

掺金单晶硅特性的研究*

陈敏锐 沈频华 刘士毅

厦门大学物理系, 厦门, 361005

1991 年 4 月 9 日收到

本文研究单晶硅掺金前后的表面光伏和红外吸收谱, 证实在相同表面状况下, 红外吸收谱的基线与少子扩散长度的对应关系; 由半导体统计, 推导出简并因子不等于 1 时扩金硅的统计公式, 以及金受主简并因子 $g_{Au,s} \neq 1$, 金施主简并因子 $g_{Au,d} \neq 1$ 硅双重能级复合理论公式, 由此计算的少子寿命值与测量值之比在 1.64—0.745 之间。

PACC: 7280C; 7220J; 7850

一、引 言

单晶的质量对器件和超大规模集成电路 (VLSI) 的性能有决定性影响。少子扩散长度 L (或寿命 τ) 是衡量单晶的重要参数, 它反映有害杂质和缺陷引起的深能级复合中心的影响。当已知复合中心 (在禁带中) 的能级位置、复合中心浓度和俘获截面的大小等三个参数, 由复合动力学方程可计算出少子寿命 (或扩散长度)。本文推导出简并因子 g 不等于 1 时, 扩金硅半导体统计公式和硅双重能级复合理论公式, 由此计算少子寿命, 并与用表面光伏法^[1]测量少子扩散长度所得寿命进行对比。

氧和碳是 CZ 硅单晶中主要杂质, 它们在各种热处理过程中表现出非常复杂的行为, 对 VLSI 的性能影响很大, 因此对其定量或定性分析是很必要的。本文由红外吸收法测量硅中氧、碳含量^[2,3]; 发现红外吸收光谱的基线高度随金浓度增加而单调升高, 从而证实了基线高度与少子扩散长度的关系, 对此进行了定性分析。

二、基 本 原 理

1. 掺金单晶硅少子寿命的统计计算公式

1) 简化模型 金在硅中的行为很复杂, 至今仍有许多重要特性尚未统一认识。本文综合大多数文献的结果^[4-7], 提出下列简化模型:

(1) 认为金在硅中的扩散可分为快速的间隙和慢速的替位扩散两种。

(2) 硅中 III 族杂质能级简并因子 g 取为^[4]。本文假定金施主和金受主的简并因子分别取为 $g_{Au,d} = 2$ 和 $g_{Au,s} = 4$ 。

* 国家自然科学基金资助的课题。

(3) 金施主和金受主是属于同一杂质(或缺陷)的两个能级^[6,7].

(4) 金受主能级位置 $E_{Au,s}$ 和金施主能级位置 $E_{Au,d}$ 分别为 $E_c - 0.54\text{eV}$ 和 $E_v + 0.35\text{eV}$, 并且不随温度而变化^[8], E_c 和 E_v 分别为导带和价带边能量.

2) 掺金单晶硅统计公式 根据以上模型得

$$N_{Au}^0 + N_{Au,s}^- + N_{Au,d}^+ = N_{Au}, \quad (1)$$

$$N_{Au,s}^- : N_{Au}^0 : N_{Au,d}^+ = \frac{1}{g_{Au,s}} \exp\left(\frac{E_F - E_{Au,s}}{kT}\right) : 1 : \frac{1}{g_{Au,d}} \exp\left(\frac{E_{Au,d} - E_F}{kT}\right). \quad (2)$$

由(1),(2)式解得

$$N_{Au}^0 = N_{Au} / \left\{ 1 + \frac{1}{g_{Au,s}} \exp[(E_F - E_{Au,s})/kT] + \frac{1}{g_{Au,d}} \exp[(E_{Au,d} - E_F)/kT] \right\}, \quad (3)$$

$$N_{Au,s}^- = N_{Au} / \left\{ 1 + g_{Au,s} \exp[(E_{Au,s} - E_F)/kT] \left[1 + \frac{1}{g_{Au,d}} \exp[(E_{Au,d} - E_F)/kT] \right] \right\}, \quad (4)$$

$$N_{Au,d}^+ = N_{Au} / \left\{ 1 + g_{Au,d} \exp[(E_F - E_{Au,d})/kT] \left[1 + \frac{1}{g_{Au,s}} \exp[(E_F - E_{Au,s})/kT] \right] \right\}. \quad (5)$$

上述(3),(4),(5)式即为 g 不等于 1 时掺金单晶硅统计公式. 式中 N_{Au}^0 , $N_{Au,s}^-$, $N_{Au,d}^+$, N_{Au} 分别代表中性金浓度、离化金受主浓度、离化金施主浓度、掺金浓度, E_F 为费密能级.

