

a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池设计分析*

林鸿生 段开敏 马雷

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘要: 通过应用 Scharfetter-Gummel 解法数值求解 Poisson 方程, 对热平衡态 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池进行计算机数值模拟, 详细分析不同制备条件下 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池的能带结构和电池中电场强度分布, 指出采用更薄 p⁺ (a-SiC : H) 薄膜和在 pn 异质结嵌入 i(a-Si : H) 缓冲薄层设计能有效增强光生载流子的传输与收集, 从而提高 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池的性能, 而高强度光照射下模拟计算表明, a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池具有较高光稳定性.

关键词: 异质结太阳能电池; Newton-Raphson 解法; a-SiC : H 阶梯密度分布; 载流子收集

PACC: 8630J; 0260; 7125M

中图分类号: TM 914.42

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)05-0492-07

阳能电池中具有巨大的潜力.

在 160℃ 下通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术^[3] 把 a-SiC : H 薄膜直接沉积于 n 型单晶硅 n(c-Si) 本底材料上而形成 p⁺ (a-SiC : H) / n (c-Si) 异质结, 获得了 8.6% 电池能量转换效率, 但若嵌入有器件质量的 i(a-Si : H) 缓冲薄层, 即采用所谓 HIT 技术(heterojunction with inserted intrinsic thin-layer), 电池的能量转换效率将提高到 12.6%^[3], 这被笼统归结为所嵌入的缓冲薄层钝化非晶(薄膜)-晶态硅异质结, 改善结特性的缘故^[1~3], 而非晶(薄膜)-晶态硅异质结制造中普遍应用极薄 (~ 5nm) 非晶薄膜设计的原因, 迄今在文献上未见过适当的解释与说明. 本文将应用计算机数值模拟方法来分析嵌入 i(a-Si : H) 薄层提高 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池性能的物理原因, 阐释电池中极薄 p⁺ (a-SiC : H) 薄膜设计, 并讨论其稳定性.

2 物理模型

图 1 是 p⁺ (a-SiC : H) / i(a-Si : H) / n(c-Si) 异质结太阳能电池结构简图. a-SiC : H 薄膜中加入的

1 引言

近年来, 非晶(薄膜)-晶态硅异质结, 诸如 a-Si/c-Si, μc-Si/c-Si 和 a-SiC/c-Si 等结构太阳能电池得到人们愈来愈浓厚的兴趣^[1~3], 原因是晶态硅半导体太阳能电池能量转换效率虽高达 24%, 但造价昂贵, 而 a-Si : H 基太阳能电池虽然能大面积生产, 造价又低廉, 可是内在的 Staebler-Wronski 效应使其稳定性变差. 非晶(薄膜)-晶态硅异质结结构是综合两者优点充分发挥各自长处的最佳设计, 而且这种结构电池能在较低温度下 (< 250℃) 制造, 从而避免采用传统的高温 (> 900℃) 扩散工艺来获得 p-n 结. 这样不但节约能源, 而且低温环境使得 a-Si : H 基薄膜掺杂、禁带宽度、厚度得以较精确控制, 为优化器件特性提供机会. 低温沉积过程中单晶硅片弯曲, 变形小, 因而其厚度可取作为本底光吸收材料光学所要求的最低值, 约 80μm, 改善少数载流子扩散长度与电池总厚度比值, 从而允许采用“低品质”c-Si 以及 poly-Si^[1]. 因此非晶(薄膜)-晶态硅异质结在制造大面积、高效率、低价格、稳定性好的半导体太

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69876024)

林鸿生 男, 1939 年出生, 教授, 目前主要从事半导体太阳能电池等器件模拟和特性研究.

马雷 男, 1977 年出生, 研究生, 现在美国 University of North-Carolina 攻读博士学位.

