

中子辐照的单晶硅参数研究*

沈颀华 朱文章** 吴孙桃 谢敬仁 陈仪明

(厦门大学, 361005)

1993年2月24日收到初稿, 1993年6月21日收到修改稿

摘要 在不同温度和红外光照下, 测量了经中子辐照的单晶硅表面光电压, 确定了其深能级的位置和少子扩散长度; 由双能级复合理论, 推导了中子辐照单晶硅的深能级复合中心和寿命的计算公式; 计算了热中子辐照和高能中子辐照单晶硅后的深能级密度、费米能级和其他有关重要参数。

关键词: 中子辐照 单晶硅 深能级 表面光伏效应 少子扩散长度或寿命

Study of Parameters of Neutron-Irradiated Single Crystal Silicon

Shen Yihua, Zhu Wenzhang, Wu Suntao, Xie Jinren, Chen Yiming

(Xiamen University, 361005)

Abstract: The photovoltage spectra of neutron-irradiated single crystal silicon under infra-red illumination and at low temperatures are measured. The deep level and minority carrier diffusion length are determined. By the double-level recombination model, the statistics formulas of the deep level and lifetime are derived for neutron-irradiated single crystal silicon. Some important parameters of the silicon irradiated with high energy and thermal neutron are calculated respectively.

Key Words: Neutron-Irradiation, Single Crystal Silicon, Deep Level, Surface Photovoltaic Effect, Minority Carrier Diffusion Length or Lifetime

1 引 言

高反压大功率硅器件, 为提高其性能, 通常采用热中子嬗变掺杂衬底 (Neutron Transmutation Doping); 有些半导体器件必须在辐照条件下工作或在辐照后仍能继续工作, 但这些器件的基体材料单晶硅在受中子辐照后, 会产生新的缺陷, 形成深能级复合中心, 使材料和器件性能发生变化, 因此, 研究其受辐照后深能级位置和密度及其他有关参数, 对器件研制有实际意义。为测量深能级位置, 采用一种新的方法——低温红外表面光电压谱测量, 它属于非破坏性, 不需制备 pn 结和电极, 不会引进新的缺陷。本研究的测量和计算结果与已有文献报导的

* 国家自然科学基金研究课题。

** 现为集美航海学院教师。

基本一致。

2 原 理

低温(15~100 K)下,用红外光照射经中子辐照后的单晶硅样品,当光子能量等于电子从深能级到导带或从价带到深能级的能量差时,发生光激发。如图 1 的过程 1 或 2,产生的光生载流子的扩散、复合和在表面势垒电场作用下,在表面势垒两侧形成光生载流子的积累,从而产生光生电压;其结果在表面光电压谱中出现峰值,由峰值对应的位置即可计算出深能级位置,如图 2 的 1,3 峰位置。

