

离子注入硅的椭圆偏振光谱和光性

莫 党 叶 贤 京

(中山大学物理系)

1981年2月26日收到

提 要

为了进一步发展测定离子注入损伤层的椭圆偏光法,我们测量了离子注入硅在4000—7000 Å 波长范围内的椭圆偏振光谱,并由此得到它的色散关系。注入条件为150 keV, 10^{15}cm^{-2} 和 10^{16}cm^{-2} 的砷离子注入。由于在硅样品表面处形成无定形层,我们用单层模型,从 (Ψ, Δ) - λ 数据计算出 (n, k) - λ 关系,并可定出损伤层厚度。在 $\sim 4800\text{Å}$ 处,出现折射率 n 的谱峰,峰值约4.9。本文还比较了离子注入损伤层、溅射无定形硅膜层、蒸发无定形硅膜层和单晶硅的实验结果。

一、引 言

测定和研究离子注入引起的辐射损伤,过去主要采用背散射测量、电子衍射、电子显微镜、电子自旋共振等方法。Adams等^[1,2]、莫党等^[3,4]、罗晋生等¹⁾曾利用椭圆偏光法,分别对 P^+ 注入Si, As^+ 注入Si, N^+ 注入Si的情况,进行了测量和研究。这些结果表明,椭圆偏光法亦是测定离子注入损伤的有用工具。在上述工作中,均是采用一定波长($\lambda = 6328\text{Å}$)的椭圆偏光仪,对样品进行逐层(用阳极氧化剥层法)测量,得到硅折射率和消光系数沿深度的分布,从而知道辐射损伤的分布情况。Adams等亦采用过一定波长下改变入射角的测定方法。

另一方面,椭圆偏光法发展到测定一系列波长下的椭圆偏光参数^[5,6],可获得更多物理内容的信息。我们曾用此法来测定Si上 SiO_2 膜性质^[7]、共振膜条件下Si的色散关系^[8]。

在本工作中,我们企图进一步发展测定离子注入硅中损伤的椭圆偏光法,改变光波波长,测量离子注入硅的椭圆偏振光谱,从而得到折射率、消光系数及复数介电常数的谱分布,同时也可定出损伤层厚度。作为第一个实验对象,我们选取大注入剂量的砷注入样品。这一方面是我们过去工作^[3,4]的继续,也由于这种情况中损伤层分布形式较简单,便于计算分析。

由于离子注入损伤是在一定厚度的层内分布的,因此如何从实验测得的椭圆偏光参数 (Ψ, Δ) 计算折射率 n 和消光系数 k ,是个复杂问题。对我们的样品,已经知道 n, k 在损伤层内为平台式分布^[3,4],故可采用较简单的单层模型计算。具体计算方法,后面再详述。

1) 罗晋生、周彩弟,半导体学术讨论会上的报告,1978年8月,长春。

在过去的文献中,未见报道离子注入硅的色散关系的数据,故我们将结果与别种性质有些相似的硅样品的数据相比较. 在 150 keV、大注入剂量的砷离子注入条件下,辐射损伤层已经转变为无定形层. 在本工作中,我们把测量结果与溅射、蒸发等方法制备的无定形硅膜的色散关系加以比较,并进行讨论.

二、样品与测量方法

硅样品是 [111] 晶向的单晶硅片, P 型,电阻率为 $7-9 \Omega \cdot \text{cm}$. 然后经砷离子注入,注入能量为 150 keV,注入剂量为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 和 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$. 为了避免沟道效应,偏离 [111] 小角度注入.

实验装置基本上如文献[7]所述. 偏振器改用 Glan 稜镜,以提高实验精度. 波长可由 4000 Å 连续改变到 7000 Å. 入射角为 70.0° . 起偏器方位角放在 45° 位置(从入射面算起),不用 $1/4$ 波长片. 转动检偏器,测出 $I-\theta$ 关系. 这里 I 为通过光电倍增管和放大器系统的讯号值, θ 为检偏器方位角.