2001-07-12 收到, 2001-11-23 定稿

C 增加了晶格无序度而使其带尾态宽度展宽^[4]和隙态密度增大(约比 a-Si : H 大 2 个数量级^[5]), 用图 2 的 “U”型分布模型^[6,7]来概括 a-SiC : H 和 a-Si : H 隙态密度分布, 即从导带边 E_C 伸入带隙的类受主 Urbach 带尾态为 $N(E) = G_{do} \exp(-E/E_d)$, 和价带边 E_V 伸入带隙的类施主 Urbach 带尾态 $N(E) = G_{ao} \exp(-E/E_a)$, 能量 E 起始点分别从导带底和价带顶算起, 伸入禁带为正, 禁带中部是常数隙态密度 G_{mg} , 其能量范围从 E_{L0} 到 $E = E_{UP} - E_{L0}$ ^[6,7], E_{da} 是类受主态和类施主态转换能量.

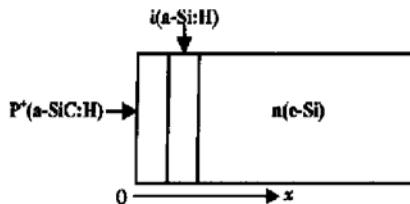


图 1 p^+ (a-SiC : H)/i(a-Si : H)/n(c-Si) 异质结太阳能电池结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of p^+ (a-SiC : H)/i(a-Si : H)/n(c-Si) solar cell

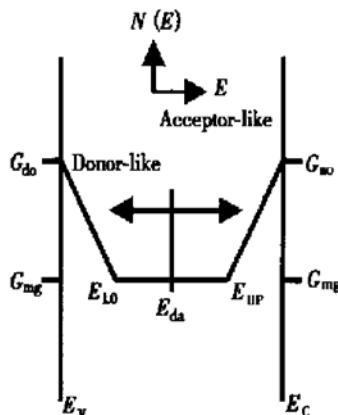


图 2 “U”型隙态密度分布

Fig. 2 U-shaped distribution of gap states

下列 Poisson 方程描述 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池热平衡态性质:

$$\epsilon(x) \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = \rho(x) \quad (1)$$

式中 $\Psi(x)$ 称局部真空能级, 它的数值与电子静电势相同, 但符号相反, 其单位为 eV^[6,7]; $\epsilon(x)$ 是材料介电常数. 于是电池中电场强度 $F(x)$ 由下式得出:

$$F(x) = \frac{d\Psi(x)}{dx}$$

方程(1)右边空间电荷密度 $\rho(x)$ 表示为:

$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + N_D^+(\text{net})(x) + p_i(x) - n_i(x)] \quad (2)$$

其中 $p(x)$ 是价带中空穴浓度; $n(x)$ 是导带中电子浓度; $N_D^+(\text{net})(x)$ 是净有效荷正电分立局域态浓度, $p_i(x)$ 是连续局域态上俘获的空穴浓度; $n_i(x)$ 是连续局域态上俘获的电子浓度.

表 1 列出了 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池模拟计算中使用的典型物理参数^[3~7]. a-SiC : H 的 $E_g = 1.98\text{eV}$, 电子亲和能 $X_e = 3.83\text{eV}$, 介电常数 $\epsilon = 9.7$, a-Si : H 的 $E_g = 1.72\text{eV}$, $X_e = 4.0\text{eV}$, $\epsilon = 11.7$, 而 c-Si 的 $E_g = 1.12\text{eV}$, $X_e = 4.05\text{eV}$, $\epsilon = 11.9$. 模拟计算中 $T = 300\text{K}$, 器件总长度为 L , $L = 4.0\mu\text{m}$. Φ_{b0} 是 $x = 0$ 处势垒高度, Φ_{bL} 是 $x = L$ 处势垒高度, $\Phi_{b0} = 1.52\text{eV}$, $\Phi_{bL} = 0.23\text{eV}$. 方程(1)的边界条件是:

$$\begin{cases} \Psi(0) = \Phi_{b0} - \Phi_{bL} \\ \Psi(L) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

把器件进行 800 等分的网格划分, 通过差分法把方程(1)转化成一组差分方程组, 由 Newton-Raphson 解法求解差分方程组^[6,7], 得出器件网格点上电子局部真空能级 Ψ 的精确数值解, 从而计算出相应的能带图, 电场强度和空间电荷浓度分布等^[6,7]. 显然, 只要选择恰当的器件物理参数, 方程(1)和(3)的求解是没有任何先决条件的.

