

127-135

氢化非晶硅中空穴与电子的俘获效应

——PIN型非晶硅太阳能电池稳定性研究

林鸿生

TM914-41

(中国科学技术大学物理系,合肥,230026)

1993年5月28日收到初稿,1993年9月23日收到修改稿

A

摘要 通过应用 Scharfetter-Gummel 解法数值求解 Poisson 方程,对经高强度光辐照过的 PIN 型非晶硅太阳能电池进行计算机数值模拟。结果表明,载流子俘获效应所造成的 α -Si:H 中空穴电荷净增加或减少都会使电池内部电场分布发生改变和准中性区(低场“死层”)的出现,使电池性能因光的长期辐照而衰退。本文还讨论了 α -Si:H 中载流子俘获效应的研究在高稳定性 PIN 型非晶硅太阳能电池研制中的重要性。

关键词: 载流子俘获效应 α -Si:H 光致性能衰退 Scharfetter-Gummel 解法

Hole and Electron Trapping Effects in Hydrogenated Amorphous Silicon (α -Si:H)

——A Study of Stability of PIN Solar Cells

Lin Hongsheng

(Dept. of Physics, Univ. of Sci. and Tech. of China, Hefei, 230026)

Abstract: A computer simulation model of hydrogenated amorphous silicon (α -Si:H) PIN solar cells subjected to light irradiation has been developed by using Scharfetter-Gummel solution of Poisson's equation. The results indicate that due to carrier trapping, the increased or decreased space-charge density changes the electric field distribution and leads to a wider quasi-neutral region (low-field "dead layer") in the i layer, resulting in light-induced degradation of solar cell performances. We also discuss the importance of carrier trapping effects to the stability of PIN α -Si:H solar cells.

Key Words: Carrier Trapping Effects, Light-induced Degradation in α -Si:H, Scharfetter-Gummel Solution

1 引 言

提高 PIN 型非晶硅太阳能电池稳定性是目前这种薄膜太阳能电池研制中的突出问题之一。1986 年, Epstein 和 Moore 等^[1]从实验上明确提出光辐射下电池内建场分布的变化是 PIN 型非晶硅太阳能电池产生光致性能衰退的物理原因。而在这之前,许多人基于对 α -Si:H 因光照而增生的亚稳态缺陷的了解,认为这些缺陷增加的材料复合中心进一步减少了载流子寿命,

导致电池性能因光照射而衰退。1985年,Smith,Wagner和Faughnan^[2]的载流子寿命衰退模型概括了人们对PIN型非晶硅太阳能电池光致性能衰退的这种认识。但是,我们在应用表面光生电压(SPV)技术来研究受光辐照过后的 α -Si:H薄膜性质的实验^[3]时所得到的结果是,随着光辐照时间的加长, α -Si:H表面势垒区宽度减少,正空间电荷密度与表面电场强度增加,但载流子的双极扩散长度却基本上不变。这表明光的辐照改变了 α -Si:H薄膜内电场强度的分布,但并不使载流子 $\mu\tau$ 乘积发生变化。因此,这一实验结果支持了Epstein和Moore等提出的有关非晶硅太阳能电池光致性能衰退的物理机制。

电场分布的这种改变来源于光照射下 α -Si:H中空间电荷因光生空穴俘获而产生的变化。Crandall等^[4,5]以及Tiedje,Wronski等^[6]都在实验中观察到光照下空穴俘获效应造成的正空间电荷增加现象。笔者在 α -Si:H载流子双极扩散长度的SPV测量实验中^[7]也发现在光照射下 α -Si:H表面势垒区的正空间电荷密度增加,例如,一个太阳偏置光下($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$)正空间电荷密度比无光偏置时大7倍,而隙态密度大的样品则增加19倍。特别应指出的是Carlson等^[8]测量了PIN型非晶硅太阳能电池在光辐照前后i层中的表面光生电势纵向分布图后证实,经过光照射过的样品其p/i结面周围正空间电荷增加,使n/i结附近准中性区(低场“死层”)扩大。他们得出结论,电池中内建场分布的这种变化改变了有源区对光生载流子的收集,使电池性能因光照射而发生退化现象。

