第 36 卷 第 8 期
1987 年 8 月

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 36, No. 8
Aug., 1987

As^+ 注入硅的紫外-可见椭圆偏振光谱*

江任荣 项颂光 王浩文 徐泽鸿 莫 党
(中山大学微电子学研究所)

1986 年 8 月 8 日收到

提 要

本文采用椭圆偏振光谱法研究了剂量为 1×10^{16}—$3\times10^{17}cm^{-2}$ 的 As^+ 注入硅，及其在 700℃ 退火后的光学性质. 得出：当 As^+ 注入剂量增大到某一程度后，便呈非晶特性. 低于临界剂量的样品，其 n-λ，ε_2-λ 关系曲线随剂量的增大而往下方移动，呈有规律变化；退火后，在大于 4000 Å 波段，n-λ 与 ε_2-λ 曲线基本恢复到单晶硅状态. 但在小于 4000 Å 的紫外区却未完全恢复，注入剂量越大，偏离单晶硅就越大. 并指出，紫外光区是离子注入硅的信息敏感区；用有效质量模型计算出注入剂量与损伤度的关系. 计算结果与实验符合得较好.

一、引 言

离子注入技术已经成为半导体掺杂的一种重要工艺. 硅片在注入过程中，由于高能粒子的轰击，在半导体表面层产生辐照损伤，引起晶格缺陷. 对离子注入损伤的研究，一直是人们关心的课题. 它对超大规模集成电路工艺的发展有着重要的影响. 前人曾用电子衍射、电子显微镜、背散射、电子自旋共振等方法进行研究[1].

椭圆偏振光谱法[2,3]是通过分析一系列波长下椭圆偏振光束经样品反射后，状态的变化来测量的. 它是一种非破坏性的测量方法. 莫党等人[4,5]曾在 4000—7000 Å 波长范围内，研究了高剂量的 As^+ 注入硅的光学性质. 本工作是在已有工作的基础上，进一步把测量波长范围扩展到紫外光区. 并对低于临界剂量（非晶化时的剂量）的各种 As^+ 注入样品，及其退火效应进行研究. 同时用有效质量模型，计算出注入剂量与损伤度的关系.

二、样品与实验装置

离子注入样品由清华大学微电子学研究所提供. 原始硅片为 P 型、(100) 晶向、电阻率为 7—9Ωcm. 注入能量为 150keV，注入偏角 7°. 注入束流控制在较小范围，以减少自退火效应. As^+ 的注入剂量在 1×10^{16}—$3\times10^{17}cm^{-2}$ 范围. 用来测量比较用的原始硅单晶片，经过阳极氧化后再进行除氧化膜处理，以减少硅片表面机械损伤层的影响.

实验装置是采用我们自己生产的 TPP-1型椭圆偏振光谱仪[6,7]. 仪器的工作波长范

* 中国科学院科学基金资助的课题.

围为 2600—8600 Å，椭偏参数的测量精密度 $\psi_{\sigma_{n-1}} \leqslant 0.05$，$\Delta_{\sigma_{n-1}} \leqslant 0.1°$，准确度误差 $\leqslant \pm 3\%$，起偏器和检偏器的读数精度为 0.01°，入射角的读数精度为 0.1°。仪器采用旋转检偏器的光度法工作，起偏器固定在 45° 的方位角上。测量时，对应某一波长，测出光电流的极大值 I_{max}，极小值 I_{min} 以及对应的检偏器的方位角 θ_{min}。计算出椭偏参数 ψ，Δ。当被测样品的膜厚远大于光的透入深度时，根据菲涅耳公式和椭偏参数的定义，导出 ψ，Δ 与 n，k 的关系式

$$n^2 = k^2 + \sin^2\varphi_1\left[1 + \frac{\tan^2\varphi_1(\cos^2 2\psi - \sin^2 2\psi \sin^2\Delta)}{(1 + \sin^2\psi\cos^2\Delta)}\right], \tag{1}$$

$$k^2 = \frac{\sin^2\varphi_1 \tan\varphi_1 \sin\Delta\psi \sin\Delta}{2n(1 + \sin 2\psi\cos\Delta)^2}, \tag{2}$$

