

非晶硅肖特基太阳电池的 $I-V$ 特性分析*

徐 乐

(南开大学物理系)

提 要

本文提出了一种在光照和短路条件下测量 $\text{Ni}/a\text{-Si:H}$ 肖特基结势垒宽度的方法. 同时,又在实验确定的参数的基础上,从理论上计算了在 $AM1$ 太阳光谱照射下 $\text{Ni}/a\text{-Si:H}$ 太阳电池的 $I-V$ 曲线. 由此得到的非晶硅少子扩散长度的数值与作者 1983 年用表面光电压法 (SPV) 测得的是一致的. 从计算结果出发,着重分析了影响填充因子的各种因素. 与实验对比可以得出结论: 被测太阳电池的填充因子小是串、并联电阻造成的,而不是扩散长度太短的缘故.

一、引 言

由于很多因素,如光吸收系数,光照下肖特基结的势垒宽度,非晶硅少子的扩散长度,串联电阻和并联电阻等都对光照下的非晶硅肖特基太阳电池的 $I-V$ 特性有影响,所以从理论上计算 $I-V$ 曲线是十分麻烦的,有关这方面的报道很少^[1-3]. 但是,通过理论计算一方面可以进一步了解各种因素所起作用的大小. 另一方面,太阳电池的填充因子 FF 可以反映出材料的少子扩散长度,从而可从另一途径检验我们用表面光电压法测出的扩散长度^[4]. 自从 1982 年 Catalano 等人^[5]报道用扩散长度达 $1\mu\text{m}$ 的材料做出效率为 12% 的非晶硅太阳电池后,人们普遍认为扩散长度的长短对太阳电池有较大影响. 但对扩散长度究竟起多大作用则尚不甚了解. 通过本文的计算则可以较好地了解扩散长度对太阳电池性能的影响.

计算 $AM1$ 太阳光谱照射下的 $I-V$ 曲线需要知道在该光强下太阳电池短路时的肖特基势垒宽度,然而对实验测定此量的方法报道极少. Moore^[6] 提出了一个结短路情况下空间电荷密度随光强变化的模型. 按照这个模型,在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下,由于空间电荷密度的增大将使势垒皱缩到只有几百埃宽. 但势垒如此之窄,令人难以置信,需要作进一步研究. 为此,本文提出了一种无需复杂设备即可测定这个参量的方法. 测试结果表明,结短路时,空间电荷密度随光强的变化并不很大,在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下,其数值较暗场

* 1984 年 4 月 16 日收到. 1985 年 5 月 20 日修改定稿.

(无光照)下的约增加 3 到 5 倍;势垒宽约为暗场下的一半,为 $0.2\mu\text{m}$ 左右,远比 Moore 模型给出的值大. 所得结果的合理性从 $I-V$ 特性的计算中得到证实. 这说明本文提出的测定方法是可取的.

二、计算方法

1. 理论模型

图 1 为非晶硅肖特基太阳电池的等效电路. 其电流密度 I 与电压 V 之间的关系可用式(1)表示,即

$$\left. \begin{aligned} I &= I_L(V) - I_d(V) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \\ I_d(V) &= I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\}. \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 I_0 , n , R_s 和 R_{sh} 分别为二极管的饱和电流密度,品质因子,串联电阻和并联电阻; T 为温度; k 为玻尔兹曼常数; $I_L(V)$ 为光生电流密度.

$I_L(V)$ 由两部份组成,一部份是势垒区内光生载流子在电场作用下形成的漂移电流;另一部份是势垒区外光生载流子扩散到势垒区边界形成的扩散电流;而以势垒区内的漂移电流为主. 由于势垒区宽度是势垒区两边电压的函数,所以非晶硅太阳电池的光生电流是电池两端电压的函数,这是非晶电池和单晶电池的主要区别,并从而导致非晶电池的填充因子较单晶的低,其大小还受材料的少子扩散长度的影响. 若忽略势垒区内的复合以及背面反射,则来自势垒区的光生电流密度 I_1 可表示为

$$I_1 = \int N_0(\lambda)(1 - R_0)q[1 - \exp(-\alpha(\lambda)W(V))]d\lambda, \quad (2)$$

