

# 均匀吸收介质层的椭圆偏振光谱方法及其应用\*

莫 党 陈树光 林树汉 叶贤京 江任荣

(物理学系)

## 摘 要

本工作研究了均匀吸收介质层的椭圆偏振光谱,提出一种处理数据的方法,并应用于溅射无定形硅膜层、离子注入硅及其退火效应,得到一些新的实验结果。

椭圆偏光法是测定和研究薄膜和表面的一种方法<sup>[1,2,3]</sup>。对非吸收的透明膜层,用椭圆偏光仪测出椭圆偏光参数 $\Psi$ 、 $\Delta$ ,可由此求出膜层的折射率 $n$ 和厚度 $d$ 。当膜层是光吸收介质时,待求的未知数有三个,即 $n$ 、 $d$ 和消光系数 $k$ 。一次测量只得到一组 $(\Psi$ 、 $\Delta)$ ,不可能解出三个待求量。测定吸收介质层,一般可采用如下一些办法<sup>[3]</sup>:多入射角法、多厚度法、多环境法、多衬底法。

我们采用不同波长的测量,即椭圆偏振光谱法。通过光谱测量,常可获得一些具有较深入物理内容的信息<sup>[4-7]</sup>。本工作是把光谱法应用于均匀的吸收介质层。随着波长 $\lambda$ 的变化, $n$ 、 $k$ 也改变,而膜厚 $d$ 是不变的。因此,在整个测量过程中,待求量不只三个,而是 $d$ 、 $n=n(\lambda)$ 和 $k=k(\lambda)$ 。

在我们的实验中,发现某些均匀吸收介质层符合下面的条件:在光谱短波区,介质层的 $k$ 值较大,对一定厚度的介质层,可略去层厚的影响;在长波区,则需计及层厚的影响。对这种情况,实验数据的计算可以不致太复杂而较好处理。本文介绍我们所采用的方法,具体处理了溅射无定形硅膜层和离子注入硅损伤层,并研究了离子注入硅的退火效应。

## 1. 方 法

我们采用的是旋转检偏器式的椭圆偏振光谱仪<sup>[6]</sup>,现经改进,提高了灵敏度。用该仪测量 $I-\theta$ 关系中的几个参量 $\theta_{\min}$ 、 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ ( $I$ 为经光电接收放大系统显示出的信号值, $\theta$ 为检偏器方位角)。

均匀吸收介质层如图1所示。椭圆偏振光谱的计算公式为:

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

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

\*北京师范大学低能核物理研究所卢武星同志和中国科学院半导体研究所黄乐斌同志提供了离子注入硅样品。

$$\tan \Delta = \frac{\tan 2\chi}{\sin 2\alpha} \tag{3}$$

$$\cos 2\psi = -\cos 2\chi \cos 2\alpha \tag{4}$$

$$\tan \psi e^{i\Delta} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-2i\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-2i\delta}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-2i\delta}} \tag{5}$$

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

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

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

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

$$n_1 \sin \varphi_1 = (n_2 - ik_2) \sin \varphi_2 = (n_3 - ik_3) \sin \varphi_3 \tag{10}$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{(n_2 - ik_2)^2 - \sin^2 \theta} \tag{11}$$

各符号的意义:

$\theta_{\min}$   $I-\theta$  关系中  $I$  极小值所对应的  $\theta$  值

$I_{\max}$   $I-\theta$  关系中  $I$  极大值

$I_{\min}$   $I-\theta$  关系中  $I$  极小值

$\alpha$  反射光的椭圆长轴方位角

$\tan \chi$  反射光的椭圆短轴与长轴之比

$\tan \psi$  反射时  $p$  波与  $s$  波的相对振幅衰减

$\Delta$  反射时  $p$  波与  $s$  波的位相移动之差

$2\delta$  相邻两束反射光的位相差

$r_{1p}$  第 1 界面(空气—膜层)的  $p$  波反射系数

$r_{1s}$  第 1 界面的  $s$  波反射系数

$r_{2p}$  第 2 界面(膜层—衬底)的  $p$  波反射系数

$r_{2s}$  第 2 界面的  $s$  波反射系数

$n_1$  空气折射率

$n_2$  吸收介质层的折射率

$k_2$  吸收介质层的消光系数

$n_3$  衬底的折射率

$k_3$  衬底的消光系数

$\varphi_1$  入射角

$\varphi_2$  满足(10)式的量, 实数时等于折射角

$\varphi_3$  同上

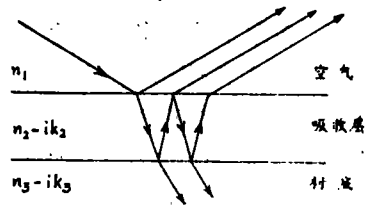


图 1 均匀吸收介质层示意图

d 吸收介质层厚度

λ 光在真空中的波长

公式(1)–(11)中,待求量为d、n<sub>2</sub>=n<sub>2</sub>(λ)和k<sub>2</sub>=k<sub>2</sub>(λ)。原则上,可对(1)–(11)式进行复数运算,求数值解。实际上,常会遇到满足如下条件的均匀吸收介质层:整个光谱可分两区,短波区中介质层的k<sub>2</sub>较大,对一定层厚,可略去层厚对计算的影响,长波区中则需计及层厚的影响。这时,可采用如下述的较简单的具体计算办法。