测定 $I-\theta$ 关系曲线的极值位置和大小,即 $\theta_{\min}$ (或 $\theta_{\max}$), $I_{\max}$, $I_{\min}$. 根据如下公式^[7]计算 Ψ, Δ :

$$\theta_{\min} = \alpha \pm 90^\circ, \quad (1)$$

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \cos 2\chi, \quad (2)$$

$$\tan \Delta = \frac{\tan 2\chi}{\sin 2\alpha}, \quad (3)$$

$$\cos 2\Psi = -\cos 2\chi \cos 2\alpha. \quad (4)$$

这里 (α, χ) 与 (Ψ, Δ) 是椭圆偏光参数的两组不同的表达方式,可互相转换. α 是反射光的椭圆长轴方位角, $\tan \chi$ 是椭圆的短轴与长轴之比. $\tan \Psi$ 是反射时 p 波与 s 波的相对振幅衰减, Δ 则是 p 波与 s 波位相移动之差.

改变波长,测出 $(\Psi, \Delta)-\lambda$ 关系,便是椭圆偏振光谱.

本方法测出在 $\lambda = 6328 \text{ Å}$ 的 Ψ, Δ 值,曾与用氩-氟激光椭圆偏光仪^[9]测得的值相比较,是一致的.

三 实验结果与计算方法

图 1 是 As^+ 注入 Si 的椭圆偏振光谱的一例. 为了减少样品表面自然氧化层的影响,每次测量前清洗样品并用稀 HF 的水溶液漂去氧化层.

如何从 $(\Psi, \Delta)-\lambda$ 实验数据求折射率 n 和消光系数 k 与波长 λ 的关系,我们采用单层模型加以分析,(如图 2 所示). 图 2 中, n_1 为空气折射率, n_2 和 k_2 分别为损伤层的折射率和消光系数, d 为损伤层厚度, n_3 和 k_3 分别为硅单晶的折射率和消光系数. 这里把损伤层当作均匀吸收介质层来近似处理. 对于大剂量离子注入引起的非晶质层来说,我们认为这是个较好的近似. 从逐层测量结果(文献[3]的图 1),可以看出 n 和 k 在损伤层内

按平台式分布,故可近似设 n , k 在损伤层内其值不变。值得指出,小剂量注入时呈尖峰分布,这时需用别的模型处理。对于 As^+ , Rothmund 等^[10]用扫描电子显微镜测吸收电子流,得到形成无定形层的临界剂量为 $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$;一些理论估计值也与此相近。本实验的注入剂量为 10^{15}cm^{-2} 和 10^{16}cm^{-2} ,已超过临界剂量很多。

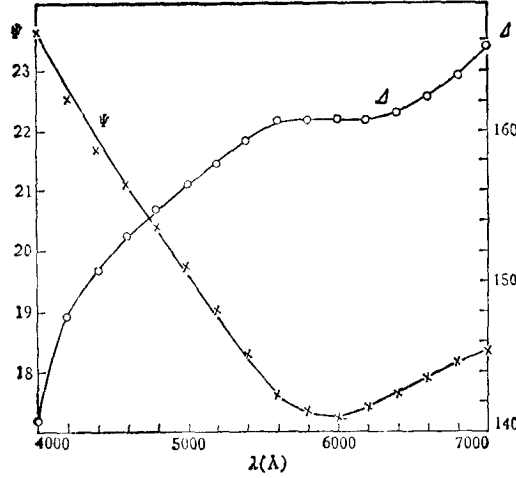


图1 150 keV, $10^{16} \text{cm}^{-2} \text{As}$ 注入 Si 的椭圆偏振光谱

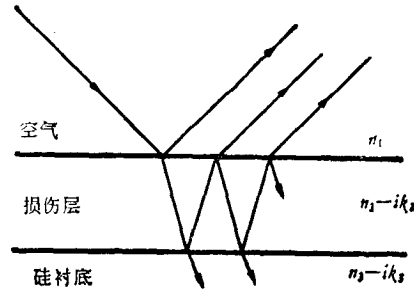


图2 单层模型示意图

对单层吸收介质模型,有如下关系式(参见文献[7, 11],这里推广到吸收膜情况):