式中 R_0 为光照面的反射系数; q 为电子电荷; λ 为波长; $\alpha(\lambda)$ 为光吸收系数,它是波长的函数; $W(V)$ 是光照下势垒区的宽度,它是电池两端电压 V 的函数; $N_0(\lambda)$ 是入射光中波长为 λ 的光的光子数. 来自势垒区外的光生电流密度 I_2 可由解扩散方程得到,若不考虑背面反射,则可表示为

$$\begin{aligned} I_2 &= \int N_0(\lambda)(1 - R_0)q \frac{\alpha(\lambda)L_p}{[(\alpha(\lambda)L_p)^2 - 1]} \\ &\times \left\{ \frac{\exp[-\alpha(\lambda)d] - \exp[-\alpha(\lambda)W(V)] \cosh\left(\frac{d - W(V)}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{d - W(V)}{L_p}\right)} \right. \\ &\left. + \alpha(\lambda)L_p \exp[-\alpha(W(V))] \right\} d\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 d 为非晶硅膜厚, L_p 为非晶硅少子扩散长度. 而

$$I_L(V) = I_1 + I_2. \quad (4)$$

光照下势垒宽度与电压的函数关系仍可表示为

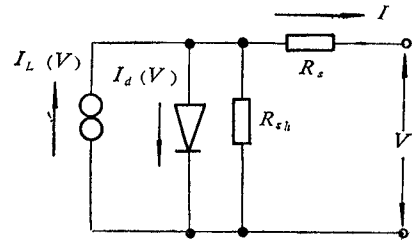


图 1 非晶硅肖特基太阳电池的等效电路

$$\left. \begin{aligned} W(V) &= W(0) \left(\frac{V_{bi} - V}{V_{bi}} \right)^{1/2}, \\ W(0) &= \left(\frac{2\epsilon\epsilon_s V_{bi}}{q\rho} \right)^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里 $W(0)$ 为光照下且电池短路 ($V = 0$) 时势垒区的宽度, 它是光强的函数; V_{bi} 为内建势; ρ 为光照下的空间电荷密度; ϵ 为真空电容率; ϵ_s 为非晶硅的介电常数, 一般取与单晶硅的值相同.

本文用数值积分法, 根据式(2)–(5) 计算了 $I_L(V)$. 然后, 又由式(1) 用函数求根法求出对应于不同电压的电流密度. 每 10mV 计算一个点. 最后得到 $I-V$ 曲线.

2. 光照和短路条件下势垒区宽度的测定和其它参数的实验选取

(1) $W(0)$ 的测定 图 2(a) 为测定光照和短路条件下势垒宽度的原理图. 信号

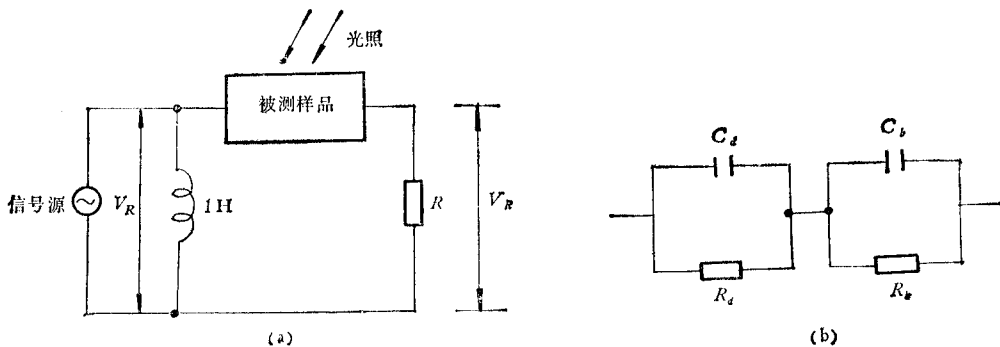


图 2

(a) 测光照下短路时势垒宽的原理图
(b) 非晶硅肖特基结的等效电路

源为 XD1 低频信号发生器; 接入的 1H 电感用作被测样品的直流短路; R 为取样电阻, 取值 7.5Ω ; V_R 和 V_S 用 9505E 型锁相放大器测量, 测量时取 $V_S < 15\text{mV}$.

图 3 为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的光照射下的 V_R/V_S-f 关系曲线, f 表示信号频率. 图中“ \times ”号为实验结果; 实线为采用下面将讨论的模型, 取 $W(0) = 0.23\mu\text{m}$ 时算得的理论结果.

