

硅太阳能电池发射区复合的分析*

丘思畴 左磊 丘睦钦

(华中理工大学 固体电子学系, 武汉, 430074)

1990年7月26日收到, 1991年3月8日修改定稿

本文全面考虑了太阳能电池发射区的重掺杂效应, 计算了高斯分布下, 表面杂质浓度和表面复合速度对内部复合速度及发射区暗电流的影响。

一、引言

近年来人们致力于优化硅太阳能电池掺杂剖面及钝化发射区表面, 以降低发射区复合电流。在浅结情况下, 结区复合一般由区内和表面的复合共同决定。区内的复合是杂质浓度的函数, 分析起来相当复杂。A. Rohatgi 等^[1]推广了 J. D. Alamo^[2] 的高低结界面有效复合速度的概念, 引入“内部复合速度”, 直观地描写了电池各个区域少子的复合损失。本文修正了 A. Rohatgi 的公式, 计算了结区的复合。

二、理论关系式

N^+ 发射区准中性区的泊松方程

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\rho(x)/\epsilon_0\epsilon_s, \quad (1)$$

式中电荷密度 $\rho(x)$ 可表为

$$\rho(x) = q[N_{D,eff}(x) - n(x)], \quad (2)$$

边界条件为

$$\begin{cases} \left. \frac{d\phi(x)}{dx} \right|_{x=0} = -qN_f/\epsilon_0\epsilon_s, \\ \phi(x)|_{x=W_E} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

坐标 x 的原点取在发射区表面, W_E 为准中性区边界。 N_f 是考虑到现代高效电池为改善表面衰退场, 在减反射膜中引入固定正电荷 N_f 。

对简并半导体, 电子浓度 $n(x)$ 可表为

$$n(x) = \frac{2N_c}{\sqrt{\pi}} \Phi_{\frac{1}{2}}(\xi), \quad (4)$$

$\Phi_{\frac{1}{2}}(\xi)$ 为费米积分

* 国家自然科学基金资助项目。

$$\Phi_{\frac{1}{2}}(\xi) = \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}}}{1 + e^{x-\xi}} dx, \quad (5)$$

$$\text{而 } \xi = [E_F - E_c(x)]/kT = [(E_F - E_{c0}(x)) + q\phi(x)]/kT. \quad (6)$$

式中 $E_{c0}(x)$ 为 N^+ 区无附加势时导带底能量. 设 $\xi_1 = [E_F - E_{c0}(x)]/kT$, 则 $\xi = \xi_1 + q\phi(x)/kT$, ξ_1 可用近似表达式^[3]代入计算.

重掺杂下常用有效电离杂质浓度 $N_{D,eff}(x)$ 表征电离程度, 可表为^[4]

$$N_{D,eff}(x) = N_D(x) \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \frac{\exp(\xi)}{\Phi_{\frac{1}{2}}(\xi)}. \quad (7)$$

式中 ΔE_g 为重掺杂引起的禁带收缩, 可表为^[1]

$$\Delta E_g = 0.231 \left[\left(\frac{10^{20}}{N_D(x)} \right)^{3/4} + 1 \right]^{-2/3}. \quad (8)$$

式 (7) 和 (8) 中的 $N_D(x)$ 为发射区施主杂质的分布剖面, 今设为高斯分布

$$N_D(x) = \frac{N_{D0}}{\sqrt{\pi D_t}} \exp[-x^2/4D_t] = N_{Ds} \exp[-Ax^2]. \quad (9)$$

后面的计算中将 N_{Ds} 作为表面杂质浓度, 并取磷为杂质, 扩散温度 835°C 、时间 30 分钟. 这样, 给定 N_{Ds} , 根据高斯分布(式 (9)) 可计算禁带收缩(式 (8)), 再将 ΔE_g 提供给式(7) 以计算 $N_{D,eff}$, 但从 (1) 到 (7) 式可知, 求 Φ 与 $N_{D,eff}$ 是个自洽问题.

J. D. Alamo 推得 PP^+ 高低结界面有效复合速度^[1]

$$S_c = \frac{N_A D_n^+}{N_A^+ L_n^+} \cdot \frac{S_n L_n^+ / D_n^+ + \text{th}(W_p^+ / L_n^+)}{1 + (S_n L_n^+ / D_n^+) \cdot \text{th}(W_p^+ / L_n^+)}. \quad (10)$$

A. Rohatgi 将 S_c 视作体内任意相邻两区域的“界面”复合速度, 称为内部复合速度, 并计入重掺杂引起的能隙收缩 ΔE_g , 得到

$$S_E(x_{j+1}) = \frac{N_D(x_{j+1}) \cdot D_p(x_j)}{N_D(x_j) L_p(x_j)} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_g(x_j) - \Delta E_g(x_{j+1})}{kT}\right) \times \left[\frac{S_E(x_j) L_p(x_j) / D_p(x_j) + \text{th}(\Delta x / L_p(x_j))}{1 + (S_E(x_j) L_p(x_j) / D_p(x_j)) \text{th}(\Delta x / L_p(x_j))} \right]. \quad (11)$$

这里 $j = 0, 1, 2, \dots, M$, M 是发射区被划分的层数, Δx 是层间距. 根据式 (11), 可以从发射区表面开始, 迭代计算 $x = 0$ 至 $x = W_E$ 之间任意层上的内部复合速度.