$$\tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-2i\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-2i\delta}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-2i\delta}}, \quad (5)$$

$$r_{1p} = \frac{(n_2 - ik_2) \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_2}{(n_2 - ik_2) \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2}, \quad (6)$$

$$r_{1s} = \frac{n_1 \cos \varphi_1 - (n_2 - ik_2) \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi_1 + (n_2 - ik_2) \cos \varphi_2}, \quad (7)$$

$$r_{2p} = \frac{(n_3 - ik_3) \cos \varphi_2 - (n_2 - ik_2) \cos \varphi_3}{(n_3 - ik_3) \cos \varphi_2 + (n_2 - ik_2) \cos \varphi_3}, \quad (8)$$

$$r_{2s} = \frac{(n_2 - ik_2) \cos \varphi_2 - (n_3 - ik_3) \cos \varphi_3}{(n_2 - ik_2) \cos \varphi_2 + (n_3 - ik_3) \cos \varphi_3}, \quad (9)$$

$$n_1 \sin \varphi_1 = (n_2 - ik_2) \sin \varphi_2 = (n_3 - ik_3) \sin \varphi_3, \quad (10)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \sqrt{(n_2 - ik_2)^2 - \sin^2 \varphi_1}, \quad (11)$$

式中 λ 为光在真空中的波长, φ_1 为入射角。 φ_2 和 φ_3 值由(10)式算出。 r_{1p} , r_{1s} , r_{2p} , r_{2s} 分别为第1界面和第2界面的 p 波和 s 波的反射系数。

在波长较短的区域内, k_2 值较大。对于超过 $1000 \text{ \AA}$ 的离子注入损伤层, δ 虚部 > 1 , 故(5)式中含 $e^{-2i\delta}$ 的各项可近似略去。即得

$$(\tan \Psi e^{i\Delta})_{\text{短波}} \simeq \frac{r_{1p}}{r_{1s}}. \quad (12)$$

由(6), (7), (10) 和 (12) 式,解得

$$n_2^2 = k_2^2 + \sin^2 \varphi_1 \left\{ 1 + \frac{\tan^2 \varphi_1 (\cos^2 2\Psi - \sin^2 2\Psi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \right\}, \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{\sin^2 \varphi_1 \tan^2 \varphi_1 \sin 4\Psi \sin \Delta}{2n_2(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2}. \quad (14)$$

这时相当于吸收较强时,损伤层与衬底交界面的反射效应对总反射的贡献可略去.

在波长较长的区域内,不能对 n_2, k_2 求出近似的解析解,需采用电子计算机对 (5)–(11) 式作数值运算. 损伤层厚度 d 作为待定参数,根据实验结果加以确定.

原则上,在整个波长范围内,均可用电子计算机作数值解,从 (Ψ, Δ) – λ 数据求出 (n, k) – λ 关系. 在我们所研究的情况下,由于短波区吸收较大,可用 (13), (14) 式直接计算. 短波区结果有助于长波区的求解,使计算简化.

图 3 是 150 keV, $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ As}$ 注入 Si 的结果. 图 4 是 150 keV, $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ As}$ 注入 Si 的结果. 为了比较,在图 3 中还标出了直接用 (13), (14) 式从 (Ψ, Δ) 实验值算出的 n_2, k_2 (标以 n', k'). 长波区 (n', k') – λ 曲线呈振荡式,表明这里应该用单层模型严格计算. 图 3 中虚线,则是用单层模型解出的 (n, k) – λ 关系,通过 (5)–(11) 式算 (Ψ, Δ) – λ 关系,然后用 (13), (14) 式算出.

