

低功率消耗 SOI 基热光可变光学衰减器*

贺月娇 方 青 辛红丽 陈 鹏 李 芳 刘育梁

(中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

摘要: 制作了带有 U 形隔热槽的马赫-曾德干涉型 SOI 热光可变光学衰减器, 在 1510~1610nm 波长范围内动态调节范围可达到 0~29dB. 与未加隔热槽的相同结构光学衰减器相比, 器件插入损耗和调制深度不受影响, 最大功率消耗降低了 230mW.

关键词: 可变光学衰减器; 热光; 隔热槽; 功率消耗

PACC: 4280K; 4280S; 4280L EEACC: 4250; 4270

中图分类号: TN252 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0204-04

1 引言

波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)系统的出现很好地解决了日益增长的大容量数据传输的要求,但随着 WDM 系统通道数的增多,各通道间的功率不均衡严重影响着光信号的传输和处理. 光学衰减器的主要作用就是实现 WDM 传输系统及网络节点处各个通道的功率均衡, SOI 波导型光学衰减器由于其优越的光学性能及易于与其他硅基器件单片集成等优点成为目前的研究热点^[1].

本文采用多模干涉(multimode interference, MMI)结合马赫-曾德干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)结构制作了可变光学衰减器(variable optical attenuator, VOA),利用硅的热光效应,对 MZI 其中的一个臂进行加热,使该臂下的硅波导芯区折射率改变,两个臂间产生相位差,通过输出多模干涉耦合器发生干涉,达到不同程度光学衰减的目的. 前期工作表明用顶层硅较厚的 SOI 制作的热光可变光学衰减器的功率消耗较大^[2]. 本文所制作的 VOA 在 MZI 两个干涉臂之间及两侧刻蚀了隔热槽,有效降低了衰减器的功率消耗而不影响器件的插入损耗,衰减量为 29dB 时功率消耗只有 130mW,与未刻蚀隔热槽的相同结构 VOA 相比降低了 230mW.

2 理论设计

所设计的 SOI 基热光可变光学衰减器如图 1 所示,包括一个输入波导、一个输出波导、两个 MMI 耦合器、两个相位调制臂及三个隔热槽. 由单模输入波导耦合进来的光信号 I_{in} 经过第一个 MMI 耦合器分成强度相等的两束, I_1 和 I_2 , 并沿两个相位调制臂传输,如果两个相位调制臂完全对称且相互间无

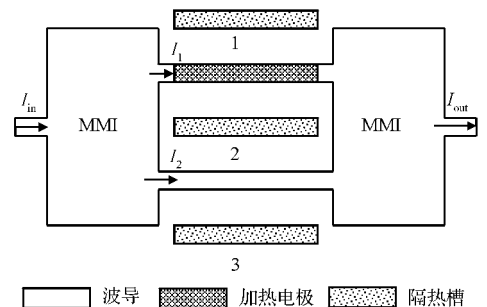


图 1 带隔热槽的 SOI 基热光 VOA 的结构俯视图
Fig. 1 Schematic diagram of VOA with isolation grooves

热作用,分路光束将由第二个 MMI 耦合器合波在输出波导内产生最低阶导模无衰减地输出. 若在其中一个相位调制臂上淀积高阻的金属加热电极(如 Ti 和 NiCr),当一定的电流作用于加热电极时,由于热光效应,该臂下硅材料折射率改变,对于

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号:2001AA312250)

1.5 μm 的光波有^[3]

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 1.86 \times 10^{-4} \quad (1)$$

通过该臂的光波会产生相位差 $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda_0} \quad (2)$$

式中 Δn 是波导芯区折射率的变化量; λ_0 是真空中波长; L 为调制区的长度. 于是经第二个 MMI 耦合器合波在输出波导产生的光强为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\varphi \quad (3)$$

当 $\Delta\varphi$ 从 0 到 π 变化时, 输出光强就会从最大值变化到最小值. 最大调制深度定义如下:

$$\eta_{\text{max}} = -10\lg\left[\frac{\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2}}{\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}}\right]^2 \quad (4)$$

如果经过第一个 MMI 耦合器分波后两个相位调制臂中的光波振幅相等, 则 $I_1 = I_2$, 当两臂的相位差等于 π 时, 输出光强为零, 此时调制深度为无限大, 但这只是理想情况. 虽然在器件设计时可以将两个臂的位置、宽度等参量设置得完全相同, 在实际的工艺实现过程中却不可避免地会在两臂间引入差异, 也就是说, 光强 I_1 和 I_2 不可能完全相等, 调制深度不可能为无限大. 为得到尽量大的调制深度, 在器件设计阶段应尽量保证两个臂的对称性.