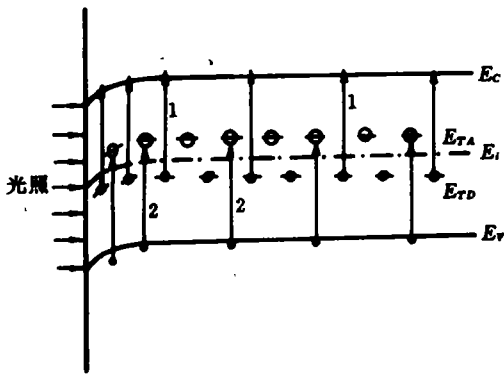


图 1 低温下红外光照的光激发示意

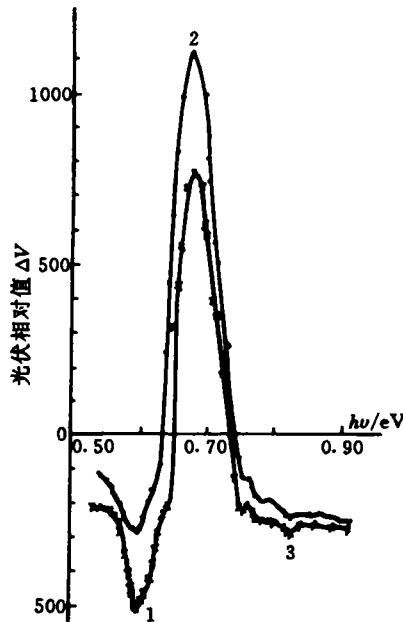


图 2 960 C 金扩散的 p 型硅单晶,在低温下

红外表面光电压谱。•, 97.7 K, ×, 61.2 K

热中子辐照单晶硅,对硅样品的主要损伤机理是:使晶格原子往间隙位置位移,且有的发生嬗变。当辐照的中子能量与热运动能量相近时,中子与单晶硅中含量为 3.1% 的同位素 ^{28}Si 发生核反应而形成稳定的磷原子 ^{31}P ^[1],使晶格原子发生嬗变和产生缺陷;高能中子与晶格原子发生碰撞,使其产生缺陷群^[2]。在轻掺杂和室温下,受中子辐照的单晶硅中产生的缺陷,双空位缺陷起主要作用^[3],因此,可用双能级模型对它进行分析。

根据电中性条件:

$$n + N_A^- + N_T^- = p + N_D^+ + N_T^+ \quad (1)$$

对 p 型样品, $N_A \gg N_D$ (对 n 型样品 $N_D \gg N_A$)

则
$$n + N_A^- + N_T^- = p + N_T^+ \quad (2)$$

$$N_T^- = N_T^0 + N_T^+ + N_T^- \quad (3)$$

$$N_T^- : N_T^0 : N_T^+ = \exp\left(\frac{E_F - E_{TA}}{KT}\right) : 1 : \exp\left(\frac{E_{TD} - E_F}{KT}\right) \quad (4)$$

则得
$$N_T^0 = N_T / \{1 + \exp[(E_F - E_{TA})/KT] + \exp[(E_{TD} - E_F)/KT]\} \quad (5)$$

$$N_T^- = N_T / \{1 + \exp[(E_{TA} - E_F)/KT]\} \times \{1 + \exp[(E_{TD} - E_F)/KT]\} \quad (6)$$

$$N_T^+ = N_T / \{1 + \exp[(E_F - E_{TD})/KT]\} \times \{1 + \exp[(E_F - E_{TA})/KT]\} \quad (7)$$

式中 N_A 和 N_D 分别代表浅受主和浅施主浓度; n 和 p 分别代表导带电子和价带空穴浓度; N_T , N_T^- , N_T^+ 和 N_T^0 分别代表深能级复合中心浓度、离化受主型、离化施主型和中性深能级的浓度; E_{TA} 和 E_{TD} 分别代表受主型和施主型深能级的位置。

由于每个缺陷具有三种带电状态,因此,有四个发射和四个复合过程:

- (1) 中性施主深能级俘获空穴,俘获截面为 σ_p^0 ,施主型深能级带正电。
- (2) 带正电的施主俘获电子,俘获截面为 σ_n^+ ,施主型深能级呈中性。
- (3) 中性施主深能级发射电子,则带正电。
- (4) 带正电的施主型深能级发射空穴,即由价带中俘获电子,施主型深能级呈中性。
- (5) 中性受主深能级俘获电子,俘获截面为 σ_n^0 ,受主深能级带负电。
- (6) 带负电受主深能级俘获空穴,俘获截面为 σ_p^- ,受主深能级呈中性。
- (7) 中性受主深能级发射空穴,即由价带俘获电子,则它带负电。
- (8) 带负电受主深能级发射电子,受主深能级呈中性。

在稳态和小信号条件下,由动力学方程,可推导出少数寿命 τ 和少数扩散长度 L 的计算公式:

$$\tau_n = D' / [(p_0 + n_0) \times (n_{1A}\tau_{pA} + p\tau_{nA} + p_{1D}\tau_{nD} + n\tau_{pD})] \quad (8)$$

$$D' = (p\tau_{nD} + n_{1D}\tau_{pD}) \times (p\tau_{nA} + n_{1A}\tau_{pA}) + (n\tau_{pD} + p_{1D}\tau_{nD}) \times (p\tau_{nA} + n_{1A}\tau_{pA}) + (n\tau_{pD} + p_{1D}\tau_{nD}) \times (n\tau_{pA} + p_{1A}\tau_{nA}) \quad (9)$$