短波区, k<sub>2</sub>较大, 2δ的虚部 ≈ -4π/λ dk<sub>2</sub>, 其绝对值 ≫ 1, 故(5)式中含 e<sup>-2iδ</sup> 的各项可近似略去。这时, 解得

n<sub>2</sub><sup>2</sup> = k<sub>2</sub><sup>2</sup> + sinφ<sub>1</sub> [ 1 + (tan<sup>2</sup>φ<sub>1</sub>(cos<sup>2</sup>2Ψ - sin<sup>2</sup>2Ψsin<sup>2</sup>Δ) / (1 + sin2ΨcosΔ)<sup>2</sup> ] (12)

k<sub>2</sub> = (sin<sup>2</sup>φ<sub>1</sub> + tan<sup>2</sup>φ<sub>1</sub>sin4ΨsinΔ) / (2n<sub>2</sub>(1 + sin2ΨcosΔ)<sup>2</sup>) (13)

即是说, 短波区内可直接用解析式(12)、(13)计算, 从(Ψ, Δ)–λ关系求出n<sub>2</sub>(λ)和k<sub>2</sub>(λ), 相当于略去层厚对光干涉的影响。此区的计算与d无关, 故不能定出d值。

长波区的计算, 可利用短波区求得的n<sub>2</sub>(λ)和k<sub>2</sub>(λ)逐步外推作试探, 并用逐步逼近法求解。d作为待定参数, 也是根据测得的光谱曲线, 用逐步逼近法确定。具体计算如下: 先用(12)、(13)式从实验测出的Ψ(λ)、Δ(λ)值算出长波区的n<sub>2</sub>、k<sub>2</sub>, 因长波区不能略去膜厚影响, (12)、(13)式不成立, 所以用这两式求出的n<sub>2</sub>和k<sub>2</sub>不是真正的折射率和消光系数值, 而是表观值, 故我们称为n''和k''。然后根据短波区n(λ)、k(λ)[即n<sub>2</sub>(λ)、k<sub>2</sub>(λ)]外延作试探, 并选择适当的d值, 通过(6)–(11)及(5)式, 计算出相应的Ψ'(λ)、Δ'(λ)[这与由I<sub>max</sub>、I<sub>min</sub>、θ<sub>min</sub>通过(1)–(4)式算出的Ψ(λ)、Δ(λ)是不同来源得到的物理量, 可能两者的数值不相同]。再用(12)、(13)式从Ψ'(λ)、Δ'(λ)算出n'(λ)、k'(λ), 然后比较n'(λ)与n''(λ)、k'(λ)与k''(λ), 若两者相等或相差小于一定的误差量, 则所试探用的长波区的n(λ)、k(λ)以及d为所求的解。若相差大于给定误差量, 则调整试探值n(λ)、k(λ)以及d, 重复以上步骤。

计算程序如图2(采用 BASIC 语言)。

2. 溅射无定形硅膜

对无定形硅的研究, 近二十年来有很大发展, 但可见光区色散关系的测定, 已发表的仅是关于蒸发法制备的无定形硅, 采用光吸收和 K–K 计算法测

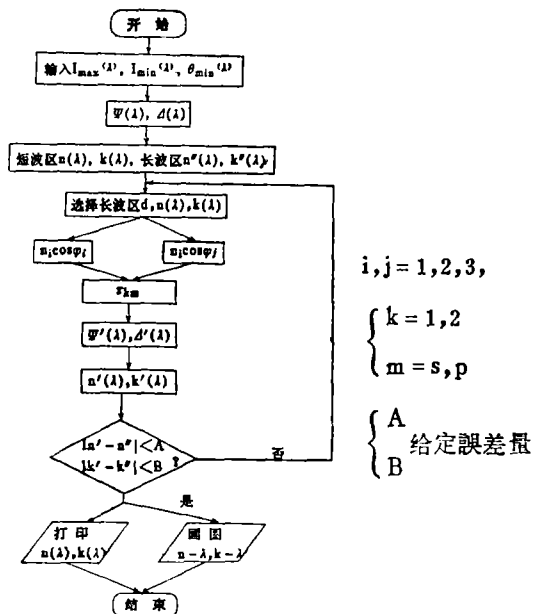


图2 计算程序框图

定<sup>[8,9]</sup>。我们曾用椭圆偏振光谱法测定足够厚的溅射法制备无定形硅膜的光学性质，样品制备条件包括掺氢与不掺氢两类。

现采用本文所介绍的方法，测得具有一定厚度( $<10000 \text{ \AA}$ )的溅射无定形硅膜的  $n(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$ ，衬底用玻璃板( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 时 $n = 1.50$ )。图3表示其中的一个结果，溅射条件为：氩气氛，掺氢气20%，总气压 $5 \times 10^{-8}$ 托。