表 1 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池模拟计算使用的典型物理参数

Table 1 Typical physics parameters used as input for computer simulation in a-SiC/c-Si heterojunction solar cells

参数	$p(\text{a-SiC : H})$	$i(\text{a-Si : H})$	$n(\text{c-Si})$
$L/\mu\text{m}$	0.05	0.03	3.92
N_D/cm^{-3}			4×10^{15}
N_A/cm^{-3}	5×10^{17}		
N_c/cm^{-3}	2.04×10^{19}	2×10^{19}	2.8×10^{19}
N_v/cm^{-3}	3.3×10^{19}	2×10^{19}	1.09×10^{19}
$G_{do}/(\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1})$	7×10^{21}	7.222×10^{21}	
$G_{ao}/(\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1})$	7×10^{21}	7.222×10^{21}	
E_d/eV	0.06	0.0433	
E_a/eV	0.04	0.027	
$G_{mg}/(\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1})$	1×10^{17}	5×10^{15}	
E_{da}/eV	1.0	0.86	

a-Si : H 太阳能电池在光照射下性能出现衰退影响了它的应用. 我们在文献[8]的实验结果中支持了空间电荷效应是 a-Si : H 太阳能电池光诱导性能衰退的主要物理机制^[9], 继而应用数值模拟方法^[7]

进一步论证并得出结论, 在光照射下 a-Si:H 太阳能电池光生空穴俘获产生的带正电缺陷使电池内部有了净正空间电荷, 从而把高电场调制到 p/i 界面, 而使 i/n 界面附近电场强度下降以至出现小于 $1 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 准中性区(低场“死层”), 低场“死层”降低 a-Si:H 太阳能电池对光生载流子收集, 使电池性能随着光照射而衰退。本文继续应用计算机数值模拟方法分析 a-SiC/c-Si 异质结结构太阳能电池的稳定性, 用 N^+ 来表示在光照射下 a-Si:H(和 a-SiC:H) 中由于空穴俘获正空间电荷密度的增加量, 取 $N^+ = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ^[7, 8, 10], 于是被光照射过的 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池空间电荷效应也应用方程(1) 来模拟, 但此时空间电荷密度 $\rho(x)$ 应取以下形式:

$$\rho(x) = q[N^+ + p(x) - n(x) + N_D^+(\text{net})(x) + p_i(x) - n_i(x)]$$

c-Si 没有 Stebler-Wronski 效应, $N^+ = 0$.

3 结果与讨论

3.1 p⁺(a-SiC:H)/n(c-Si) 异质结中 a-SiC:H 膜厚设计

图 3 是理论计算的 p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池能带图(取电池 0~0.2 μm 区域)。异质结位于 0.08 μm 处, 能带不连续, 价带顶有跳变, 而且在靠近表面($x=0$) 区域能带向下弯曲。

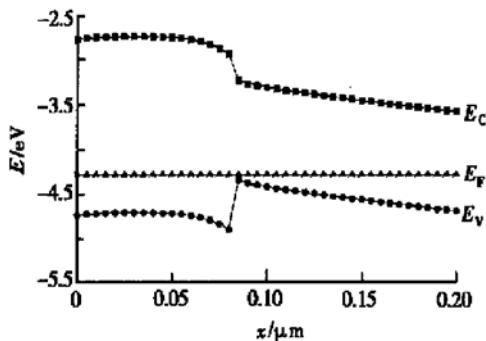


图 3 p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池能带图(取电池 0~0.2 μm 区域)

Fig. 3 Band diagram of p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si) heterojunction solar cell($x=0\sim 0.2 \mu\text{m}$)

图 4 中的曲线 a 是 p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si) 异质结的电场强度分布(取电池 0~0.2 μm 区域)。 $x=0.08 \mu\text{m}$ 交界面上电场强度最大, 为 $1.39 \times$