$$\tau_{nD} = 1 / (V_{thc} N_T \sigma_n^+), \tau_{pD} = 1 / (V_{thh} N_T \sigma_p^0),$$

$$\tau_{nA} = 1 / (V_{thc} N_T \sigma_n^0), \tau_{pA} = 1 / (V_{thh} N_T \sigma_p^-),$$

$$L_n = \sqrt{\tau_n D_n} \quad (10)$$

式中 n_{1A} , n_{1D} 和 p_{1A} , p_{1D} 分别代表费米能级在受主型和施主型深能级上时,导带中的电子和价带中的空穴浓度, V_{thc} 和 V_{thh} 分别代表电子和空穴的热运动速度。

当已知深能级位置后,由表面光电压法测得少数扩散长度 L_n ,则可算出 N_T ,而 $N_T \propto \Phi_e$,

$$N_T = A \Phi_e \quad (11)$$

式中 Φ_e 为中子辐照的剂量; A 为比例常数,它表明每个具有一定能量的中子在单晶硅中单位厘米深度内产生的复合中心数,定义为中子的缺陷引进率。

考虑单一复合能级、单一复合截面近似,则为 SRH 理论^[5],对 p 型样品,只考虑施主型复合中心,则得

$$\tau_n = 1 / (\sigma_n^+ V_{thc} N_T) \quad (12)$$

$$1/\tau_n' = 1/\tau_{n0} + 1/\tau_n \quad (13)$$

式中 τ_{n0} 和 τ_n' 分别为辐照前、后的少数寿命,由(11)和(12)式代入(13)式得

$$1/\tau_n' = 1/\tau_{n0} + K_L \Phi_e \quad (14)$$

由(10)式则得

$$K_L \Phi_e = 1/L_n'^2 - 1/L_{n0}^2 \quad (15)$$

式中 L_{n0} 和 L_n' 分别为辐照前、后的少数扩散长度, K_L 为辐照损伤系数。当已知 L_{n0} 和 L_n' 时,则可计算出 K_L 。

3 实验结果与计算

采用文献[6]的实验装置,对掺金硅和中子辐照的样品,测量了它们在低温下的红外表面光电压谱(如图 2),从而确定了它们的深能级位置,其结果如表 1。

测量了 p 型和 n 型单晶硅受中子辐照前后的少子扩散长度。由所推导的公式和所测量的深能级复合中心位置、少子扩散长度,计算了它们的体内费米能级、深能级复合中心的密度和损伤系数、缺陷引进率以及其他有关参数,其结果如表 2。

计算中所采用的常数为:

(1)n 型单晶硅为 FZ 单晶,电阻率 $\rho > 200 \Omega \cdot \text{cm}$,其掺杂浓度取为 $N_D \doteq 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $D_p = 11.63 \text{cm}^2/\text{s}$ 。

(2)p 型单晶硅为 CZ 单晶,电阻率 $\rho = 18 \Omega \cdot \text{cm}$,其掺杂浓度 $N_A = 7.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, $D_n = 36.2 \text{cm}^2/\text{s}$ 。

(3)浅施主杂质能级 $E_D = 0.045 \text{eV}$,浅受主杂质能级 $E_A = 0.045 \text{eV}$ 。

(4)深能级俘获截面分别为^[7]:

$$\sigma_n^0 = 1.9 \times 10^{-14} \text{cm}^2, \quad \sigma_n^+ = 1.0 \times 10^{-13} \text{cm}^2,$$

$$\sigma_p^0 = 1.2 \times 10^{-14} \text{cm}^2, \quad \sigma_p^- = 2.3 \times 10^{-13} \text{cm}^2$$

计算中的一些参量由下列公式计算得出:

(1)费米能级的值由求解电中性条件得出

$$n + N_A^- + N_T^- = p + N_D^+ + N_T^+$$

(2)电子和空穴有效质量随温度变化,由文献[8]的实验曲线值,经最小二乘法用多项式曲线拟合得出

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

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

(3)禁带宽度 E_g 随温度 T 变化^[9]

$$E_g = E_g(0) - \beta T^2 / (T + \gamma)$$

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

$$\gamma = 636 \text{K}$$

4 讨 论

4.1 表 1 表明,由测量低温下的红外表面光电压谱,得出的深能级位置与其他方法测量的结果基本一致;测量温度 95 K 左右即可,因此,可采用液氮冷却,使测量简便。对处于禁带中央上方和下方的其他深能级,在低温和红外光照下,同样可进行测定。

4.2 表 2 说明,通过测量单晶硅受中子辐照前后的少子扩散长度,当已知深能级复合中心的位置和俘获截面,可计算出复合中心的密度,其计算结果与采用统计计算结果基本一致;同时,

表 1 由表面光电压谱测定深能级位置

样品		掺金 浓度/cm ⁻³	中子辐照 剂量/cm ⁻²	测 量 温度/K	施主型深 能级 E_{TD}/eV	文 献 实验值/eV	受主型深 能级 E_{TA}/eV	文 献 实验值/eV
掺金单晶硅	P 型	2.061×10^{13}		15.9~96.9	$E_V + (0.352 \pm 0.003)$	$E_V + 0.35^{[9]}$	$E_C - (0.564 \pm 0.002)$	$E_C - 0.54^{[9]}$
	n 型	5.663×10^{15}		60.2~95.8	$E_V + (0.344 \pm 0.002)$	$E_V + 0.35^{[9]}$	$E_C - (0.553 \pm 0.002)$	$E_C - 0.54^{[9]}$
热中子辐照单晶硅	n 型硅 1#		7.85×10^{15}	15.3~96.9	$E_V + (0.337 \pm 0.006)$	$E_V + 0.35^{[7]}$	$E_C - (0.560 \pm 0.002)$	$E_C - 0.54^{[10]}$
	P 型硅 2#		7.8×10^{15}	60.1~96.7	$E_V + (0.337 \pm 0.002)$	$E_V + 0.35^{[7]}$	$E_C - (0.539 \pm 0.005)$	$E_C - 0.54^{[10]}$
高能中子辐照单晶硅	P 型硅 11#		1.0×10^{12}	16.0~98.0	$E_V + (0.380 \pm 0.020)$	$E_V + 0.35^{[7]}$	$E_C - (0.557 \pm 0.0003)$	$E_C - 0.54^{[10]}$

表 2 由测定的深能级和少子扩散长度计算得出的参数

样品		中子辐照 剂量/cm ⁻²	辐照前 少子 L_0 /10 ⁻² cm	辐照后 L /10 ⁻⁴ cm	费米能级 E_F/eV	复合中心 浓度 N_T/cm^{-3}	损伤系 数 K_L	缺陷引 进率 A	由计算的 N_T 反算 L' 及与测量值的比较		
									L' /10 ⁻⁴ cm	相对误 差/%	
热中子辐照单晶硅	n 型单晶硅	1#	7.8×10^{15}	7.394	7.5	0.742 185	6.99×10^{12}	2.28×10^{-10}	8.97×10^{-4}	7.499 6	5.33×10^{-3}
		2#	2.3×10^{16}	6.825	5.4	0.734 065	1.35×10^{13}	1.49×10^{-10}	5.88×10^{-4}	5.399 8	3.70×10^{-3}
		3#	7.8×10^{15}	7.459	9.0	0.745 758	4.88×10^{12}	1.58×10^{-10}	6.26×10^{-4}	8.999 4	6.67×10^{-3}
		4#	2.3×10^{16}	6.837	4.6	0.717 586	1.91×10^{13}	2.05×10^{-10}	8.31×10^{-4}	4.599 9	2.17×10^{-3}
		5#	3.96×10^{16}	6.313	3.7	0.667 016	3.56×10^{13}	1.84×10^{-10}	8.99×10^{-4}	3.699 9	2.70×10^{-3}
	P 型单晶硅	6#	7.8×10^{15}	5.635	6.2	0.263 807	9.25×10^{13}	3.35×10^{-10}	1.19×10^{-2}	6.185 4	2.35×10^{-1}
		7#	2.3×10^{16}	4.820	3.8	0.270 265	2.50×10^{14}	3.02×10^{-10}	1.08×10^{-2}	3.791 2	2.32×10^{-1}
		8#	3.96×10^{16}	4.612	2.6	0.288 155	5.65×10^{14}	3.75×10^{-10}	1.43×10^{-2}	2.594 1	2.27×10^{-1}
高能中子辐照单晶硅	9#	4.0×10^{11}	5.188	1.077	0.458 169	1.22×10^{16}	2.16×10^{-4}	3.04×10^4	1.076	2.18	
	10#	6.0×10^{11}	4.704	0.999	0.462 791	1.47×10^{16}	1.67×10^{-4}	2.45×10^4	0.998 5	1.5×10^{-1}	
	11#	1.0×10^{12}	4.091	0.758	0.476 675	2.80×10^{16}	1.74×10^{-4}	2.80×10^4	0.757 7	3.0×10^{-1}	