式中 φ_1 为入射角。不断改变工作波长，可测得 n-λ，k-λ 关系。因为介电常数的虚部 ε_2 和 n，k 有如下的关系：

$$\varepsilon_2 = 2nk, \tag{3}$$

便可获得 ε_2-λ 关系。

三、实验结果与讨论

所有样品在测量之前，先用 $HF:H_2O = 1:9$ 的腐蚀液漂浸 5min，然后用去离子水冲洗、烘干。椭圆偏振光谱仪的入射角 φ_1 选用 70°。

1. 退火前

图 1 为折射率 n 与波长 λ 的关系曲线。图中列出了 3×10^{12}，5×10^{13}，1×10^{14}，1×10^{15}，$1 \times 10^{16}cm^{-2}$ 五种不同注入剂量样品的测试结果。同时也列出单晶硅的测试结果，以资比较。

从图 1 中可见，$1 \times 10^{15}cm^{-2}$ 和 $1 \times 10^{16}cm^{-2}$ 的 n-λ 曲线很相似，偏平缓慢而无明显的谱峰。这种现象作者在研究非晶硅光学性质时已经指出[8—10]，这是非晶硅特性的反映。其它低剂量的样品，则仍保持与单晶硅相类似的形状，都出现明显的谱峰。而谱峰的高度随注入剂的增加而下降，谱峰的位置随注入剂量的增加而稍向长波方向移动。

图 2 为 ε_2-λ 关系曲线。单晶硅曲线出现双峰结构，位置分别在 2900 Å 和 3600 Å 附近。结果与前人工作相符[11]。剂量为 3×10^{12}，5×10^{13}，$1 \times 10^{14}cm^{-2}$ 三种样品曲线形状仍与单晶相似，也有双谱峰结构。在波长大于 4000 Å 波段，曲线随着注入剂量的增加而向上方移动。在波长小于 3800 Å 的紫外区，曲线则随注入剂量的增加而向下移动。

注入剂量为 $1 \times 10^{15}cm^{-2}$ 和 $1 \times 10^{16}cm^{-2}$ 的两高剂量样品。只有在 3600 Å 附近出现一个扁平谱峰，变化平缓。作者在文献 [9,10] 中也指出，非晶硅的 ε_2-λ 曲线只存在扁平单谱峰。样品出现这种现象表明已经非晶化了。

在这里我们可看到，当注入剂量大于 $1 \times 10^{15}cm^{-2}$ 时，便呈非晶化。显然，离子注入硅将存在着一个达到非晶态的临界剂量。这个临界剂量的准确值，必须用更细致工作来确定。

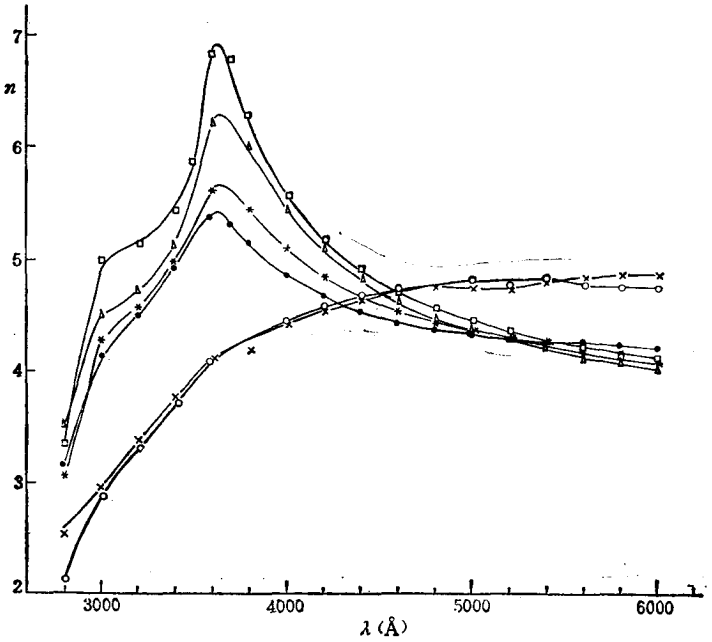

图 1 As^+ 注入硅的 n-λ 关系

□ 为单晶硅； △ 为 3×10^{12} cm^{-2}； * 为 $5\times10^{13}cm^{-2}$； ● 为 $1\times10^{14}cm^{-2}$；
$1\times10^{15}cm^{-2}$； $1\times10^{16}cm^{-2}$

