

高能离子注入硅中自由载流子的等离子效应的光学响应研究

俞跃辉 邹世昌

(中国科学院上海冶金所 离子束开放研究实验室 上海 200050)

周筑颖 赵国庆

(复旦大学原子核物理系 上海 200433)

摘要 将能量分别为 3MeV 或 5MeV, 剂量为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 的磷离子注入 $\langle 100 \rangle$ 硅单晶, 经 1050°C, 20s 退火形成导电埋层. 本文分析高能离子注入体系和自由载流子等离子体效应的光学响应. 在 $500-4000 \text{cm}^{-1}$ 波数范围的红外反射谱中观测到由自由载流子等离子体效应所致的干涉现象. 应用计算机模拟红外反射谱获得了导电埋层中的载流子分布, 迁移率和高能注入离子的电激活率.

PACC: 7830, 6170T

1 引言

高能(MeV)离子注入技术作为超大规模集成电路(ULSI)的关键工艺已得到国际上广泛的重视^[1,2], 在硅材料中, 2MeV 的磷离子注入, 其深度可达 $\sim 2\mu\text{m}$, 这表明利用高能离子注入可形成倒阱, 以减小漏电流和闭锁敏感性, 可制作 n^+ 栅或 p^+ 埋层, 或用来作为多维立体结构器件的深掺杂. 目前, 高掺杂, 隐埋导电层的形成及表征是国际上高能离子注入在微电子学和集成电路方面的研究热点, 研究尚处于数据积累阶段, 同时在测量技术方面还存在许多困难; 以载流子分布测量问题为例: 高能离子注入深度达几个微米, 应用微分霍尔法在实际测量中是很困难的; 同时由于没有准确的迁移率数据, 也无法应用扩展电阻(SRP)方法获得准确的载流子分布. 因此建立有效的高能离子注入形成导电埋层的载流子分布的测量方法是非常重要的.

在本工作中, 我们深入地分析高能离子注入硅中自由载流子的等离子效应的光学响应, 在此基础上用计算机模拟红外反射谱获得载流子浓度分布.

2 实验方法

将能量分别为 3MeV 或 5MeV, 剂量为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 的砷离子注入电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型 <100> 硅单晶. 注入后进行 1050°C , 20s 的快速热退火 (RTA), 以便激活注入的离子, 形成导电埋层. 用 SSM-150 扩展电阻仪测得了注入层的电阻率分布. 用 Perkin-Elmer 983 型双束红外光谱仪进行红外反射谱测量. Perkin-Elmer 983 的绝对反射率测量误差为 $\pm 1\%$. 反射率是在入射光垂直照射于注入表面的情况下测量的. 离子注入面与背面之间的多次反射由于背面粗糙而消除. 为了获得样品绝对反射率, 将从样品表面反射出的光的强度与一高质量 Al 镜上反射出的光的强度进行比较.

3 结果与讨论

高能注入的砷离子经 RTA 后, 在注入区内激活成为施主并在注入区形成载流子分布; 由于自由载流子等离子效应将在红外反射谱中产生干涉效应. 用 n_1 和 k_1 表示注入区的折射率和消光系数, n_1 和 k_1 在低频范围的行为由激活的高能注入离子所贡献的自由载流子的等离子体效应决定. 这时注入区的折射率 n_1 和消光系数 k_1 必须包含由等离子体效应所致的色散效应, 即 n_1 和 k_1 是载流子分布 $N_c(x)$, 阻尼系数 γ 和频率 ν 的函数. 由于注入离子的分布是非对称的, 因此, 我们用具有不同标准偏差的两个半高斯分布来表征载流子分布. 按一般离子束合成多层结构薄膜体系的光学表征方法^[3], 载流子分布 $N_c(x)$ 被分成 T 层, 每一层的厚度为 Δx , 具有浓度 N_{ci} :

$$N_{ci} = N_{co} \times \exp(- (x_i - R_p)^2 / 2\Delta R_p)^2 \quad (1)$$

其中, $x_i = (i-1) \times \Delta x$, ($i=1, 2, \dots, T$)

$$\Delta x = \Delta R_p / 10$$

而且, 当 $x_i < R_p$ 时, $\Delta R_p = \Delta R_{p1}$

$$\text{当 } x_i > R_p \text{ 时, } \Delta R_p = \Delta R_{p2}$$

由 $N_c(x)$ 可以计算注入区的 n_1 和 k_1 , 第 i 层的复介电函数

$$\epsilon_i = \epsilon'_i + i\epsilon''_i = (n_i - ik_i)^2 = \epsilon_1 - \epsilon_1 \omega_{pi}^2 / (\omega^2 - i\gamma_i \omega) \quad (2)$$

第一项 ϵ_1 是高频时 ($\omega \gg \omega_p$) 没有自由载流子效应时注入区介电函数, 第二项是与自由载流子对应的介电响应. ω_{pi} 是第 i 层的等离子频率, 由下式给出:

$$\omega_{pi}^2 = N_{ci} e^2 / (\epsilon_1 \epsilon_0 m^*) \quad (3)$$

其中 m^* 是自由载流子的有效质量.