3) 掺金单晶硅少数寿命 金在硅中是一种具有两重性的掺杂剂, 一个金原子既可以失去一个电子也可以得到一个电子, 因此要考虑 3 种带电状态 (A_u^+ , A_u^- , A_u^0). 导带中电子通过金能级的复合中心和价带中空穴的复合, 共有 4 个发射和 4 个复合过程, 如图 1 所示.

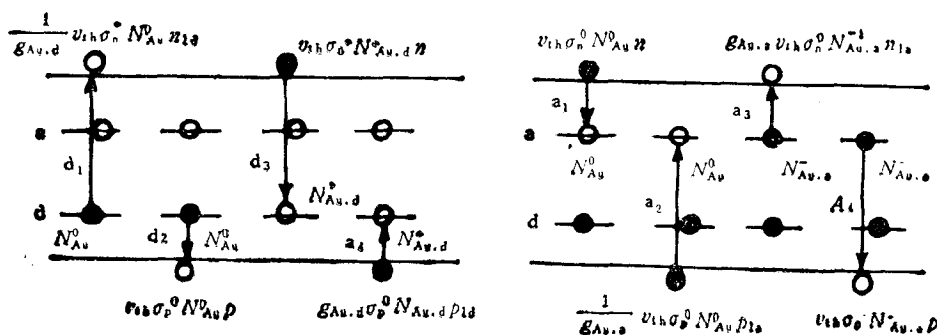


图 1 复合过程

图 1 中 d_1 , a_3 分别为金施主和金受主能级上电子激发过程; d_2 , a_4 分别为金施主和金受主能级上空穴俘获过程; d_3 , a_1 分别为金施主和金受主上电子俘获过程; d_4 , a_2 分别为金施主和金受主上空穴激发过程. v_{th} 为载流子平均热运动速度; σ_n^0 , σ_n^+ 分别为中性金受主和带正电的金施主俘获电子的俘获截面; σ_p^0 , σ_p^- 分别为中性金施主和带负电的金受主俘获空穴的俘获截面. n_{id} 和 p_{id} 分别为费密能级在金施主能级上时电子和空穴浓

度; n_{1a} 和 p_{1a} 分别为费密能级在金受主能级上时电子和空穴浓度。

在稳态条件下, 动力学方程为

$$-\frac{dn}{dt} = v_{th} \cdot n(\sigma_n^+ N_{Au,d}^+ + \sigma_n^0 N_{Au}^0) - v_{th} \left(\frac{1}{g_{Au,d}} \sigma_n^+ N_{Au}^0 n_{1d} + g_{Au,a} \sigma_n^0 N_{Au,a}^- n_{1a} \right), \quad (6)$$

$$-\frac{dp}{dt} = v_{th} p(\sigma_p^0 N_{Au}^0 + \sigma_p^- N_{Au,a}^-) - v_{th} \left(g_{Au,d} \sigma_p^0 N_{Au,d}^+ p_{1d} + \frac{1}{g_{Au,a}} \sigma_p^- N_{Au}^0 p_{1a} \right), \quad (7)$$

$$\frac{dN_{Au,d}^+}{dt} = -v_{th} \sigma_n^+ N_{Au,d}^+ n + v_{th} \sigma_p^0 N_{Au}^0 p + v_{th} \sigma_n^- N_{Au}^0 n_{1d} / g_{Au,a} - v_{th} \sigma_p^- N_{Au,a}^- p_{1d} g_{Au,d} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{dN_{Au,a}^-}{dt} = v_{th} \sigma_n^0 N_{Au}^0 n - v_{th} \sigma_p^- N_{Au,a}^- p - v_{th} \sigma_n^- N_{Au,a}^- n_{1a} g_{Au,a} + v_{th} \sigma_p^0 N_{Au}^0 p_{1a} / g_{Au,a} = 0. \quad (9)$$

由(8),(9)和(1)式解得 N_{Au}^0 , $N_{Au,d}^+$, $N_{Au,a}^-$ 并代入(6),(7)式得复合速率

$$u = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt} = (g_{Au,a} n_{1a} \tau_{pa} + p \tau_{na} + g_{Au,d} p_{1d} \tau_{nd} + n \tau_{pd})(np - n_i^2) / D', \quad (10)$$