图 2(b) 为被测肖特基结的等效电路^[7]; 图中 R_d , C_d 分别为结区电阻和电容; R_b 和 C_b 分别为体区的电阻和电容. R_d 可由光照下 $I-V$ 曲线在 $V = 0$ 那点的斜率求得.

$$\left. \begin{aligned} R_d &= dV/dI|_{V=0}, \\ C_d &= \epsilon\epsilon_s A/W(0), \\ R_b &= \frac{1}{\sigma_b} \frac{d - W(0)}{A}, \\ C_b &= \frac{\epsilon\epsilon_s A}{d - W(0)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 A 为结面积, σ_b 为光照下材料的光电导率.

按上述等效电路可推导出

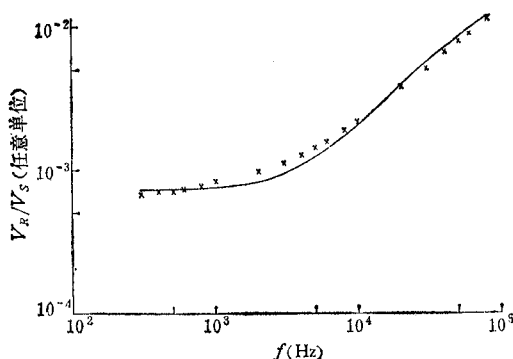


图3 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下 V_R/V_S-f 曲线
图中×为实验结果,实线为 $W(0) = 0.23\mu\text{m}$ 时的理论值

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{R_b}{1 + \omega^2 C_b^2 R_b^2} + \frac{R_d}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2} + R\right)^2 + \left(\frac{\omega C_b R_b^2}{1 + \omega^2 C_b^2 R_b^2} + \frac{\omega C_d R_d^2}{1 + \omega^2 C_d^2 R_d^2}\right)^2}}, \quad (7)$$

其中 ω 为信号角频率。如图3所示,当 $W(0) = 0.23\mu\text{m}$ 时,理论和实验曲线吻合良好。从而测定了 $W(0)$ 。

由于样品的离散性,在计算 $I-V$ 曲线时, $W(0)$ 取了 $0.14, 0.23, 0.30\mu\text{m}$ 三种值。

(2) $N_0(\lambda)$ 的选取 $N_0(\lambda)$ 可从 AM1 光谱计算得到^[8]。

(3) $\alpha(\lambda)$ 的测定 光吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 的实验值是用测量透射率和反射率的方法得到的^[7]。这个实验结果可用下列经验公式表示^[2]

$$\sqrt{\alpha(\lambda)h\nu} = B(h\nu - E_g), \quad (8)$$

式中 B 为比例常数, E_g 为光学禁带宽度, h 为普郎克常数, ν 为光频率。 B 和 E_g 均可根据式(8)由 $\alpha(\lambda)$ 的实验结果求得。

本文在计算中取两组参数: 第一组 $B = 500(\text{cm} \cdot \text{eV})^{-1/2}$, $E_g = 1.60\text{eV}$; 第二组 $B = 720(\text{cm} \cdot \text{eV})^{-1/2}$, $E_g = 1.61\text{eV}$ 。 所测的样品的 $\alpha(\lambda)$ 绝大多数介于由这两组参数推算出的 $\alpha(\lambda)$ 之间,而以接近按第一组参数求得的 $\alpha(\lambda)$ 值居多。

(4) I_0 和 n 的测定 式(1)中的 I_0 和 n 是用测量 $I_{sc}-V_{oc}$ 关系曲线的方法得到的^[9]。典型值为 $I_0 = 3 \times 10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$, $n = 1.2$ 。

镍膜透射率的实测值在 $30-50\%$ 之间,所以计算时取 $(1 - R_0) = 0.4$ 。

(5) V_{bi} 和 d 的选取 式(5)中的内建势 $V_{bi} = (\phi - E_F - kT)/q$, 势垒高 ϕ 可由测量 I_0-1/T 曲线得到, E_F 可由暗电导 σ 与温度的关系 $\sigma-1/T$ 实验曲线得到,但在 AM1 光照下光生载流子将使电子的准费米能级向导带移动,从而将使内建势增高十分之几电子伏。由于光照下的内建势应该高于开路电压,而实测到的最高开路电压为 0.46V , 所以本文在计算中取 $V_{bi} = 0.48\text{V}$ 。

