

晶硅太阳能电池中 Fe-B 对与少子寿命、陷阱浓度及内量子效率的相关性^{*}

李 凤^{1)†} 马忠权¹⁾ 孟夏杰¹⁾ 殷晏庭²⁾ 于征汕²⁾ 吕 鹏²⁾

1) (上海大学物理系, 上海 200444)

2) (上海索朗太阳能科技有限公司, 上海 200120)

(2009 年 7 月 30 日收到; 2010 年 1 月 15 日收到修改稿)

以太阳能电池级直拉单晶硅片为材料, 利用瞬态微波反射光电导衰减仪研究了硅片分别经过单、双面扩散后 Fe-B 对与少子寿命 τ 、陷阱浓度及制备成电池的内量子效率 (IQE) 的相关性. 对于单面扩散后的样品, Fe-B 对浓度分布在较大程度上决定了少子寿命分布; 对于双面扩散后的样品, Fe-B 对浓度显著降低 (在 $1.35 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 左右), 已不及其他杂质和缺陷对少子寿命的影响. 结合瞬态微波衰减信号和陷阱模型, 对单、双面吸杂前后硅片的陷阱浓度进行数值计算, 发现经过扩散吸杂后硅片的陷阱浓度显著减少. 对经过单面扩散后的硅片进行取点分析, 发现 Fe-B 对浓度与陷阱浓度的相关性较差, 即 Fe-B 对不是影响陷阱浓度变化的主要因素. 将分别经过单面和双面扩散的硅片制备成太阳能电池, 利用光生诱导电流测量了电池的 IQE. 分析发现, 经过双面扩散制备的电池的 IQE 比经过单面扩散制备的电池的 IQE 高, 且 IQE 分布较单面扩散制备的电池更均匀, 说明 Fe-B 对的浓度分布显著影响 IQE 的分布.

关键词: 少子寿命, 陷阱浓度, 内量子效率, Fe-B 对

PACC: 8630J, 7280C

1. 引 言

过渡金属 (例如 Fe, Cr 和 Cu 等) 是太阳能电池级直拉单晶硅片中常见的杂质, 它们一般以间隙态、替位态、复合体或沉淀的形态存在. 研究表明, 这些金属杂质会影响太阳能电池的效率^[1]. 在硅片工艺处理过程中, Fe 是较易引入的一种金属杂质, 它的存在可能改变晶硅中载流子的浓度; 可能直接引入深能级中心成为复合中心, 降低少数载流子寿命^[2, 3]; 也可能增加 p-n 结的漏电流, 降低晶硅太阳能电池的性能^[4, 5].

然而, 杂质能级可能是载流子的复合中心, 也可能是陷阱中心. 少数载流子陷阱中心的存在, 在效果上等于夺取了一部分复合中心上的少子, 从而较大程度地降低了电子-空穴对的复合率, 这对少子工作器件是相当有利的. 已有研究证明, 陷阱中心

的存在有利于提高太阳能电池的开路电压^[6, 7]. 因此, 若某些形态的 Fe 杂质不是以复合中心存在, 而是以陷阱中心存在, 将对太阳能电池性能的提高会产生积极的影响. 在直拉晶硅中, Fe 杂质以多种形态存在, 其中 Fe-B 对是最常见、最重要的金属复合体^[8]. Macdonald 等^[9, 10] 认为 Fe-B 对不是陷阱中心形成的原因, 但缺乏详细的实验论证, Fe-B 对与陷阱中心的相关性尚不明了. 因此, 有必要对 Fe-B 对与陷阱中心的相关性进行更加详细、深入的研究.

确定陷阱中心参数的方法较多, 如基于结电容技术的深能级瞬态谱仪 (DLTS)^[11-13]、光电导衰减 (PCD) 测量与 Hornbeck-Haynes 模型^[14] 拟合等等. 利用 DLTS 对半导体材料进行检测时需要制备电极, 是一种接触性的、破坏性的检测手段. 而 PCD 测量与 Hornbeck-Haynes 模型拟合出陷阱中心的相关参数 (如陷阱浓度和能级位置) 是非接触、非破坏的方法. PCD 技术分为准稳态光电导 (QSSPC) 衰减和

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60876045)、上海市重点学科建设项目 (批准号: S30105)、上海市科学技术委员会基础研究重点项目 (批准号: 09JC1405900) 和上海大学研究生创新基金 (批准号: SHUCX091012) 资助的课题.

[†] E-mail: joysli@shu.edu.cn

瞬态微波光电导衰减(MW-PCD). 结合 QSSPC 衰减测量与 Hornbeck-Haynes 模型得到陷阱中心参数, 针对晶硅中杂质和缺陷(如位错^[15]、间隙态氧^[16]、氢^[17]等等)对陷阱影响的研究已有报道. 利用 MW-PCD 少子寿命测量结果与 Hornbeck-Haynes 模型进行数值计算, 也可以得到陷阱中心的参数^[18], 而利用该方法对晶硅电池中 Fe-B 对与陷阱中心相关性的研究作者尚未见报道.