式中,

$$\begin{aligned} \tau_{nd} &= 1/v_{th} N_{Au} \sigma_n^+, & \tau_{pd} &= 1/v_{th} N_{Au} \sigma_p^0, \\ \tau_{na} &= 1/v_{th} N_{Au} \sigma_n^0, & \tau_{pa} &= 1/v_{th} N_{Au} \sigma_p^-, \\ D' &= \left(p \tau_{nd} + \frac{1}{g_{Au,d}} n_{1d} \tau_{pd} \right) (p \tau_{na} + g_{Au,a} n_{1a} \tau_{pa}) \\ &\quad + (n \tau_{pd} + g_{Au,d} p_{1d} \tau_{nd}) (p \tau_{na} + g_{Au,a} n_{1a} \tau_{pa}) \\ &\quad + (n \tau_{pd} + g_{Au,d} p_{1d} \tau_{nd}) \left(n \tau_{pa} + \frac{1}{g_{Au,a}} p_{1a} \tau_{na} \right), \\ v_{th} &= (3kT/m^*)^{1/2} = 1.97 \times 10^7 (T/300)^{1/2} \text{[cm/s]}, \\ \sigma_n^0 &= 5 \times 10^{-16} \text{cm}^2, & \sigma_n^+ &= 3.5 \times 10^{-15} (T/300)^{-2.5} \text{cm}^2, \\ \sigma_p^0 &= 1 \times 10^{-16} \text{cm}^2, & \sigma_p^- &= 1 \times 10^{-15} (T/300)^{-4} \text{cm}^2 \text{[8]}. \end{aligned}$$

式中 n , p 分别代表导带和价带中的电子和空穴浓度。

少子寿命 τ_n (P 型硅) 则为

$$\tau_n = \Delta n / \frac{dn}{dt} = D' / \left(\Delta p + p_0 + n_0 \frac{\Delta p}{\Delta n} \right) (n_{1a} \tau_{pa} + p \tau_{na} + p_{1d} \tau_{nd} + n \tau_{pd}). \quad (11)$$

光生载流子浓度 $\Delta n = f(\Delta p)$ 或 $\Delta p = f(\Delta n)$ 可由浅受主硼浓度 $N_s = N_{p_s} / (g_p + p_s)$ (其中 $p_s = N_s \exp[-(E_s - E_v)/kT]$ 和 $n = n_0 + \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p$) 代入电中性条件(1)式得到。少子寿命 τ_n 和少子扩散长度 L_n 关系为

$$\tau_n = L_n^2 / D_n, \quad (12)$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_{n0} / [1 + 350N_T / (N_T + 3.2 \times 10^{18})]^{1/2}, \quad (13)$$

$$N_T = N_{Au} + N_s, \quad (14)$$

式中 N_s 和 E_s 分别代表浅受主硼浓度和能级位置, N_v 为价带等效态密度, n_0 和 p_0 分别为平衡电子和空穴浓度, μ_{n0} 为电子迁移率. 在 300K 下, 对掺金单晶硅 $\mu_{n0} = 1200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 对单晶硅 $\mu_{n0} = 1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [9].

2. 红外吸收谱

1) 氧、碳含量的计算 红外吸收法是测定硅中氧、碳含量的简便方法. 本文采用空气参比法, 并在 300K 下进行红外吸收测量. 根据 ASTM [2,3], 氧、碳的标定常数分别为 $2.45 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$ 和 $1.0 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^3$, 依比尔定律 [10] 得间隙氧 [O] 和替位碳 [C] 浓度为

$$[\text{O}] = 2.45 \times 10^{17} \times \alpha \text{ (atom/cm}^3\text{)}, \quad (15)$$

$$[\text{C}] = 1.0 \times 10^{17} \times \alpha \text{ (atom/cm}^3\text{)}, \quad (16)$$

α 为其对应的吸收系数, 其值 [11] (如图 2) 为

$$\alpha_i = \frac{1}{t} (A_i - A_r) - \frac{1}{t} \ln \left\{ \frac{1 - Rr \exp[-2(\alpha_i + \alpha_r)t]}{1 - Rr \exp(-2\alpha_r t)} \right\}. \quad (17)$$