膜厚 $d = 0.5\mu\text{m}$ 。这是由制备样品时的淀积时间和生长速率得到的。

三、结果和讨论

1. 结短路时势垒宽随光强的变化

图 4 为测量所得的 $W(0)-V_+$ 曲线。 V_+ 是当被测样品为开路时在所加光照下产生的直流光电压值,用它表示测量时照射光的光强。图中“×”号为用本文的方法测出的结

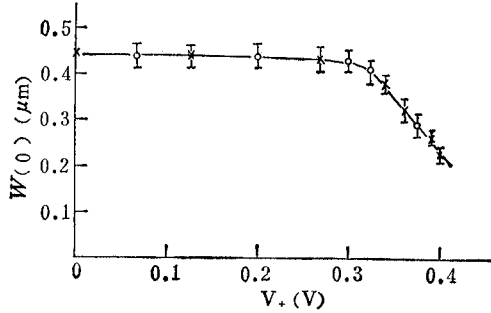


图 4 $W(0)-V_+$ 曲线

V_+ 表示当样品开路时在测 $W(0)$ 所加光强下产生的开路电压

果。自然, $V_+ = 0$ 时即为暗场情形,此时,式(6)中的 R_d 为暗场下的结电阻,是暗场时 $I-V$ 曲线在 $V = 0$ 那点的斜率的倒数。它也可由 I_0 算得^[7]。暗场时式(6)中的 σ_b 为材料的暗电导率。不过,这方法用来测定暗场时的势垒宽不够灵敏。我们又用 $\lambda > 0.62 \mu\text{m}$ 的单色光,测试电池加偏置光和不加偏置光时的收集效率 $\eta(V_+)$ 和 $\eta(0)$ 。在上述波长范

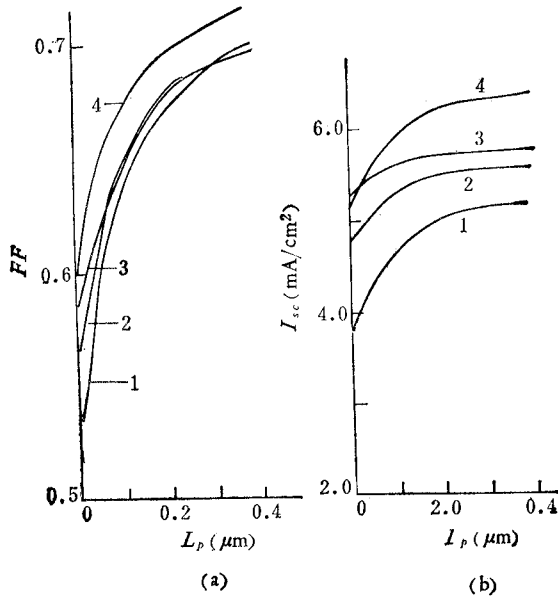


图 5

- (a) 理想情况下 ($R_s = 0, R_{sh} = \infty$) 的 $FF-L_p$ 计算曲线
 (b) 理想情况下的 $I_{sc}-L_p$ 计算曲线

围,收集效率主要由短路时的势垒宽度决定,所以从 $\eta(V_+)$ 与 $\eta(0)$ 之比可以推算出相应光强下的 $W(0)$,其结果在图 4 中以小圆圈表示. 两种方法所得结果组成一条平滑曲线. 这里所得的 $W(0)$ 与文献[10,11]所报道的结果一致. $W(0)$ 随光强而变的原因是在光照下由于空穴的陷获使空间电荷密度增大. 由式(5)可知,势垒宽度将收缩. 但在结短路情况下,空间电荷密度随光强的增加并不像文献[6]提出的模型那样迅速. 按照文献[6]的模型计算,暗场下宽度为 $0.4, 0.5\mu\text{m}$ 的势垒区,在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照射下,其宽度只应有几百埃. 由于非晶硅太阳电池的光生电流主要来自势垒区,那么就很难设想一个在 $AM1$ 光照下 $W(0)$ 如此之窄的太阳电池尚能有一定的效率. 所以本文的结果应更为合理.