γ_i 是第 i 层的阻尼系数, 根据阻尼系数的物理定度, γ_i 为:

$$\gamma_i = N_{ci} e^2 / (m^* \sigma_i F_\gamma) = N_{ci} \rho_i e^2 / (m^* F_\gamma) \quad (4)$$

其中, σ_i 和 ρ_i 分别为第 i 层的电导率和电阻率, F_γ 是一拟合参量. F_γ 可在拟合过程中确定. 进一步有:

$$\epsilon'_i = n_i^2 - k_i^2 = \epsilon_1 (1 - \omega_{pi}^2 / (\omega^2 + \gamma_i^2)) \quad (5)$$

$$\epsilon''_i = 2n_i k_i = \epsilon_1 \gamma_i \omega_{pi}^2 / (\omega (\omega^2 + \gamma_i^2)) \quad (6)$$

由此可得第 i 层的折射率 n_i 和消光系数 k_i ：

$$n_i = (\epsilon_i'/2 + (\epsilon_i'^2 + \epsilon_i''^2)^{1/2})^{1/2} \tag{7}$$

$$k_i = (-\epsilon_i'/2 + (\epsilon_i'^2 + \epsilon_i''^2)^{1/2})^{1/2} \tag{8}$$

将光学参量 n_i 和 k_i 代入我们已经建立的描述离子束合成多层结构薄膜光学响应的计算软件中^[3]，就可以计算在任意频率 ν 时的该体系的反射率 R 。根据上述模型，我们可以计算在垂直入射条件下，据有折射率 n_i ，消光系数为 k_i ，层厚为 Δx 的任意多层介质体系的反射率。由于在实验中消除了光在正、背表面的多次反射，衬底硅可认为是具有折射率 n_s 的无限大介质^[4]：

$$n_s = (4.1476 + 5.8876 \times 10^9 / (27973^2 - L^2))^{0.5} \tag{9}$$

其中 L 为波数，在波数为 $500\text{--}4000\text{cm}^{-1}$ 范围内，消光系数 $k_s=0$ 。实验谱的计算机模拟是通过调整多层介质体系模型中参量使约化均方 χ^2 达最小：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (R_{i,e} - R_{i,t})^2 / (N - N_p) \tag{10}$$

其中， $R_{i,e}$ 是实验测量的反射率， $R_{i,t}$ 是理论计算的反射率， N 是实验谱中的数据点数， N_p 是上述模型中参量数。理论谱与实验谱的拟合过程表明，在达到最佳拟合时，多层介质体系中参量如载流子分布的峰值浓度 N_{c0} ，射程 R_p 都确定的。

图 1 为能量为 3MeV ，剂量为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 的砷离子注入硅并经 1050°C ， 20s 的 RTA 后的，用 SRP 所得电阻率分布。图 2(a) 为图 1 样品的红外反射谱和最佳理论拟合谱。用非线性最小二乘法使理论谱与实验谱得到最佳拟合。图 2(b) 为模拟计算达到最佳时的载流子分布。表 1 为最佳拟合参量。在模拟计算中，还用另一种方法来描述 γ ：对所有的 N_{ci} ， γ 都为同一拟合参量。从图 2(a) 中可见，两种不同描述 γ 情况下的拟合反射谱在实验误差 (R 为 $\pm 1\%$) 的范围内吻合的很好，因此两种方法都可以用于模拟计算。上面的计算亦表明反射谱对 γ 的深度依赖性不敏感，这一点可以从图 3 中得到解释。图 3 给出了以 R_p 为中心的载流子分布和阻尼系数 γ 的分布。 γ 的分布是由图 1 中的电阻率分布通过式(4)计算的，虚线为 γ 是常数分布时最佳拟合值。从图 3 中可见，在以 R_p 为中心的 $2\Delta R_p$ 范围内， γ 在 10% 范围内是常数而相应的载流子浓度变化了一个多数量级。因此，在包含 96% 载流子的范围内，阻尼系数为常数。在确定了阻尼系数 γ 后；在 γ 不随深度变化情况下，导电层的有效迁移率 $\mu_{\text{eff}} = e / (m^* \gamma)$ 为 $162\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。在 γ 随深度变化情况下，在载流子分布浓度峰值附近的迁移率为 $166\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。