最近^[9],我们在正向电压偏置的 α -Si:H/金属Schottky二极管上进行了表面光生电压(SPV)实验,与有偏置光(产生同样数量的电子与空穴)SPV实验不同,这时只有一种载流子——多数载流子电子的注入,电子在 α -Si:H中的俘获现象更为突出,于是 α -Si:H表面势垒区中空间电荷密度不是增加而是减少,空间电荷的这种变化对 α -Si:H中电场的调制应与上面的结果不同。下面利用数值模拟分析方法讨论光照射下 α -Si:H中光生载流子空穴和电子的俘获效应,重点分析这些效应给PIN型非晶硅太阳能电池电场强度分布带来的影响。本数值分析结果支持了Epstein和Moore等提出的PIN型非晶硅太阳能电池光致性能衰退的物理机制。本文最后讨论这一机制在非晶硅太阳能电池光致性能稳定性研究中的实际意义。

2 物理模型

图1是PIN型非晶硅太阳能电池的能带。 p^+ 、i-和 n^+ - α -Si:H层沿 x 方向依次排列, E_g 是 α -Si:H的禁带宽度。 p^+ -和 n^+ - α -Si:H层分别与高电导(或金属)材料接触,这种接触呈阻挡少数载流子输运性质,其接触势垒高度分别用 φ_0 和 φ_L 表示。 E_{vL} 是电子局部真空能级。它与导带底相距一个电子亲和能 χ_s 。用 $\psi=\psi(x)$ 表示样品上各点的 E_{vL} 值,通常取边界点 $x=L$ 上的 E_{vL} 值为电子能量零点。

描述处于热平衡状态的PIN型非晶硅太阳能电池的基本方程是Poisson方程:

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

(1)式中 $\psi(x)$ 不是传统中的电子静电势分布^[10],它的数值与电子静电势相同但符号相反,其单位为电子伏特(eV),方程(1)右边是空间电荷密度,表达式是

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

其中

$p(x)$ 是价带中空穴浓度,

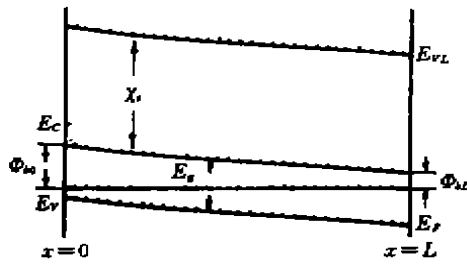


图 1 PIN 型非晶硅太阳能电池能带

$n(x)$ 是导带中电子浓度,

$N_D^+(net)(x)$ 是净有效荷正电分立局域态密度,

$p_i(x)$ 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.

如前所述,光辐射下 $a\text{-Si:H}$ 中由于空穴的俘获,空间电荷密度将要增加.这个增加量用 N^+ 来表示,假设 N^+ 与样品中的位置无关,参照文献[3,7]的实验结果,增加量比较大,所以 N^+ 取值可比通常非晶硅太阳能电池中的空间电荷密度(请看下面的计算结果)大一个数量级,即 $N^+ = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.它对电池内电场强度的调制通过 Poisson 方程自洽联系着.因此,被光照射过的 PIN 型非晶硅太阳能电池中空穴的俘获效应可通过解方程(1)来模拟,只不过此时空间电荷密度 $\rho(x)$ 应取下述形式:

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

同样,如果光辐射下 $a\text{-Si:H}$ 中只发生电子俘获,空间电荷量有一个净减少,此处用 N^- 表示,假设其值取 $N^- = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.这时方程(1)右边应写为

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

数值求解方程(1)就将模拟出 PIN 型非晶硅太阳能电池在光照射下的电子俘获效应.

方程(1)的边界条件是

$$\begin{cases} \psi(0) = \phi_0 - \phi_L \\ \psi(L) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

为求解方程(1),需要给式(2)中诸量规定一个合适的物理模型及相应的数学描写,下面分别予以介绍.

2.1 自由载流子浓度模型

类似晶态半导体的载流子浓度公式,按照图 1 的能量定义并应用 Boltzman 统计, $a\text{-Si:H}$ 价带中空穴浓度

$$\begin{aligned} p(x) &= N_v \exp\{-[E_f - E_v(x)]/KT\} \\ &= N_v \exp\{[\phi_L - E_f]/KT\} \exp[\psi(x)/KT] \\ &= p_{0L} \exp[\psi(x)/KT] \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$p_{0L} = N_v \exp\{[\phi_L - E_f]/KT\}$$

