

12keV 低能砷离子注入硅的损伤分布

张 旭* 莫 党

林成鲁 何治平

(中山大学物理学系, 广州 510275)

(中国科学院上海冶金研究所)

摘 要 测量了 12keV 注入能量、 $8 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 剂量砷离子注入硅的椭圆光谱, 并用最优化拟合算法从椭圆光谱定出损伤分布. 这种低能量离子注入的结果表明, 损伤分布呈现为平台型, 体内不出现峰值. 损伤深度为 12.5~16.0nm, 与背散射沟道技术测定结果相符合.

关键词 椭圆光谱, 离子注入, 损伤分布

分类号 O483

半导体超大规模集成电路的发展, 以及新型真空微电子管的出现^[1], 提出了制备非常浅的 p-n 结的要求, 有时结深只有 10nm 或更浅. 离子注入是制造浅结的一种有效手段, 很浅的结要求采用很低的离子注入能量. 当使用低能量 (例如本工作所用的 12keV) 离子注入时, 由于受到深度分辨率的限制 (在利用 2MeV He^+ 作分析束时, 常规 RBS/C 分辨率 $\sim 40\text{nm}$, 掠角 RBS/C 分辨率 $\sim 10\text{nm}$), 传统使用的背散射沟道技术 (RBS/C) 已不适宜用作损伤分布测定. 本工作首次用椭圆光谱法测定和研究低能量 (12keV) As^+ 注入 Si 的损伤分布, 得到损伤分布形状的有用结果, 并与 RBS/C 测量结果相比较.

根据有效介质理论^[2]和多层模型^[3], 对椭圆光谱测量数据进行分析 and 处理, 原则上可求出离子注入样品中损伤分布并定出损伤层厚度. 过去文献中曾采用过一些具体的求解法, 如何星飞和莫党^[4,5]采用 Levenberg 和 Marquardt 法 (简称 L-M 法). 低能离子注入浅层损伤分布的测定, 对椭圆光谱数据处理要求更高, 故本工作寻求一种对浅层损伤分布有足够精度而又有较快求解速度的实用算法. 经过试验, 我们采用一种结合随机投点法、空间收缩水平集切割法和 L-M 法的综合算法, 得到较好效果.

1 实验与多层模型拟合技术

低能离子注入样品用的硅片是电阻率为 $6 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型 $\langle 100 \rangle$ 抛光片. 砷离子注入能量为 12keV, 注入剂量分别为 $8 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 和 $2 \times 10^{15}/\text{cm}^2$. 为避免沟道效应, 注入时入射离子束与样品表面法线成 7° .

收稿日期: 1994-01-19

* 1992 级硕士研究生

椭圆偏光谱用本实验室制造的 TPP-1 型椭圆偏光谱仪测量. 光子能量范围是 2.0~3.6 eV, 入射角为 70°. 测量每光子能量 $h\nu$ 下的椭圆偏参数 Ψ 和 Δ , 即得椭圆偏光谱.

根据多层模型^[3], 对椭圆偏光谱数据进行拟合以求出损伤分布, 是采用最优化处理. 采用的目标函数为

$$f(X) = \sum_{h\nu} [(P_{h\nu}^c - P_{h\nu}^m)^2 + (Q_{h\nu}^c - Q_{h\nu}^m)^2] \quad (1)$$

其中

$$P_{h\nu}^{c,m} = \cos \Delta_{h\nu}^{c,m}, \quad Q_{h\nu}^{c,m} = (\tan^2 \Psi_{h\nu}^{c,m} - 1) / (\tan^2 \Psi_{h\nu}^{c,m} + 1) \quad (2)$$

这里上标 c 和 m 分别表示计算值和测量值. 对于由 N 层组成的对象, 每层可看作是由非晶硅和单晶硅两相组成. 第 i 层中的非晶硅占的百分比 x_i , 代表损伤度. 于是损伤分布可用 N 维向量 $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ 描述. 最优化处理的目标函数 $f(X)$ 的自变量就是损伤分布向量. 对于每组 x_i 值, 可计算出 $P_{h\nu}^c$ 和 $Q_{h\nu}^c$ 谱. 最优化就是求 $f(X)$ 最小. 这里, P 与 Q 在 $[-1, 1]$ 区间内取值.