在本文中, 我们首先详细讨论了 Fe-B 对对晶硅太阳能电池少子寿命的影响. 然后结合 MW-PCD 少子寿命测量结果与 Hornbeck-Haynes 模型进行拟合得到了陷阱浓度, 分析研究了 Fe-B 对与陷阱中心的相关性. 最后, 讨论了 Fe-B 对对电池内量子效率(IQE)的影响.

2. 实 验

我们选取太阳能电池生产线上的 p 型掺 B 直拉单晶硅为研究对象, 首先采用 NaOH 溶液对硅片进行去除损伤层和制绒处理, 处理后的硅片晶面指数为(111), 厚度为(175 ± 3) μm, 电阻率为(1.5 ± 0.5) Ωcm. 然后利用傅里叶红外光谱仪对硅片的碳、氧浓度进行测量. 为了进行比较, 选择具有相同替位碳浓度和间隙氧浓度的纵向相邻硅片作为实验样品. 样品被分为 A 组和 B 组, 表面尺寸均为 5 cm × 5 cm. A 组中的样品 1、样品 2 分别与 B 组中的样品 3、样品 4 为相邻的硅片. 利用 Semilab 公司生产的 WT-2000 型 MW-PCD 少子寿命测试仪测得扩散前样品 1 和样品 3 的少子寿命分别为 13.20 和 12.92 μs, Fe-B 对浓度分别为 5.95 × 10¹¹ cm⁻³ 和 5.74 × 10¹¹ cm⁻³; 测得样品 2 和样品 4 的少子寿命和 Fe-B 对浓度如表 1 所列. 测量发现, 扩散前所有样品的 Fe-B 对浓度均为非均匀分布, 具有显著的横向位置分布差异.

利用 POCl₃ 对 A 组硅片进行单面扩散, 对 B 组硅片进行双面扩散. 采用浓度为 5% 的 HF 溶液酸洗 5 min, 以去除硅片表面的磷硅玻璃(PSG). 在进行少子寿命和 Fe-B 对浓度测量前, 我们采用等离子增强化学气相沉积(PECVD)法沉积 SiN_x:H 钝化层对硅片进行双面钝化, 沉积温度为 400 °C, 时间约为 20 min. 进行下一步工艺时, 将样品浸泡在 10% 的 HF 溶液中约 6 min, 以除去样品表面的 SiN_x:H, 然后用去离子水清洗并用氮气吹干. 电池的制备采用

以下常规工艺: PECVD 沉积 SiN_x:H 后, 进行背面电极、背面电场和正面栅线电极印刷, 最后经过高温烧结形成较好的欧姆接触.

利用 WT-2000 型 MW-PCD 少子寿命测试仪对样品进行少子寿命和 Fe-B 对浓度测量时, 激光波长为 904 nm、脉冲宽度为 200 ns, 每个脉冲产生的载流子数为 120 × 10¹⁷; 选择的测量步长为 1 mm, 因此样品上(x, y)坐标每个单位区域代表 1 mm × 1 mm 的区域. 利用 MW-PCD 少子寿命测试仪中的光生诱导电流进行 IQE 测量时, 所采用的三个激光波长分别为 980, 878 和 660 nm.

3. 陷阱浓度模型

由于陷阱中心是缺陷和杂质引起的, 因此, 陷阱效应在缺陷和杂质浓度高的材料中比在缺陷浓度低的材料中更明显. 根据 Hornbeck-Haynes 模型^[14], p 型硅中载流子运动过程可由如下的微分方程来描述:

$$\frac{dn(t)}{dt} = G - \frac{n(t)}{\tau_b} + \frac{n_1(t)}{\tau_g} - \frac{n(t)(1 - n_1(t)/N_1)}{\tau_i}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = -\frac{n_1(t)}{\tau_g} + \frac{n(t)(1 - n_1(t)/N_1)}{\tau_i}. \quad (2)$$

这里 $n(t)$ 是导带中非平衡电子浓度, $n_1(t)$ 是陷阱俘获的电子浓度, G 是光生电子-空穴对的产生率, τ_b 是体复合寿命. 方程(1), (2)中与陷阱中心能级相关的参数包括陷阱浓度 N_1 、电子被俘获在陷阱中的平均寿命 τ_g 和电子被陷阱中心俘获前的寿命 τ_i . 方程(1)描述了未被陷阱俘获的导带中非平衡电子的变化率, 等号右边前两项分别为外注入产生和复合引起的非平衡电子浓度的变化率; 第三、第四项分别为从陷阱中“逃逸”出来的电子和被陷阱俘获的电子引起的非平衡电子浓度变化率. 方程(2)表示陷阱中非平衡电子浓度的变化率.

样品经过光照后的非平衡电导, 是导带中非平衡载流子与陷阱中载流子共同作用的结果, 因此, 根据瞬态 PCD 得到的载流子浓度 n_a 可表示为

$$n_a(t) = n(t) + \frac{\mu_p}{\mu_p + \mu_n} n_1(t), \quad (3)$$

其中 μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率.

