第 23 卷第 5 期　　半　导　体　学　报　　Vol. 23, No. 5
2002 年 5 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　May, 2002

# 快速响应 SOI 马赫曾德热光调制器*

魏红振[1]　余金中[1]　夏金松[1]　严清峰[1]　刘忠立[1]　房昌水[2]

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室，北京　100083)
(2 山东大学人工晶体研究所，济南　250100)

**摘要**：给出了 Y 分支 MZI 热光调制器的模型，实验研制了基于 SOI(silicon-on-insulator) 的 MZI 热光调制器，调制器的消光比为 - 16.5dB，开关的上升时间为 10μs，下降时间为 20μs，相应的功耗为 0.39W.

**关键词**：集成光学；调制器；SOI；热光开关
**EEACC**：1250
**中图分类号**：TN36　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0253-4177(2002)05-0509-04

## 1　引言

当前光子器件的研究朝着材料多元化、结构多元化的方向发展. 在各种材料中，由于硅的加工工艺极其成熟，Si 基集成光学始终是人们研究的一个重要方向. SOI(silicon-on-insulator) 光波导具有与 CMOS 电路工艺兼容的特点，而且可制作高速 CMOS 器件，同时 SOI 材料的制作工艺非常成熟，而且顶层 Si 膜的厚度是不受限制的，可制作大截面尺寸的 SOI 光波导，减小与光纤的耦合损耗，因此，SOI 非常适合制作光电混合集成芯片[1,2].

在调制方法上我们采用了热光调制，相对于电光调制，热光调制速度相对较低，但是工艺非常简单. Si 的热光系数比 $SiO_2$ 大两个数量级，因而 SOI 上的热光调制速度将比 $SiO_2$ 上的调制速度快两个数量级，可以达到微秒量级.

在各种调制器结构中，马赫曾德干涉仪(Mach-Zehnder interferometer，MZI) 是集成光学中的一种典型的结构，Y 分支 MZI 结构为常用的调制器结构[3,4]. 本文介绍了 Y 分支 MZI 调制器的结构及其输出消光比，分析了硅的热光折射率调制模型，给出了热光调制器的基本结构. 采用常规的硅工艺制作了 SOI 热光 Y 分支 MZI 光调制器，获得了快速的响应.

## 2　Y 分支马赫曾德光调制器的基本结构

Y 分支 MZ 干涉型调制器的结构如图 1(a) 所示，由两个 Y 分支和两个相移臂组成. 相移臂的长度相等. 一个分支器将输入光分为两路，经过两相移臂后由另一个分支器合并输出. 若输入光场经过 Y 分支后的两束光强度分别为 $I_1$ 和 $I_2$，假设两相移臂产生的相移分别为 $\frac{\Delta\varphi}{2}$ 和 $-\frac{\Delta\varphi}{2}$，则干涉器的输出为[5]

$$I_{out} = \left| \frac{\sqrt{I_1}}{\sqrt{2}} \exp\left[ i \frac{\Delta\varphi}{2} \right] + \frac{\sqrt{I_2}}{\sqrt{2}} \exp\left[ - i \frac{\Delta\varphi}{2} \right] \right|^2$$

$$= \frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)$$

所以有

$$I_{out,max} = (I_1 + I_2)/2 + \sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_{out,min} = (I_1 + I_2)/2 - \sqrt{I_1 I_2}$$

由此可得调制器的最大消光比为

$$Er = -20\lg \frac{\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}}{\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2}}$$

由上式可看到，Y 分支的输出越均衡，调制器可达到

* 国家自然科学基金(批准号：69896260，69990540)，国家科技部 "973"计划(No. G2000-03-66) 资助项目
魏红振，男，1969 年出生，博士，主要从事集成光波导耦合器与光开关的研究.
2001-09-12 收到，2001-12-26 定稿

©2002 中国电子学会

的消光比越大.