式(1)的目标函数有一定复杂性, 自变量较多, 且解析形式较复杂. 无法运用收敛速度较快的牛顿法或变尺度法等. 何星飞和莫尧^[4,5]曾用求局部极值的 L-M 法进行损伤分布最优化计算. 但是, 由于复杂的目标函数可能存在多个极值点, 单用 L-M 法不一定能求出最优点. 此外, 单纯采用随机投点法的计算量太大, 不便实际使用. 为此, 我们利用每次投点后获得的信息对搜索区域作不大的收缩, 延续下去形成迭代过程, 并结合求局部极值的 L-M 法, 最后找到目标函数的总体极值点. 在此法中, 我们采用水平集切割收缩搜索区域^[6], 并且在某些情况下(例如每产生 20 组随机数)运用一次 L-M 法, 即可使效率提高很多.

为了检查本工作所用的最优化处理程序, 我们把有现成结论的氧离子注入硅形成 SOI 结构的椭圆偏光谱实验结果进行比较, 所算出的椭圆偏谱与实验谱的符合程度, 比文献^[7,8]所用算法要好.

2 损伤分布结果

我们测量了 12 keV As^+ 注入 Si 样品的椭圆偏光谱, 并采用 15 层模型来进行拟合, 求出相应的损伤分布. 图 1 是 3 个不同注入剂量的样品的损伤分布结果.

由图 1 可见, 12 keV 大剂量 As 注入 Si 的损伤分布呈平台形, 表面损伤几乎完全非晶化, 损伤度高达 100%. As 离子注入 Si 的实验损伤分布或原子分布曾在文献中发表过, 但注入能量范围在 40 keV 以上. 象 10 keV 这样低的注入能量, 还未见有损伤分布或原子分布的测定结果发表, 分布的具体形状还不大清楚. 有人用蒙特卡罗法在理论上

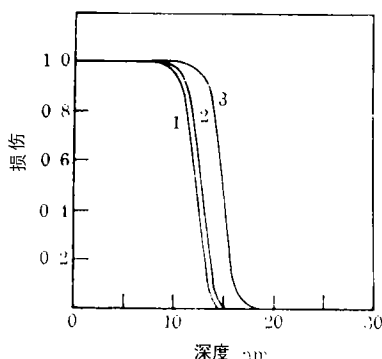


图 1 12keV As^+ 注入 Si 的损伤分布

Fig. 1 Damage profiles of 12keV As^+ implanted Si

1: 注入剂量 $8 \times 10^{14} / \text{cm}^2$, 2: $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2$,
3: $2 \times 10^{15} / \text{cm}^2$

计算了极低能 (1 keV) As 离子注入 Si 中砷原子的分布图^[9]. 计算结果随所用的理论模型不同而有较大差别. 当采用静态法时求得的分布在离表面约 2 nm 处具有峰值, 而表面处砷原子浓度接近零. 当采用考虑了注入过程中复杂的溅射和反射等因素的动态法计算, 分布则呈平台形, 表面处砷原子浓度达到平台值. 定性上看来, 后者的分布形状与本工作测得的损伤分布结果很相似.

图 2 是 As⁺注入 Si 的椭偏谱实验结果, 与两种典型分布 (即体内高斯型分布与表面高斯型分布) 所算出的椭偏谱的比较. 由图可见, 实验曲线随 $h\nu$ 的变化比较缓慢, 没有明显的隆起部位, 与表面高斯型结果较相近, 而与体内高斯型结果有很大差异. 以上比较进一步说明拟合结果呈平台型分布 (不是体内峰型分布) 是可信的.