10^5 V/cm , 保证了对势垒区光生载流子的抽取, 势垒区主要延伸于 c-Si 上, 单晶硅中载流子扩散长度有几百微米, 载流子传输可以主要因扩散运动而进行, 电场的存在并不重要, 但 a-SiC:H 等非晶薄膜缺陷密度高, 载流子扩散长度极短($< 0.1 \mu\text{m}$), 膜内光生载流子要依靠其膜内高电场($\geq 1 \times 10^4 \text{ V/cm}$) 驱使才被电极所收集而形成光生电流, 有关非晶薄膜内电场强度分析对于其太阳能电池应用至关重要, 这也是我们工作的出发点。但从图 4 中曲线 a 看到, p⁺(a-SiC:H) 膜内 $0.035\sim 0.045 \mu\text{m}$ 区域有小于 $1 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 的准中性区(低场“死层”)。如 $x=0.035, 0.045 \mu\text{m}$, 强度分别为 $1.99 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 和 $8.29 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 。低场区的出现不利于光生载流子传输与收集, 但若把 p⁺(a-SiC:H) 膜厚减薄至 $0.04 \mu\text{m}$, 则如图 4 中曲线 b 所示, 膜内低场区几乎消失, 仅在 $x=0.01 \mu\text{m}$ 处, 强度为 $2.59 \times 10^3 \text{ V/cm}$, 因此, p⁺(a-SiC:H) 膜越薄, 光生载流子的传输与收集就越容易。

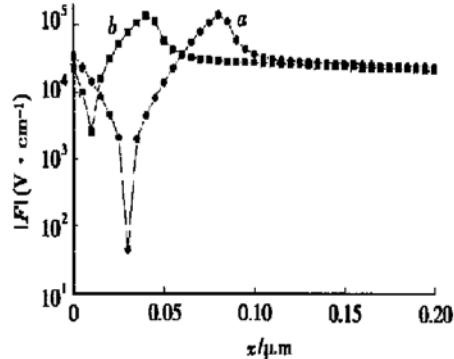


图 4 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池电场强度分布(取电池 0~0.2 μm 区域) a: p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si); b: p⁺(a-SiC:H) 0.04 μm/n(c-Si)

Fig. 4 Electric field profiles in a-SiC/c-Si heterojunction solar cell ($x=0\sim 0.2 \mu\text{m}$) a: p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si); b: p⁺(a-SiC:H) 0.04 μm/n(c-Si)

特别值得注意的是, 如图 4 所示, 在靠近表面($x=0$) 区域内存在反电场, 如 p⁺(a-SiC:H) 0.08 μm/n(c-Si) 异质结, $x=0, 0.01, 0.03 \mu\text{m}$, 电场强度分别为 $+3.43 \times 10^4, +1.44 \times 10^4, +4.52 \times 10^3 \text{ V/cm}$, 反电场区域($0\sim 0.03 \mu\text{m}$) 是膜厚的 $3/8$, 而 p⁺(a-SiC:H) 0.04 μm/n(c-Si) 异质结, $x=0, 0.005 \mu\text{m}$, 反电场强度 $+2.33 \times 10^4, +1.02 \times 10^3$, 反电场强度数值减少, 区域范围也减小为 $0\sim$

0.005μm, 仅是膜厚的 1/8. 反电场区域的能带向下弯曲, 如图 3. 反电场将阻挡电极对光生空穴的收集, 但如刚才所揭示的, p^+ (a-SiC : H) 膜愈薄, 不仅膜内小于 1×10^4 V/cm 的低场区愈窄, 强度愈大, 而且反电场区域宽度和强度也愈小, p^+ (a-SiC : H) 膜薄还使载流子扩散运动变得重要, 这样光生空穴在接近表面时除了高电场下漂移运动的惯性外还能借助扩散运动来冲破反电场到达收集电极, 这时由于光生载流子的有效收集, 增大了电池的短路电流, 而且厚度尽可能薄的 p^+ (a-SiC : H) 薄膜还能减少入射光及光生载流子在 p^+ (a-SiC : H) 层损失, 于是薄的 p^+ (a-SiC : H) 薄膜设计将能提高电池的能量转换效率, 如文献[3]实验制作 p^+ (a-SiC : H) 5nm/n(c-Si) 异质结太阳能电池, 获得了 8.6% 的能量转换效率. 不过太薄的 p^+ (a-SiC : H) 膜与 c-Si 所形成的是浅异质结, 受界面影响较大, 异质结特性不易做好.