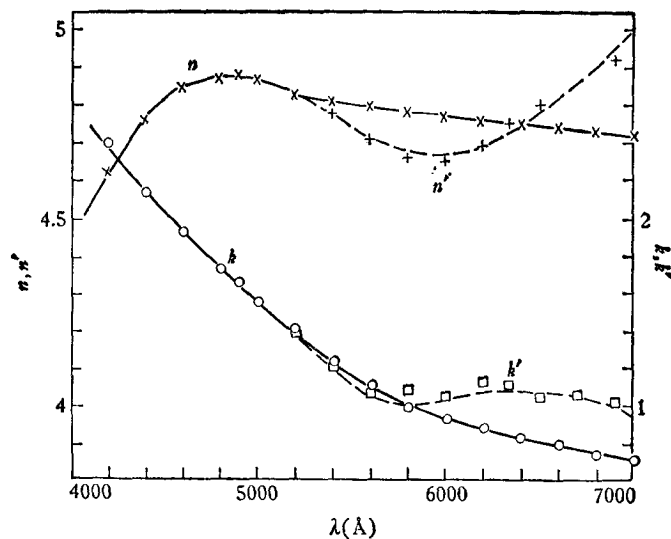


图 3 (n, k) – λ 关系, $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ As}$ 附 (n', k') – λ 关系
× 为 n 值; ○ 为 k 值; + 为 n' 值; □ 为 k' 值;

离子注入损伤层是一种光吸收介质层,即使是均匀层情况下,也有三个未知数,即 n, k, d 待求. 固定波长椭圆偏光法,每次测量只能确定两个未知数;要确定 n, k, d (或 n, k 分布),则需配合剥层法、改变入射角法等. 这里采用改变波长方法,除可定出 (n, k) – λ 关系外,还可无损地测定出 d 值. 表 1 对比了几种测定损伤层厚方法的结果,是 150 keV, $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ As}^+$ 注入 Si 的. 可看到光谱法与背散射法结果更接近. 这也旁证本文所用的计算方法是适宜的.

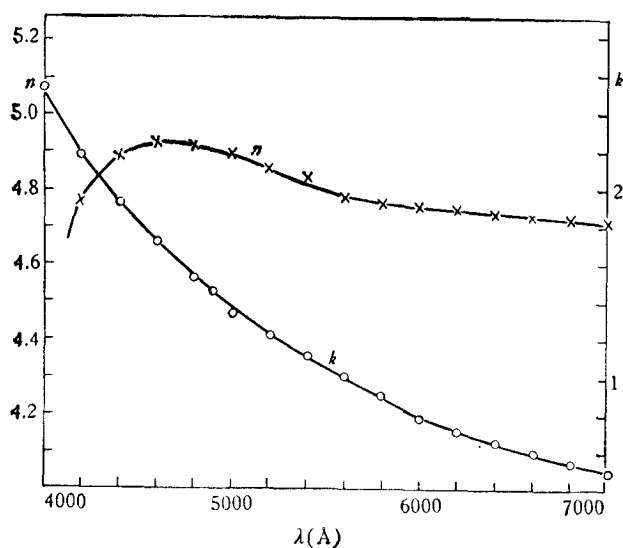
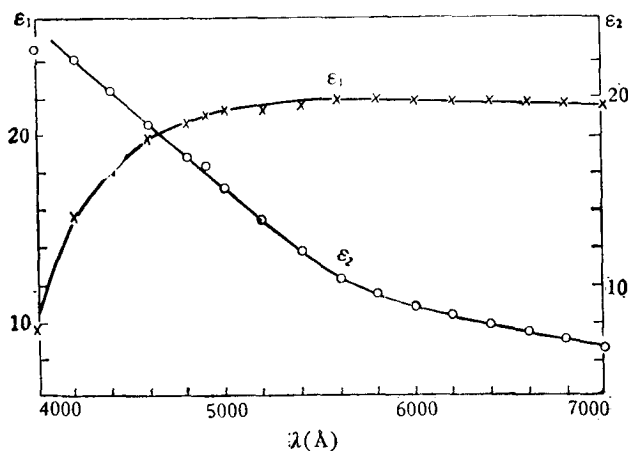
图4 $(n, k)-\lambda$ 关系, $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ As}$ 图5 $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ As}^+$ 注入 Si 中损伤层的介电常数谱

