

# As<sup>+</sup> 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  $1 \times 10^{16} - 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  的 As<sup>+</sup> 注入硅, 及其在 700°C 退火后的光学性质。得出: 当 As<sup>+</sup> 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  $n-\lambda$ ,  $\epsilon_2-\lambda$  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,  $n-\lambda$  与  $\epsilon_2-\lambda$  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<sup>[1]</sup>。

椭圆偏振光谱法<sup>[2,3]</sup>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<sup>[4,5]</sup>曾在 4000—7000 Å 波长范围内, 研究了高剂量的 As<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> 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—9 Ωcm。注入能量为 150 keV, 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<sup>+</sup> 的注入剂量在  $1 \times 10^{16} - 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  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<sup>[6,7]</sup>。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, 椭圆参数的测量精密密度  $\psi_{\sigma_{n-1}} \leq 0.05$ ,  $\Delta_{\sigma_{n-1}} \leq 0.1^\circ$ , 准确度误差  $\leq \pm 3\%$ , 起偏器和检偏器的读数精度为  $0.01^\circ$ , 入射角的读数精度为  $0.1^\circ$ . 仪器采用旋转检偏器的光度法工作, 起偏器固定在  $45^\circ$  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  $\theta_{\min}$ . 计算出椭圆参数  $\psi, \Delta$ . 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圆参数的定义, 导出  $\psi, \Delta$  与  $n, k$  的关系式

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

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

式中  $\varphi_1$  为入射角. 不断改变工作波长, 可测得  $n-\lambda, k-\lambda$  关系. 因为介电常数的虚部  $\epsilon_2$  和  $n, k$  有如下的关系:

$$\epsilon_2 = 2nk, \quad (3)$$

便可获得  $\epsilon_2-\lambda$  关系.

### 三、实验结果与讨论

所有样品在测量之前, 先用 HF:H<sub>2</sub>O = 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  $\varphi_1$  选用  $70^\circ$ .

#### 1. 退火前

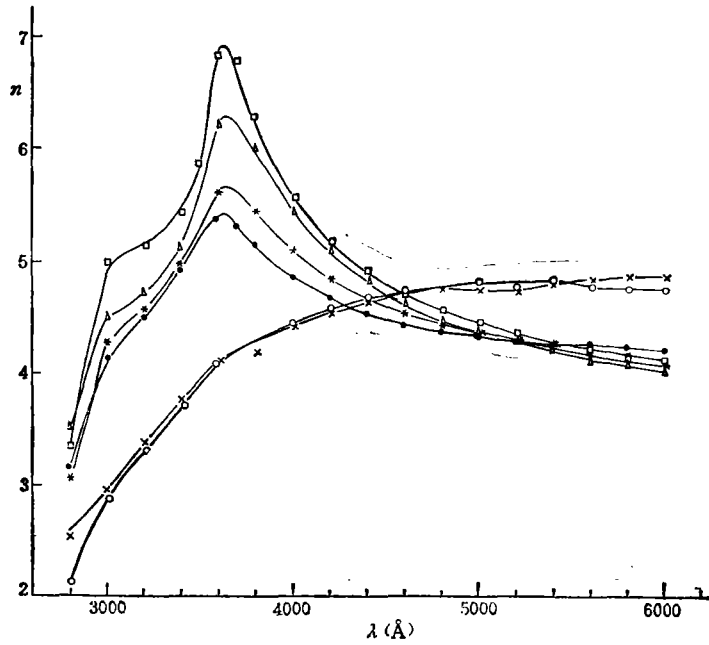
图 1 为折射率  $n$  与波长  $\lambda$  的关系曲线. 图中列出了  $3 \times 10^{12}, 5 \times 10^{13}, 1 \times 10^{14}, 1 \times 10^{15}, 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$  五种不同注入剂量样品的测试结果. 同时也列出单晶硅的测试结果, 以资比较.

从图 1 中可见,  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  和  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$  的  $n-\lambda$  曲线很相似, 偏平缓而无明显的谱峰. 这种现象作者在研究非晶硅光学性质时已经指出<sup>[8-10]</sup>, 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.