3.2 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结中 a-SiC : H 薄膜的 p型杂质浓度选择

如果降低 p^+ (a-SiC : H) 薄膜掺杂, 取 $N_A = 1 \times 10^{17}$ cm⁻³, 计算的 p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池能带如图 5 所示(取电池 0~0.2μm 区域). 异质结位于 0.08μm 处, 能带不连续, 价带顶有跳变, 在靠近表面($x = 0$) 区域能带不是向下而是向上弯曲.

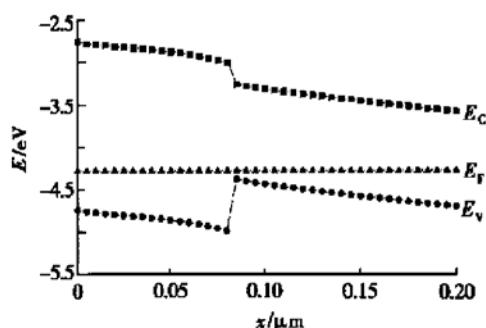


图 5 p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池能带图(取电池 0~0.2μm 区域) 其中 p^+ (a-SiC : H) 薄膜掺杂 $N_A = 1 \times 10^{17}$ cm⁻³

Fig. 5 Band diagram of p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) heterojunction solar cell ($x = 0 \sim 0.2\mu\text{m}$) $N_A = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ in p^+ (a-SiC : H) film

图 6 中曲线 a 是 p^+ (a-SiC : H) 薄膜掺杂为 N_A

$= 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的 p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) 异质结的电场强度分布(取电池 0~0.2μm 区域), 曲线 b 是 p^+ (a-SiC : H) 薄膜中 $N_A = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 掺杂的 p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) 异质结的电场强度分布. $x = 0.08\mu\text{m}$ 交界面上, 两种电池电场强度都最大, 但 $N_A = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 掺杂的强度减弱为 5.97×10^4 V/cm. 有意思的是, 这时靠近表面的反电场区域消失(在靠近表面($x = 0$) 区域, 能带向上弯曲, 见图 5), 而且电池的大部分非晶薄膜中电场强度变大, 最小值是 $x = 0.025\mu\text{m}$ 强度为 1.93×10^4 V/cm, 没有小于 1×10^4 V/cm 的低场区, 所以, 降低 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结太阳能电池中 p^+ (a-SiC : H) 薄膜 p型掺杂有利于光生载流子传输与收集. 但为了增加电池内电势和减小串联电阻, a-SiC : H 薄膜掺杂浓度要适当调高, 伴随高掺杂出现的小于 1×10^4 V/cm 低场区和靠近表面反电场区域, 如上面所分析, 随着 p^+ (a-SiC : H) 膜厚进一步减薄, 对光生载流子传输与收集的影响愈来愈不重要, 所以 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池设计中都选择薄的重掺杂 p^+ (a-SiC : H) 薄膜.

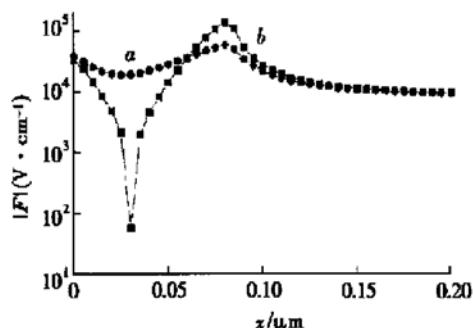


图 6 p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池电场强度分布(取电池 0~0.2μm 区域) a: p^+ (a-SiC : H) 中 $N_A = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, b: p^+ (a-SiC : H) 中 $N_A = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$

Fig. 6 Electric field profiles in p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si) heterojunction solar cell ($x = 0 \sim 0.2\mu\text{m}$) a: $N_A = 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ and b: $N_A = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ in p^+ (a-SiC : H) film, respectively

3.3 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结中嵌入 i(a-Si : H) 缓冲薄层的作用

现在把 p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/n(c-Si) 异质结嵌入 0.03μm i(a-Si : H) 薄膜设计成 HIT 结构

—— p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池, 其能带图(取电池 0~0.2μm 区域)如图 7 所示, p^+ (a-SiC : H)/i(a-Si : H) 异质结位于 0.05μm 处, i(a-Si : H)/n(c-Si) 异质结于 0.08μm 处, 能带不连续, 价带顶有跳变, 在靠近表面($x=0$)区域能带向下弯曲。