值得注意的是, 硅的热传导系数较大, 有利于热量从调制臂顶部向波导芯区的传输, 但同时有一部分热量也会向另一个没有加热电极的臂耗散, 导致另一个臂的相位同向改变, 两臂间的相位差减小, 要达到一定的衰减量, 需要加更大的电压来保证相位差, 从而引起功率消耗增大; 另外还有一部分热量会耗散到加热臂的另一侧, 这也会使产生的热量流失, 造成加热功率的利用率降低, 功率消耗增大. 为降低 VOA 的功率消耗, 必须切断两个相位调制臂之间, 以及加热臂向器件边缘的热量传输路径.

SiO_2 的热导率约为硅的百分之一, 可以视为绝热介质, 因此可以在两相位调制臂间的硅平板波导上刻蚀隔热槽 2, 将两臂间的导热介质硅隔断, 阻断热量传输. 为防止热量向器件边缘耗散, 在加热臂的另一侧也刻蚀隔热槽 1. 从图 1 中可以看到, 在未加热的调制臂一侧刻蚀了隔热槽 3, 它的作用并不是要隔断热量传输, 而是要让相位调制的两个臂的结构保持对称, 以期得到尽量相等的光强 I_1 和 I_2 , 实现光强的大范围衰减.

3 实验

实验选用的基底 SOI 材料的埋层 SiO_2 厚 $1\mu\text{m}$, 顶层硅厚 $11\mu\text{m}$. 通过电感耦合等离子体 (inductively coupled plasma, ICP) 干法刻蚀, 在顶层硅上形成外脊高 $6\mu\text{m}$ 的脊形波导. ICP 刻蚀后需要进行热氧化, 在波导表面形成 600nm 的氧化层, 随后将该氧化层用氢氟酸漂去. 这是利用热氧化 SiO_2 的各向同性特性有效改善由于 ICP 刻蚀造成的波导表面的粗糙度, 降低光波在波导中传输时由于表面不平坦造成的散射损耗^[4]. 由于金属的吸收系数一般都较大, 为限制光信号泄漏入加热金属, 下一步要在波导表面热氧化 100nm 的 SiO_2 , 这同时可以进一步降低散射损耗. 然后在 MZI 的一个相位调制臂上淀积 $0.1\mu\text{m}$ 的高阻金属 Ti 作为加热电极. 最后采用 ICP 在两相位调制臂之间和两侧的平板波导上刻蚀 $6\mu\text{m}$ 宽的三条隔热槽, 刻蚀深度为平板波导的高度, 即一直刻蚀到埋层硅为止. 图 2 给出的是我们所设计的热光 VOA 的调制区截面 SEM 照片, 两个相位调制波导中间的 U 形槽即为隔热槽.

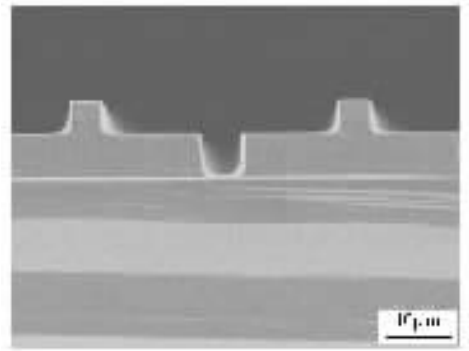


图 2 带隔热槽的 VOA 调制区的截面 SEM 图

Fig. 2 SEM picture of cross section of the modulation region of VOA with isolation grooves

4 结果与讨论

图 3 所示为带隔热槽的 VOA 的插入损耗和最大衰减量与光波长之间的关系. 采用的 VOA 芯片端面未镀膜, 输入输出光纤与器件之间未滴折射率匹配液, 光源为 ASE (amplified spontaneous emission) 宽带光源, 波长范围 $1510\sim 1610\text{nm}$, 输出光信号用光谱分析仪记录.

