

研究简报

硅中离子注入层光学常数的振荡分布

钱佑华 陈良尧 张继昌

(复旦大学) (同济大学)

1980年12月15日收到 1981年7月25日收到修改稿

椭圆偏光法结合阳极氧化剥层技术, 测量得到磷注入硅临界剂量附近样品表层的表观光学常数 $\tilde{n} = n - ik$, 出现一个振荡型的深度分布。在关于离子注入层无序分布的公认结论的基础上, 建立了 $k(x)$, $n(x)$ 同无序度分布 $D(x)$ 之间的经验关系式, 从而从定量上解释了 $\tilde{n}(x)$ 的振荡。

离子注入层具有非均匀的光学性质, 其根源在于注入损伤和离子分布的不均匀。由于对注入无序度如何影响电子的态密度和光跃迁至今尚不了解; 与此同时, 一定波长的光对不同无序度的注入层的透入深度也不同, 因此不能用任何测量所得光学参数值的分布来直接代表注入层中的无序分布。Adams 等^[1]曾触及了 $\tilde{n}(x)$ 与 $D(x)$ 之间的联系问题, 但未作正面探讨。本文作者在分析用二相模型^[2]所得椭偏-剥层法数据的过程中, 紧紧抓住光波信息取样深度这个重要因素, 找出了 $\tilde{n}(x)$ 与 $D(x)$ 之间的关联。这对于推广简便的椭偏法在离子注入层一类非均匀膜检测中的应用, 是有实际价值的。

实验用硅中注磷样品的剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 注入能量 80 keV , 衬底 P 型 $8-13 \Omega \cdot \text{cm}$, $\langle 111 \rangle$ 晶向, 束流成 7° 倾角, 剂量率 $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。样品在以乙二醇 + 硝酸盐 + 水为电解液的、装有自动控制膜厚的阳极氧化装置上进行表层氧化, 电流密度 $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$, 膜厚的重复性用椭偏仪在未注入区核测。椭偏仪波长 6328 \AA , 光束 70° 入射, 仪器标称读数精度 0.01° 。剥层后逐次测量均在样品上的确定点进行, 以避免注入时束流扫描和剂量不均匀可能引入的误差。用二相模型从 ψ 、 Δ 计算折射率 n 和消光系数 k 。

图 1 为测量结果。 $(3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 剂量的结果与此类似) 可以看到 k 和 n 在趋于各自的衬底值之前, 均作有规则的振荡, 分别出现两个峰和两个谷。在紧靠表面约 200 \AA 的范围内, 有明显的趋势存在除内部二主峰之外的另一较弱的振荡峰。就曲线的主要部分而言, $n(x)$ 与 $k(x)$ 之间似有下列关系:

$$n(x) \propto -\frac{\partial}{\partial x} k(x) + C. \quad (1)$$

其中 C 为一常数, 其值与注入剂量有关。另外, 在二主峰中间的深谷层内, 出现 $\Delta n(x) = n(x) - n_s < 0$ 的情况, 这与 Adams 等的测量结果是一致的, 其中 n_s 为衬底的折射率。

根据作者前已形成的概念^[3]及(1)式, 建立 $k(x)$ 与 $D(x)$ 之间的经验关系式如下:

$$\Delta k(x) = k(x) - k_{s0} = \frac{1}{n(x)L(x)} \int_x^{x+L_{eff}(x)} D(x) dx \quad (2)$$

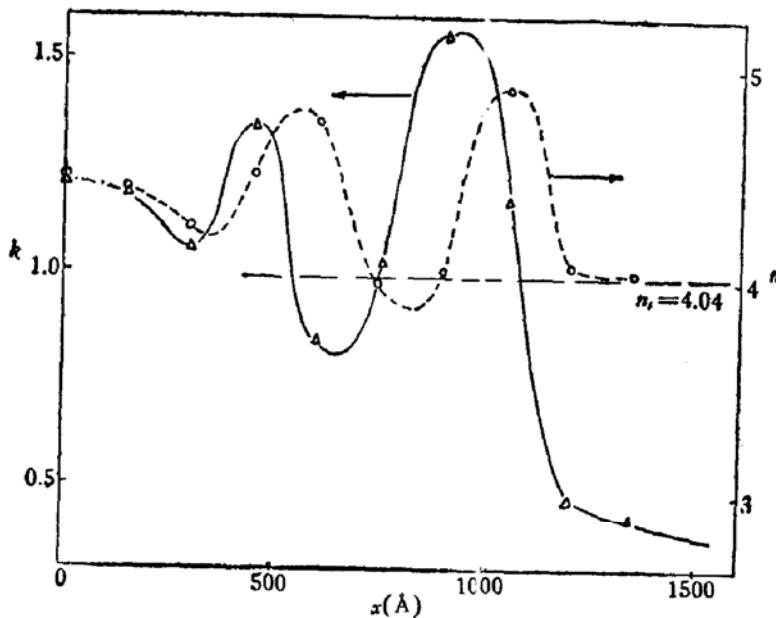


图1 剂量 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的磷注入硅层的 $k(x)$ 和 $n(x)$, n_t 表示衬底硅片的折射率