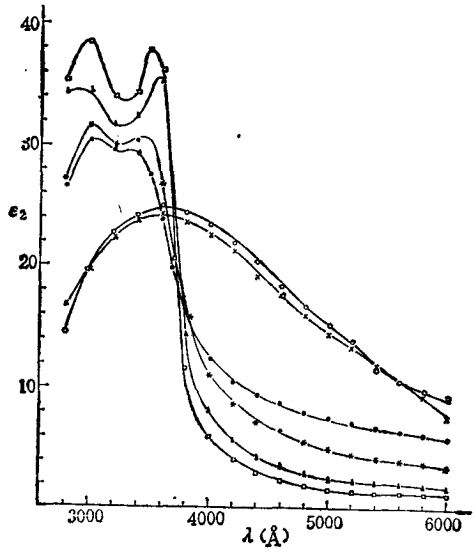

图 2 As^+ 注入硅的 ε_2-λ 关系

图注同图 1

2. 退火后

退火之前，样品用有机溶剂和硫酸、王水、去离子水作清洁处理. 退火温度 700℃，时间 30min，用氮气保护.

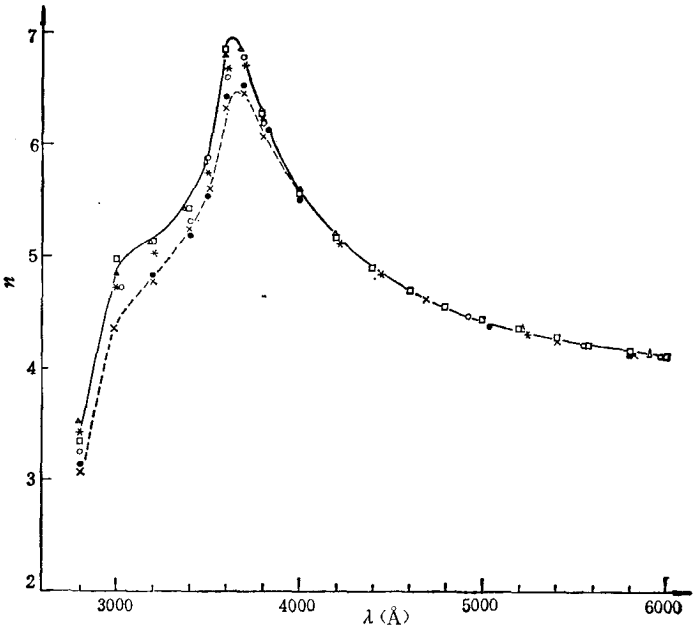

图 3　As^+ 注入硅退火后的 n-λ 关系

图注除○为 $1\times10^{14}cm^{-2}$；　●为 $1\times10^{15}cm^{-2}$ 外，均同图 1

图 3 为退火后的 n-λ 曲线．图 3 中在大于 4000 Å 的波段，各种不同注入剂量的样品，基本上恢复到单晶硅的状态．在小于 4000 Å 的紫外光区，各种不同注入剂量的样品，曲线的形状与单晶硅相似，但却达不到单晶硅曲线的高度．注入剂量越低，峰值及曲线就越高，即越接近单晶硅的曲线．

退火后的 ε_2-λ 关系曲线如图 4 所示，各条曲线的形状已经和单晶硅很相似．均出现双谱峰，一个在 2900 Å 附近，一个在 3600 Å 附近．然而谱峰高度多数未达到单晶硅的峰值，而且注入剂量越大，峰值就越低，即偏离单晶硅越大．