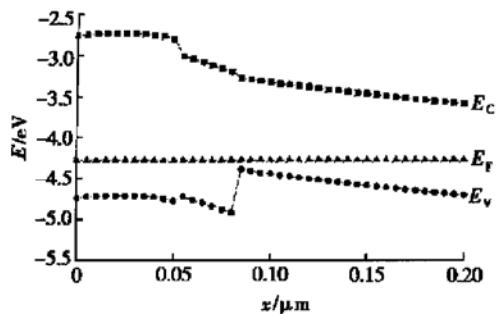


图 7 p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池能带图(取电池 0~0.2μm 区域)

Fig. 7 Band diagram of p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si) heterojunction solar cell ($x=0\sim0.2\mu m$)

计算 p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si) 异质结太阳能电池电场强度分布, 如图 8 中曲线 a 所示(取 0~0.2μm 电池区域)。这时沉积在 c-Si 上非晶薄膜总厚度即 p^+ (a-SiC : H) 和 i(a-Si : H) 厚度之和是 0.08μm, 图 8 中曲线 b 是把 0.08μm 厚的 p^+ (a-SiC : H) 与 n(c-Si) 形成的异质结电场强度分布。比较它们的电场强度分布, 发现嵌入 0.03μm i(a-Si : H) 薄膜后异质结非晶薄膜中最大电场强度由 $x=0.08\mu m$ 向表面移动到 $x=0.055\mu m$ 处, 强度减小为 $7.78\times10^4 V/cm$, 但电池的非晶薄膜中大于 $1\times10^4 V/cm$ 高场区域则由 $0.05\sim0.08\mu m$ 扩大到 $0.03\sim0.08\mu m$, 大部分高场区的强度也都增高, 见图 8。与此同时, 其小于 $1\times10^4 V/cm$ 的低场区也移向表面, 区域宽度由 $0.035\sim0.045\mu m$ 减小为 $0.025\sim0.03\mu m$, 电场强度则增大, 未嵌入 a-Si : H 薄层时, 最低是 $x=0.035\mu m$, 强度 $1.99\times10^3 V/cm$, 嵌入 a-Si : H 薄层后, 最低是 $x=0.025\mu m$, 强度为 $3.62\times10^3 V/cm$; 而反电场区域宽度从未嵌入 a-Si : H 薄层的 0~0.03μm 缩为 0~0.02μm, 电场强度也减弱, 如表面 $x=0$ 处, 从 3.43×10^4 减小到 $3.34\times10^4 V/cm$, 所以嵌入的 a-Si : H

缓冲薄层虽然增加电池的串联电阻损失, 但它带来的双异质结对电场调制的结果却与上述减薄 a-SiC : H 膜厚的一样, 起到了增强光生载流子有效收集和增大电池短路电流的作用。而且嵌入的 i(a-Si : H) 薄层不但缓解上述浅异质结制造的困难, 还把重掺杂 p^+ (a-SiC : H) 的高隙态密度对异质结面附近载流子复合的影响隔开来, 钝化 a-SiC/c-Si 异质结, 改善电池的光生伏特效应。应用 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结嵌入 i(a-Si : H) 缓冲薄层设计, 与未嵌入 a-Si : H 薄层相比, 反向暗电流减少 2 个数量级, 电池短路电流增大达 $29mA/cm^2$, 电池能量转换率从 8.6% 提高到 12.6%^[3]。

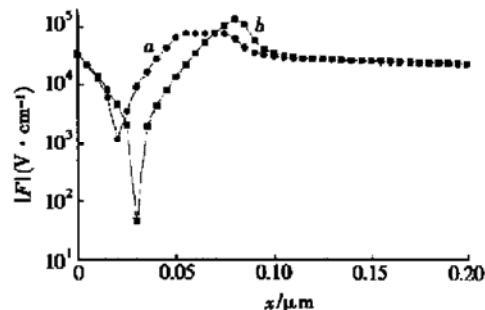


图 8 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池电场强度分布(取电池 0~0.2μm 区域) a: p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si); b: p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si)