N_v 为价带顶有效态密度.同理, $a\text{-Si:H}$ 中导带电子浓度

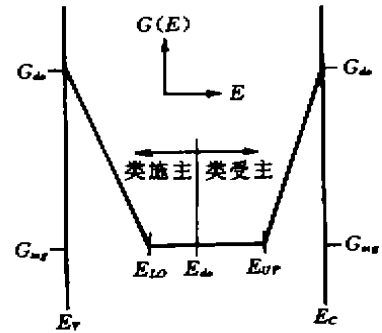


图 2 “U”型隙态密度分布

$$n(x) = n_{0L} \exp[-\phi(x)/KT] \quad (5)$$

式中,

$$n_{0L} = N_C \exp(-\phi_L/KT)$$

N_C 是导带底有效态密度。

2.2 分立局域态模型

本文涉及的是有意的杂质掺杂所形成的分立局域电子态。如果认为其掺杂效率很高,则这些杂质局域态对空间电荷的贡献可采用全电离假设,于是它们对空间电荷的贡献简单写成:

$$N_D^-(\text{net})(x) = N_D(x) - N_A(x)$$

2.3 a-Si:H 中连续隙态密度分布模型

a-Si:H 的隙态密度分布模型由两部分组成:一是带尾态,呈指数分布;二是带隙中部即费米能级附近为常数隙态密度分布,构成了所谓“U”型隙态密度分布^[10],如图 2 所示。从图看出,类受主 Urbach 态尾从导带边 E_C 指数地伸入带隙中去,其隙态密度分布表示为

$$g(E) = G_{av} \exp(-E/E_a) \quad (6)$$

其中,能量 E 起始点是导带底,向下为正; E_a 是确定带尾延伸入带隙斜率的一个特征能量。同样,类施主 Urbach 态尾由价带边 E_V 指数地延伸进带隙,其隙态密度分布表示为

$$g(E) = G_{dv} \exp(-E/E_d) \quad (7)$$

这时能量 E 从价带顶算起,向上为正。 E_d 是表示带尾延伸入带隙快慢的另一个特征能量。

禁带中部的隙态密度分布为一常数 G_{mg} ,如图 2。其能量范围从 E_{LO} 到 $E = E_{UP} - E_{LO}$, E_{UP} 和 E_{LO} 分别由下式决定:

$$\begin{cases} E_{UP} = E_a \ln(G_{av}/G_{mg}) \\ E_{LO} = E_d \ln(G_{dv}/G_{mg}) \end{cases}$$

图 2 中 E_{da} 是转换能量。从价带顶起算,若 $(E - E_V) < E_{da}$, 则其隙态是类施主态,而 $(E - E_V) > E_{da}$ 则是类受主态。

在零热力学温度统计近似下,已知费米能级位置便可直接计算出隙态上受俘的空穴与电子浓度,例如隙态上受俘的空穴浓度为

$$p_i(x) = p_i(\text{带尾态区域}) + p_i(\text{常数隙态区域}) \quad (8)$$

其中,

$$p_i(\text{带尾态区域}) = G_{dv} E_d \exp(-E_{FV}/E_d)$$

但常数隙态分布区域上 p_i 有下列三种可能值:

$$\begin{aligned} (a) E_{FV} \geq E_{da}, \quad p_i(\text{常数隙态区域}) &= 0 \\ (b) E_{LO} \leq E_{FV} < E_{da}, \quad p_i(\text{常数隙态区域}) &= G_{mg}(E_{da} - E_{FV}) \\ (c) E_{FV} < E_{LO}, \quad p_i(\text{常数隙态区域}) &= G_{mg}(E_{da} - E_{LO}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 E_{FV} 是费米能级相对价带顶距离。同理,隙态上俘获的电子浓度 $n_i(x)$ 可写成:

$$n_i(x) = n_i(\text{带尾态区域}) + n_i(\text{常数隙态区域}) \quad (10)$$

其中,

$$n_i(\text{带尾态区域}) = G_{av} E_a \exp(-E_{FC}/E_a)$$

而 $n_i(\text{常数隙态分布区域})$ 也有下列三种可能值:

$$\begin{aligned} (a) E_{FC} \leq [-(E_g - E_{da})], \quad n_i(\text{常数隙态区域}) &= 0 \\ (b) [-(E_g - E_{da})] < E_{FC} \leq (-E_{UP}), \quad n_i(\text{常数隙态区域}) &= G_{mg}(E_g - E_{da} + E_{FC}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$(c) E_{FC} > -E_{UP}, \quad n_i(\text{常数隙态区域}) = G_{mg}(E_g - E_{da} - E_{UP})$$