Hornbeck-Haynes 模型解释了陷阱对迁移率测量的影响^[14], 也解释了利用 QSSPC 或 MW-PCD 在

低注入时测得半导体少子寿命增大的现象. 该模型认为, 带隙中存在某些能级, 这些能级俘获一种带电类型的载流子后又释放, 是一种暂时性的俘获, 不同于复合中心对载流子的俘获. 这些能级的存在导致大部分光生少子被俘获, 在效果上等于夺取了一部分复合中心上的少子, 使得测量的光生电导增加, 从而得到较大的少子寿命值.

4. 结果及讨论

在室温下, p 型硅中的 B 原子主要处于晶格的替位位置, 很难移动, 而处于间隙态的 Fe 原子可以通过扩散与 B 结合形成 Fe-B 对, 它的形成降低了 B 掺杂浓度, 从而导致载流子浓度降低、电阻率升高. 利用 Fe 杂质引起少子寿命或扩散长度变化的特性, 发展了检测 Fe 污染程度的技术. 该测量技术的原理^[19]是在 B 掺杂的 p 型硅中, 以间隙态 Fe 与以 Fe-B 对方式存在的 Fe 具有不同的能级差和俘获截面, 导致 Fe-B 对和间隙 Fe 在硅中的复合率不同; 当硅片经过热处理或光激发之后, Fe-B 对分离, 扩散长度发生变化. 假定所有的复合过程保持不变, 通过测量 Fe-B 对分离前后的扩散长度 L_{before} 和 L_{after} , Fe-B 对浓度 $N_{\text{Fe-B}}$ 可以通过下式计算:

$$\begin{aligned} N_{\text{Fe-B}} &= A \left(\frac{1}{L_{\text{before}}^2 - L_{\text{after}}^2} \right) \\ &= C \left(\frac{1}{\tau_{\text{before}}} - \frac{1}{\tau_{\text{after}}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

当硅片电阻率为 $1\text{--}5 \text{ } \Omega\text{cm}$ 时, 因子 $C = 3.4 \times 10^{13} \text{ } \mu\text{s}/\text{cm}^3$. 如果测量的是扩散长度, 而不是少子寿命, 则因子 A 可由 $A = D_n C$ 来确定, 其中 D_n 是少子扩散系数.

4.1. Fe-B 对浓度对少子寿命的影响

B 掺杂的 p 型晶硅中, 由 Fe-B 对引起的复合寿命为 $\tau_{\text{Fe-B}}$, 则硅片的少子寿命 τ 可表示为^[3]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{Fe-B}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Fei}}} + \frac{1}{\tau_{\text{other}}}, \quad (5)$$

其中 τ_{Fei} 是间隙态 Fe 引起的复合寿命, τ_{other} 是除了 Fe-B 对和间隙 Fe 杂质以外的其他杂质引起的复合寿命. 从(5)式可知, 少子寿命除了受到 Fe-B 对的影响, 还受到其他杂质和缺陷的影响. 图 1(a) 和 (b) 分别为 A 组中样品 1 经过单面扩散后的 Fe-B 对浓度分布和少子寿命分布. 比较图 1(a) 和 (b) 可知, Fe-B 对浓度高的区域对应的少子寿命低, Fe-B

对浓度低的区域对应的少子寿命高. 例如, (1, 7) 处的 Fe-B 对浓度为 $1.12 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 少子寿命为 $7.53 \text{ } \mu\text{s}$, 而 (-13, -17) 处的 Fe-B 对浓度为 $2.59 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 少子寿命为 $12.96 \text{ } \mu\text{s}$. 但是也存在一些少数区域, 在这些区域中 Fe-B 对浓度低, 相应的少子寿命也低. 如 (17, 3) 处的 Fe-B 对浓度低至 $5.81 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 而少子寿命只有 $7.69 \text{ } \mu\text{s}$. 这主要是由于在样品中除了 Fe-B 对缺陷外, 还存在大量其他杂质和缺陷(如金属杂质 Zn, Cr 和位错等等), 这些杂质和缺陷都将形成数量显著的复合中心, 降低样品的少子寿命^[2, 3, 10], 这将显著地影响到 Fe-B 对浓度与少子寿命的相关性. 在 Fe-B 对浓度较高的区域, Fe-B 对对少子寿命的影响大于其他杂质对少子寿命的影响, Fe-B 对浓度与少子寿命有较强的相关性. 在 Fe-B 对浓度较低的区域, 分布不均匀的其他杂质或缺陷对少子寿命的影响不可忽略, Fe-B 对已不是影响少子寿命的主要因素, 从而导致 Fe-B 对浓度与少子寿命的相关性变差. 从图 1(a) 和 (b) 可以发现, 尽管 Fe-B 对浓度与少子寿命分布没有表现出严格的对应关系, 但从整体上看, Fe-B 对浓度与少子寿命的分布具有较强的相关性, Fe-B 对浓度在很大程度上决定了少子寿命的分布.