因为重掺杂时有效电离杂质浓度由式 (7) 表示, 我们认为要用式(7)取代式(10)的 N_A, N_A^+ , 得

$$S_E(x_j + 1) = \frac{N_D(x_j + 1) D_p(x_j)}{N_D(x_j) L_p(x_j)} \cdot \exp\left[\frac{\Delta E_g(x_j) - \Delta E_g(x_j + 1)}{kT}\right] \times \frac{\exp[\xi(x_j + 1)] \Phi_{\frac{1}{2}}[\xi(x_j)]}{\exp[\xi(x_j)] \Phi_{\frac{1}{2}}[\xi(x_j + 1)]} \cdot \left[\frac{S_E(x_j) L_p(x_j) / D_p(x_j) + \text{th}(\Delta x / L_p(x_j))}{1 + [S_E(x_j) L_p(x_j) / D_p(x_j)] \text{th}(\Delta x / L_p(x_j))} \right]. \quad (12)$$

式中 $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$. 扩散系数 $D_p = \frac{12.5}{1 + \left[\frac{N_D(x)}{10^{17}} \right]^{0.6}} + 1$ ^[5]; 发射区中少子寿命

$\tau_p = \left[\frac{1}{\tau_K} + \frac{1}{\tau_A} \right]^{-1}$, 其中 $\tau_K = \frac{\tau_0}{1 + N_D(x)/7 \times 10^{15}}$, τ_0 与硅材料质量有关, 高质量材料 τ_0 取 200—400 μs , τ_A 为 Auger 复合寿命, $\tau_A = \frac{1}{(2.8 \times 10^{-31})N_D^2(x)}$.

发射区反向饱和电流密度 J_{oc} 为

$$J_{oc} = [qn_{i0}^2/N_D(x_i)]S_E(x_i)|_{x_j=w_E}, \tag{13}$$

式中 n_{i0} 为不考虑重掺杂效应时的本征载流子浓度.

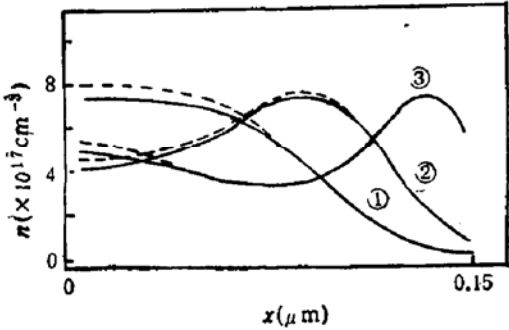


图 1 不同表面掺杂浓度下电子浓度分布
 N_{Ds} : (cm^{-3}) ① 8×10^{18} ② 2×10^{19}
 ③ 2×10^{21}

实线 $N_f = 0$; 虚线 $N_f = 1 \times 10^{19}(cm^{-3})$

三、数值计算结果及结论

数值计算的若干结果示如图 1、2、3.

可见: ①表面掺杂浓度很高时, 杂质不能充分电离, 形成多子浓度的倒向分布, 电池表面区域出现衰退场; 内部复合速度主要由体内复合机制决定, 保持了很高的数值, 成为暗电流的主要贡献者. ②表面掺杂浓度降至适当低值时, 表面复合对内部复合速度的影响上升. 只有这时钝化发射区表面才能较有效地降低内部复合速度, 从而减小暗电流. ③电池前表面引入固定正电荷可以在一定程度上抑制重掺杂引起的表面电势的下降, 改善衰退场, 减小暗电流.