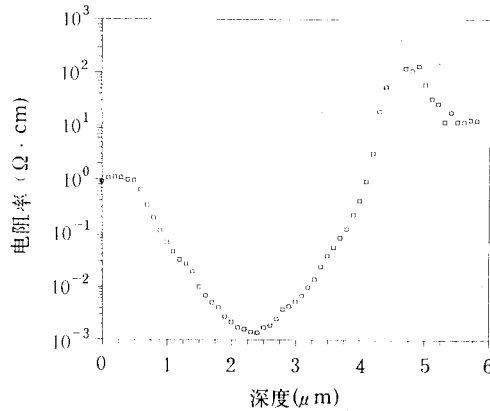


图 1 3MeV ， $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-2}\text{As}^+$ 注入硅并经 1050°C ， 20s 退火后电阻率分布

表 1 图 1 中样品的最佳拟合参量

$R_p(\mu\text{m})$	$\Delta R_{p1}(\mu\text{m})$	$\Delta R_{p2}(\mu\text{m})$	$N_{c0}(\text{cm}^{-3})$
2.20	0.47	0.16	9.0×10^{19}

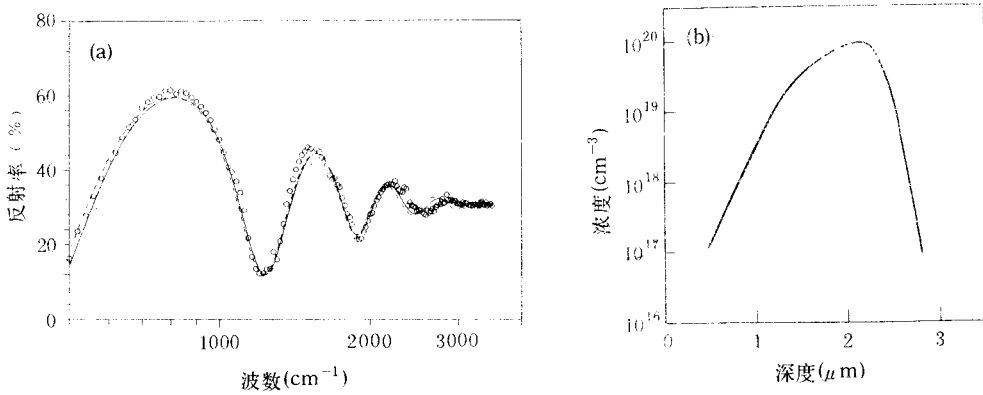


图2 (a)图1样品的红外反射谱(○)和最佳理论拟合谱(实线为 γ 按公式(4)随深度变化时,虚线为 γ 常数分布时)(b)为模拟计算的载流子分布

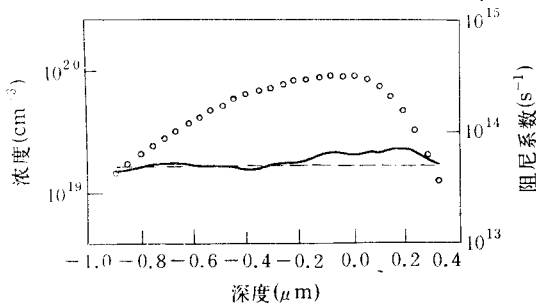


图3 以 R_p 为中心的载流子分布(○); γ 为由式(4)确定的,最佳拟合时分布(实线); γ 为常数分布时最佳拟合值(虚线)

图4给出了确定载流子分布的重要参量 N_{c0} , R_p 不同于最佳拟合值时所对应的红外反射理论谱.计算结果表明红外反射谱对载流子分布浓度峰值和形状是敏感的.这是非常重要的,因为它表明这种方法可以准确地表征载流子分布.同样,图5(a)能量为5MeV,剂量为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 的砷离子注入硅并经 1050°C ,20s的RTA后的红外反射谱和最佳理论拟合谱.图5(b)为模拟计算达到最佳时的载流子分布.表2为最佳拟合参量.这时,导电层的有效迁移率 $150 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