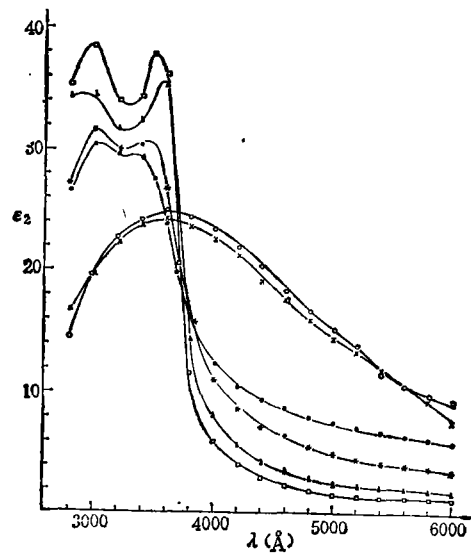
图 2 为  $\epsilon_2-\lambda$  关系曲线. 单晶硅曲线出现双峰结构, 位置分别在 2900 Å 和 3600 Å 附近. 结果与前人工作相符<sup>[11]</sup>. 剂量为  $3 \times 10^{12}, 5 \times 10^{13}, 1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$  三种样品曲线形状仍与单晶相似, 也有双谱峰结构. 在波长大于 4000 Å 波段, 曲线随着注入剂量的增加而向上方移动. 在波长小于 3800 Å 的紫外区, 曲线则随注入剂量的增加而向下移动.

注入剂量为  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  和  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$  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  $\epsilon_2-\lambda$  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  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  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  $n-\lambda$  关系

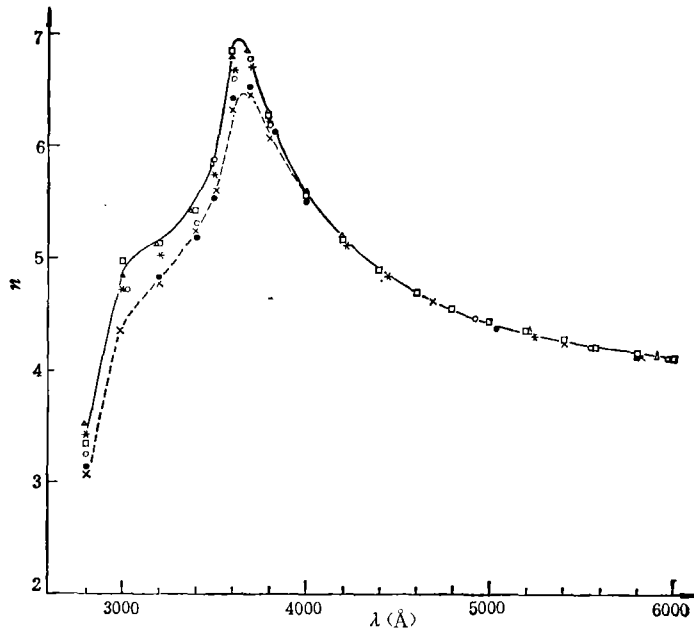
□ 为单晶硅;  $\Delta$  为  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ; \* 为  $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ; ● 为  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ;  
 $\circ$  为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ;  $\times$  为  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

图2  $As^+$  注入硅的  $\epsilon_2-\lambda$  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  $700^\circ\text{C}$ , 时间  $30\text{min}$ , 用氮气保护。

图3  $As^+$  注入硅退火后的  $n-\lambda$  关系

图注除  $\circ$  为  $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ ;  $\bullet$  为  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  外, 均同图 1

图 3 为退火后的  $n-\lambda$  曲线, 图 3 中在大于  $4000 \text{\AA}$  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  $4000 \text{\AA}$  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  $\epsilon_2-\lambda$  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  $2900 \text{\AA}$  附近, 一个在  $3600 \text{\AA}$  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  $4000 \text{\AA}$  波段它已经恢复到单晶状态。然而在小于  $4000 \text{\AA}$  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  $4000 \text{\AA}$  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

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

式中  $N_c = n_c - ik_c$  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  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$  样品代替)。  $N_B = n_B - ik_B$  为单晶硅的复折射率。  $q$  为样品中