表1 各种方法测定损伤层厚的结果

方 法	椭圆偏振光谱	椭圆偏光+剥层 ^[4]	背散射法 ^[12]
d 值 ($\text{\AA}$)	1120	1400	1100

图5是 $\epsilon_1-\lambda$ 和 $\epsilon_2-\lambda$ 关系图, 介电常数的实部 ϵ_1 和虚部 ϵ_2 由下式算出:

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2, \quad (15)$$

$$\epsilon_2 = 2nk. \quad (16)$$

四、结果的比较和讨论

图6表示硅单晶、 10^{16} cm^{-2} 砷离子注入无定形硅、蒸发无定形硅和溅射无定形硅的色散关系。

对硅单晶的色散关系,这里引用了 Philipp 等^[13], Meyer 等^[14]和我们^[8]以前的工作.三者用的方法不同,结果基本一致,图 6 中综合地用一根曲线表示.

至于无定形硅的 n - λ 关系,过去只有少数工作. Philipp^[15], Pierce 等^[16]用反射率法测量了电子束蒸发制备的无定形硅样品. 陈树光等¹⁾用椭圆偏振光谱法测量了射频溅射制备的无定形硅样品. 图 6 中示出了文献[15]的结果.

无定形结构可能与制备方法有关,但也有某些共性. 无定形材料的各种性质,与其结构的不同方面相联系. 可见光范围的光学性质,与导带和价带的平均间距及跃迁相关. 因此,分析 n - λ 谱,可得到电子能带结构的信息.

对比单晶硅和各种无定形硅的 n - λ 曲线,归纳如表 2.

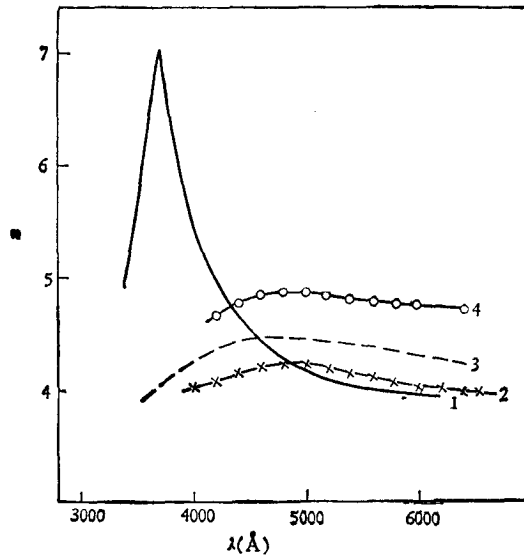


图 6 单晶硅和几种无定形硅的 n - λ 关系

1 为单晶硅; 2 为溅射硅;
3 为蒸发硅; 4 为离子注入硅

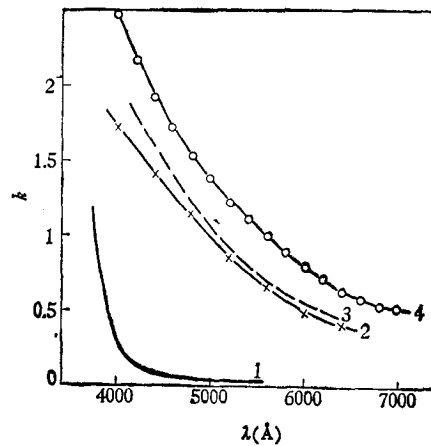


图 7 单晶硅和几种无定形硅的 k - λ 关系

1 为单晶硅; 2 为溅射硅;
3 为蒸发硅; 4 为离子注入硅

表 2 单晶硅和无定形硅的 n - λ 关系的比较

		峰位置($\text{\AA}$)	峰 高	峰形状	出 处
单晶硅		3700	7.0	尖陡	文献[8,13,14]
无定形硅	溅射	4800	4.23	宽缓	陈树先等 ¹⁾
	电子枪蒸发	4600	4.48	宽缓	文献[15]
	离子注入 10^{16}cm^{-2}	4900	4.88	宽缓	本文
	10^{15}cm^{-2}	4700	4.93	宽缓	本文

各种无定形硅的 n - λ 谱峰,比单晶的往长波方向移动,且峰值大为降低,形状也变得很宽缓. n 峰对应的能量间距,由单晶硅的 3.35 eV 降到无定形的 ~ 2.6 eV,表明无定形态中能带平均间距变小.