2. $W(0)$ 的大小对电池性能的影响

图 5 表示计算所得 $FF-L_p$ 曲线 (a) 和 $I_{sc}-L_p$ 曲线(b). 图中曲线 1, 2, 3 分别对应于 $W(0)$ 为 $0.14, 0.23$ 和 $0.30\mu\text{m}$; $\alpha(\lambda)$ 为采用第一组参数 ($B = 500(\text{cm} \cdot \text{eV})^{-1/2}$, $E_g = 1.60 \text{ eV}$), 由式(8)推算得的值. 由计算结果可知 $W(0)$ 对 FF 几乎没有影响;但对短路电流密度 I_{sc} 则有一定影响, $W(0)$ 为 $0.30\mu\text{m}$ 时计算的 I_{sc} 与 $W(0)$ 为 $0.14\mu\text{m}$ 时的相比约增加 $1/5$. 由此可见,光照并短路条件下,空间电荷密度小的非晶硅材料能做出更好的太阳电池.

3. $\alpha(\lambda)$ 对电池性能的影响

图 5 中曲线 4 的 $W(0)$ 与曲线 2 的相同,也为 $0.23\mu\text{m}$, 但其 $\alpha(\lambda)$ 是采用第二组参数 ($B = 720(\text{cm} \cdot \text{eV})^{-1/2}$, $E_g = 1.61\text{eV}$) 的推算值. 其值约为曲线 2 所用的两倍. 比较曲线 4 和曲线 2, 可看出 $\alpha(\lambda)$ 对 I_{sc} 和 FF 均有影响,但对 FF 的影响较小. 曲线 4 的 I_{sc} 值约比曲线 2 的增加 $1/5$, FF 约增加 0.04 . 而材料的少子扩散长度 L_p 从 $0.1 \mu\text{m}$ 增加到 $0.40\mu\text{m}$ (增加为 4 倍) 时, FF 的增加也只有 0.04 , 而 I_{sc} 的增加还少于 $1/5$. 因此可以得出结论: 为了做出性能好的太阳电池,改进制备非晶硅材料的工艺条件,使材料的光吸收系数大是极为重要的.

4. L_p, R_s 和 R_{sh} 对 FF 的影响

由图 5 可见, FF 是 L_p 的单调函数,随 L_p 的增大而增大. 因此由 FF 值可以粗略估计少子扩散长度 L_p 的长短^[3]. 实验所得的最大的 FF 值为 0.52 , 这说明 $L_p < 0.1\mu\text{m}$.

图 6 为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下的 $I-V$ 曲线. 实线表示实验结果 (被测电池的面积为 1cm^2), 点线表示计算结果, 两者很接近. 这说明我们用 SPV 法测得的 L_p ($0.06 \mu\text{m}$) 是合理的. 开路电压 V_{oc} 值

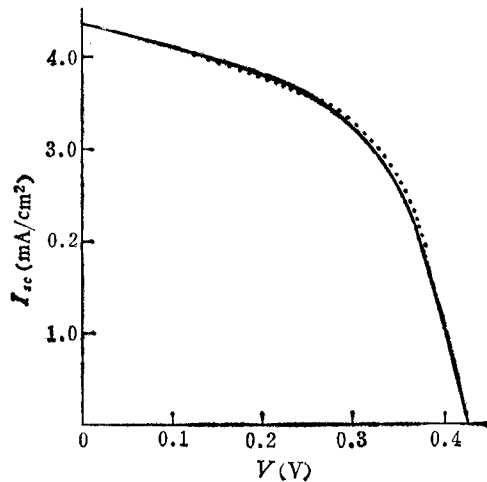


图 6 在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下的 $\text{Ni}/a\text{-Si:H}$ 肖特基电池的 $I-V$ 曲线. 实线为实验曲线; 点线为计算曲线, 此时 $W(0) = 0.14\mu\text{m}$, $\alpha(\lambda)$ 取用第一组参数 ($B = 500(\text{cm} \cdot \text{eV})^{-1/2}$, $E_g = 1.60\text{eV}$), $L_p = 0.06\mu\text{m}$, $R_{sh} = 1 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$, $R_s = 10\Omega\text{cm}^2$

小的主要原因是镍和非晶硅构成的肖特基势垒高度 ϕ 低, 使内建势 V_{bi} 小的缘故. 这使这种太阳能电池的效率比白金和非晶硅构成的肖特基太阳能电池的低.