当前表面(光照面)的反射系数 R 和后表面(背光面)的反射系数 r 相等时, 即

$$R = r,$$

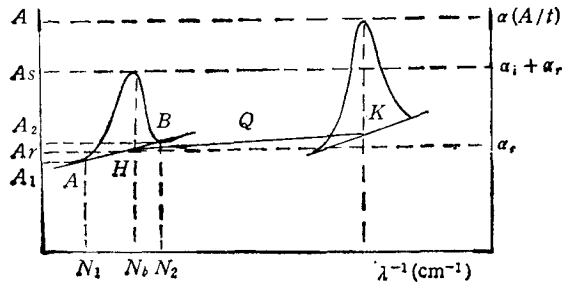


图 2 红外吸收谱示意图

则

$$\alpha_i = \frac{1}{t} (A_i - A_r) - \frac{1}{t} \ln \left\{ \frac{1 - R^2 \exp[-2(\alpha_i + \alpha_r)t]}{1 - R^2 \exp(-2\alpha_r t)} \right\}, \quad (18)$$

式中

$$A_r = A_1 + (A_2 - A_1)(N_b - N_1) / (N_2 - N_1), \quad (19)$$

$$\alpha_r = \frac{A_r}{t} - \frac{1}{t} \ln [1 - R^2 \exp(-2\alpha_r t)] + \frac{1}{t} \ln (1 - R^2). \quad (20)$$

α_i 代表杂质吸收系数, t 为样品厚度.

(18) 式等号右边第二项是薄样品修正项, 此项为负值, 所以它使杂质吸收系数 α_i 变小.

2) 基线高度的计算 基线高度定义为 HK 中点 Q 的吸收系数, 如图 2 所示. 氧峰基线点吸收系数 α_0 为 [9]

$$\alpha_0 = \frac{A_H}{t} + \frac{1}{t} \ln (1 - R)^2 - \frac{1}{t} \ln [1 - R^2 \exp(-2\alpha_0 t)]. \quad (21)$$

碳峰基线点吸收系数 α_c 为

$$\alpha_c = \frac{A_K}{l} + \frac{1}{l} \ln(1-R)^2 - \frac{1}{l} \ln[1 - R^2 \exp(-2\alpha_c l)], \quad (22)$$

则基线高度 h_0 为

$$h_0 = \frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2}. \quad (23)$$

(21)和(22)式等号右边第二项是考虑了薄样品存在多次反射的修正项, A_H 和 A_K 分别为 H 和 K 点的吸收度.

3. 表面光伏效应

由表面光电压测定少子扩散长度 L 是标准方法之一. 在等光强和小讯号条件下, 若 $l > 2.5L$, $l > 4l$, $W_1 \ll l$, $W_2 \ll l^{[12]}$, 则光电压 ΔV_{ph} 的倒数与吸收系数的倒数 α^{-1} (即 l) 为直线关系,

$$\Delta V_{ph}^{-1} = C'(\alpha^{-1} + L)^{[13]}, \quad (24)$$

C' 为常数, W_1 和 W_2 分别为前后表面的势垒宽度.

三、实验和计算结果及讨论

1. 掺金单晶硅的少子寿命

为测量不同掺金浓度的 P 型单晶硅的少子寿命, 金扩散温度选为 800—1150℃, 其掺金浓度见表 1. 由于金在硅中扩散后, 其分布为 U 型分布, 因此样品扩散后的表面必须磨掉一定厚度的硅层, 我们取 200 μm 处的金浓度作为样品的金浓度. 由表面光电压法测得少子寿命见表 1; 根据推导的公式, 计算了不同掺金浓度的 P 型硅的少子寿命, 其结果见表 1. 计算中的一些参量由下列公式计算得出:

(1) 费密能级的值, 通过求解电中性条件方程得出, 即

$$n + N_a^- + N_{Au,a}^- = p + N_d^+ + N_{Au,d}^+. \quad (25)$$

所用材料为高阻 P 型硅, $\rho = 33.5 \Omega \cdot \text{cm}$, 查表 $N_a = 4.1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3[13]}$, 则可认为 $N_d \ll N_a$, $N_d^+ \rightarrow 0$, N_a^- 为离化浅受主硼浓度:

$$N_a^- = N_a / \{1 + \exp[(E_a - E_F)/kT]\}. \quad (26)$$

(2) 禁带宽度 E_g 随温度变化为^[14]

$$E_g = E_c - E_v = E_g(0) - \beta T^2 / (T + r), \quad (27)$$

式中 $E_g(0) = 1.170 \text{eV}$, $\beta = 4.73 \times 10^{-4} \text{eV/K}$, $r = 636 \text{K}$.