式中 $L(x)$ 为光的透入深度; $L_{\text{eff}}(x)$ 表示在 $L(x)$ 以内对光波起衰减作用的有效深度; 无序分布为:

$$D(x) = D_i(x) + D_D(x) + D_g(x). \quad (3)$$

这里 D_i 、 D_D 和 D_g 分别表示注入离子本身的格位无序、损伤无序^[4]和紧邻表面的无序^[5]。均以高斯型分布表为:

$$D_i(x) = \delta \exp \left\{ -\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right\}. \quad (4)$$

$$D_D(x) = \gamma \exp \left\{ -\frac{(x - R_D)^2}{2\Delta R_D^2} \right\}. \quad (5)$$

$$D_g(x) = \beta \exp \left\{ -\frac{(x - R_g)^2}{2\Delta R_g^2} \right\}. \quad (6)$$

R_p —投影射程, ΔR_p —射程岐离; R_D —损伤峰深, ΔR_D —损伤峰半宽的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$; R_g —表面无序峰深, ΔR_g —表面峰半宽的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$. δ 、 γ 和 β 分别为 D_i 、 D_D 和 D_g 的表观峰高。(2)式中引入 L_{eff} 是考虑到伴随注入过程产生的退火效应, 可能在注入层中导致结构完整性甚佳的低吸收区, 因此在积分时应将 $L - L_{\text{eff}}$ 这个深度的贡献排除。

具体的计算步骤是先选择三个典型的数据按上列各式求出表观峰高 β 、 γ 、 δ . 然后再计算任意剥层深度的 Δk 和 k . 图2所示为计算与测量结果的比较. 数据列于表中(只列出8次剥层的有关数据.)图3为计算所导致的 $D(x)$ 的示意图。

从结果可见, 以(2)式为基础, 合理地解释了二相模型下表观光学常数令人感兴趣的振荡. D_D 峰与 D_i 峰具有“相反”的光传播特性, 导致二者中间形成一个 $\left\langle \frac{\partial}{\partial x} D(x) \right\rangle \ll 0$ 的层次, 从而在这里出现 $\Delta n(x) < 0$ ^[1]. 关于临界剂量上下的注入层中, $D(x)$ 存在“三峰二谷”的结论; 作者最近从电场调制光谱的测量中进一步得到证实, 将于适当场合予以报道.

作者感谢陈一、吴苏华和承焕生等同志在实验和问题讨论中所给予的帮助。

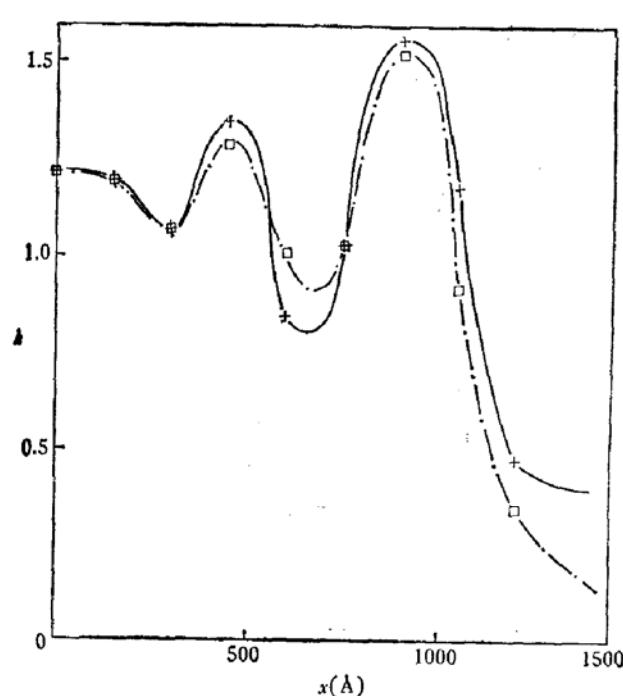


图 2 剂量 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 磷注入硅层 $k(x)$ 的计算曲线
(- - - -) 和测量曲线 (- -)