注:为比较和说明问题,有的数据取 4~6 位。

还可计算出其他重要参数,如费米能级、少子扩散长度损伤系数、中子辐照的缺陷引进率、离化或中性的深能级密度等,为研究粒子辐照对材料性质的影响提供一种简便方法。

4.3 图 2 的第 2 表面光电压谱峰,系与表面态能级有关,这有待进一步研究。

承蒙刘士毅教授对本工作关心和进行有益的讨论;峨嵋半导体厂李斯成高级工程师和清华大学陆金法副教授、北京师范大学低能核物理所华铭老师提供有关样品,谨表衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 Haas E W, Schnoller M S. *IEEE Trans Electron Devices*, 1976; **ED-23**(8): 803
- 2 Holmes R R. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1970; **NS-17**(6): 137
- 3 Chen L T, Lori J. *Phys Rev*, 1968; **171**(3): 6
- 4 Moll J L. *Physics of Semiconductors*, McGraw-Hill, New York, 1964: 99
- 5 Shockly W, Read W T. *Phys Rev*, 1952; **87**(5): 835
- 6 沈颖华. *电子学报*, 1989; **17**(3): 1
- 7 Messenger G C. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1967; **NS-14**(6): 88
- 8 Barber H D. *Solid-State Electronics*, 1967; **10**(11): 1 039
- 9 Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices*, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc, 1981: 15
- 10 查芬 R J 著, 阎光彬, 胡林浦译, 黄世明校. *微波半导体器件—原理和辐射效应*, 北京: 原子能出版社, 1980: 104



沈颖华 男, 1939 年生, 1962 年毕业于厦门大学物理系半导体专业, 现在厦门大学物理系工作, 副教授。长期从事半导体物理与器件物理的教学和科研, 现主要从事半导体光电性质方面的教学与科研; 曾参加完成和承担多项国家及福建省自然科学基金资助研究课题; 在国内外刊物和学术会议上发表论文几十篇。



朱文章 男, 1962 年生, 1986 年厦门大学物理系毕业, 并获硕士学位, 1993 年 1 月在厦门大学获理学博士学位。现在集美航海学院工作, 副教授。主要从事半导体单晶、异质结、超晶格和量子阱光电性质的研究, 在国内外学术刊物上发表论文 20 多篇。

物上发表论文 20 多篇。

世界固体电子新闻

小型化的微波和毫米波发射机

据《J Electron. Def.》1993 年第 6 期报道, 1991 年美国空军与诺思罗普电子系统子公司签订合同, 研制成两种高度小型化的发射机——微波功率组件(MPM)。这两种组件都直接用于电子干扰和雷达设备。具体性能如右表。

(曲兰欣)

参数/单位	电子战组件	雷达组件
频率/GHz	6~18	7~11
功率/W	500~100	100
占空比/%	100	50
增益/dB	>50	>50
效率/%	>30	>40
(噪声功率/Hz)	-105 dBm	-157 dBc (1kHz 下)
噪声系数/dB	-10	<10
尺寸	8 mm×102 mm ×152 mm	25 mm×51 mm ×152 mm