(3) 电子和空穴有效质量随温度变化关系式: 由文献[15]的电子和空穴有效质量随温度变化的实验曲线, 由最小二乘法^[16]用多项式曲线拟合得电子和空穴有效质量 (m_c^* , m_h^*) 随温度变化关系式(拟合范围由 0—300K) 为

$$m_c^*/m_0 = 1.0616 + 2.465 \times 10^{-5}T + 3.604 \times 10^{-6}T^2 - 1.215 \times 10^{-8}T^3 + 1.754 \times 10^{-11}T^4 - 9.469 \times 10^{-15}T^5, \quad (28)$$

$$m_h^*/m_0 = 0.58955 - 2.389 \times 10^{-4}T + 1.267 \times 10^{-5}T^2 - 5.358 \times 10^{-8}T^3 + 9.033 \times 10^{-11}T^4 - 5.429 \times 10^{-14}T^5. \quad (29)$$

(4) 浅受主硼电离能为 $E_a = 0.045 \text{eV}^{[17]}$.

表 1 掺金 P 型硅少子寿命统计计算值与实验结果比较

实 验 值 样 品	扩散温度 (°C)	掺金浓度 ($\times 10^{14} \text{cm}^{-3}$)	E_{F1} (eV)	E_{F2} (eV)	统 计 计 算 值				实 验 测 量 值		$\tau_{s,Au}$ ($\times 10^{-8} \text{s}$)	$\tau_{s,Au}/\tau_{n1}$	$\tau_{s,Au}/\tau_{n2}$	τ_{n2}/τ_{n1}
					L_{n1} (μm)	τ_{n1} ($\times 10^{-8} \text{s}$)	L_{n2} (μm)	τ_{n2} ($\times 10^{-8} \text{s}$)	L_n (μm)	τ_n ($\times 10^{-8} \text{s}$)				
31-4	800	3.623	0.277078	0.277057	113.3	420.7	117.5	452.1	116.4 ± 1.3	444.0	507.6	1.21	1.12	1.07
31-18	860	20.61	0.278116	0.277936	47.52	74.07	50.60	83.98	53.6 ± 1.4	94.22	96.18	1.29	1.16	1.13
31-17	900	56.76	0.280453	0.279868	28.68	27.02	31.13	31.83	39.6 ± 0.9	51.53	52.13	1.92	1.64	1.18
31-21	960	215.9	0.293455	0.289281	14.90	7.353	16.76	9.304	18.3 ± 0.2	11.09	11.12	1.51	1.20	1.27
31-20	1010	584.7	0.336195	0.312001	10.37	3.6311	11.71	4.627	10.1 ± 0.3	3.443	3.446	0.949	0.745	1.27
31-25	1080	2035	0.386012	0.351596	7.946	2.278	8.334	2.506	8.9 ± 0.2	2.858	2.860	1.26	1.14	1.10
31-1	1150	6203	0.417935	0.383008	5.287	1.175	5.213	1.143	5.45 ± 0.3	1.226	1.226	1.04	1.07	0.97

注: (1) E_{F1} , L_{n1} , τ_{n1} 是在简并因子皆取 1 的统计计算结果.(2) E_{F1} , L_{n1} , τ_{n1} 是在受主杂质能级简并因子取 4, 金受主能级简并因子取 2 的统计计算结果.(3) L_n , τ_n 为实验测量值, $\tau_{s,Au} = \left(\frac{1}{\tau_n} - \frac{1}{\tau(\text{掺金前})} \right)^{-1}$.

由表 1 看出, τ 的计算值与实验值的比值在 0.745—1.64 之间, 说明理论计算与实验结果符合较好。由表 1 还可看出, 简并因子对少子寿命的计算有影响, 计算时必须考虑其取值问题。

2. 基线高度与少子扩散长度对应关系

测量了具有相同表面状况, 掺金浓度不同的单晶硅样品的红外吸收谱和少子扩散长度, 其结果如表 2 所示。由表 2 看出, 对相同表面状况的样品, 基线高度愈高, 少子扩散长度愈短, 反之亦然^[12]。这是因为基线高度可以综合反映杂质和缺陷的含量和种类^[9], 所以对表面状况相同样品, 由其红外吸收谱基线的高低, 可以定性确定其材料的优劣。对基线的研究尚待进一步进行, 特别是测量低温下的红外吸收谱将有助于研究的深入。