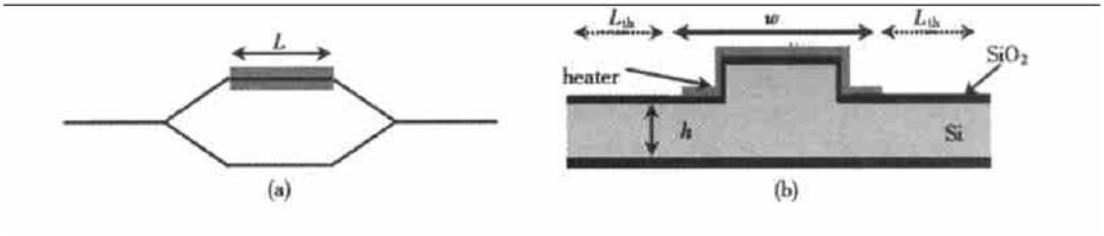


图 1 SOI MZ 光调制器的结构 (a) MZI 调制器示意图; (b) 调制区截面示意图

Fig. 1 Structure of SOI MZ optical modulator (a) MZI schematic structure; (b) Lateral structure

硅具有比较大的热光温度系数, 当 $\lambda = 1.3\mu m$ 时, $\frac{dn}{dT} = 2\times10^{-4}K^{-1}$. 因此, 利用硅的热光效应可以很容易地实现硅的折射率调制, 从而实现对光波的调制和开关. 图 1(b) 为 SOI 光波导的结构及热光调制区截面的结构示意图.

调制相移臂中导模的相移为

$$\Delta\varphi = \Delta\beta L$$

其中 $\Delta\beta$ 为导模由于折射率的改变引起的传播常数的改变, 可以近似为 $\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta N$. $\Delta N$ 为导模的等效折射率, 可以近似为 $\Delta N = \Delta n$, $\Delta n$ 为热光效应引起的硅的折射率的变化. 因此有

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}$$

这样, 实现 $\pi$ 相移所需的温度变化为

$$\Delta T = \left(\frac{dn}{dT}\right)^{-1}\frac{\lambda}{2L}$$

其中 $L$ 为相移臂的长度; $\lambda$ 为工作波长.

通常, 加热薄膜产生的热量除了使薄膜区温度上升外, 由于热量的扩展, 也会使薄膜周围区域温度增加. 如图 1(b) 所示, 由于热量扩展形成的热扩展长度为[6]

$$L_{th} = \sqrt{dh}\sqrt{\frac{\sigma_{Si}}{\sigma_{SiO_2}}}$$

其中 $d$ 为埋层 $SiO_2$ 的厚度; $h$ 为脊形波导外脊的厚度; $\sigma_{SiO_2}$、$\sigma_{Si}$ 分别为 $SiO_2$ 和 Si 的热传导系数. 根据具有内热源的一维导热线性近似可得加热区的温度变化为[4]

$$\Delta T = \frac{dP}{\sigma_{SiO_2}w_{th}L}$$

其中 $w_{th}$、$L$ 分别为加热区的宽度和长度; $P$ 为所加的电功率. 由图 1(b) 有

$$w_{th} = w + 2L_{th}$$

其中 $w$ 为加热薄膜的宽度. 可得 MZ 热光调制器的功耗为

$$P_\pi = \frac{\lambda}{2L}\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1}\sigma_{SiO_2}\frac{(w+2L_{th})L}{d} = \frac{\lambda}{2}\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1}\sigma_{SiO_2}\frac{w+2L_{th}}{d}$$

MZ 热光调制器的截止频率可由下式得到[6]

$$\frac{P_\pi}{f_g A} = \pi\lambda\rho\epsilon\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1}$$

其中 $A = (2L_{th} + w)h$ 为加热面积; $\rho$ 为加热薄膜的密度; $\epsilon$ 为加热薄膜的热容量.

上面的讨论给出了影响热光调制器的功耗和响应时间的因素, 为热光调制器的优化设计提供了理论基础. 由于硅的导热系数比较大, 因此 SOI 光调制器的功耗相对而言比较大, 降低功耗是优化设计的一个重要的目标. 由于 $SiO_2$ 的导热系数比 Si 小得多, 因此埋层 $SiO_2$ 相当于一层绝热层. 增加 $SiO_2$ 层的厚度可以有效地减小器件的功耗. 另外, 减小 SOI 波导层的厚度可以减小加热区的热扩散, 减小器件的功耗. 同样, 减小加热薄膜的宽度可以减小加热区的面积, 从而降低功耗. 同时, 也由于 Si 具有比较大的热传导系数, SOI 光波导调制器具有比较快的响应. 通过优化设计可以使 SOI 热光开关的响应时间缩短到 $\mu s$ 量级.