1) 陈树先等,第二届全国非晶态材料和物理学术会议上的报告,1980年12月,昆明.

离子注入无定形硅,与溅射、蒸发无定形硅相比,其峰值要高一些,而峰位置没有明显的差异。

离子注入无定形硅的 n 峰比别的无定形硅高,这里提出一个可能的解释。离子注入引起的无定形态是由原来晶态变成的,其中微空洞数量比蒸发、溅射无定形硅的可能要少。根据 Webman 等^[17]关于微空洞对 n 影响的理论,微空洞会降低 n 值。我们发现, n 峰值与溅射条件有颇大关系,溅射速率过高时 n 值会大为降低。可能这时形成大量微空洞。

图 7 是单晶硅和各种无定形硅的 $k-\lambda$ 关系。单晶、溅射、蒸发的数据分别取自[13], [16]。离子注入是 $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{As}$ 注入。从图 7 可见,离子注入硅的吸收,比溅射、蒸发硅更大。

中国科学院半导体研究所黄乐斌同志提供了样品,陈树光同志在工作中给予帮助,作者表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. R. Adams, N. M. Bashara, *Surface Sci.*, **49**(1975), 441.
- [2] J. R. Adams, *Surface Sci.*, **56**(1976), 307.
- [3] 莫党、卢因诚、李旦晖、刘尚合、卢武星,物理学报, **29**(1980), 1214.
- [4] 莫党、卢因诚、李旦晖、刘尚合、卢武星,半导体学报, **1**(1980), 198.
- [5] D. E. Aspnes, A. A. Studna, *Appl. Opt.*, **14**(1975), 220.
- [6] F. Meyer, *Phys. Rev. B*, **9**(1974), 3622.
- [7] 莫党、陈树光、余玉贞、黄炳忠,物理学报, **29**(1980), 673.
- [8] 莫党、陈树光、徐耕,中山大学学报(自然科学版), (3) (1980), 45.
- [9] 莫党,电子科学技术, (2) (1979), 33.
- [10] W. Rothmund, C. R. Fritzsche, *Appl. Phys.*, **10**(1976), 111.
- [11] 莫党、朱雅新,物理, **6**(1977), 140.
- [12] 刘尚合、卢武星、姬成周、张通和,在第四届离子束分析国际会议上的报告, 1979 年 6 月,哥本哈根。
- [13] H. R. Philipp, E. A. Taft, *Phys. Rev.*, **120**(1960), 37.
- [14] F. Meyer, E. E. De Kluizenaar, G. A. Boostma, *Surface Sci.*, **27**(1971), 88.
- [15] H. R. Philipp, *J. Phys. Chem. Solids*, **32**(1971), 1935.
- [16] D. T. Pierce, W. E. Spicer, *Phys. Rev. B*, **5**(1972), 3017.
- [17] I. Webman, J. Jortner, M. H. Cohen, *Phys. Rev. B*, **15**(1977), 5712.

ELLIPSOMETRIC SPECTRUM AND OPTICAL PROPERTIES OF ION IMPLANTED SILICON

MO DANG YE XIAN-JING

(*Department of Physics, Zhongshan University*)

ABSTRACT

In order to develop the ellipsometry used for determination of ion implanted damage layer, we have measured the ellipsometric spectrum of ion implanted silicon in a wavelength range of 4000—7000 Å. The samples were implanted by 150 keV, $10^{15}/\text{cm}^2$ or $10^{16}/\text{cm}^2$ As ions. In this case the amorphous layers were formed at the surface of Si samples, so that a monolayer model could be used to calculate the relations of (n, k) - λ from the data of (Ψ, Δ) - λ . The peak of n - λ curve of As ion implanted silicon is situated at ~ 4800 Å, and the peak value is about 4.9. The experimental results of ion implanted silicon have been compared with those of sputtering amorphous silicon, evaporated amorphous silicon and single crystalline silicon.