当我们细心观察图 3，图 4，特别是图 3 时，便会发现，同样一块退火后的样品，在大于 4000 Å 波段它已经恢复到单晶状态．然而在小于 4000 Å 的紫外区却未能完全恢复．而且这种情况随注入剂量大小而异，剂量越大，偏离单晶硅曲线越大．这就表明，小于 4000 Å 的紫外光区是离子注入硅的信息敏感区，在这个波段中我们可以获得更多的信息和有意义的结果．

3. 损伤度与注入剂量关系

有效介质理论的 Maxwell-Garnet 方程

$$\frac{N_c^2-1}{N^2+2}=q\frac{N_A^2-1}{N_A^2+2}+(1-q)\frac{N_B^2-1}{N_B^2+2}, \tag{4}$$

式中 $N_e=n_e-ik_e$ 为样品(看作有效介质)的复折射率．$N_A=n_A-ik_A$ 为非晶硅的复折射率（用 $1\times10^{16}cm^{-2}$ 样品代替）．$N_B=n_B-ik_B$ 为单晶硅的复折射率．q 为样品中

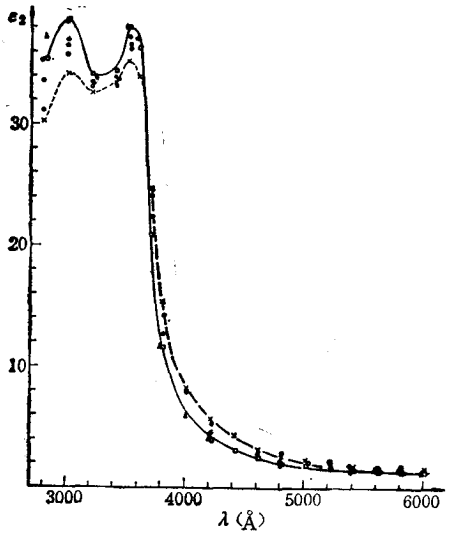

图 4 As^+ 注入硅退火后的 ε_2-λ 关系
图注同图 3

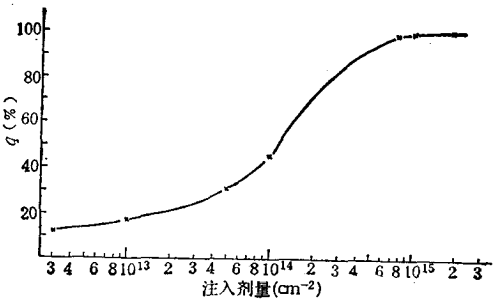

图 5 损伤度 q 与 As^+ 注入剂量的关系

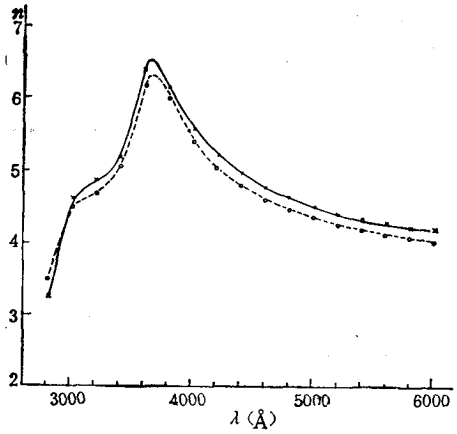

图 6 注入剂量为 $3\times10^{12}cm^{-2}$ 的样品的理论计算(○)与实验(×)的 n-λ 曲线比较

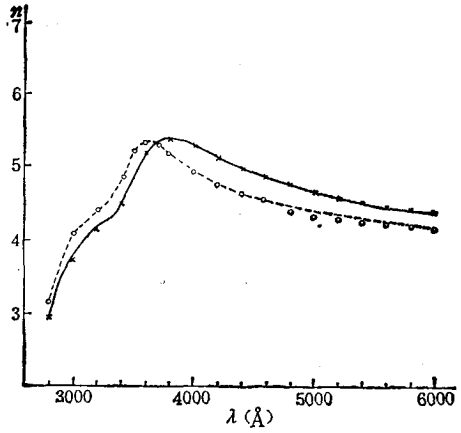

图 7 注入剂量为 $1\times10^{14}cm^{-2}$ 的样品的理论计算(○)与实验(×)的 n-λ 曲线比较

被测量薄层中非晶硅的体积含量百分比.

