing and multimode

扰至- 40dB 以下, 如图 4 所示(两个 VOA). 图中 z 轴为光传播方向, x 为波导宽度方向, 中间插入的是旁路波导, 显而易见, 原本由于热光效应从多模波导区泄漏出的光能量被旁路波导吸纳而不致影响到相邻的 VOA. 我们可以根据系统对 VOA 插入损耗和衰减范围的不同需求, 在不加旁路和上述三种旁路间距的 VOA 结构之间进行选取.

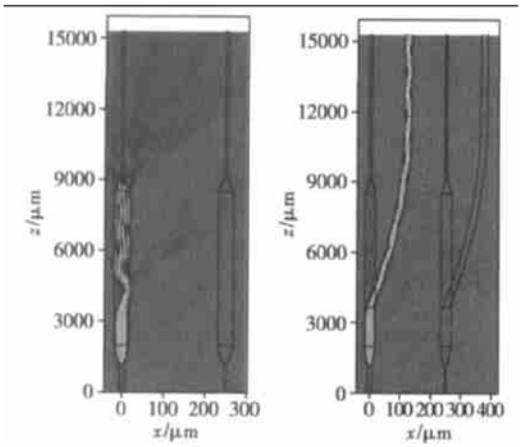

图 4　VOA 阵列中旁路波导减小串扰的示意图

Fig. 4　Schematic of crosstalk reducing due to bypassing waveguide in VOA array

3　倒脊形 VOA 器件制作

由于实验条件限制, 我们采用倒脊形波导结构进行了原理性的器件制作, 芯层和上覆盖层均为热光聚合物, 折射率差为 0.007, 具有相同的热传导系数和热扩散系数, 如图 5 所示. 这种波导结构截面设计易与单模光纤芯径相近, 单模条件的近似公式为[11]

$$\frac{w}{h} \leqslant 0.3 + \frac{t/h}{\sqrt{1-(t/h)^2}} \qquad (2)$$

式中　t 为芯层聚合物膜厚; h 为倒脊部分高度; w 为倒梯形脊上部宽度, $t > h/2$, $h - t > \lambda$, λ 为真空中波长. 由于脊形波导引入水平方向的小折射率差, 水平方向只能承载单模, 垂直方向上的高阶模全部耦合到平板部分基模中去, 实现了基模传输.

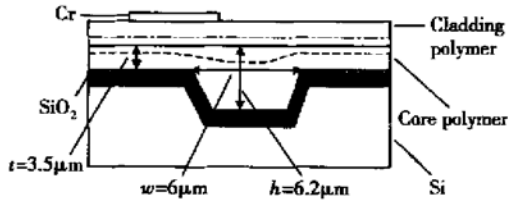

图 5　倒脊形波导单模部分的截面尺寸

Fig. 5　Cross section of single-mode part of inverse rib waveguide

波导制作在基于(100)晶面衬底的 Si 材料上, 光波导方向沿着 〈110〉或 〈$\bar{1}$10〉晶向. 硅衬底湿法腐蚀后可得到光滑洁净的倒梯形截面, 侧壁(111)面和底部(100)面夹角理论值为 54.74°[12], 深度约为 2.7μm, 宽度为 8μm. 在上面匀涂芯层聚合物, 并在真空烘箱里固化, 包层聚合物采用同样操作. 芯层在 1.3μm 波长下折射率为 1.598, 包层折射率为 1.591. 匀涂后较为稀薄, 得到近似于沟道波导的倒脊形波导, 实际两层聚合物膜如图 5 中的虚线所示. 在制作好的波导上依次淀积铬层、镍层和金层, 套刻并依次腐蚀后作为多层电极, 选用铬层为下粘附层是因为其较大的电阻率(12.3μΩ·cm)可以将大多数电功率转化为热量扩散到下面的波导中去, 过渡镍层热胀系数和电阻率介于铬和金之间, 导电性和导热性适中, 能实现热匹配而且能阻止金向铬层中扩散.