图 1(c) 和 (d) 给出了 B 组中样品 3 经过双面扩散后的 Fe-B 对浓度分布和少子寿命分布. 从图 1(c) 和 (d) 可以看出, 经过双面扩散的样品 3, 其 Fe-B 对浓度分布相对于单面扩散后的样品 1 显得均匀, 与少子寿命分布也不存在明显的联系. 这是因为在经过双面扩散后的硅片中, 大量 Fe-B 对被 PSG 吸附, 其浓度减少的程度比单面扩散的硅片大, 对少子寿命的影响已经低于其他杂质和缺陷对少子寿命的影响, 导致 Fe-B 对浓度不再是影响少子寿命分布的主要因素. 此外, 虽然样品 1 的 Fe-B 对浓度(图 1(a)) 比样品 3 的 Fe-B 对浓度(图 1(c)) 高, 但样品 1 的少子寿命(图 1(b)) 也高于样品 3 的少子寿命(图 1(d)). 导致这种现象的原因可能有两点: 一是样品 3 中以复合中心存在的其他杂质或缺陷浓度比样品 1 中高, 且 Fe-B 对浓度在低至 $1.35 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时(图 1(c)), 其在样品 3 中作为复合中心对少子寿命的影响小于其他杂质作为复合中心对少子寿命的影响, 即此时其他杂质和缺陷对少子寿命的消极影响是主要的. 另一个原因可能是 Fe-B 对不仅作为复合中心存在, 也作为陷阱中心存在, 导致 Fe-B 对浓度高的样品少子寿命也高, 这一

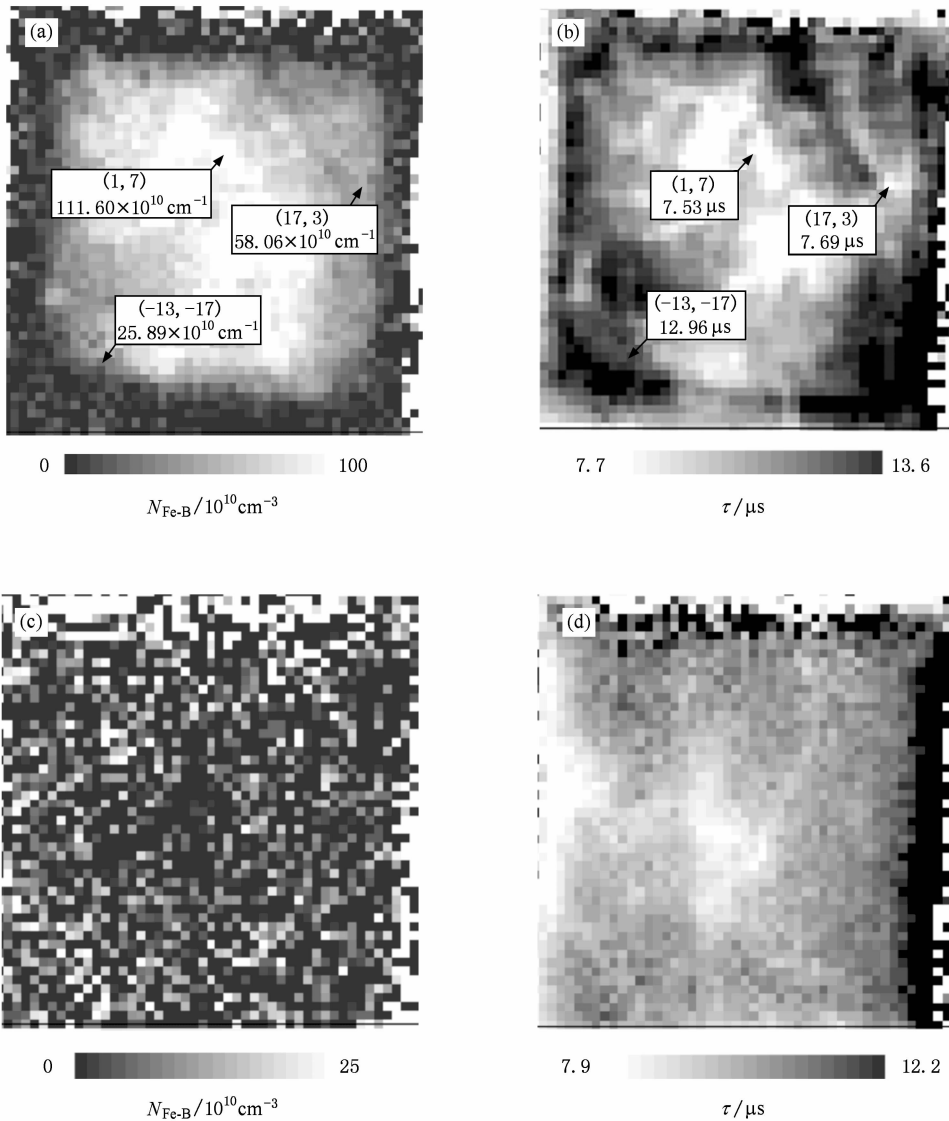


图1 扩散、去除 PSG 和钝化处理后样品的 Fe-B 对浓度分布和少子寿命分布 (a) 样品 1 的 Fe-B 对浓度分布, (b) 样品 1 的少子寿命分布, (c) 样品 3 的 Fe-B 对浓度分布, (d) 样品 3 的少子寿命分布