Fig. 8 Electric field profiles in a-SiC/c-Si heterojunction solar cell ($x=0\sim0.2\mu m$) a: p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si); b: p^+ (a-SiC : H) 0.08μm/n(c-Si)

3.4 a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池的稳定性

重画 p^+ (a-SiC : H) 0.05μm/i(a-Si : H) 0.03μm/n(c-Si) 异质结电场强度, 如图 9 中曲线 a。在高强度光照射下($N^+=5\times10^{16} cm^{-3}$), 如前所述, 计算该异质结太阳能电池的电场强度分布, 如图 9 中曲线 b 所示。图 9 中曲线 a 与 b 相差无几, 只是光照射使小于 $1\times10^4 V/cm$ 的低场区强度稍变大; 反电场强度稍减弱, 即光照射反能稍增强非晶薄膜中光生载流子的传输和收集, 而光照射又不引起 c-Si 中光生载流子输运的改变, 所以没有发生电池性能因光辐射而退化, a-SiC/c-Si 异质结结构太阳能电池具有较高的光稳定性。

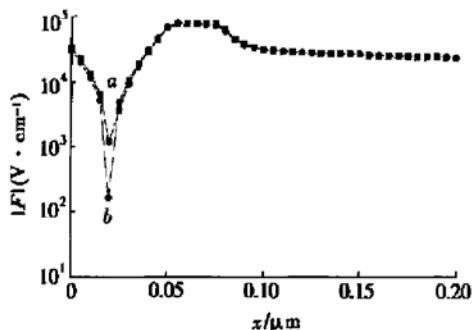


图 9 p^+ (a-SiC : H) $0.05\mu\text{m}/i$ (a-Si : H) $0.03\mu\text{m}/n$ (c-Si) 异质结太阳能电池光辐照前后电场强度分布(取电池 $0 \sim 0.2\mu\text{m}$ 区域) a: 光辐照前; b: 光辐照后

Fig. 9 Electric field profiles in p^+ (a-SiC : H) $0.05\mu\text{m}/i$ (a-Si : H) $0.03\mu\text{m}/n$ (c-Si) heterojunction solar cell ($x = 0 \sim 0.2\mu\text{m}$) before curve a and after curve b prolonged light soaking, respectively

4 小结

以上我们应用数值方法对两种结构非晶(薄膜)-晶态硅异质结太阳能电池—— p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 和嵌入本征(a-Si : H)缓冲层 p^+ (a-SiC : H)/i(a-Si : H)/n(c-Si) 中的电场强度分布和能带图进行分析和研究, 现在总结如下:

(1) 减薄 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结的 p^+ (a-SiC : H) 薄膜厚度, 能使非晶薄膜中高场区域扩大强度增大, 而小于 $1 \times 10^4\text{V}/\text{cm}$ 准中性区(低场“死层”的强度也增大, 范围却缩小以至消失; 同时靠近表面的反电场区域的宽度及强度都减小, 这些都将增强电池中光生载流子的传输与收集, 提高太阳能电池的性能。这个模拟计算也解释了非晶(薄膜)-晶态硅异质结太阳能电池制造中为什么采用极薄非晶薄膜设计。

(2) 降低 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结中 p^+ (a-SiC : H) 薄膜的 p型掺杂, 能使靠近表面的反电场区域消失, 非晶薄膜中不出现小于 $1 \times 10^4\text{V}/\text{cm}$ 低场区, 有利于电池光生载流子收集。但重掺杂的 p^+ (a-SiC : H) 薄膜能增加电池内电势和减少串联电阻, 而有效增强光生载流子收集, 如(1)所述, 可依靠减薄 p^+ (a-SiC : H) 薄膜厚度来实现, 所以 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结太阳能电池制造中采用极薄重掺杂 p^+ (a-SiC : H) 薄膜设计;

(3) 在 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结中嵌入 i(a-Si : H) 设计成 HIT 结构—— p^+ (a-SiC : H)/i(a-Si : H)/n(c-Si)