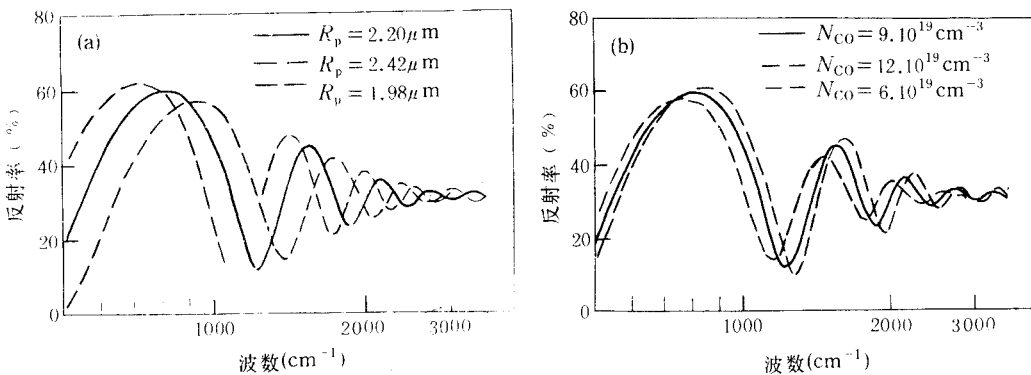


图4 与图1样品对应的通过模拟得出的不同 R_p , N_{c0} 时的红外反射理论谱

表2 图5中样品的最佳拟合参量

$R_p(\mu\text{m})$	$\Delta R_{p1}(\mu\text{m})$	$\Delta R_{p2}(\mu\text{m})$	$N_{c0}(\text{cm}^{-3})$
3.100	0.48	0.20	8.7×10^{19}

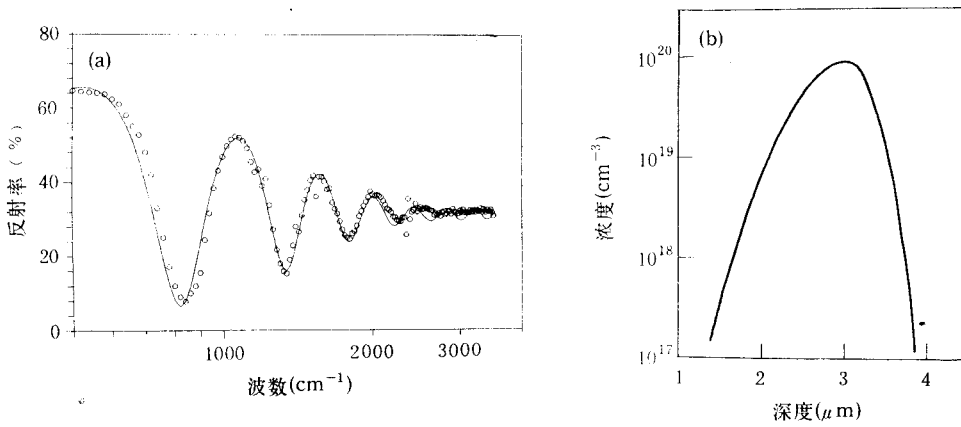


图 5 (a)5MeV, $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2} \text{As}^+$ 注入硅并经 1050°C , 20s 退火后的红外反射谱(○)和最佳理论拟合说(实线) (b)模拟计算的载流子分布

根据红外反射谱的计算机模拟结果,对高能注入的硼离子经 RTA 后的电激活率进行了计算,电激活率 η 为

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^T N_{ci} \right) / \varphi \tag{11}$$

其中, N_{ci} 为最佳拟合载流子分布, φ 为注入剂量. 由此可得 3MeV 和 5MeV 注入时电激活率分别为 71% 和 74%. 为了更详细地分析注入离子电激活行为,将模拟所得载流子分布与 TRIM91(国际通用离子在材料中运动的 Monte Carlo 计算程序,91 年版本)^[5] 计算所得的砷原子分布进行了比较;图 6 给出了砷原子分布和载流子分布. 从图中可见,原子分布峰值