## 3 SOI 马赫曾德热光调制器的制作与测量结果

在 Y 分支 MZI 调制器中, Y 分支是需要重点考虑的. Y 分支的输出越均衡, 调制器消光比越大. 在 Y 分支的设计中, 为了减小分支的能量损耗, 分支系统应满足绝热条件, 即分支角满足[5]

$$\frac{\Delta\beta_1}{\theta(\beta_0^2 - n_1^2k_0^2)^{1/2}} > 0.43$$

其中 $\Delta\beta_1$ 为分支波导的两个分支中最低阶导模的

传播常数差; θ 为分支间的夹角; $\beta_0$ 为这两个分支模传播常数的均值; $n_1$ 为波导层的折射率. 由上式可得, 为了减小 Y 分支的损耗, 应减小 Y 分支的分支角.

在设计中, SOI 脊形波导的脊形区波导层的厚度为 10μm, 脊形波导的刻蚀深度为 4μm, 脊形波导的脊宽为 7.5μm, 分支角为 1°, 相移臂的长度为 3000μm, 设计的调制器工作波长为 1.55μm, 埋层 $SiO_2$ 的厚度为 1μm.

硅在 1.55μm 时的热光系数为[7]

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 9.48 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-7} T - 1.49 \times 10^{-10} T^2 + \cdots$$

则在室温工作时的热光系数约为 $1.86 \times 10^{-4} K^{-1}$. 可得实现 π 相移所需的温度变化约为 1.34K. Si 和 $SiO_2$ 的热导率分别为 1.57W/(cm·K) 和 0.0138W/(cm·K), 由此可得到实现 π 相移所需的功耗为 0.415W. 设加热薄膜为 Al 膜, 其比热热容量为 0.895J/(g·K), 密度为 2.7g/cm³, 估算的光调制器的截止频率为 15.2kHz, 相应的开关时间为 66μs.

我们采用常规的硅工艺制作了 SOI 热光马赫曾德调制器, SOI 晶片为 BE-SOI, 埋层 $SiO_2$ 的厚度为 1μm, 顶层 Si 的厚度为 10μm, 采用反应离子刻蚀脊形波导, 刻蚀深度为 4μm. 热蒸发 Al 电极为加热薄膜, 薄膜的宽度为 20μm, 相应的电阻为 6.8Ω. 器件制作后经过减薄然后端面解理, 波导的输入输出端面为自然解理面. 相应的 Y 分支的输出如图 2 所示, 由图可见 Y 分支具有很好的输出均衡性.

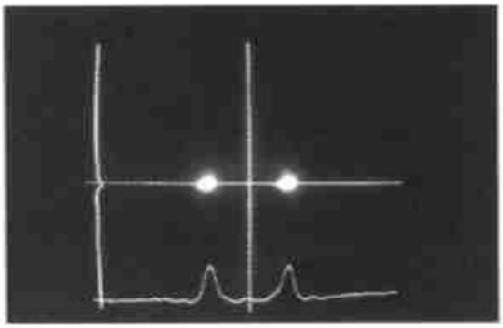

图 2　Y 分支的输出光场

Fig. 2　Output field of the Y-branch

器件的测量采用 1.55μm 的光源, 测量结果表明实现 π 相移所需的功率为 0.39W, 与上面计算的结果非常接近, 输出端的消光比为 − 16.5dB. 图 3 为调制器输出功率与所加加热电流的关系. 调制器的时间响应特性如图 4 所示, 输入到调制器的信号为电压方波, 如图中下面的方波曲线. 由 Ge 探测器输出的开关的响应曲线为图 4 中上面的曲线, 图中曲线为最大调制点. 实际测量结果是: 调制器的上升时间约 10μs, 下降时间约为 20μs. 这与上述的理论近似计算的结果很接近, 差异是由于模型对真实情况的描述不够全面, 比如没有考虑调制区长度对调制速度的影响, 还有待改善.