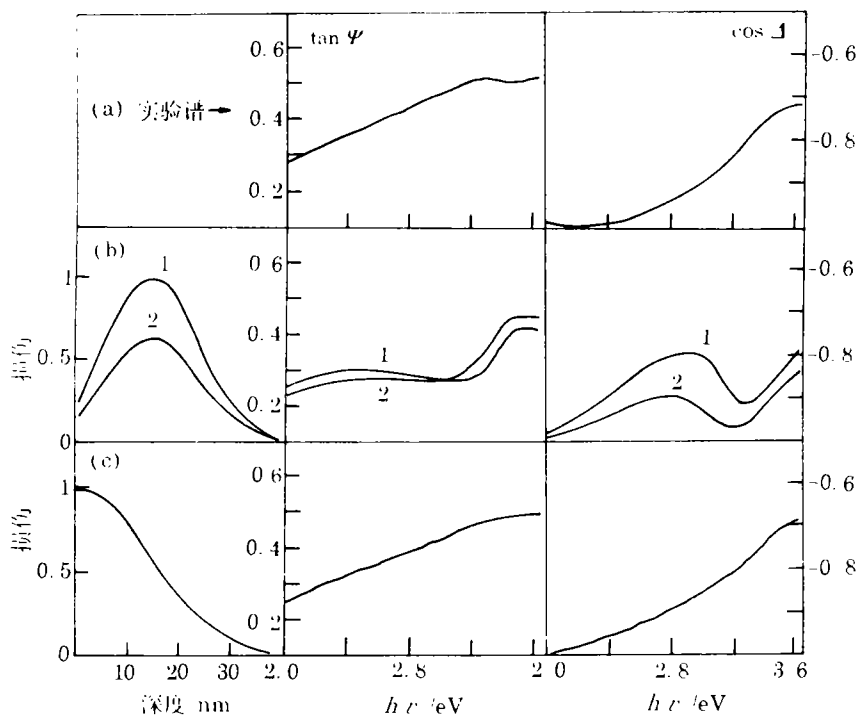


图 2 实验椭偏谱与两种典型损伤分布的理论椭偏谱 (a) 12 keV、 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ As⁺注入 Si, (b) 体内高斯型分布, (c) 表面高斯型分布

Fig. 2 Experimental ellipsometric spectra (a) and calculated spectra from (b) inside Gaussian model and (c) model of Gaussian curve truncated at the surface

由图 1 的离子注入损伤分布, 求出不同注入剂量的样品的损伤层厚度, 列于表 1.

为了比较, 我们还对同组样品作了 RBS/C 测量. 由于 RBS/C 技术的深度分辨率限制, 不能从 RBS/C 谱定出具体的损伤分布图. 但还是可根据 RBS/C 谱的分析, 求出损伤层厚度值. 其结果也一并列于表 1. 由表可看出, 椭偏光谱法与 RBS/C 法两者测得的损伤层厚度值还比较符合.

表 1 砷离子注入硅的损伤层厚度的测定比较

Tab.1 Comparison between two thickness values of damage layer in As ion implanted Si determined by spectroscopic ellipsometry and RBS/C technique

样 品	损伤层厚度	
	椭偏谱法	RBS/C 法
12 keV, $8\times10^{14}/\text{cm}^2$	12.5 nm	12.9 nm
$1\times10^{15}/\text{cm}^2$	13.0 nm	14.4 nm
$2\times10^{15}/\text{cm}^2$	16.0 nm	17.5 nm

3 结 语

- (1) 用一种有效的拟合算法，可根据椭偏光谱求出很低能量（如 12 keV）As 离子注入 Si 的损伤分布。
- (2) 12 keV、高剂量 As 离子注入 Si 的损伤分布呈平台型，表面处损伤达到 100%，体内不出现损伤峰。
- (3) 对于 12 keV、 $8\times10^{14}\sim2\times10^{15}/\text{cm}^2$ As 离子 Si，损伤层厚度在 12.5~16.0nm，与 RBS/C 法测定结果相近。

参 考 文 献

1 Brodie I. Keynote address to the first international vacuum microelectronics conference, June 1988; pathways to vacuum microelectronics. IEEE Trans ED. 1989, 36: 2637

2 Aspnes D E. Optical properties of thin films. Thin Solid Films, 1982, 89: 249

3 Born M, Wolf E. Principles of Optics, 6th edition, 1988

4 何星飞, 莫党. 离子注入 Si 损伤分布的光谱法多层分析. 物理学报, 1986, 35: 1567

5 何星飞, 莫党. 椭偏光谱法研究离子注入 Si 损伤分布—多层模型的最优化方法. 中山大学学报 (自然科学版), 1986 (3): 81

6 郑权, 蒋百川, 庄松林. 一个求总极值的方法. 应用数学学报, 1978, 1: 161

7 Liang Z L, Mo D. Ellipsometric spectra of silicon—on—insulator wafers. Appl Phys Lett, 1988, 52: 1050

8 梁中宁, 莫党, 卢殿通. 氧离子注入硅 SOI 结构的椭偏谱研究. 半导体学报, 1989, 10: 132

9 Zheng L P. Cui F H, Wang Z X. Simulation of ultra—low—energy and high fluence As im-plantation. Proc Shanghai Workshop on Ion Implantation, Hangzhou, 1988. 101

Damage Profile of 12keV Low – Energy Arsenic Ion Implanted Silicon

Zhang Xu Mo Dang Lin Chenglu He Zhiping*

Abstract Damage profiles for 12keV, $8 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ As⁺ implanted Si samples are determined by suitably optimizing the ellipsometric spectra. It is shown for the case of very low energy implantation that the damage profile is plateau type and that there is no inside peak structure. The depth of damage is determined to be 12.5 ~ 16.0nm, which is consistent with the result measured by RBS/C technique. The ellipsometric spectroscopy is shown to be advantageous over RBS/C technique in resolution, thus providing more details of damage profile with this work.

Keywords spectroscopic ellipsometry, ion implantation, damage profile

* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275