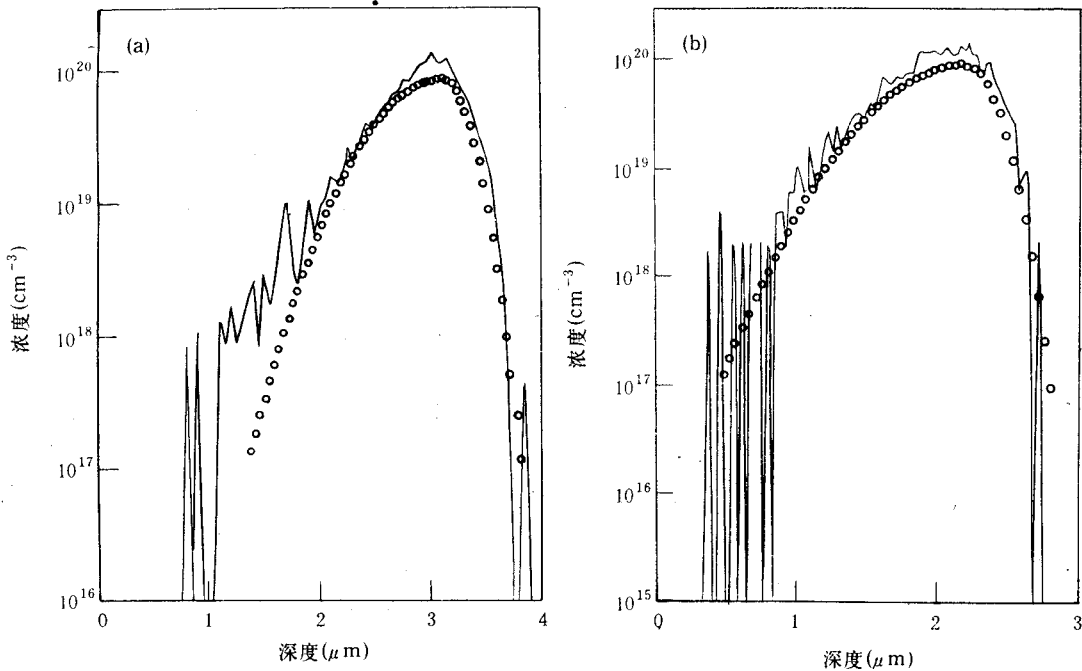


图 6 (a)和(b)分别给出了图 1 和图 5 样品的 TRIM91 计算砷原子分布(实线)和模拟计算载流子分布(○)

两侧的注入离子基本激活;在原子分布峰值附近注入离子的激活率较低.这是由于高能离子注入的硅在退火过程中,晶格恢复是从表面和衬底同时进行的,在原子分布峰值附近形成较多的二次缺陷,这些缺陷可俘获砷原子或形成载流子陷阱,导致原子分布峰值附近载流子浓度较低.

4 结 论

高能砷离子注入硅并经 RTA 后,被激活形成载流子分布.在 $500-4000\text{cm}^{-1}$ 波数范围的红外反射谱中观测到自由载流子等离子体效应所致的在低波数范围内的干涉现象.在分析高能离子注入体系和自由载流子等离子体效应的光学响应的特征基础上,应用红外反射谱结合计算机模拟,获得了载流子分布,迁移率和高能注入离子的电激活率.结果表明用红外反射谱结合计算机模拟的高能离子注入载流子分布的光学表征方法是一种有效的,无损测量方法.

参 考 文 献

- [1] J. F. Ziegler, Nucl. Instrum. Methods, 1985, **B6**:272.
- [2] M. Tamura and T. Suzuki, Nucl. Instrum. Methods, 1989, **B30**:318.
- [3] Yu Yuehui *et al.*, Appl. Surf. Sci., 1989, **40**:146.
- [4] C. D. Salzberg and J. J. Villa, J. Opt. Soc. Am., 1957, **47**:244.
- [5] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, The Stopping and Ranges of Ions in Solids, Vol. 1: edited by J. F. Ziegler, (Pergamon New-York), 1985.

Optical Response of Free-Carrier Plasma Effects of MeV Ion Implanted Silicon

Yu Yuehui and Zou Shichang

(Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Science, Shanghai 200050)

Zhou Zhuying and Zhao Guoqing

(Department of Nuclear Physics, Fudan University, Shanghai 200433)

Received 23 March 1994, revised manuscript received 17 June 1994

Abstract Arsenic ions have been implanted into Si at an incident energy of 3MeV or 5MeV to a dose of $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$. Buried conductive layers are formed in Si substrate after annealing at 1050°C for 20s. Infrared (IR) reflection spectra in the wavenumber range of 500–4000 cm^{-1} were measured and interference fringes related to free-carrier plasma effects are observed. By detailed theoretical analysis and computer simulation of the IR reflection interference spectra, the depth profile of the carrier density, the carrier mobility near maximum carrier density, and the carrier activation efficiency were obtained. The physical interpretation of the results and a critical discussion of the sensitivity of data fitted to the variation in parameters are given.

PACC: 7830, 6170T