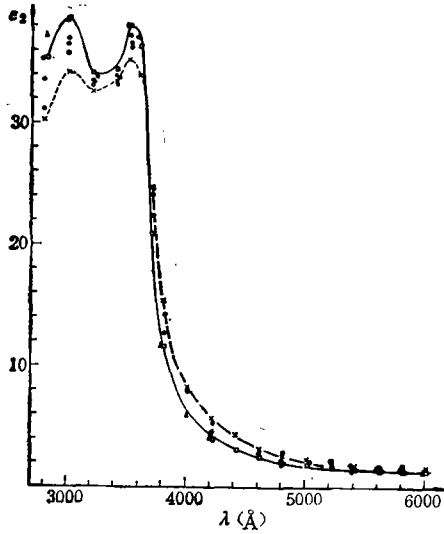


图 4 As<sup>+</sup> 注入硅退火后的  $\epsilon_2$ - $\lambda$  关系  
图注同图 3

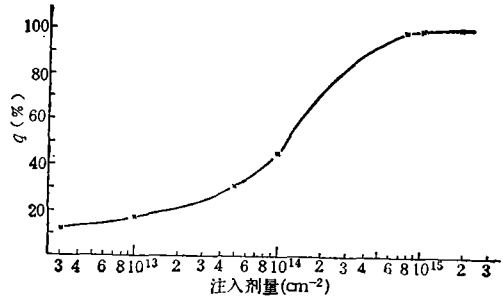


图 5 损伤度  $q$  与 As<sup>+</sup> 注入剂量的关系

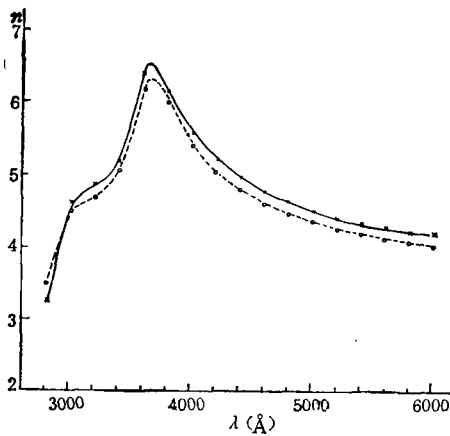


图 6 注入剂量为  $3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  的样品的理论计算  
(O)与实验( $\times$ )的  $n$ - $\lambda$  曲线比较

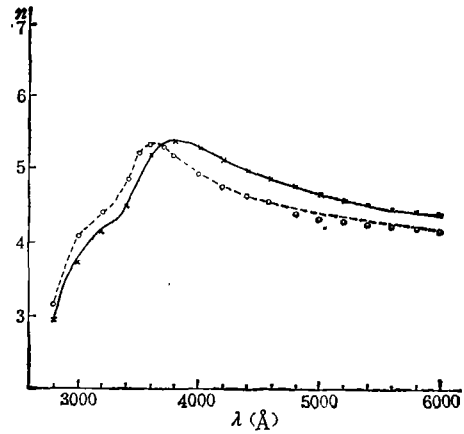


图 7 注入剂量为  $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$  的样品的理论计算  
(O)与实验( $\times$ )的  $n$ - $\lambda$  曲线比较

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  $\lambda = 4000 \text{Å}$  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  $3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  和  $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$  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  $n$ - $\lambda$  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. Jeusion *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  $1 \times 10^{16} - 3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$   $As^+$  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  $n-\lambda$  and the  $\epsilon_2-\lambda$  curves for  $As^+$  implanted silicon shifted downward with an increase dose of implanted  $As^+$ . (2) With annealing at  $700^\circ\text{C}$ , the  $n-\lambda$  curve and  $\epsilon_2-\lambda$  curve in the spectra range of  $4000 - 7000 \text{ \AA}$  of  $As^+$  implanted silicon exhibited the behaviour of single crystalline silicon. However in the range of  $2700 - 4000 \text{ \AA}$ , the curves did not show crystalline silicon behaviour and the difference between these curves and those taken with crystalline silicon increased with the doses of implanted  $As^+$ . (3) The dose dependence of the radiation damage has been obtained.