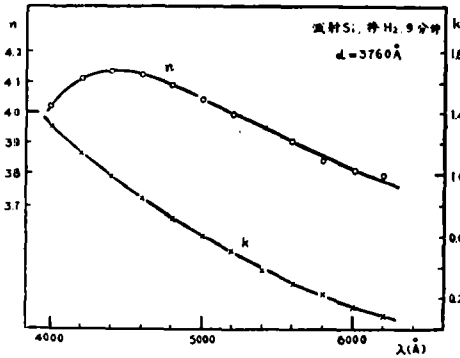


图3 掺氢溅射无定形硅薄层的 $(n, k) - \lambda$ 关系

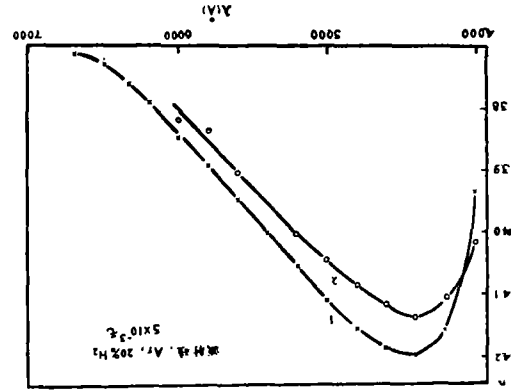


图4 薄膜法和厚膜法测定结果的比较  
1 溅射140'厚膜法 2 溅射9'薄膜法

对同一样品，由本法定出的膜厚值为 $3760 \text{ \AA}$ ，用干涉显微镜测出\*的值为 $3290 \text{ \AA}$ ，相差13%。

图4表示本法测得的 $(n, k) - \lambda$ 关系，以及陈树光等(1980)用厚膜法测得的结果。两者色散谱形状相似，峰位置相同，但峰高略有差异。

### 3. 离子注入硅及其退火效应

近年来，用椭圆偏光法测定离子注入硅的损伤层已有一系列工作<sup>[10,11,12]</sup>，但尚未发现有人测过离子注入损伤层的 $(n, k) - \lambda$ 关系，我们测量并计算出高剂量( $10^{16}$ 和 $10^{18} \text{ cm}^{-2}$ )  $\text{As}^+$ 注入硅中损伤层(无定形层)的色散关系。图5给出 $10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 注入 $150 \text{ keV}$   $\text{As}^+$ 的结果。

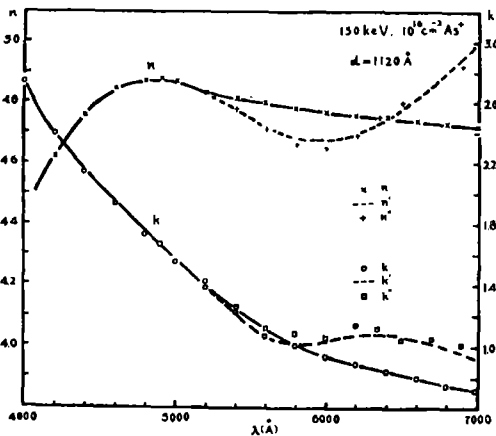
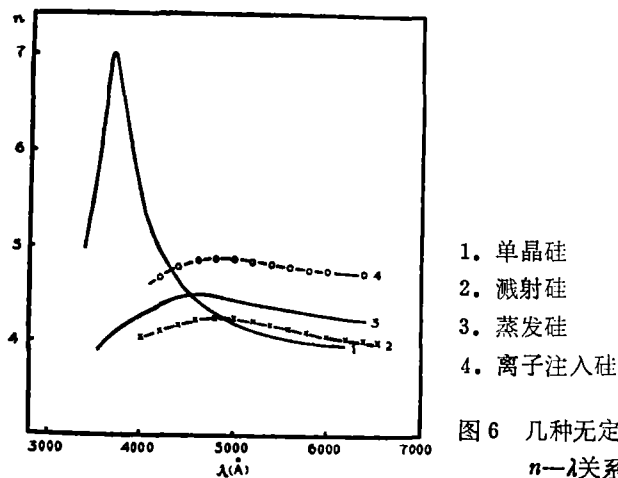