图 7(a) 和 (b) 分别为计算所得的 $FF-R_s$ 曲线和 $FF-R_{sh}$ 曲线. 计算时 $\alpha(\lambda)$ 取用第一组参数时的值, $W(0) = 0.23\mu\text{m}$. 从图可以看出并联电阻对 FF 影响较小, 如果每平方厘米太阳能电池的并联电阻不小于 $5\text{k}\Omega$, 就对 FF 几乎没有影响. 但串联电阻对 FF 有很大影响, 当每平方厘米太阳能电池的串联电阻大于 15Ω 时, FF 就主要由串联电阻决定而几乎不受 L_p 影响. 反之, 如果串联电阻足够小, 即使 $L_p = 0.06\mu\text{m}$, FF 也有可能达到 0.60 左右.

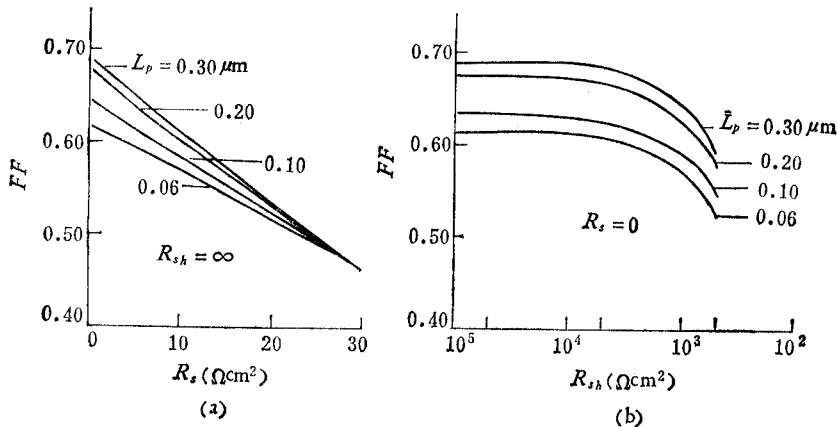


图 7 (a) $FF-R_s$ 的计算曲线

$W(0) = 0.23\mu\text{m}$, $B = 500(\text{cm} \cdot \text{eV})^{-1/2}$, $E_g = 1.60\text{eV}$

(b) $FF-R_{sh}$ 的计算曲线

参数与(a)同

本项工作中所用样品是陆靖谷和周楨华同志制备的, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] M. H. Brodsky, *Amorphous Semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin, 1979, Chap. 10.
- [2] Y. Kuwano, S. Tsuda and M. Ohnishi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **21** (1982), 235.
- [3] M. Konagai, H. Miyamoto and K. Takahashi, *ibid*, **19** (1980), 1923.
- [4] 徐乐, 刘启一, *电子科学学刊* **6**(1984), 247.
- [5] A. Catalano et al., 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., San Diego, (1982).
- [6] A. R. Moore, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 222.
- [7] Xu Le, D. K. Reinhard and M. G. Thompson, *IEEE Trans. on ED*, ED-29 (1982), 1004.
- [8] R. C. Neville, *Solar Energy Conversion: The Solar Cell*, Elsevier Scientific Publishing Co. New York, 1978, p. 37.
- [9] F. S. Sinencio and R. Williams, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 2757.
- [10] R. S. Crandall, R. Williams and B. E. Tompkins, *ibid*, **50** (1979), 5506.
- [11] J. Beichler, W. Fuhs, H. Mell and H. M. Welsch, *J. Non-Cryst. Solids*, **35/36** (1980), 587.

THE I - V CHARACTERISTIC ANALYSIS OF SCHOTTKY AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS

Xu Le

(Department of Physics, Nankai University)

The present paper introduces an experimental method for measuring the width of illuminated and short-circuited Ni/a-Si:H Schottky barriers. The current-voltage curves for the Schottky barrier solar cells under AM1, 100 mW/cm² illumination are calculated by using the parameters determined by experiments. The diffusion length of holes in a-Si:H obtained from the illuminated I - V curve is consistent with the results measured by the author with the surface photovoltage method in 1983. The factors affecting the fill factor are analysed on the basis of the calculated results. A comparison of the calculated results to the experiment's reveals that the very low fill factor of the solar cells measured is due to series and shunt resistances rather than the low diffusion length of the holes.