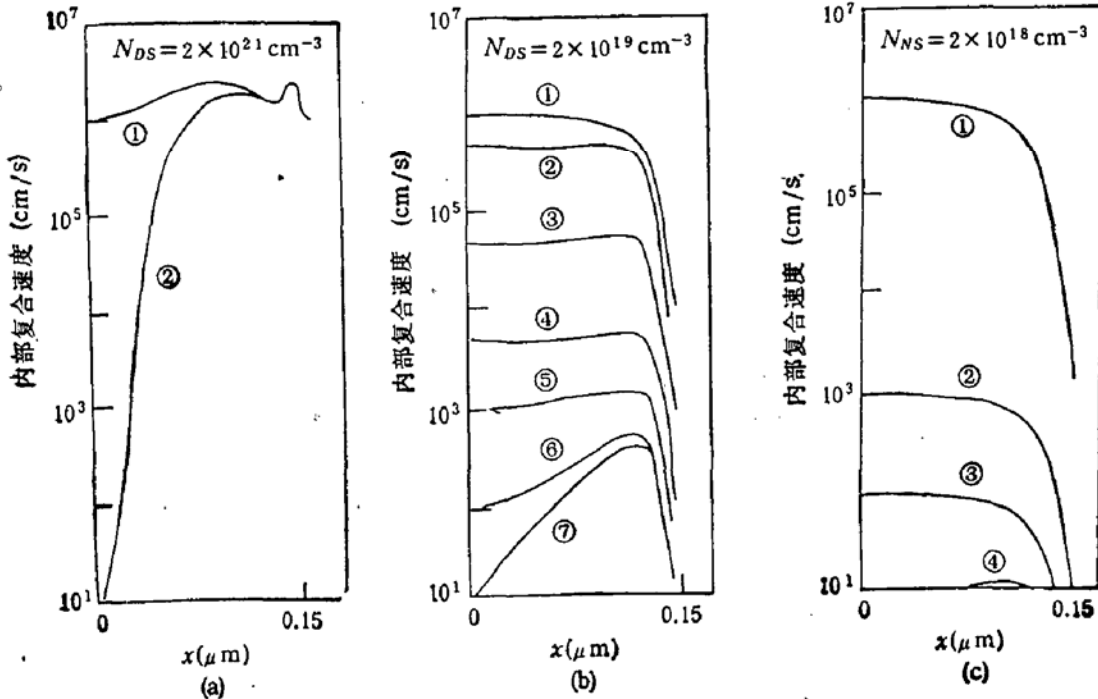


图 2 表面复合速度对内部复合速度的影响

S 值 (cm/s): (a) ① 1×10^6 ② 10 ; (b) ① 1×10^6 ② 5×10^5 ③ 5×10^4 ④ 5×10^3
 ⑤ 1×10^2 ⑥ 1×10^1 ⑦ 10 ; (c) ① 1×10^6 ② 1×10^5 ③ 1×10^4 ④ 10

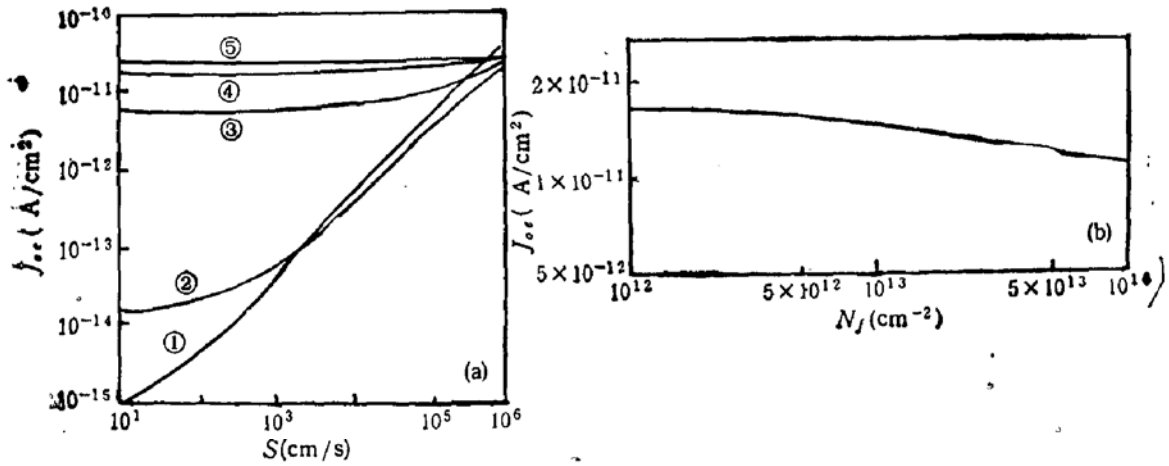


图3 (a) 表面复合速度对反向饱和电流的影响
 N_{DS} : (cm^{-3}) ① 2×10^{18} ② 2×10^{19} ③ 3×10^{20} ④ 8×10^{20} ⑤ 2×10^{21}
 (b) 表面固定正电荷对反向饱和电流的影响
 N_{DS} : $2 \times 10^{19}(\text{cm}^{-3})$; $S = 1 \times 10^6 \text{cm/s}$

参 考 文 献

- [1] A. Rohatgi & P. Rai-Choudhury, *IEEE Trans.*, ED-31, 596 (1984).
 [2] J. D. Alamo, et al., *Solid State Electron.*, 24, 533(1981).
 [3] E. De Castro, et al., *IEEE Trans.*, ED-31, 785(1984).
 [4] J.S. Park, et al., *IEEE Trans.*, ED-33, 240(1986).

Analysis of Recombination in Emitter of Silicon Solar Cells

Qiu Sichou Zuo Lei and Qiu Muqin

(Department of Solid State Electronic, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074)

Abstract

The effects of surface dopant density and surface recombination on internal recombination velocity and dark current in emitter are studied for heavily doped emitter and a Gaussian doping profile.