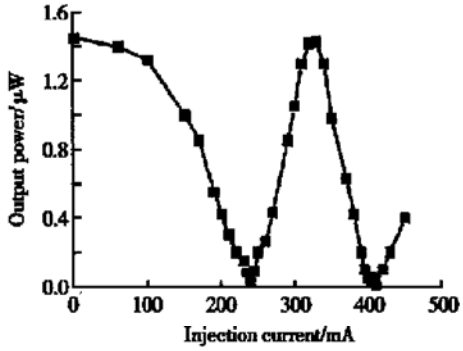


图 3　输出功率与所加电流的关系

Fig. 3　Relation between injection current and output power

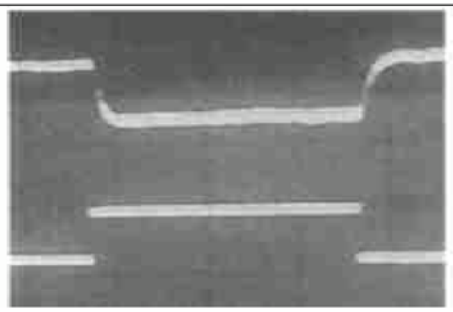

图 4　Y 分支 MZI 热光调制器的时间响应特性

Fig. 4　Time response of the modulator

## 4　结论

根据马赫曾德干涉调制器的基本原理设计了 SOI 热光调制器. 采用常规硅工艺制作了 SOI Y 分支马赫曾德热光调制器. Y 分支的输出均衡性直接影响 MZI 调制器的输出消光比, 我们测量了 MZI 结构中 Y 分支的输出, 结果表明 Y 分支具有很好的输出均衡性. 采用热光效应实现了 Y 分支 MZI 光调制器, 输出消光比为 − 16.5dB, 开关的时间响应特性: 上升时间为 10μs, 下降时间为 20μs, 实现 π 相

移时的电功耗为 0.39W,这些实验结果与理论估算比较接近.

## 参考文献


[1] Soref R A, Schmidthen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguide in GeSi and Si-on-$SiO_2$. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27: 1971

[2] Jalali B, Yegnanarayanan S, Yoon T, et al. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, 4(6): 938

[3] Mayer S T, Jung K H, Lee W D. Thin-film thermo-optical $Ge_xSi_{1-x}$ Mach-Zehnder interferometer. Opt Lett, 1992, 17 (24): 1812

[4] Treyz G V. Silicon Mach-Zehnder waveguide interferometers operating at 1.3μm. Electron Lett, 1991, 27(2): 118

[5] Zhao Cezhou. Theory and technology on semicondactor waveguide optical devices. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 178[赵策洲. 半导体导波光学器件理论及技术. 北京: 国防工业出版社, 1998: 178]

[6] Fisher U, Zinke T, Schuppert B, et al. Singlemode optical switches based on SOI waveguides with large cross-section. Electron Lett, 1994, 30(5): 406

[7] Cocorullo G, Della Corte F D, Rendia I. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550K at the wavelength of 1523nm. Appl Phys Lett, 1999, 74(22): 3338


# Mach-Zehnder Interferometer Thermo-Optical Modulator with Fast Response*


Wei Hongzhen[1], Yu Jinzhong[1], Xia Jinsong[1], Yan Qingfeng[1], Liu Zhongli[1] and Fang Changshui[2]

(1 *State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*)

(2 *State Key Laboratory of Crystal Materials, Shangdong University, Ji'nan* 250100, *China*)



**Abstract**: A Mach-Zehnder interferometer thermo-optical modulator based on SOI (silicon-on-insulator) is reported. At operating wavelength 1.55μm, the measured extinction ratio is − 16.5dB with a rising time of 10μs and down time of 20μs, while power consumption with π phase shift is about 0.39W.



**Key words**: integrated optics; modulator; SOI; thermo-optical switch

**EEACC**: 1250

**Article ID**: 0253-4177(2002)05-0509-04



* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69896260 and 69990540) and The Ministry of Science and Technology "973" Plan(No. G2000-03-66)



Wei Hongzhen male, was born in 1969, PhD. He is engaged in the research on integrated optical waveguide coupler and optical switch.



Received 12 September 2001, revised manuscript received 26 December 2001


©2002 The Chinese Institute of Electronics