解释的合理性将在下面进行详细的论证。

4.2. Fe-B 对与陷阱中心的关系

在本文中, 利用 MW-PCD 测量的结果与 Hornbeck-Haynes 模型进行拟合得到陷阱浓度. 为了使硅片在扩散前后 Fe-B 对浓度有显著的变化, 从而更有效地体现 Fe-B 对与陷阱中心的相关性, 我们选用了原始片 Fe-B 对浓度高的样品 2 和样品 4. 图 2 (a) 为利用 MW-PCD 测得样品 2 的电压衰减信号, 图 2(b) 为其非平衡载流子的瞬态衰减信号. 利用 Matlab 软件, 对非平衡载流子衰减信号与方程 (1) — (3) 进行拟合. 在 $t = 0$ 时刻停止光照, 从此刻开始光生载流子产生率 $G = 0$, 非平衡载流子浓度开

始衰减. 由于导带中载流子浓度的衰减速度较陷阱中载流子浓度的衰减速度快, 所以可认为此刻所有的陷阱被填满 ($n_t(0) = N_t$), 且导带中的非平衡载流子浓度 ($n(t)$) 远高于陷阱俘获的载流子浓度 ($n_t(t)$). 已知 Fe-B 对的能级位置^[20] E_t 位于导带下 0.29 eV ($E_c - 0.29$ eV) 处, 利用公式^[15]

$$E_c - E_t = kT \ln \left(\frac{N_c \tau_g}{N_t \tau_1} \right) \quad (6)$$

可以得到由 Fe-B 对引起的逃逸率 τ_g/τ_1 与陷阱浓度 N_t 的关系为 $\tau_g/(N_t \tau_1) = 2.45 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3}$. 这里导带的有效状态密度 N_c 为^[21] $2.86 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 调整导带中初始非平衡载流子浓度 $n(0)$ 、陷阱浓度 N_t 、陷阱常数 τ_1 和 τ_g 四个参数, 对实验数据进行拟合,

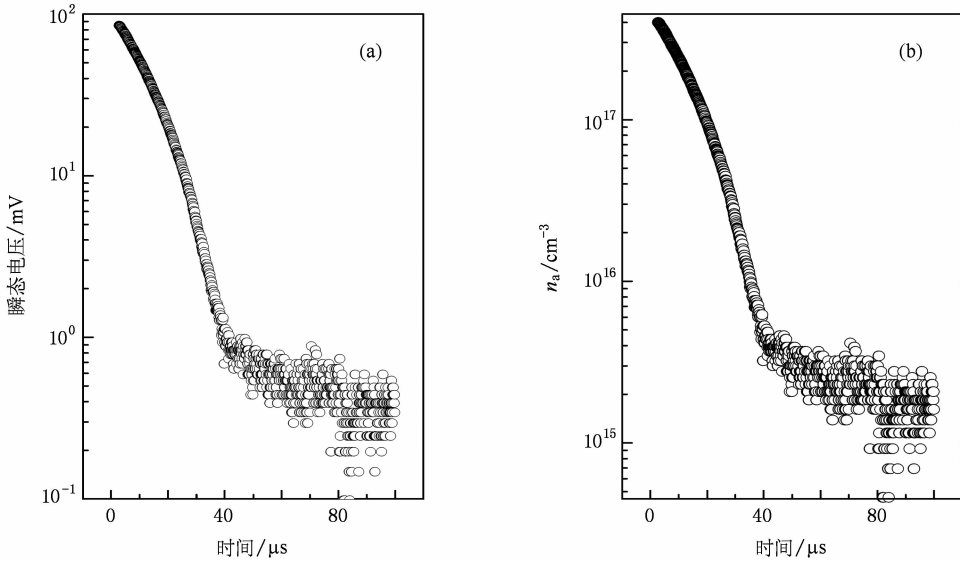


图2 样品2扩散前的MW-PCD瞬态电压及其非平衡载流子浓度衰减特性 (a)MW-PCD瞬态电压,(b)非平衡载流子浓度衰减特性. $N_1 = 6.13 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_g = 10.9 \text{ } \mu\text{s}$, $\tau_i = 1.5 \text{ } \mu\text{s}$

得到样品2和样品4的陷阱浓度如表1所列.