图5  $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{As}^+$ 注入硅的损伤层的色散关系 $(n, n', n'', k, k', k''$ 见第二节中说明)

● 样品制备：做有一台阶的溅射膜，然后镀铝膜。

图 6 是几种无定形硅与单晶硅<sup>(13)</sup>的  $n-\lambda$  关系的比较。



- 1. 单晶硅
- 2. 溅射硅
- 3. 蒸发硅
- 4. 离子注入硅

图 6 几种无定形硅与单晶硅的  $n-\lambda$  关系

我们还用本法测定不同温度下(从室温至900℃)的退火效应。每一离子注入样品, 在一系列逐步提高的温度及每次在干氮气氛中退火30分钟, 出炉后即行测量。图7是用本方法测出的损伤层厚度 $d$ 与退火温度 $T$ 的关系。从实验结果得到下述看法: 退火时在损伤层与衬底交界处发生从无定形态转变为晶态的相变, 随着退火时间延长这相变向样品表面移动, 使损伤层厚度减小; 退火温度愈高相变速度愈快。本法适用于均匀层。实际上层与衬底间( $n, k$ )的变化不是突变, 而是有一过渡区, 所以层厚愈小, 测定误差愈大。图8表示 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 处椭圆偏参数改变量 $\delta\Psi$ (相对单位)与 $T$ 的关系, 还画上Mayer等<sup>(14)</sup>用背散射法测出畸变度(相对单位)与 $T$ 的关系。两者很相似。椭圆测量提供一个较简便的办法。

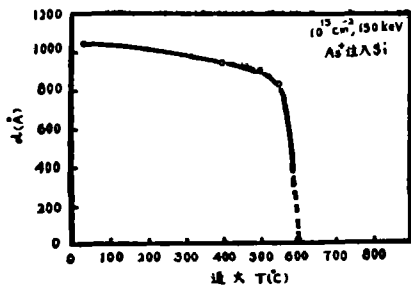


图 7 损伤层厚与退火温度的关系

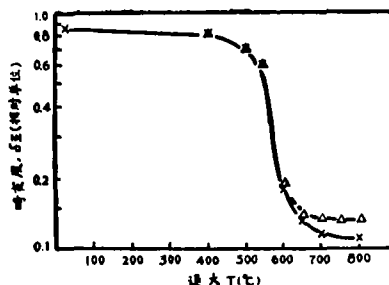


图 8  $\delta\Psi$  及畸变度与退火温度的关系  
 × Nayer等 ( $2.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}, 40 \text{keV}, \text{As}^+$ )  
 + 本工作 ( $10^{15} \text{cm}^{-2}, 150 \text{keV}, \text{As}^+$ )

从以上实例看来, 本文所用的测定方法对不少重要的均匀吸收介质层是适宜的。

## 参 考 文 献

- [1] R.M.A.Azzam, N.M.Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, (1977).
- [2] 莫党、朱雅新, 物理, 6 (1977), 140.
- [3] J.Sarakinos, J.Spyridelis, *Thin Solid Films*, 28(1975), 167.
- [4] D.E.Aspnes, A.A.Studna, *Appl. Opt.*, 14(1975), 220.
- [5] F.Meyer, *Phys. Rev.*, B9(1974), 3622.
- [6] 莫党、陈树光、余玉贞、黄炳忠, 物理学报, 29 (1980), 673.
- [7] 莫党、陈树光、徐耕, 中山大学学报(自然科学版), (1980), 3, 45.
- [8] H.R.Philipp, *J. Phys, Chem. Solids*, 32(1971), 1935.
- [9] D.T.Pierce, W.E.Spicer, *Phys. Rev.*, B5(1972), 3017.
- [10] J.R.Adams, N.M.Bashara, *Surface Sci.*, 49(1975), 441.
- [11] 莫党、卢因诚、李旦辉、刘尚合、卢武星, 物理学报, 29(1980), 1214; 半导体学报, (1980), 1, 198.
- [12] 陈敏麒、罗晋生, 西安交通大学学报, 15(1981), 107.
- [13] F.Meyer, E.E.DeKluizenaar, G.A.Boostma, *Surface Sci.*, 27(1971), 88.
- [14] J.W.Mayer, L.Eriksson, S.T.Picraux, J.A.Davies, *Can. J. Phys.*, 46 (1968) 663.

## Ellipsometric Spectrum Measurement of Uniform Absorbing Layer and Its Application

Mo Dang Chen Shuguang Lin Shuhan Ye Xianjing Jiang Renrong

### Abstract

An ellipsometrically spectral method used to determine the refractive index, extinction coefficient and thickness of the uniform absorbing layer on substrate has been developed. We have successfully applied this method to the following cases—rf sputtered amorphous silicon on glass substrate, ion implanted silicon and its annealing effect.