

硅 1.3~1.6μm 电光强度调制器探索

赵策洲 刘育梁 李国正 刘恩科 高 勇

(西安交通大学电子工程系 西安 710049)

摘要 本文采用等离子体色散效应和大注入效应,通过EPW各向异性腐蚀的方法,在外延硅芯片上刻蚀出脊形单波导,并采用纵向p⁺n结结构,对硅1.3~1.6μm电光强度调制器进行了初步研究,在注入电流密度为1.7×10⁴A/cm²时,调制深度为90%。最后通过有限元法对横向p⁺n结大注入进行分析,提出了提高空穴时间利用率的措施。

PACC: 8280L, 4282

1 引言

硅在微电子领域已得到广泛的研究和应用,但在光电子集成领域受到的注意一直微乎其微。近年来,随着人们对硅材料的进一步研究和认识,全硅光电子器件及其集成技术已成为OEIC的一个重要研究方向。在光调制方面,在波长1.3和1.5μm均有电光调制的模型和实验见诸报道^[1~4],但离研制出实用的光开关还有相当一段距离。本文作为全硅电光强度调制器的初步研究,在硅脊形波导上采用顶注入式p⁺n结结构,在注入电流密度为17kA/cm²时,获得90%的调制深度。

2 简单理论分析

在硅的电光调制中,等离子体色散效应可描述为^[3]: λ=1.55μm时, n₁=3.48, a=0.04cm⁻¹

$$\Delta n_e = -8.8 \times 10^{-22} N_e \quad (1)$$

$$\Delta n_h = -8.5 \times 10^{-18} N_h^{0.8} \quad (2)$$

$$\Delta a_h = 2.1 \times 10^{-20} N_h^{1.13} \quad (3)$$

赵策洲 男,1964年生,副教授,主要研究方向为半导体集成光学和微电子器件可靠性(现工作单位为西安电子科技大学微电子所,710071)

刘育梁 男,1966年,博士后,从事半导体集成光学研究(现工作单位为中国科学院半导体研究所,100083)
1994年11月25日收到初稿,1995年3月6日收到修改稿

式中, N_e 是图 1 所示电光强度调制器 $n^+ \text{-Si}$ 的掺杂浓度, N_h 是 $p^+ \text{n}$ 结注入到波导芯层的平均空穴浓度, 则 $n^+ \text{-Si}$ 的折射率 $n_2 = n_1 + \Delta n_e$, 当 $p^+ \text{n}$ 结零偏时, 波导芯折射率为 n_1 , 当 $p^+ \text{n}$

结正偏时, 波导芯折射率为 $n_1 + \Delta n_h$, 吸收系数为 $\alpha_1 + \Delta \alpha_h$. 对于图 1 所示的电光强度调制器, 在脊形波导顶部制备有一个浅 $p^+ \text{n}$ 结, 用以进行电光调制. 当 $p^+ \text{n}$ 结不加偏压时, 由波导一端耦合入的光模可直接传输到另一端; 当 $p^+ \text{n}$ 结施加偏压时, 由于大量的空穴注入使 n_1 层折射率和吸收系数改变, 引起了芯层和 $n^+ \text{-Si}$ 层的折射率之差显著变小, 芯层吸收系数显著增大, 导致原来传输的导模被大量吸收或变成衬底辐射模而损失掉, 这样脊形波导中传输的导模将受到强度调制.

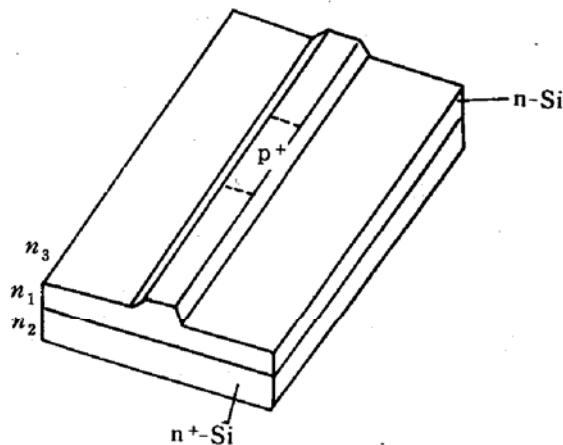


图 1 纵向注入式硅电光波导强度调制器

3 器件研制及测量

在掺杂浓度 N_e 为 $3.0 \sim 6.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\langle 100 \rangle$ 晶向的 n 型单晶硅上, 外延生长厚 $d = 6 \mu\text{m}$, 掺杂浓度 N_D 约 10^{16} cm^{-3} 的外延层; 然后用 SiO_2 掩膜, 用 EPW 腐蚀液刻蚀出深 $2 \mu\text{m}$, 背宽为 $12 \mu\text{m}$ 的脊形波导, 使该波导在垂直于表面方向承载单模, 在平行于表面方向承载多模. 再在波导顶部扩硼, 形成长度为 $1050 \mu\text{m}$ 的 $p^+ \text{n}$ 结, 最后制备上下电极. 波导两端的耦合面通过化学机械抛光获得. 接下来对器件的强度调制特性进行测试. 采用端焦耦合技术, 将 $1.52 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光耦合入波导, 在 $p^+ \text{n}$ 结上施加正偏电压, 输出端用红外变像管观察和用光电探测器测试. 测得稳态情况下, $p^+ \text{n}$ 结注入电流密度为 17kA/cm^2 时, 可获得 90% 左右的调制深度. 因此实验表明, 该结构作为强度调制器是适用的.

4 调制器的改善分析

对于图 1 所示的 $p^+ \text{n}$ 结, 大注入时电流密度为

$$J_p = 2D_p q N_h(0)/d \quad (4)$$

式中 $N_h(0)$ 为 $p^+ \text{n}$ 结界面处的注入空穴浓度, D_p 为空穴扩散系数, d 为外延层厚度. 对于 $J_p = 17 \text{kA/cm}^2$ 的电流密度, 由(4)式知 $N_h(0) = 3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$. 这种结构的强度调制器不足之处在于需要注入很高的空穴浓度, 导致调制电流过大. 很显然, 在整个扩散漂移过程中, 载流子的时间利用率为 $d^2/L_p^2 \ll 1$ (L_p 为大注入时空穴扩散长度). 为了提高载流子的时间利用率, 可采用图 2 所示的, 以 $p^+ \text{-Si}$ 为衬底的横向注入式电光强度调制器结构. 这种结构增加了空穴在调制区的行程, 使 $(DE/2)^2/L_p^2 \gg 1$, 从而提高了空穴的时间利用率.

由于横向注入结构是一个二维问题, 需要用数值方法进行分析. 根据有限元法特别适用于复杂的几何结构和介电特性分析的思想^[5], 这里采用有限元法对横向注入结构进行网格划分(如图 2 所示), 采用求解系数矩阵为大型稀疏矩阵的线性方程组子程序来求解扩散方

程的总刚方程. 所求解的 p^+n 结

二维稳态扩散方程为

$$\frac{\partial p}{\partial x^2} + \frac{\partial p}{\partial y^2} - \frac{p - p_n}{L_p^2} = 0 \quad (5)$$

式中 p_n 为波导芯中平衡空穴浓度, L_p 为波导芯中空穴扩散长度.

该问题的边界条件(忽略表面复合)为: 在 AB, BC, HG, GF 处满足自由边界条件; 在 CD, FE 处空穴浓度为 p_n ; 在 DE 边界, 由于大注入时通常可使 $L_p > d$, 因此这里按自由边界处理. 运算中取硼掺杂浓度 $N_A = 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 波导芯掺杂 $N_D = 1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 则 $p_n = 2.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 大注入时 $L_p = 12 \mu\text{m}$, $DE = 60 \mu\text{m}$, $AH = 12 \mu\text{m}$, 由 EPW 腐蚀(100)晶向硅片得 $\angle ABF = 54.74^\circ$, p^+n 结正偏压 $V_A = 0.95 \text{ V}$, 则大注入时 $p(x, y) = N_h(0) = 1.45 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 这里 $|x| \leq \frac{AH}{2}$, $y = 0$. 通过对运算结果进行数据拟合, 载流子在波导芯附近的近似分布为

$$\begin{cases} p(x, y) = p(x)p(y) \\ p(x) = N_h(0) \times \frac{\sinh[(DE/2 - x)/L_p]}{\sinh(DE/2L_p)} + p_n \\ p(y) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

而对于图 1 所示的一维 p^+n 结, 载流子分布为

$$p(y) = N_h(0) \frac{\sinh[(d - y)/L_p]}{\sinh(d/L_p)} + p_n \quad (7)$$

根据载流子的连续性方程可求出这两种结构各以电流 I_V 和 I_T 来维持同样大小的电荷贮存区内的总量, 对于纵向注入结构

$$Q/\tau_p = I_V - \frac{qD_p N_h(0)DE}{2L_p \sinh(d/L_p)} \quad (8)$$

对于横向注入结构

$$Q/\tau_p = I_T - \frac{qD_p N_h(0)CD}{2L_p \sinh(DE/2L_p)} \quad (9)$$

式中 τ_p 是注入空穴的寿命. 由于 $DE > d > CD$, 因此 $I_V > I_T$. 由于纵向注入结构电流密度为 17 kA/cm^2 , 因此由(8)和(9)式可知达 90% 调制深度时, 横向注入结构只须 4.8 kA/cm^2 . 再考虑垂直结构中存在着空穴在两个方向的侧向流失, 而横向结构中仅有一个方向的纵向流失, 而且还受到了反向漂移场的抑制, 因此纵向结构还需付出更多的电流来维持等量的注入空穴浓度, 因此横向结构能减小调制电流而提高调制深度.

5 结论

在外延型硅脊形波导上, 采用纵向 p^+n 结大注入, 初步研制成功了 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 电光强度调制器, 在注入电流为 17 kA/cm^2 时, 调制深度为 90%, 并进一步分析了横向结构的硅调

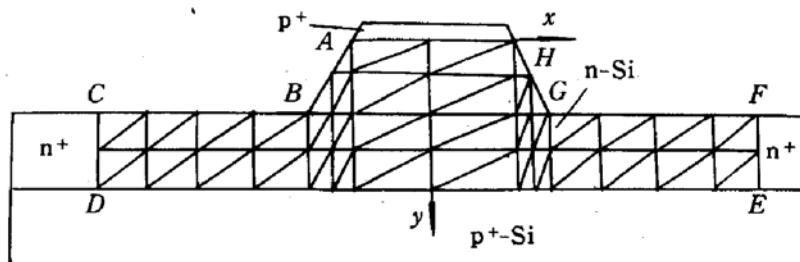


图 2 横向注入式硅电光波导强度调制器
和它的有限元法网格划分

制器,指出了这种结构能减小调制电流,增加调制深度.

参 考 文 献

- [1] G. V. Treyz, P. G. May and J. M. Halbout, IEEE Electron Device Letters, 1991, **12**(6):276~278.
- [2] T. Pirnat, L. Friedman and R. A. Soref, J. Appl. Phys., 1991, **70**(6):3355~3359.
- [3] S. R. Giguere, L. Friedman, R. A. Soref *et al.*, J. Appl. Phys., 1990, **68**(10):4964~4970.
- [4] O. Solgaard, A. A. Godil, B. R. Hemenway *et al.*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1991, **9**(5):704~710.
- [5] 周乐柱,有限元法应用于微波和光波器件的问题和发展,电子学报,1994,**22**(3):77~85.

Investigation of Silicon Electro-Optical Waveguide Intensity Modulator at $1.3\sim1.6\mu\text{m}$

Zhao Cezhou, Liu Yuliang, Li Guozheng, Liu Enke and Gao Yong

(Electronic Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Received 25 November 1994, revised manuscript received 6 March 1995

Abstract By using the plasma dispersion effect and pn junction large injection effect, an all silicon electro-optical waveguide intensity modulator at $1.3\sim1.6\mu\text{m}$ is investigated. A rib waveguide is formed in epitaxial silicon wafer by using anisotropic etching with EPW (Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water) solution, and the Si vertically injecting electro-optical modulator is fabricated by doping boron on the rib waveguide. Its modulating depth is 90% at $17\text{kA}/\text{cm}^2$ injecting current. And finally, the silicon transversely injecting electro-optical waveguide modulator is analysed by using finite element method, and a measure for improvement of holes time utilization factor is put forward.

PACC: 8280L, 4282