以波长为 1.3μm 的半导体激光器输出作为光源, 用红外照相机拍摄的 VOA 的通光测试如图 6 所示. 光斑为 VOA 输出, 在电流增加到 46mA 时观察到明显的衰减, 随着电流增加, 电极下的波导折射率逐步减小, 光能量耦合到左面旁路波导中的部分越来越多, 直至 66mA 时到光场能量衰减已经无法观察. 此时将光斑进行数据处理得到衰减值约为 11dB, 考虑到测试设备的成像精度, 实际衰减值应稍大. 聚合物平板部分较薄, 从脊波导泄漏到其中的多模光能量已经很微弱, 而 1μm 左右的二氧化硅下

限制层很好地限制了光场向衬底的泄漏. 图 7 为 VOA 输出光斑的光场强度分布梯度图. 由图 6、图 7 明显可见, 绝大部分光强耦合泄漏到左面的旁路波导中去, 泄漏到硅衬底的光能几乎可以忽略.

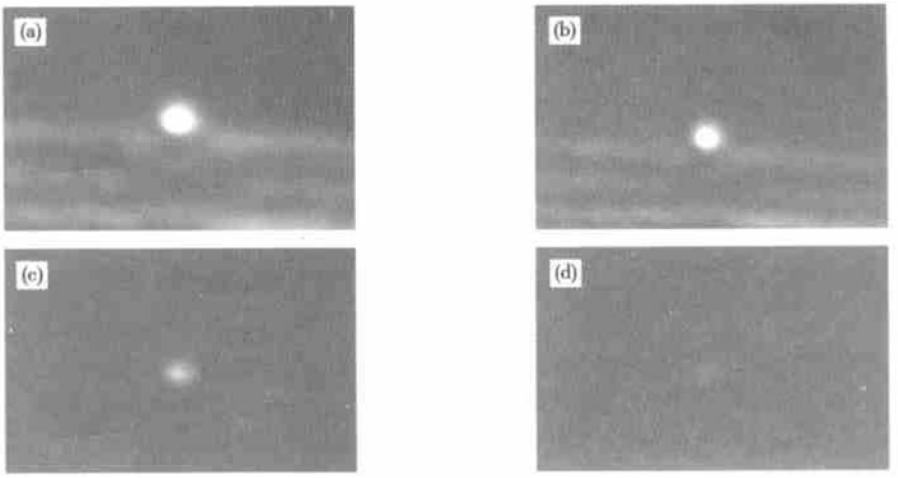

图 6 VOA 热光特性测试 输入电流为: (a) 0; (b) 46mA; (c) 53mA; (d) 66mA

Fig. 6 Thermo-optic characteristic of VOA

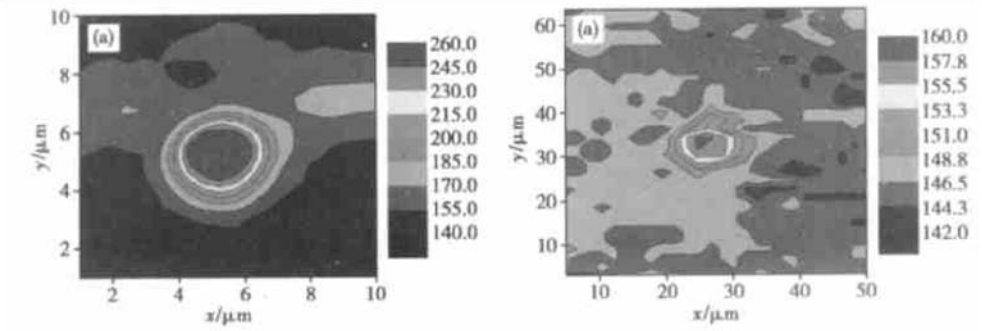

图 7 VOA 衰减前后光场强度梯度图 输入电流为: (a) 0; (b) 66mA

Fig. 7 Gradient diagram of optical fields density

4 结论

提出一种新型的有机聚合物热光 VOA 结构, 在相邻 VOA 之间插入旁路波导, 达到提高衰减效率和降低串扰的目的. 软件模拟证实无旁路间距时可以达到 28dB 衰减, 插入损耗为 0.6dB, 分别比相同情况未加旁路波导的 VOA 增加 10dB 和 0.3dB, 间距减小, 插入损耗改善, 而衰减增加值却也随之变小. 最佳串扰低于- 44dB, 计算功耗约为 40mW, 改进效果明显. 通过平面光波导工艺, 在倒脊形波导上实现了这种新型结构 VOA 的原理性制作, 初步测试显示该结构已具有较明显的热光 VOA 效果, 衰减大于 11dB, 相应输入电流为 66mA, 实验证明我们的设计是合理可行的.