表 2 基线高度与少子扩散长度

样 品 号	少子扩散长度 $L \pm \Delta L$ (μm)	$N(0)$ ($\times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	$N(c)$ ($\times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	α_0 (cm^{-1})	α_c (cm^{-1})	$\frac{\alpha_0 + \alpha_c}{2}$ (cm^{-1})
31-18	394.4 ± 10.5	6.64	6.85	6.26	2.89	4.57
31-17	388.9 ± 10.1	6.30	6.92	6.08	3.53	4.81
31-25	387.8 ± 11.8	6.48	7.24	7.56	3.00	5.28
31-20	383.3 ± 8.3	6.53	6.95	7.25	3.42	5.33
31-9	351.1 ± 12.4	6.24	6.99	7.66	3.53	5.59
31-4	345.0 ± 9.4	5.76	6.65	7.74	3.96	5.85
31-1	332.6 ± 7.6	5.83	7.13	8.71	3.19	5.95
31-11	330.2 ± 11.6	5.93	7.43	8.69	4.07	6.38
31-5	327.3 ± 8.8	6.23	6.63	9.44	4.40	6.92
31-19	303.5 ± 8.9	6.79	6.92	9.78	4.80	7.29
31-18*	53.6 ± 1.4	6.42	6.50	14.69	5.90	10.29
31-17*	39.6 ± 0.9	6.45	6.68	15.77	6.07	10.92
31-21*	18.3 ± 0.2	6.57	6.94	16.79	7.43	12.11
31-25*	8.9 ± 0.2	6.71	6.87	19.26	9.13	14.19
31-1*	5.4 ± 0.3	5.90	6.35	20.93	9.05	15.29

注: “*”为样品掺金后实验的结果。

3. 不同处理的单晶硅红外吸收谱的特点

通过测量大量样品的红外吸收谱, 发现在室温下其谱图存在下列规律:

1) 掺金单晶硅样品, 因引入深能级复合中心, 少子扩散长度变短, 基线基本上是平行上升, 如图 3(a), (b)。

2) 中子辐照的单晶硅, 因辐照产生深能级复合中心, 引起少子扩散长度变短, 基线明显上升, 而且出现向碳峰方向倾斜, 如图 3(c)。

3) 浓磷扩散样品, 因掺杂浓度很高, 晶格吸收很大, 杂质吸收峰不能从背景中区别开来, 因此室温下不能用红外吸收法测量掺浓磷样品的杂质含量, 如图 3(d)。

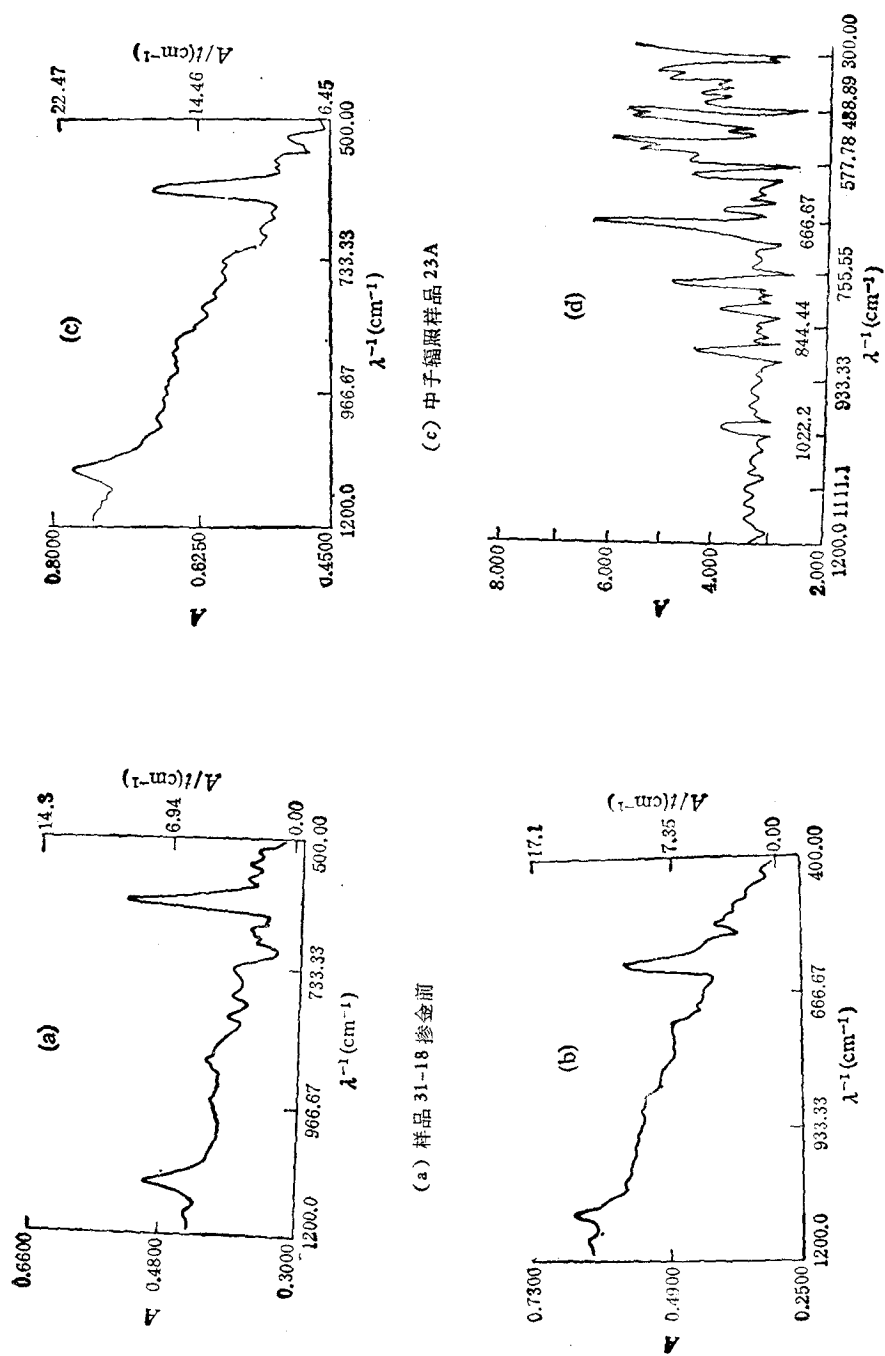


图 3 不同处理后, 单晶硅样品的红外吸收谱

- [1] 沈颢华, 固体电子学研究进展, 5, (1985), 273.
- [2] Annual Book of ASTM Standards, F123—83, (1985).
- [3] Annual Book of ASTM Standards, F 121—83, (1985).
- [4] W. R. Wilcox and T. J. Lachapelle, *J. Appl. Phys.*, 35(1964), 240.
- [5] S. M. Sze, *Phys. of Semiconductor Device*, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc, (1981), p. 21.
- [6] L-A Ledebo and Zhan-Guo Wang, *Appl. Phys. Letter.*, 42 (1983), 680.
- [7] 王占国, 半导体学报, 3(1987), 236.
- [8] G. Bemske, *Phys. Rev.*, 111 (1958), 1515.
- [9] M. Neuberger and S. J. Wells, "Silicon", A. D 698342 Hughes Aircraft Compang Culver city, California, (1969), p. 84.
- [10] Annual Book of ASTM Standards, F168-67(1985).
- [11] 陈敏锐, 厦门大学硕士学位论文, (1990).
- [12] 吴建国, 厦门大学硕士学位论文, (1989).
- [13] 同[5], p. 32.
- [14] 同[5], p. 15.
- [15] H. D. Barber, *Solid-State Electronics*, 19(1967), 1039.
- [16] 清华大学, 计算方法, 科学出版社, 上册, 北京, p. 53.
- [17] 同[5], p. 21.

A STUDY ON PROPERTIES OF Au-DOPED SILICON

CHEN MIN-RUI SHEN YI-HUI LIU SHI-YI

Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, 361005

(Received 9 April 1991)

ABSTRACT

In this paper infra-red absorption spectra and surface photovoltaic spectra of Au-doped and undoped silicon are studied. The relation of minority carrier diffusion length to the height of base line of infra-red absorption spectra under the same surface condition is determined. By using semiconductor statistics, we obtain the Au-doped silicon semiconductor statistics formulae when the degeneracy factor is different from unit, as well as silicon two-levels recombination theory formulae when $g_{Au,a} \neq 1$ and $g_{Au,d} \neq 1$. The ratios of the calculated lifetime of minority carrier to the experimental data are between 1.64 and 0.745.

PACC: 7280C; 7220J; 7850