表1 样品2和样品4扩散吸杂前后的少子寿命 τ ,Fe-B对浓度 $N_{\text{Fe-B}}$ 和陷阱浓度 N_t

	扩散情况	$N_{\text{Fe-B}}/\text{cm}^{-3}$	$\tau/\mu\text{s}$	$N_t/10^{15} \text{ cm}^{-3}$
样品2	扩散前	1.12×10^{12}	7.26	6.13
	扩散后	1.42×10^{11}	15.41	5.07
样品4	扩散前	1.37×10^{12}	6.80	6.75
	扩散后	9.36×10^{10}	18.02	4.61

已有研究表明^[9,10],可以利用 POCl_3 扩散在硅片表面产生的PSG来吸附晶硅中的杂质,尤其是金属杂质,同时陷阱浓度也会随之降低.在研究中,我们发现扩散后的样品相比于扩散前Fe-B对浓度有显著降低,陷阱浓度也降低约20%,见表1.但这种现象还不足以表明陷阱浓度降低完全是由于Fe-B对浓度降低所引起.为了进一步分析Fe-B对对陷阱浓度的影响,我们在A组样品1中选取6个 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 区域作为分析对象,如图3(a)和(b)所示.通过数值计算,我们得到了这6个位置所对应的陷阱浓度,如表2所列.由表2可知,Fe-B对浓度相差数倍的区域却可以具有相同的陷阱浓度,如(20,14)处和(-16,-9)处,以及(-11,19)处和(18,-13)处.此外,(4,-2)处和(-18,-20)处的Fe-B对浓度相差4个数量级,而陷阱浓度相差不到3倍.由此说明,Fe-B对浓度的改变不是导致陷阱浓度发生变化的决定性因素.

表2 样品1中不同Fe-B对浓度位置对应的陷阱浓度 N_t

取样点坐标(x,y)	$N_{\text{Fe-B}}/\text{cm}^{-3}$	$N_t/10^{15} \text{ cm}^{-3}$
(-11,19)	4.5099×10^{10}	3.37
(20,14)	7.0132×10^{10}	3.07
(4,-2)	1.2037×10^{12}	6.13
(-16,-9)	3.2783×10^{11}	3.07
(18,-13)	2.7407×10^{11}	3.37
(-18,-20)	1.0000×10^8	2.79

上述结果与Macdonald等^[9,10]的结果相一致,文献[9,10]指出,陷阱浓度发生变化并不是由Fe-B对浓度变化引起的.在半导体中,缺陷能级是以复合中心存在还是以陷阱中心存在,取决于这些能级对不同带电类型非平衡少子的不同俘获概率 r ,而俘获概率 r 直接取决于俘获截面 σ ,即

$$r = \sigma v_{\text{th}},$$

其中 v_{th} 为非平衡载流子热运动速率.Macdonald等^[20]对p型掺B的晶硅中Fe-B对能级的研究表明,Fe-B对能级对非平衡载流子的俘获截面分别为 $\sigma'_n = 3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, $\sigma'_p = 2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$,即Fe-B对能级对电子的俘获概率 r'_n 是其对空穴的俘获概率 r'_p 的15倍.同时,Macdonald等^[20]给出了间隙态Fe能级对电子的俘获截面 $\sigma_n = 5 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$,对空穴的俘获截面 $\sigma_p = 7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$.因此,间隙态Fe的能级对电子的俘获概率是其对空穴俘获概率的700多倍,即 $r_n \gg r_p$.以上所述表明,Fe-B对主要以复合中

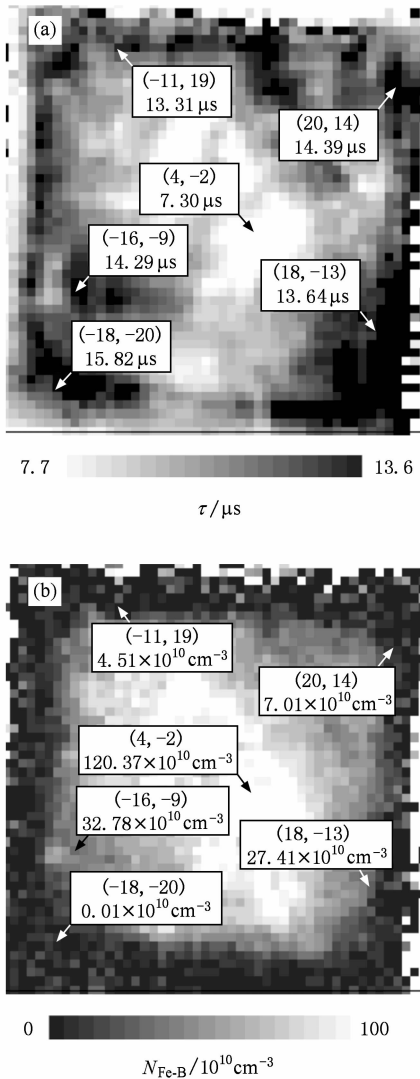


图3 样品1中 Fe-B 对浓度不同的6个位置的少子寿命分布和 Fe-B 对浓度分布 (a)少子寿命分布, (b) Fe-B 对浓度分布

心形式存在,而间隙态 Fe 能级主要以陷阱中心存在. 实验中利用 POCl_3 对硅片进行扩散吸杂后,陷阱浓度与 Fe-B 对浓度均减小,这是由于在 POCl_3 扩散过程中硅片经历高温后在硅片表面形成 PSG,同时 Fe-B 对分离为间隙态 Fe. 由于间隙态 Fe 在 PSG 中的固溶度大于其在硅片中的固溶度,从而使得 Fe-B 对分离形成的间隙态 Fe 和硅片中原有的间隙态 Fe 进入 PSG,导致硅中的 Fe-B 对浓度和间隙态 Fe 浓度都降低. 而间隙态 Fe 主要以陷阱中心存在,所以 PSG 中磷吸杂降低间隙态 Fe 浓度的同时,也降低了陷阱中心浓度.