参考文献

[1] Benner A, Presby H M, Amitay N. Low-reflectivity in-line variable attenuator utilizing optical fiber tapers. J Lightwave Technol, 1990, 8(1): 7

[2] Morozov V, Fan H, Eldada L, et al. Fused fiber optic variable attenuator. OFC'2000, 2000: 22

[3] Noh Y O, Yang M S, Won Y H, et al. PLC-type variable optical attenuator operated at low electrical power. Electron Lett, 2000, 36(24): 2031

[4] Kowalczyk T C, Finkelshtein I, Kouchnir M, et al. Variable optical attenuator with large dynamic range and low drive power. OFC'2001, 2001: WR5-1

[5] Kawai T, Koga M, Okuno M, et al. PLC type compact vari-

able optical attenuator for photonics transport network. Electron Lett, 1998, 34(3): 264

[6] Yu Zhong, Wang Minqiang, Yao Xi. The development of optical waveguide polymer in the optical communication. Chemistry Online, 2001, 64(1): 5(in Chinese) [禹忠, 汪敏强, 姚熹. 光通讯波段聚合物光波导材料的研究进展. 化学通报, 2001, 64(1): 5)]

[7] Yang Xiaohong, Du Yun, Shi Zhiwen, et al. Mach-Zehnder electro-optic polymer modulator with corona poled core layer. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(8): 971

[8] Li Ying, Jiang Xiaoqing, Li Xihua, et al. Novel polymeric variable optical attenuator array. Optical Instruments, 2002, 24(4~5): 111(in Chinese) [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]

[9] Milton A F, Burns W K. Mode coupling in optical waveguide horns. IEEE J Quantum Electron, 1977, QE-13(10): 828

[10] Hida Yasuhiro, Onose Hidekatsu, Imamura Saburo. Polymer waveguide thermooptic switch with low electric power consumption at 1.3μm. IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5(7): 782

[11] Fischbeck G, Moosburger R, Töpper M, et al. Design concept for singlemode polymer waveguides. Electron Lett, 1996, 32(3): 212

[12] Tsang Won-Tien, Tseng Cheng-Chung, Wang Shyh. Optical waveguides fabricated by preferential etching. Appl Opt, 1975, 14(5): 1200

Polymer-Based Variable Optical Attenuator*

Li Ying[1], Jiang Xiaoqing[1], Li Xihua[1], Tang Yi[1], Wang Minghua[1], Zhang Tao[2] and Shen Yuquan[2]

(1 *Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou* 310027, *China*)

(2 *Technical Institute of Physics and Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: A VOA(variable optical attenuator) is presented based on thermo-optic polymer, in which a bypassing guide was adopted to improve attenuating efficiency and lower crosstalk as well. Simulations demonstrate that the attenuation in case of no space between passing waveguide and multi-mode region can reach 28dB, increasing by 10dB than no passing waveguide case. Simultaneously, insertion loss increases only by 0.3dB, crosstalk is below -44dB and theoretic power consumption is about 40mW. The inverse rib structure is adopted, working out thermo-optic polymer-based VOA. Measured attenuation is higher than 11dB, the responding input current is about 66mA. From measurement obvious thermo-optic effect is observed.

Key words: variable optical attenuator; bypassing waveguide; thermo-optic polymer

PACC: 4280L; 4280S; 4282; 7820N

Article ID: 0253-4177(2004)05-0557-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60177012), the Key Science and Technology Foundation of Zhejiang Province (No. G20030190)

Li Ying　male, was born in 1976, graduate student. His major is mainly in thermo-optic VOA.

Received 9 May 2003, revised manuscript received 8 July 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics