

全硅结栅控制双注入波导电光开关 及调制器的一种新方案

刘志敏 刘恩科

(西安交通大学人工智能与机器人研究所, 陕西, 西安, 710049)

摘要: 分析了全硅结栅控制双注入波导电光开关及电光调制器的工作原理, 给出了器件的某些参数, 并对其频带宽度进行了数字估算, 经有效折射率 Δn_{eff} 分析表明, 这类 DIFET 波导电光器件是切实可行的。

关键词: 集成光学, 硅, 光波导, 电光器件。

引言

光开关和光调制器是集成光学技术的基本元件。光开关和光调制器的研究主要集中在 LiNbO_3 ^[1], InGaAs/InP ^[2] 和 AlGaAs/GaAs ^[3] 等 III - V 族化合物半导体材料上。这是因为 III - V 族化合物半导体材料可制作具有泡克尔 (Pockels) 效应的电荷控制器件。

研究表明, 单晶硅也是集成光学和集成光路的可靠材料, 它虽没有泡克尔效应, 但可利用它的等离子色散效应。R. A. Soref^[4] 等人在单晶硅材料上成功地制成了硅光波导, 并观察到了电光调制现象。近来国内也陆续制成了硅光波导, 全硅多模 PN 结型电光调制器和 2×2 电光开关。本文提出了一种新型的单模全硅结栅控制双注入波导电光开关及调制器。

1 两类结构器件的比较

硅 PN 结型 (二极管型) 电光器件是由脊形波导上细长的二极管组成 (见图 1)。其电光调制有两种: 一种是使 PN 结正偏, 把少数注入波导中, 形成大注入以改变载流子浓度, 从而改变波导中的折射率; 另一种是使 PN 结反偏来耗尽波导中的载流子, 从而改变其折射率。虽然两种调制器都是行之有效的, 但均有局限性。少子的寿命限制了注入型调制器件的调制速度, 而且还要求大注入。耗尽型调制器件调制速度快而且光传输损耗小, 但它需要在波导中有较高的基底掺杂浓度 N_f , 而大的 N_f 使得波导中光传输损耗增加。另外, 在需

本文 1991 年 9 月 2 日收到, 修改稿 1993 年 5 月 13 日收到。

承载单模的前提条件下要求波导的脊形高度是超微米级的；再者 N_f 越高，在反偏压相同的条件下，耗尽层的宽度越窄，要求器件的尺寸越小，使实际偏压下大多数波导层耗尽。本文提出的结栅控制双注入型（三极管型）电光调制器件可放宽器件尺寸的限制，其调制的电流密度由注入的载流子浓度和波导层掺杂浓度 N_f 共同决定。它把耗尽、注入和夹断等结合在一起，这样三极管型波导电光开关和电光调制器与二极管型相比在设计和操作方面自由度大，具有调制速度快，光传输损耗小等优点。

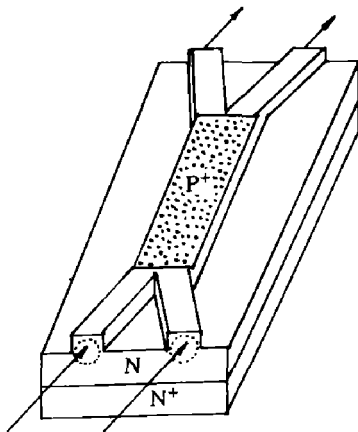


图 1 P-N 结硅波导电光开关
Fig. 1 P-N junction guided-wave silicon electro-optical switch

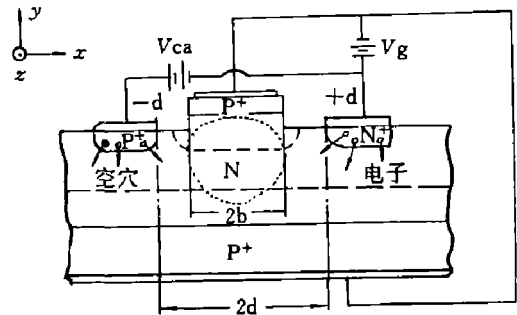


图 2 双注入效应
Fig. 2 Dual-injection effect

2 双注入效应

双注入就是在阴极和阳极的结点处同时分别注入电子和空穴，它以增强电荷密度的方式提高半导体材料中折射率变化的效率（见图 2）。用这种方法获得的载流子浓度比平衡载流子浓度或只有电子（或空穴）注入的载流子浓度大得多^[5]。其注入浓度受间接带隙半导体的复合过程和空间电荷的限制，折射率的变化 Δn_{eff} 依赖于两种载流子在大注入时浓度的总和，这样，在阴阳极电压小的情况下就有较大的折射率变化。

本文讨论的器件，注入的载流子浓度远大于本底掺杂浓度，此时 N 型波导区中电子与空穴浓度近似相等，即 $N(x) = P(x)$ 。在稳定状态下，沟道电流应包括 N 型波导区、P+ 阳极区和 N+ 阴极区的复合电流。后两个区域的复合电流可以忽略。这样，正向电流密度将由 N 型波导区复合电流决定。按图 2 的坐标，电流密度为

$$J = \int_{-d}^{+d} qR dx, \tag{1}$$

式 (1) 中复合率 $R = N(x)/\tau_a$ ， d 为 N 型波导区半宽度，双极性寿命 τ_a 等于高注入寿命 $\tau_{p0} + \tau_{n0}$ ，它与掺杂浓度无关。由于在大注入时注入的载流子浓度大于本底杂质浓度，因此有：

$$J = 2q\bar{N}d/\tau_a, \tag{2}$$

式 (2) 中 \bar{N} 为 N 型波导区平均载流子浓度. 在 N 型波导区中稳态电流连续性方程为^[6]

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \frac{N}{L_a^2} = 0, \quad (3)$$

式 (3) 中双极扩散长度 $L_a = \sqrt{D_a \tau_a}$, D_a 为双极扩散系数.

在大注入条件下, 需计入电场产生的漂移电流, 此时电流密度为在 N^+ 一端:

$$J = J_{N(+d)} = q\mu_N N_{(+d)} E_{(+d)} + qD_N \left. \frac{dN}{dx} \right|_{x=+d} = 2qD_N \left. \frac{dN}{dx} \right|_{x=+d}, \quad (4)$$

与式 (4) 相似, 在 P^+ 一端:

$$J = J_{P(-d)} = -2qD_P \left. \frac{dP}{dx} \right|_{x=-d}, \quad (5)$$

根据电中性条件, 可解出载流子浓度分布为

$$N = P = \frac{\tau_a J}{2qL_a} \left[\frac{\text{ch}(x/L_a)}{\text{sh}(d/L_a)} - B \frac{\text{sh}(x/L_a)}{\text{ch}(d/L_a)} \right], \quad (6)$$

式 (6) 中 $B = \frac{\mu_N - \mu_P}{\mu_N + \mu_P}$, 对硅而言, $b = \frac{\mu_N}{\mu_P} = 3$, $B = \frac{1}{2}$.

图 3 显示了注入载流子浓度的分布曲线, 图中电子和空穴浓度在 P^+-N 和 $N-N^+$ 两个结处最高, 最小值靠近阴极, 这是由于电子和空穴迁移率不同而引起的.

波导区载流子平均浓度可由式 (6) 解得为:

$$\bar{N} = \bar{P} = \frac{1}{2b} \int_{-b}^b N(x) dx = \frac{\tau_a J}{2bq} \cdot \frac{\text{sh}(b/L_a)}{\text{sh}(d/L_a)}. \quad (7)$$

在一般情况下, τ_a 在 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ s 之间, L_a 在几个到几十个 μm 之间. 当调制器电流密度 $J \leq 1000$ A/cm² 时, 器件温度不会过份升高, 此时取 $\tau_a = 10^{-6}$ s, $L_a = 10$ μm , $J = 10^3$ A/cm², $d = 8$ μm , $b = 2$ μm , 可得 $\bar{N} = \bar{P} = 3.73 \times 10^{18}$ cm⁻³.

大注入时, 我们求得波导区压降 V_i 为

$$V_i = \frac{kT}{q} \left\{ \frac{8b}{(b+1)^2} \cdot \frac{\text{sh} \frac{d}{L_a}}{1 - B^2 \text{th}^2 \frac{d}{L_a}} \cdot \arctan \left[\left(1 - B^2 \text{th}^2 \left(\frac{d}{L_a} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \text{sh} \left(\frac{d}{L_a} \right) \right] + B \ln \left[\frac{1 + B \text{th}^2 \frac{d}{L_a}}{1 - B \text{th}^2 \frac{d}{L_a}} \right] \right\}, \quad (8)$$

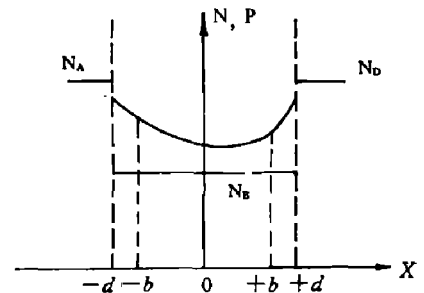


图 3 双注入效应的载流子分布
Fig. 3 Distribution of carriers in dual-injection effect

对于 Si, 当 $d \leq L_a$ 时, $V_i = \frac{3kT}{2q} \left(\frac{d}{L_a} \right)^2$. 若取 $d = 8 \mu\text{m}$, $L_a = 10 \mu\text{m}$, 在室温下可算得 $V_i \approx 25 \text{ mV}$, 可见大注入对波导区压降很小, 且与电流密度无关.

3 全硅结栅控制双注入波导电光开关及调制器

波导电光开关的工作原理与波导电光调制器完全相同. 同样的器件既能作开关, 又能作调制器, 基于这一特征, 下面着重讨论电光调制器.

3.1 器件的结构

DIFET 电光波导器件的俯视图见图 4, 阳极、栅极和阴极如图 4 中阴影所示, 三个区域沿垂直于光传播方向排开, 采用的是单片光电集成. 图 4(a) 是波导电光调制器, 图 4(b) 是工作在两模干涉的 2×2 波导电光开关, 它由交叉的脊形波导组成, 交叉区宽度是单波导的 2 倍. 为了有选择性地改变交叉区的对称波导模, 栅电极制作在脊形波导顶端.

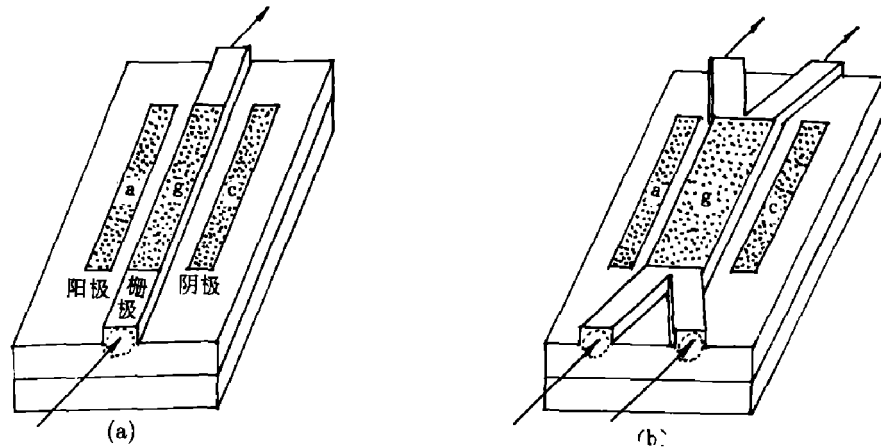


图 4 结栅控制硅波导电光调制器及 2×2 电光开关

Fig. 4 Silicon guided-wave modulator and 2×2 switch with electro-optical control produced by an integrated junction-DIFET structure

DIFET 波导电光调制器沿中间部分 $x-y$ 平面的截面图见图 2. N 型硅外延层在波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 时, 其折射率 n_f 是 3.505. 衬底折射率 n_s 较低, 它由电离受主的自由空穴浓度决定; 在浓度为 $1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时, $n_s \approx 3.494$; 这样在衬底和外延层之间, 折射率有一恒定的梯度, 该梯度在竖直方向限制光. 脊形波导顶端 P^+ 区折射率也为 n_s , 是一个低折射率的覆盖层. $0.7 \mu\text{m}$ 的竖直腐蚀台是在 N 型的平板波导上制作的, 形成脊形在横向限制光. 对于单模传输, 我们选择脊形宽度为 $4 \mu\text{m}$, 外延层厚度为 $2 \mu\text{m}$, 腐蚀台高度为 $0.7 \mu\text{m}$. 但具体器件设计时可灵活选择器件参数.

在器件工作时, 使两个栅反偏, 这样在上层和下层 PN 结区形成两个耗尽区, 导通沟道位于这两层之间. 图 5 表明了沟道区以及电子-空穴对、耗尽层在 y 方向通过沟道的光模形状.

3.2 折射率变化的理论推导

如图 5 所示, 我们研究中心区 (1), 掺杂浓度 $N_d = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 t ; 外层覆盖区 (2) 为重掺杂, $N_a = 1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 由于区域 (2) 之间折射率相差 0.011, 因此光绝大多数限制在区域 (1) 中. 因载流子的注入和耗尽, 区域 (1) 中的折射率存在动态变化, 区域 (1b) 中, 随电压变化的高度为 h 的导通沟道中存在注入载流子, 其折射率减小 Δn_{1b} ; 相反, 区域 (1a) 中因耗尽, 其折射率增加 Δn_{1a} .

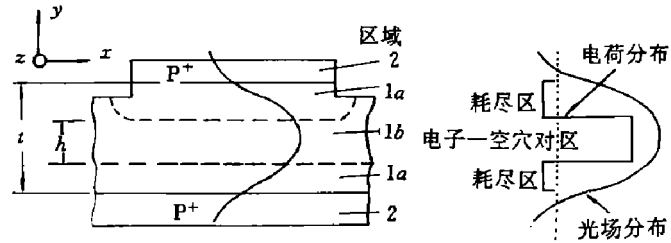


图 5 双栅调制器中限制在耗尽层之间的等离子与导模的重叠示意图

Fig. 5 Schematic diagram of two-gate modulator showing the overlap of the guided-mode field with the DIFET plasma confined between two depletion zones

假定 z 轴平行于光传输方向, y 轴沿光限制方向. 传输中的光波可看作是一个场, 形式为 $\varphi(y)e^{-i\beta z}$ [7]. 各处折射率的变化 $\delta n(y)$ 将引起传播常数 $\beta = 2\pi n/\lambda$ 的相应变化. $\delta\beta$ 可通过下面的积分给定 [8]:

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{\delta\beta}{K_0} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dy |\varphi(y)|^2 \delta n(y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} dy |\varphi(y)|^2}, \quad (9)$$

式 (9) 中 Δn_{eff} 是有效折射率的变化, $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, λ_0 是光在自由空间中波长. 基模场分布为

$$\varphi(y) = \begin{cases} \cos(2uy/t), & |y| < t/2 \\ \cos(u) \exp[w(1 - 2|y|/t)]; & |y| > t/2 \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 中 $u = \frac{t}{2}(K_0^2 n_f^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$, $w = \frac{t}{2}(\beta^2 K_0^2 n_s^2)^{\frac{1}{2}}$. 对于我们研究的情况, 只需考虑 u 的最大值:

$$u = u_{\text{max}} = \frac{t}{2} K_0 (n_f^2 - n_s^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{\pi t}{\lambda_0} (n_f^2 - n_s^2)^{\frac{1}{2}} \approx 1.073$$

上式中取 $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$, $t = 1.6 \mu\text{m}$, $n_f = 3.505$, $n_s = 3.494$, 此时光波的振幅为 $\cos(1.073) \approx 0.477$.

在光波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 时, 对于硅材料的载流子注入和耗尽, 若浓度变化 ΔN 和 ΔP , 将引起折射率的变化, Δn 可近似表示为 [4]

$$\Delta n = \mp 6.2 \times 10^{-22} \Delta N \mp 1.2 \times 10^{-21} \Delta P, \quad (11)$$

式 (11) 中 (-/+) 分别对应 (注入 / 耗尽). 由式 (11) 可得, 对于 $\Delta N = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的电子耗尽:

$$\Delta n_{1a} = +2.48 \times 10^{-5}.$$

对于 $\Delta N = \bar{N} = \Delta P = \bar{P} = 3.73 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的电子空穴对双注入区:

$$\Delta n_{1b} = -6.8 \times 10^{-3}.$$

3.3 沟道宽度的控制

沟道宽度 h 的控制可通过调节反偏栅压使耗尽区宽度改变来实现, 假设 PN 结是突变结, 对于 $N_d = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_a = 1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (见图 2), 内建电压为

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{N_i^2} = 0.92 \text{ V},$$

式中 N_i 是本征载流子浓度, 在栅电压为零时, 耗尽层宽度:

$$w_0 = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r V_D}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \approx 0.17 \mu\text{m}.$$

下面讨论有效折射率 n_{eff} 的变化 (见图 5), 导通沟道宽度 h 被两边耗尽区对称地限制, 对于任意栅电压 (两栅在同一电位), 耗尽层宽度可写为

$$w(-V_g) = \left(\frac{V_g}{V_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{t}{2}. \quad (12)$$

夹断电压定义为完全耗尽沟道所需加的栅电压, 此时夹断电压为:

$$-V_p = \left(\frac{t}{2} \right)^2 \left(\frac{q N_d}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \right). \quad (13)$$

我们知道 $N_d = N_0 - P_0 = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t = 1.6 \mu\text{m}$, 此时可算得 $V_p = 19 \text{ V}$. 由图 5 可知: $\frac{h}{2} = \frac{t}{2} - w = \frac{t}{2} \left[1 - \left(\frac{V_g}{V_p} \right)^{1/2} \right]$, 根据式 (9), 受电压控制的交叠积分为:

$$\frac{\delta\beta}{K_0} = \frac{\Delta n_{1b} \int_{h/2}^{-h/2} dy \cos^2(2uy/t) + 2\Delta n_{1a} \int_{-t/2}^{-h/2} dy \cos^2(2uy/t)}{\int_{t/2}^{-t/2} dy \cos^2(2uy/t)},$$

由上式求积分后, 得到有效折射率的变化为:

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{\delta\beta}{K_0} = \left\{ (\Delta n_{1b} - \Delta n_{1a}) \frac{h}{t} \left[1 + \frac{\sin(2uh/t)}{2uh/t} \right] \right\} / \left[1 + \frac{\sin(2u)}{2u} \right] + \Delta n_{1a}, \quad (14)$$

图 6 给出 $n_p = 3.505$, $n_s = 3.494$, $L = 650 \mu\text{m}$, $d_c = 2.0 \mu\text{m}$, $T = 1.6 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 时对称耗尽型 n_{eff} 与归一化栅压 V_g/V_p 的曲线.

4 结论

调制器工作时, 其栅电压要求在初始电压和末态电压 $\delta V_g = V_g - V_g'$ 之间变化, 这样引起波导中有效折射率变化为 $\delta n_{\text{eff}} = \Delta n_{\text{eff}} - \Delta n'_{\text{eff}}$, 导致的光相位调制是 $\Delta\phi = 2\pi\delta n_{\text{eff}}/\lambda_0$.

如果把栅电压从夹断电压的 10% 上升到 90%，我们从图 6 可见，对于对称耗尽的 DIFET， $\delta n_{\text{eff}} = 5.8 \times 10^{-3}$ 。

我们制作的结栅控制双注入调制器的调制速度是非常快的，它取决于耗尽区边缘运动电荷的抽出速度和器件本身的时间常数。频带宽度可估算如下：

抽出时间 τ_s 为

$$\tau_s = w/\mu E_d; \quad (15)$$

式中 E_d 为耗尽层场强， μ 是载流子迁移率， w 是耗尽层宽度。假定 $w = 2 \times 10^{-5}$ cm， $\mu = \mu_n = 950$ cm²/V·S， $E_d = 10^5$ V/cm，我们得到 $\tau_s = 2.1 \times 10^{-13}$ s。但调制器的上升和下降时间要受器件时间常数 RC 的限制。对于所讨论的情况， C 是反偏栅 PN 结电容，利用 $C = \epsilon_0 \epsilon_r A/W$ ， $\epsilon_r = 11.8$ ， $w = 0.2$ μm ，栅面积 $A = 4 \times 650$ μm^2 ，有 $C = 1.36$ PF，若栅串联电阻取 $R = 50$ Ω ，这样调制器频带宽度为 $1/2\pi RC \approx 2.34$ GHz，这样的调制器消耗的实际功率（栅控功率）也是很小的，光波导的传输损耗约为 5 dB/cm^[9]。

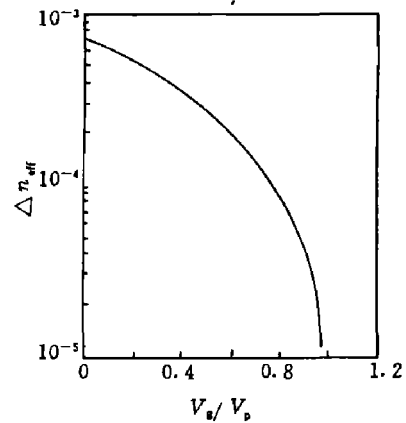


图 6 双栅器件的导模有效折射率分布
Fig. 6 Distribution of guided-mode effective refractive index of dual-gate devices

参考文献

- 1 Haga H. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986;QE-22:902~906
- 2 Mikami O, Nakagome H. *Opt. Quantum Electron.*, 1985;17:449
- 3 Hsu TY et al. *Electron. Lett.*, 1988;24:603~605
- 4 Soref RA et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987;QE-33:123~129
- 5 Lampert MA, Mark P. *Current Injection in Solids*, New York: Academic, 1970
- 6 王家骅等. *半导体器件物理*, 北京: 科学出版社, 1983, p.90
- 7 Adams MJ et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1986;48(13):820~822
- 8 Alping A, Wu XS, Hansken R, Colden LA. *Appl. Phys. Lett.*, 1986;48:1243
- 9 Hall DG. *Computer*, 1987;20(12):25~32

**A NEW METHOD FOR ALL-SILICON DOUBLE-INJECTION
GUIDED-WAVE ELECTROOPTIC SWITCH AND
MODULATOR WITH JUNCTION GATE CONTROL**

LIU ZHIMIN, LIU ENKE

*(Institute of Artificial Intelligence and Robot, Xi'an Jiao Tong University,
Xi'an, Shaanxi 710049, China)*

Abstract: A new double-injection all-silicon junction field-effect transistor structure is proposed and analyzed as a guided-wave electro-optical modulator and 2×2 electro-optical switch for infrared region. Their operating principles are analyzed, some parameters are given, and the frequency bandwidth is estimated digitally. Estimation of the change Δn_{eff} in effective mode index shows that the DIFET device is viable.

Key words: integrated optics, silicon, optical waveguide, electro-optical devices.