从上面的分析还可以得知,在图1中不仅样品1的 Fe-B 对浓度高于样品3,而且其少子寿命也高

于样品3. 这主要是因为其他杂质的存在,这些杂质作为复合中心对少子寿命的影响强于 Fe-B 对所施加的影响,导致 Fe-B 对浓度高的样品对应的少子寿命也高.

4.3. Fe-B 对浓度对 IQE 的影响

A 组中样品1和 B 组中样品3分别经过印刷背场和电极,最后烧结得到具有良好欧姆接触的电池. 采用 MW-PCD 少子寿命测试仪测量电池在激发光波长为 980 nm 时的 IQE 如图4所示. 从图4可以看出,经过双面扩散的样品3制备得到的电池,其

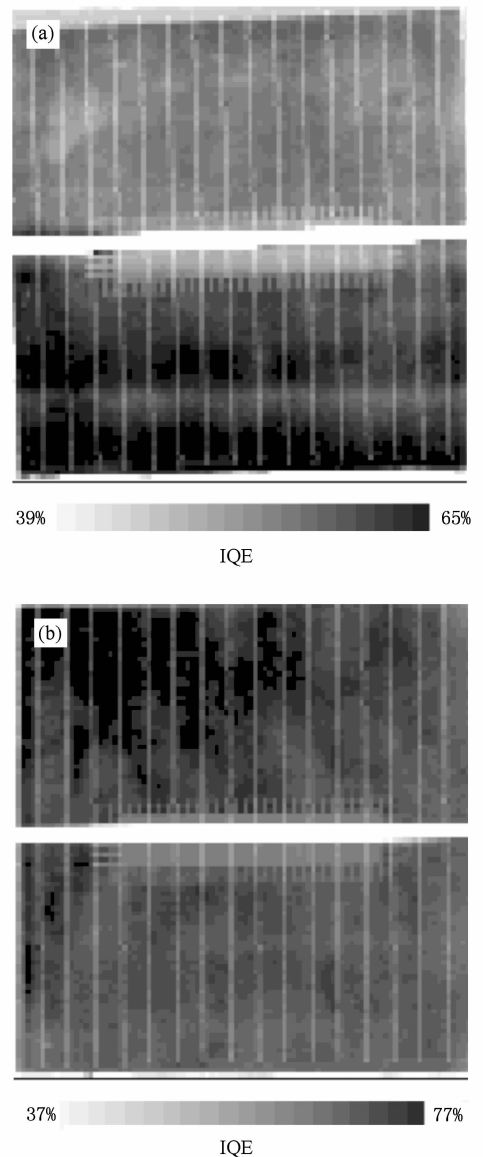


图4 不同扩散处理后得到的电池在激发光波长为 980 nm 时的 IQE 分布 (a)由样品1制备得到的电池的 IQE 分布, (b)由样品3制备得到的电池的 IQE 分布

IQE 比经过单面扩散的样品 1 制备得到的电池的 IQE 高. 这是因为双面扩散在硅片两面形成 PSG, 使以复合中心存在的杂质更易被吸收, 达到更好的吸杂效果. 如图 1(a) 和 (c) 所示, 双面吸杂后的 Fe-B 对浓度 (图 1(c)) 比单面吸杂的 Fe-B 对浓度 (图 1(a)) 低许多.

此外, 经过双面扩散后制备的电池的 IQE 分布 (图 4(b)) 比经过单面扩散后制备的电池的 IQE 分布 (图 4(a)) 更均匀. 这主要是因为硅片经过双面扩散后, 以复合中心存在的 Fe-B 对分布较单面扩散后的 Fe-B 对分布更均匀.

从以上分析可知, Fe-B 对能较大程度地影响太阳能电池的 IQE 大小及其分布, 是制约电池效率提高的重要因素. 因此, 在晶硅中降低 Fe-B 对或其他杂

质引起的复合中心的浓度, 是提高电池效率的途径之一.

5. 结 论

本文采取实验测量、理论模型和数值计算相结合的方法, 研究了太阳能电池级直拉晶硅经过单、双面扩散后 Fe-B 对浓度与少子寿命、陷阱浓度及制备成电池的 IQE 的相关性. 相比于双面扩散后的样品, 经过单面扩散后的硅片中 Fe-B 对浓度分布与少子寿命分布之间具有更强的相关性. 对经过单面扩散后的硅片取微小区域进行分析后发现, Fe-B 对浓度不是影响陷阱浓度的因素. 此外, 还发现 Fe-B 对的浓度明显影响 IQE 的大小及分布.