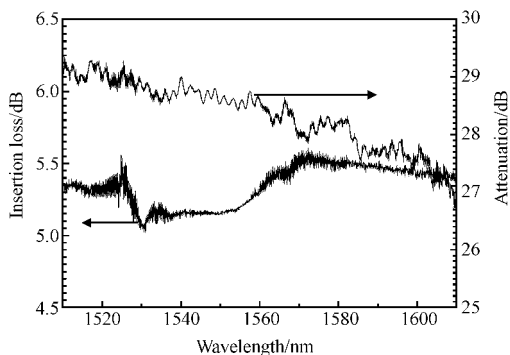


图 3 带隔热槽的 VOA 的插入损耗和衰减量与波长的关系

Fig. 3 Wavelength dependences of insertion loss and attenuation of the VOA with isolation grooves

图中下面的曲线为未加电压调制时输出光谱与光源光谱功率的差值,也就是 VOA 的插入损耗,可以看出,器件的插入损耗为 5.05~5.55dB,这其中包括光纤与波导端面的反射损耗、耦合损耗及波导和光纤内的传输损耗等.通过在波导端面镀减反膜和在光纤与器件间加入折射率匹配液,插入损耗可以降低约 2.0dB,也就是说,最终的插入损耗可达到 3.05~3.55dB.与未加隔热槽的 VOA 相比,器件的插入损耗相差不大.

图 3 中上面的曲线为带隔热槽的 VOA 未加电压调制和调制最深时的输出光谱功率的差值,即 VOA 的最大衰减量.在 1510~1610nm 波长范围内,器件的最大衰减量可达到 29dB,可见隔热槽的加入并未影响器件的调制深度.

通过测量一定衰减量下需要在调制区所加的电压及加热电路中通过的电流,我们得到器件的功率消耗与衰减量之间的对应关系,如图 4 所示.显然,带隔热槽的 VOA 功率消耗远小于不带隔热槽的 VOA,且衰减量越大,两种情况下的功率消耗差值也越大.29dB 衰减时未带隔热槽的 VOA 最大功率消耗为 360mW,加隔热槽后最大功率消耗只有 130mW.

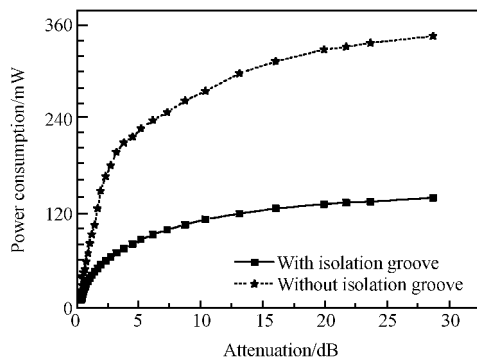


图 4 带隔热槽与不带隔热槽的相同结构 VOA 的功率消耗与衰减量的对应关系

Fig. 4 Comparison of power consumption against attenuation for VOAs with and without thermal isolation grooves

5 结论

采用 SOI 材料制作了低功率消耗的马赫-曾德干涉型热光可变光学衰减器,在相位调制臂之间和两侧刻蚀 U 形隔热槽可有效降低衰减器的功率消耗,同时也不影响器件的插入损耗和调制深度.最大调制深度下,带有隔热槽的 VOA 的功率消耗只有 130mW,与相同结构参数下的未刻蚀隔热槽 VOA 相比降低了 230mW.

参考文献

- [1] Pavesi L, Lockwood D J. Silicon photonics topics. *Appl Phys*, 2004, 94: 361
- [2] Yang Lin, Liu Yuliang, Cheng Yi, et al. Multimode-interference-type thermo-optic variable optical attenuator with a response frequency of 10kHz. *Opt Eng Lett*, 2003, 42(3): 606
- [3] Cocorullo G, Rendina I. Thermo-optical modulator at 1.5 μ m in silicon etalon. *Electron Lett*, 1992, 28(1): 83
- [4] Juan W H, Pang S W. Controlling sidewall smoothness for micromachined Si mirrors and lenses. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14(6): 4080

A Low Power Consumption SOI-Based Thermo-Optic Variable Optical Attenuator*

He Yuejiao, Fang Qing, Xin Hongli, Chen Peng, Li Fang, and Liu Yuliang

(*R&D Center on Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: A SOI-based thermo-optic variable optical attenuator with thermal isolation grooves based on a Mach-Zehnder interferometer is fabricated. Modulation depth of 29dB at the wavelength range between 1510nm and 1610nm is achieved, and the maximum power consumption is only 130mW. Compared with the variable optical attenuator without thermal isolation grooves, the maximum power consumption decreases more than 230mW.

Key words: variable optical attenuator; thermo-optic; thermal isolation grooves; power consumption

PACC: 4280K; 4280S; 4280L **EEACC:** 4250; 4270

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0204-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2001AA312250)

Received 25 September 2004, revised manuscript received 26 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics