

载流子吸收对 SOI Mach-Zehnder 干涉型电光调制器性能的影响*

严清峰 余金中

(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)

摘要: 分析了载流子吸收对 SOI 材料制作的 Y 分支型 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器/开关性能的影响, 并提出了一些改进器件性能的一些措施。

关键词: SOI; 等离子色散效应; 载流子吸收; Mach-Zehnder 干涉; 电光调制器

EEACC: 1250

中图分类号: TH744.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)12-1308-05

1 引言

随着硅基光学和光电子学的发展, 硅基光波导器件和光电子器件受到了广泛重视。其中, silicon-on-insulator(SOI)材料由于具有良好的导波性能和电学性能, 从而在导波光学器件和光电子器件方面得到广泛应用。尽管硅由于晶体对称性的原因而不具有 Pockels 电光效应和非常弱的 Franz-Keldysh 电光效应, 但可以利用硅的等离子色散效应对光信号进行电光调制, 从而实现硅基光波导器件的调制和开关功能。利用等离子色散效应, 硅基电光调制器和电光开关已经相继研制出来^[1-3]。Mach-Zehnder 干涉型调制器是一种典型的通过相位调制实现强度调制的光学器件。利用 LiNbO₃ 和 III-V 族化合物半导体材料的线性电光效应制作的 Mach-Zehnder 干涉型调制器和光开关已广泛用于光通讯系统中。不同于 Pockels 等线性电光效应, 硅的等离子色散效应中同时存在着载流子色散效应和载流子吸收效应。由于载流子吸收产生的强度调制将会使硅基 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器的性能有别于只有相位调制而没有强度调制的其它材料制作的

Mach-Zehnder 干涉型调制器。本文分析了载流子吸收对采用 SOI 材料制作的 Y 分支型 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器和光开关的性能的影响。

2 硅的等离子色散效应

在采用 SOI 材料制作的 Y 分支 Mach-Zehnder 干涉仪中, 通常利用硅的热光效应或等离子色散效应进行相位调制。由于基于热光效应的硅调制器件速度较慢, 所有高速调制和开关器件都是利用硅的等离子色散效应。根据 Drude 模型, 采用一级近似, 硅的等离子色散效应可用下式表达^[4]:

$$\Delta n = - \frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n_0} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*} \right) \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = - \frac{q^3 \lambda^2}{4\pi^2 c^3 \epsilon_0 n_0} \left[\frac{\Delta N_e}{(m_{ce})^2 \mu_n} + \frac{\Delta N_h}{(m_{ch})^2 \mu_p} \right] \quad (2)$$

式中 Δn 和 $\Delta \alpha$ 分别是折射率的实部变化和吸收系数的变化; q 是电子电量; λ 为真空波长; c 为真空光速; ϵ_0 是真空中介电常数; n_0 是本征硅的折射率; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; ΔN_e 和 ΔN_h 分别为电子和空穴的浓度变化; m_{ce}^* 和 m_{ch}^* 分别为电子和空

* 国家自然科学基金(批准号: 69990540, 69896260); 国家重点基础研究发展计划(No. G2000-03-66)资助项目

严清峰 男, 1975 年出生, 博士研究生, 目前从事硅基光电子学方面的研究。

余金中 男, 1943 年出生, 研究员, 博士生导师, 长期从事半导体光电子学研究。

2002-03-23 收到, 2002-05-29 定稿

© 2002 中国电子学会

穴的有效质量, $m_{ce}^* = 0.26m_0$, $m_{ch}^* = 0.39m_0$. 值得注意的是, 载流子色散和载流子吸收是同时存在的. 波长为 $1.55\mu\text{m}$ 时, Soref 等通过大量的实验数据得出硅的等离子色散效应可以更加简单地用下式表示^[5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = - [8.8 \times 10^{-22} \times \Delta N_e \\ \quad + 8.5 \times 10^{-18} \times (\Delta N_n)^{0.8}] \\ \Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \times \Delta N_e \\ \quad + 6.0 \times 10^{-18} \times \Delta N_h \end{array} \right. \quad (3)$$

3 Y 分支 Mach-Zehnder 干涉型调制器的工作原理

Mach-Zehnder 干涉型调制器/开关是一种典型的通过相位改变实现强度调制的器件, 广泛应用于各种信号调制器中. 基于 Y 分支的 Mach-Zehnder 干涉仪的结构如图 1 所示. 光功率经耦合进入输入波导, 在第一个分支处分成两束光, 由于干涉仪两臂的结构是完全对称的, 所以两束光功率和偏振态都相同. 在干涉仪的一个臂或两个臂上同时设置调制区, 经相位调制的两束光在第二个分支处合束进入

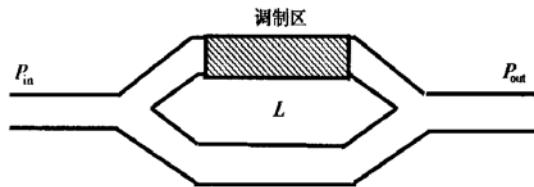


图 1 Y 分支 Mach-Zehnder 干涉仪调制器结构

Fig. 1 Schematic diagram of Y-branch Mach-Zehnder interferometer modulator

输出波导, 并干涉生成强度调制波. 假设调制区对光信号只有相位调制(例如 LiNbO_3 等基于 Pockels 效应工作的调制器件)而没有强度调制作用, 即两束光合束时光强仍然相等, 则输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 的关系为:

$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \left| \frac{\Delta \Phi}{2} \right| \quad (4)$$

其中 $\Delta \Phi$ 是合束时两路光波的相位差. P_{out} 与 P_{in} 的比值示于图 2 中. 可以看出, 这种 Mach-Zehnder 干涉仪的调制深度在 0~1 之间任意取值, 可以实现开关功能.

然而, 对于利用等离子色散效应工作的硅基

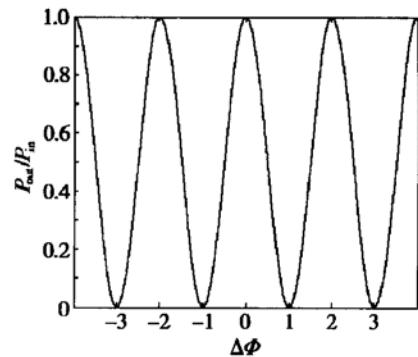


图 2 不考虑强度调制作用时调制器输出与输入功率比值和相位差的关系

Fig. 2 Ratio of output power and input power versus phase shift without consideration of amplitude modulation

Mach-Zehnder 干涉型器件, 由于载流子色散和载流子吸收是同时存在的, 在对 Mach-Zehnder 干涉仪的相移臂进行相位调制时, 必然伴随着强度调制. 这种伴随的强度调制将会在两臂之间产生不同的光场衰减, 合束时的两束光的强度不再相等, 从而使干涉仪输出端的调制深度下降(开关器件则降低了消光比). 同时, 载流子吸收将会使器件工作时产生额外的吸收损耗. 下面结合具体的器件模型分析载流子吸收产生的强度调制给器件性能带来的影响.

4 载流子吸收对 SOI Y 分支 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器性能的影响

SOI Y 分支 Mach-Zehnder 干涉型调制器的结构如图 1 所示, SOI 波导的截面示意图和调制区截面示意图如图 3 所示. 为了实现单模传输, 脊形波导的截面尺寸满足如下条件^[6]:

$$t \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}} \quad \text{且 } r > 0.5 \quad (5)$$

其中 $t = W/H$, $r = h/H$, W 、 H 和 h 分别为脊形波导的脊宽、内脊高和外脊高. 调制区采用 p-i-n 侧向注入结构, 这种结构增加了载流子在 i 区的行程, 使载流子的时间利用率得以提高, 可以减小器件的功耗. 所考虑的 SOI 材料为 BESOI 材料, SiO_2 掩埋层厚度为 $1\mu\text{m}$, 波导层为 n^- 型 Si, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 $5\mu\text{m}$, SiO_2 上包层厚度 $1\mu\text{m}$, SOI 脊形波导宽度为 $4\mu\text{m}$, 刻蚀深度为 $2.25\mu\text{m}$. 调制区长度为 $1000\mu\text{m}$. 为了将载流子注入波导区, 在波导层顶

部形成高掺杂 p^+ 区, 在波导两侧形成高掺杂 n^+ 区。器件的工作波长为 $1.55\mu m$ 。

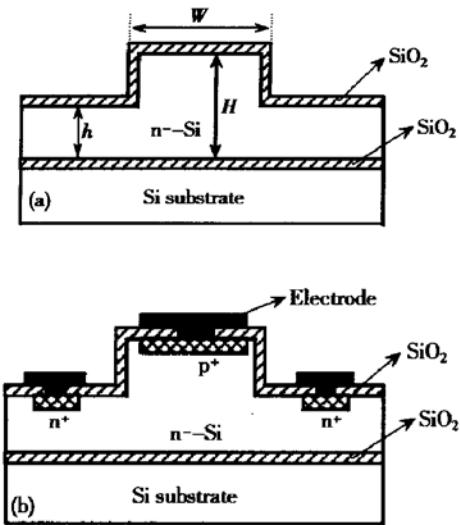


图 3 SOI Y 分支 Mach-Zehnder 干涉仪调制器波导区和调制区截面示意图 (a) 波导区截面; (b) 调制区截面

Fig. 3 Cross section schematic diagrams of waveguide and modulation area in SOI Y-branch Mach-Zehnder interferometer modulator (a) Waveguide section; (b) Modulation section

假设一振幅为 A 的偏振光被分成等功率的两束光并分别传输通过两平行直波导(其中一直波导为相移臂), 在合束时, 这两束光波可近似表示为:

$$\left| \begin{aligned} E_1 &= \frac{A}{\sqrt{2}} \exp[i(wt + \Delta\Phi)] \exp(-\Delta\alpha L/2) \\ E_2 &= \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(iwt) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

干涉后的输出功率为:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \left| \frac{A}{\sqrt{2}} \exp[i(wt + \Delta\Phi)] \exp(-\Delta\alpha L/2) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(iwt) \right|^2 = \frac{A^2}{2} [1 + e^{-\alpha L} + 2e^{-\alpha L/2} \cos(\Delta\Phi)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Delta\Phi$ 为经过调制的一束光与另一束未经调制的光的相位差。相位变化是通过等离子色散效应产生的硅的折射率的改变来实现的, 可近似表示为 $\Delta\Phi = \Delta\beta L = 2\pi\Delta n L/\lambda$, 其中 $\Delta\beta$ 为导模传播常数的变化, L 为调制区长度, λ 为器件工作波长, Δn 为等离子色散产生的折射率变化, $\Delta\alpha$ 为伴随着折射率的变化硅的吸收系数的变化。 Δn 和 $\Delta\alpha$ 的值由(3)式确定。由(7)式可知, 在不加调制时, P_{out} 为最大值 $2A^2$ 。

设输入功率 P_{in} 为 $2A^2$, 则由(7)式可知输出功率和输入功率的比值为:

$$P_{out}/P_{in} = (1/4) [1 + e^{-\Delta\alpha L} + 2e^{-\Delta\alpha L/2} \cos(2\pi\Delta n L/\lambda)] \quad (8)$$

在大注入情况下, 可以假设注入到波导区的空穴和电子浓度相等并且远大于波导区 n^- 型 Si 中初始载流子浓度, 则调制区工作时载流子的浓度变化可近似为注入载流子的浓度。由(3)式和(8)式可得到考虑载流子吸收时输出功率和输入功率比值与注入载流子浓度(以对数表示)的关系, 如图 4 所示。图中虚线所示为不考虑载流子吸收时, 输出功率与输入功率比值与注入载流子浓度的关系。可以看出, 当注入载流子浓度较低时, 由于载流子吸收很弱, 对调制器性能的影响不大。当注入载流子浓度较高时, 则与理想的 Mach-Zehnder 相位-强度调制器性能相差较大。

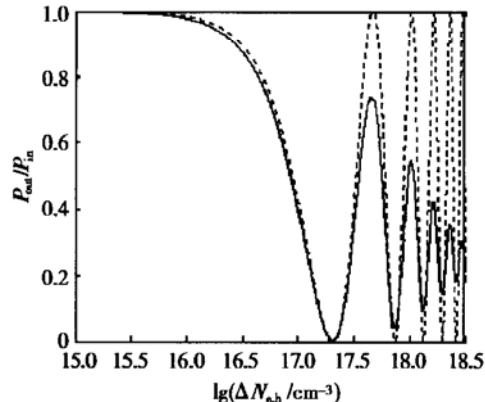


图 4 调制器输出与输入功率比值和注入载流子浓度(以对数表示)的关系 实线: 考虑强度调制作用; 虚线: 不考虑强度调制作用

Fig. 4 Ratio of output power and input power versus free carriers logarithmic concentration Solid line: with amplitude modulation; Dashed line: without amplitude modulation

定义调制深度:

$$\eta = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (9)$$

其中 I 为有调制时的透射强度; I_0 为没有外加电信号时的透射强度(这里近似为输入光强)。图 5 所示为调制深度与注入载流子浓度(以对数表示)的关系, 可以看出, 尽管调制深度与 $\Delta\Phi-\Delta n-\Delta N_{e,h}$ 仍保持余弦关系, 但随着注入载流子浓度的增加, 吸收系数增大, 最大调制深度(开关器件的消光比)逐渐减小。在注入载流子浓度为 $2.03 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 对应的相

移为 π , 此时器件的最大调制深度为 0.9953(消光比为 23.3dB), 当注入载流子浓度为 $7.33 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 对应的相移为 3π , 此时器件的最大调制深度为 0.9566(消光比为 13.7dB). 当注入载流子浓度增大到 $2.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 对应的相移为 9π , 此时器件的最大调制深度降低到 0.8181(消光比仅为 7.4dB). 由图中还可看出, 当注入载流子浓度足够大时, 器件不再具有调制功能, 光场透射率趋于一恒定值 0.25. 这是由于在很高的注入载流子浓度下, 载流子吸收很强, 经过调制臂的光场被完全衰减所致.

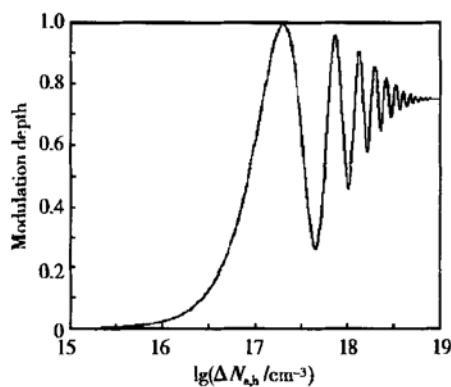


图 5 考虑强度调制作用时调制深度与注入载流子浓度(以对数表示)的关系

Fig. 5 Modulation depth versus injected free carriers logarithmic concentration with consideration of amplitude modulation

由于载流子吸收而引入的额外损耗可表示为:

$$L_{ca} = -10\lg[\exp(-\Delta\alpha L/2)] \quad (10)$$

随着注入电流的增加, 注入载流子浓度增大, 引入的附加吸收损耗也必然增加. 图 6 为吸收损耗与注入载流子浓度(以对数表示)的关系曲线, 在载流子浓度为 $2.03 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 相移为 π , 对应于调制器的最大调制深度和开关器件的状态, 此时吸收损耗为 0.64dB. 当注入载流子浓度超过 10^{18} cm^{-3} 时, L_{ca} 随载流子浓度的增加而急剧增大. 而 SOI 单模波导的传输损耗很小(最低可小于 0.01dB/cm), 因此在器件总的损耗中由于载流子吸收而产生的损耗是不可忽略的.

由于载流子吸收是与载流子色散同时产生的, 利用等离子色散效应实现相位调制时, 附加的强度调制是不可避免的, 从而对 Mach-Zehnder 干涉型器件的调制深度和消光比产生不利影响. 研究表明, 当 $\Delta n > 5\Delta k$ (Δk 为材料消光系数的变化, $\Delta\alpha =$

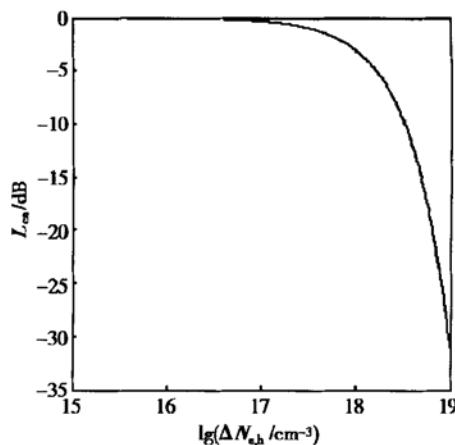


图 6 载流子吸收引入的损耗与注入载流子浓度(以对数表示)的关系

Fig. 6 Loss due to free carriers absorption versus injected free carriers logarithmic concentration

$4\pi\Delta k/\lambda$) 时, 载流子色散效应产生的相位调制作用占优势从而可以实现有效的相位调制^[7]. 我们也可以采取一些其它措施来提高 Mach-Zehnder 干涉型调制器的最大调制深度. 如不采用 Y 分支分束器, 而是采用分束比可以调节的 MMI 分束器, 使分束后调制臂上光强比非调制臂上的光强大, 则经过调制臂的相位调制和强度调制后, 器件的消光比可以得到较大的改善. 另一种可行的方法是在调制臂上引入光放大器, 使调制后的光强与非调制臂上的光强相等, 这样也可以提高器件的消光比, 但势必给器件的集成和设计带来一定难度. 为了减小载流子吸收而引入的附加损耗, 可以减小调制区长度(相应地应该增大注入电流), 在折衷考虑功耗和调制效率的情况下选取合适的调制区长度.

5 结论

利用等离子色散效应实现相位调制时, 附加的强度调制是不可避免的, 从而使 Mach-Zehnder 干涉型器件的调制性能有别于基于 Pockels 效应工作的 Mach-Zehnder 干涉型调制器件. 理论计算表明, 当注入载流子浓度为 $2.03 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 对应的相移为 π , 此时器件的最大调制深度为 0.9953(消光比为 23.3dB), 当注入载流子浓度增大到 $2.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 对应的相移为 9π , 此时器件的最大调制深度降低到 0.8181(消光比仅为 7.4dB). 当注入载流子浓度足够大时, 器件不再具有调制功能, 调制深度

接近于一恒定值 0.75。在 π 相移时, 由于载流子吸收而引入的额外损耗为 0.64dB, 当注入载流子浓度超过 10^{18} cm^{-3} 时, 吸收损耗随载流子浓度的增加而急剧增大。由于 SOI 单模波导本身的损耗很小, 因而在器件总的损耗中由于载流子吸收而产生的损耗是不可忽略的。

参考文献

- [1] Fischer U, Schuppert B, Petermann K. Optical waveguide switches in silicon based on Ge-indiffused waveguides. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1994, 6(8): 978
- [2] Zhao C Z, Li G Z, Liu E K, et al. Silicon on insulator Mach-Zehnder waveguide interferometers operating at $1.3\mu\text{m}$. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(17): 2448
- [3] Tang C K, Reed G T. Highly efficient optical phase modulator in SOI waveguides. *Electron Lett*, 1995, 31(6): 451
- [4] Soref R A, Bennett B R. Electrooptical effects in silicon. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, QE-23: 123
- [5] Giguere S R, Friedman L, Soref R A, et al. Simulation studies of silicon electro-optic waveguide devices. *J Appl Phys*, 1990, 68(10): 4964
- [6] Soref R A, Schmidchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J Quantum Electron*, 1986, QE-22(6): 873
- [7] Soref R A, McDaniel D L, Bennett B R. Guided-wave intensity modulators using amplitude-and-phase perturbations. *J Lightwave Technol*, 1988, 6(3): 437

Effects of Carriers Absorption on Mach-Zehnder Interferometer Electrooptical Modulator in Silicon-on-Insulator*

Yan Qingfeng and Yu Jinzhong

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

Abstract: The effects of carriers absorption on Mach-Zehnder interferometer electrooptical modulator based on silicon-on-insulator (abbreviated as SOI) are analyzed theoretically and some measures to improve device performance are proposed as well.

Key words: plasma dispersion effect; free carriers absorption; Mach-Zehnder interferometer; electrooptical modulator
EEACC: 1250

Article ID: 0253-4177(2002)12-1308-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69990540 and 69896260) and State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000-03-66)

Yan Qingfeng male, was born in 1975, PhD candidate. His main interest focus on silicon based waveguide devices.

Yu Jinzhong male, was born in 1943. He is engaged in the research on semiconductor optoelectronics.