我们采用 q 来表示损伤度. 选取在典型波长 $\lambda = 4000$ Å 时, 各种样品的实验数据, 代入(4)式便可求得各种注入剂量样品的 q 值. 具体如图 5 所示. 图 5 表明: 在注入能量相同的条件下,小于临界剂量的样品的损伤度, 随注入剂量的增加而增大. 超过临界剂量时,损伤度达到饱和状态.

为了进一步考察这种有效质量模型的合理性, 参考图 5 中的结果, 对 $3\times10^{12}cm^{-2}$ 和 $1\times10^{14}cm^{-2}$ 两种注入剂量的样品的 q 值分别取 11% 和 46%, 代入 (4) 式, 计算出整个波段的 n-λ 关系. 并与实验结果作比较. 具体如图 6 和图 7 所示. 图 6 中计算值与实验值的最大相对偏差为 6.6%, 图 7 为 10.0%. 可见两者基本上是相符的. 说明模型是

基本合理的.

当然，本文采用的仅是一种近似模型. 计算结果仅是表征表面一定厚度膜层的特性参数的平均值，并未反映出损伤的纵向深度分布情况. 但是它的计算简便，并且已经比较好地揭示了注入剂量与损伤度的关系. 在实际工艺中有一定的实用意义.

参　考　文　献

[1] G. Garter and W. A. Grant, Ion Implantation of Semiconductors, (1976), Chapter 6.

[2] D. E. Aspnes, Optical Properties of Solids New Development, Amsterdam, North-Holland Pub. Co., (1976), p. 801.

[3] 莫党、陈树光、余玉贞、黄炳忠，物理学报，**29**(1980)，673.

[4] 莫党、叶贤京，物理报学，**30**(1981)，10；1287，

[5] 莫党、陈树光、林树汉、叶贤京、江任荣，中山大学学报(自然科学版)，(1)(1982)，35.

[6] 江任荣、陈树光、莫党，分析仪器，(6)(1982)，28.

[7] 江任荣、陈树光、叶贤京、莫党，仪器仪表学报，**4**(1983)，4；440.

[8] CHEN Shuguang (陈树光), JIANG Renrong (江任荣) and Mo Dang (莫党), *Chinese Physics*, **5**(1985), 1; 171.

[9] 江任荣、项颂光、王晓、莫党、李惠珍，中山大学学报(自然科学版)，(3)(1985)，119.

[10] 莫党、何星飞、江任荣、项颂光，电脑与微电子技术，(1)(1985)，10.

[11] G. E. Jeuison *et al.*, *J. Appl.*, **53**(1982), 5; 3745.

ON ULTRAVIOLET-VISIBLE ELLIPOMETRIC SPECTRA OF As^+ IMPLANTED SILICON

JIANG REN-RONG　XIANG SONG-GUANG　WANG HAO-WEN　XU ZE-HONG　MO DANG

(Microelectronics Research Institute, Zhongshan University, Guangzhou)

ABSTRACT

The radiation damage and the annealing behaviour of 1×10^{16}—$3\times10^{12}/cm^2$ As^+ implanted silicon have been measured with a TPP-1 spectroscopic ellipsometer. The results are as follows: (1) The amorphous layers were formed on the surface of Si samples when the doses of implanted As^+ were higher than the critical value. In the case of the doses were smaller than the critical value, both the n-λ and the ε_2-λ curves for As^+ implanted silicon shifted downward with an increase dose of implanted As^+. (2) With annealing at 700°C, the n-λ curve and ε_2-λ curve in the spectra range of 4000—7000 Å of As^+ implanted silicon exhibited the behavious of single crystalline silicon. However in the range of 2700—4000 Å, the curves did not show crytalline silicon behaviour and the difference between these curves and those taken with crysIline silicon increased with the doses of implanted As^+. (3) The dose dependence of the radiantion damage has been obtained.