-
- [1] Davis J R, Rohatgi A, Hopkins R H, Blais P D, Choudhury P R, McCormick J R, Mollenkoff H C 1980 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **27** 677
- [2] Macdonald D H, Geerligs L J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4061
- [3] Macdonald D H, Geerligs L J, Azzizi A 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 1021
- [4] Terakawa T, Wang D, Nakashima H 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 4060
- [5] Geerligs L J 2003 *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (Osaka: Arisumi Printing Incorporated) p1044
- [6] Cuevas A, Stocks M, Macdonald D, Kerr M, Samundsett C 1999 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **46** 2026
- [7] Wang H, Yang H, Wu H C, Yu H C 2006 *J. Mater. Sci.* **41** 1905
- [8] Yang D R 2007 *Solar Cell Materials* (Beijing: Chemistry Industry Press) p130 (in Chinese) [杨德仁 2007 太阳能电池材料 (北京: 化学工业出版社) 第 130 页]
- [9] Macdonald D H, Cuevas A 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **65** 509
- [10] Macdonald D H 2001 *Ph. D. Dissertation* (Canberra: The Australian National University)
- [11] Li B, Liu C, Feng L H, Zhang J Q, Zhen J G, Cai Y P, Cai W, Wu L L, Li W, Lei Z, Zeng G G, Xia G P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1987 (in Chinese) [黎兵、刘才、冯良桓、张静全、郑家贵、蔡亚平、蔡伟、武莉莉、李卫、雷智、曾广根、夏庚培 2009 物理学报 **58** 1987]
- [12] Li Y J, Zhen J G, Feng L H, Li B, Zeng G G, Cai Y P, Zhang J Q, Li W, Lei Z, Wu L L, Cai W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 625 (in Chinese) [李愿洁、郑家贵、冯良桓、黎兵、曾广根、蔡亚平、张静全、李卫、雷智、武莉莉、蔡伟 2010 物理学报 **59** 625]
- [13] Zhang X, Hu J M, Wu Y Y, Lu F 2009 *J. Phys. D* **42** 145401
- [14] Hornbeck J A, Haynes J R 1955 *Phys. Rev.* **97** 311
- [15] Macdonald D H, Cuevas A 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1710
- [16] Schmidt J, Bothe K, Hezel R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4395
- [17] Dekkers H F W, Carmel L, Beaucame G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 013508
- [18] Lauer K, Laades A, Übensee H, Metzner H, Lawerenz A 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 104503
- [19] Zoth G, Bergholz W 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 6764
- [20] Macdonald D H, Cuevas A, Leung J W 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 7932
- [21] Green M A 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 2944

Influence of Fe-B pairs on minority carrier lifetime, trapping density and internal quantum efficiency in mono-crystal Si solar cells *

Li Feng^{1)†} Ma Zhong-Quan¹⁾ Meng Xia-Jie¹⁾ Yin Yan-Ting²⁾ Yu Zheng-Shan²⁾ Lü Peng²⁾

1) (*Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

2) (*Shanghai Suolang Solar Energy Technology Company Limited, Shanghai 200120, China*)

(Received 30 July 2009; revised manuscript received 15 January 2010)

Abstract

Solar-grade p-type Czochralski silicon wafers are doped with phosphorus by single-face and double-face diffusions, and the influence of Fe-B pairs on the minority carrier lifetime, the trapping centers density and the internal quantum efficiency (IQE) of cells (fabricated from the wafers) is analyzed by measuring microwave-detected photo-conductance decay minority carrier lifetime. In the doped wafers with single-face diffusion, the minority carrier lifetime is determined mainly by the density distribution of Fe-B pairs. However, in the doped wafers with double-face diffusion, the minority carrier lifetime is less influenced by the concentration distribution of Fe-B pairs than by other impurities and defects. Numerical calculation based on the combination of the transient voltage signal and the trapping model indicates that the density of trapping centers is reduced by either of diffusion process. On the other hand, detailed analysis of selected specific spots in one wafer with single-face diffusion shows that Fe-B pairs are not the major factor influencing the density of trapping centers. The wafers with different diffusion processes are fabricated into c-Si solar cells and the IQE is measured by using a light beam induced current. The results show that the IQEs of cells with double-face diffusion are higher than those with single-face diffusion, which demonstrates the negative effect of Fe-B pairs on the IQE of solar cells.

Keywords: minority carrier lifetime, trapping density, internal quantum efficiency, Fe-B pairs

PACC: 8630J, 7280C

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876045), the Foundation of Priority Academic Discipline of Shanghai, China (Grant No. S30105), the Key Program for Basic Research of the Science and Technology Committee of Shanghai, China (Grant No. 09JC1405900) and the Innovation Foundation for the Graduate Student of Shanghai University, China (Grant No. SHUCX091012).

† E-mail: joysli@shu.edu.cn