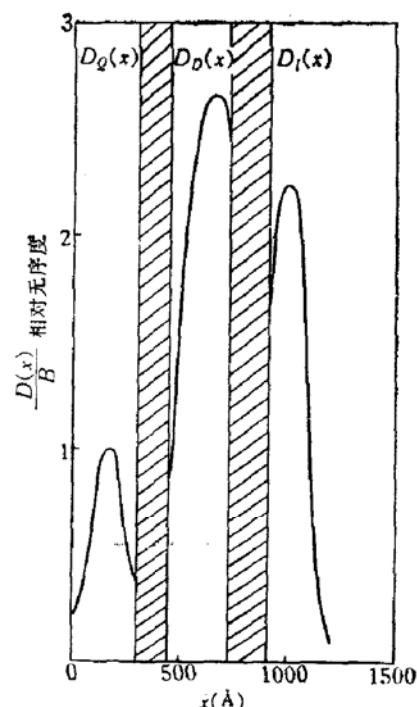


图 3 计算所得 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 磷
注入硅层 $D(x)$ 示意图

表 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 80keV, 室温, P^+ 注入硅的消光系数 k 的计算数据

剥层次数	$x(\text{\AA})$	$k_{\text{测}}$	$L_{\text{测}}(\text{\AA})$	$n_{\text{测}}$	* $D(x)$	$L_{\text{eff}}(\text{\AA})$	$t(\beta, \gamma, \delta) \times 10^{-3}$	Δk	$\uparrow k$
0	0	1.21	416	4.45	$\beta G_Q(x)$	0-300		1.19	1.21
1	150	1.19	423	4.44	$\beta G_Q(x) + \gamma G_D(x)$	150-300 450-573	$\beta = 1.15$		
2	300	1.06	475	4.27	$\gamma G_D(x)$	450-730	$\gamma = 3.04$		
3	450	1.34	375	4.47	$\gamma G_D(x)$	450-825		1.26	1.28
4	600	0.84	600	4.72	$\gamma G_D(x) + \delta G_I(x)$	600-730 900-1200		0.98	1.00
5	750	1.02	494	3.98	$\delta G_I(x)$	900-1244	$\delta = 2.56$		
6	900	1.55	325	4.07	$\delta G_I(x)$	900-1225		1.49	1.51
7	1050	1.17	430	4.91	$\delta G_I(x)$	1050-1250		0.89	0.91
8	1200	0.47	1070	4.07	$\delta G_I(x)$	1200-1250		0.32	0.34

* $G_Q(x) = \exp\{-[x - R_Q]^2 / 2\Delta R_Q^2\}$; $G_D(x) = \exp\{-(x - R_D)^2 / 2\Delta R_D^2\}$; $G_I(x) = \exp\{-(x - R_P)^2 / 2\Delta R_P^2\}$; $R_Q = 170 \text{ \AA}$, $\Delta R_Q = 70 \text{ \AA}$; $R_D = 670 \text{ \AA}$, $\Delta R_D = 297 \text{ \AA}$; $R_P = 1000 \text{ \AA}$, $\Delta R_P = 330 \text{ \AA}$.

† 对于波长 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, 无表面层的单晶硅的消光系数, 近似取值 $k_{s0} = 0.02$.

参 考 文 献

- [1] J. R. Adams and N. M. Bashara, *Surf. Sci.*, 49, 441 (1975).
- [2] D. E. Aspnes, *Spectroscopic Ellipsometry of Solids*, in *Optical Properties of Solids, New Developments*, Ed. B. O. Seraphin, Chap. 15, p. 807, North-Holland Publ. Co.
- [3] 钱佑华、陈良尧、张继昌, 半导体学报, 2, 99 (1981).
- [4] J. W. Mayer, L. Eriksson and J. A. Davies, *Ion Implantation in Semiconductors Silicon and Germanium*, Academic Press, New York and London (1970).

- [5] J. E. Westmoreland, J. W. Mayer, F. H. Eisen and B. Welch, *APL.*, 15, 308(1969); J. C. North and W. M. Gibson, *Ion Implantation*, Ed. F. H. Eisen and L. T. Chadderton, p. 143, Gordon and Breach Science Publishers (1971).

Oscillatory Profiles of Optical Constant in Ion Implanted Silicon Layers

Qian Youhua, Chen Liangya and Zhang Jichang

(Fudan University) (Tongji University)