(a-Si : H)/n(c-Si) 异质结太阳能电池, 比较非晶薄膜总厚度相等的这两种结构电池模拟计算发现, 嵌入本征(a-Si : H)薄膜带来的电场调制效果与在 p^+ (a-SiC : H)/n(c-Si) 异质结中减薄 p^+ (a-SiC : H) 薄膜厚度的结果类同, 同样将起到增强电池中光生载流子的有效收集和增大电池短路电流的作用;

(4) 高强度光照射下模拟计算表明, 光照前后 p^+ (a-SiC : H)/i(a-Si : H)/n(c-Si) 异质结太阳能电池的电场强度分布变化无几, 因而光照射不影响电池中光生载流子的传输与收集, 不会发生电池性能因光照而衰退, a-SiC/c-Si 异质结太阳能电池具有较高的光稳定性。

参考文献

- [1] Boregert D, Grabosch G, Fahrner W R. Preparation of (n) a-Si : H/(p) c-Si heterojunction solar cells. Sol Energy Mater and Sol Cells, 1997, 49: 53
- [2] Van Cleef M W M, Rath J K, Rubinelli F A, et al. Performance of heterojunction p^+ microcrystalline silicon n crystalline silicon solar cells. J Appl Phys, 1997, 82: 6089
- [3] Pallares J, Schropp R E I. Role of the buffer layer in the active junction in amorphous-crystalline silicon heterojunction solar cells. J Appl Phys, 2000, 88(1): 293
- [4] Nebel C E, Street R A. Hall experiments and interpretation in a-Si : H, a-SiC : H. J Non-Cryst Solids, 1993, 164/166: 449
- [5] Xu X, Okumura A, Morimoto A, et al. Thermally induced metastable defects in hydrogenated amorphous silicon and silicon-carbon alloy films. Phys Rev B, 1988, 38: 8371
- [6] McElheny P J, Arch J K, Lin Hongsheng, et al. Range of validity of the surface-photovoltage diffusion length measurement: a computer simulation. J Appl Phys, 1988, 64(3): 1254
- [7] Lin Hongsheng. The space charge effects in hydrogenated amorphous silicon a-Si : H solar cells—a computer simulation for light-induced performance degradation. Acta Energiae Solaris Sinica, 1994, 15(2): 167(in Chinese) [林鸿生. PIN型非晶硅太阳能电池中的空间电荷效应—太阳能电池光致性能衰退的计算机模拟. 太阳能学报, 1994, 15(2): 167]
- [8] Hegedus S, Lin Hongsheng, Moore A. Light-induced degradation in undoped hydrogenated amorphous silicon films studied by the surface photovoltage: a comparison of lifetime versus space-charge effects. J Appl Phys, 1988, 64(3): 12125
- [9] Carlson D E. Solar cells. In: Semiconductors and Semimetals, edited by Pankove J I, Part D. Florida: Academic Press Inc, 1984: 25
- [10] Moore A, Lin Hongsheng. Improvement in the surface photovoltage method of determining diffusion length in thin films of hydrogenated amorphous silicon. J Appl Phys, 1987, 61(10): 4816

Analysis of Design for a-SiC/c-Si Heterojunction Solar Cells^{*}

Lin Hongsheng, Duan Kaimin and Ma Lei

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A computer simulation model of a-SiC/c-Si heterojunction solar cells at thermodynamic equilibrium using a Scharfetter-Gummel solution of Poissons equation is developed. The energy band structure and distribution of electric field in a-SiC/c-Si heterojunction are analyzed in detail. From results, the collection and transport of photo-generated carriers are increased effectively due to the designs of thinner p⁺ (a-SiC : H) layer and the insertion of an i(a-Si : H) buffer thin layer into the heterojunction. Such a design also improves the performances of a-SiC/c-Si heterojunction solar cells. In case of prolonged light soaking, the simulation shows that a-SiC/c-Si heterojunction structure solar cell possesses high light stability.

Key words: heterojunction solar cell; Newton-Raphson solution technique; density of states in a-SiC : H; carrier collection
PACC: 8630J; 0260; 7125M

Article ID: 0253-4177(2002)05-0492-07

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69876024)

Lin Hongsheng male, was born in 1939, professor. His current research interests focus on simulation and characteristics of semiconductor solar cell.

Ma Lei male, was born in 1977. Currently, he is a PhD candidate in University of North Carolina, U. S. A.