式中 E_{FC} 是费米能级相对导带底距离。

3 数值方法

把方程(1)写成如下形式

$$FU = 0 \quad (12)$$

将电池器件区间 $[0, L]$ 等分成 $(n+1)$ 个子区间, 子区间长度 $h = L/(n+1)$, 网格点标记为 $k = 1, 2, \dots, n$ 。各网格点上相应的电子静电势能记为 $\vec{\psi}^T = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$ 。用 Scharfetter-Gummel^[11] 方法将方程(12)离散化, 其离散方程写成矢量形式为

$$\overline{FU}(\vec{\psi}) = 0 \quad (13)$$

这是一组非线性方程组, 通过 Newton-Raphson 法线性化得到迭代格式

$$F(\vec{\psi})\delta^{i+1} = -\overline{FU}(\vec{\psi}) \quad (14)$$

即第 i 次迭代向量

$$(\vec{\psi}^i)^T = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)_i \quad (15)$$

和

$$\overline{FU}(\vec{\psi}^i)^T = (FU_1, FU_2, \dots, FU_n)\vec{\psi}^i \quad (16)$$

(14)式中 $F(\vec{\psi})$ 是 Jacobi 迭代矩阵, 借助 Gauss 直接消元法解线性方程组(14), 求出样品上各网格点电子静电势能 ψ 的精确数值解, 从而得到相应的载流子浓度分布、空间电荷分布、电场强度分布以及能带图等。从上面讨论得知, 只要给 PIN 型非晶硅太阳能电池选择适当的物理参数, 方程(1)的求解是在没有任何先决条件下进行的。表 1 给出 PIN 型非晶硅太阳能电池模拟计算中使用的典型物理参数。共同参数, $a\text{-Si:H}$ $E_g = 1.72 \text{ eV}$, $\chi_s = 4.0 \text{ eV}$, $\epsilon = 11.7$, $T = 300 \text{ K}$ 。设电池器件长度为 $0.6 \mu\text{m}$, $\psi_{bo} = 1.43 \text{ eV}$ 和 $\psi_{bL} = 0.14 \text{ eV}$ ^[10,12]。

表 1 PIN 型非晶硅太阳能电池典型物理参数

参数/单位	P ⁺ 层	i 层	N ⁺ 层
厚度/ μm	0.01		0.025
N_D/cm^{-3}	0		1×10^{18}
N_A/cm^{-3}	5×10^{17}		0
N_C/cm^{-3}	2×10^{19}	2×10^{19}	2×10^{19}
N_V/cm^{-3}	2×10^{19}	2×10^{19}	2×10^{19}
$G_{do}/\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$	1×10^{21}	1×10^{21}	1×10^{21}
$G_{ms}/\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$	1×10^{21}	1×10^{21}	1×10^{21}
E_d/eV	0.06	0.05	0.06
E_a/eV	0.04	0.03	0.04
E_{da}/eV	0.86	0.86	0.86
$G_{mg}/\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$	8×10^{15}	5×10^{15}	8×10^{15}

4 结果与讨论

图 3 是电池器件长度 $L = 0.6 \mu\text{m}$, $G_{mg} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 的 PIN 型非晶硅太阳能电池

的空间电荷密度分布。从图看出,电池的*i*层中差不多对半分布着正负空间电荷,其平均密度小于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。显然, p^- 一侧的正电荷是 p^- 层空穴扩散注入*i*层中受俘于隙态而形成的;同样, n^+ 层中电子扩散进*i*层使另一半长度*i*层空间电荷取负值。上述计算的平均空间电荷密度与在厚度 $0.5 \mu\text{m}$ *i*层优质 $\alpha\text{-Si:H}$ 制造的PIN型太阳能电池上的空间电荷密度估算相近^[11]。图4是其电场强度分布,这时*i*层中的电场强度几乎是一常数,强度在 $2 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 数量级上。

图5是该电池经光辐照后的电场强度分布(请参见附录)。由于空穴俘获过程占主导,电池内部有一个净电荷增加量 $N^+ = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。与图4相比电场向 p^+/n 结面集中平均强度增至 $4 \times 10^4 \text{ V/cm}$,而靠近 n^+/i 结附近区域的电场强度大为下降,最低为 $3 \times 10^3 \text{ V/cm}$,出现了相当范围的低场“死层”。*i*层中高电场范围的缩小与我们在光辐射下 $\alpha\text{-Si:H}$ 样品表面势垒上观测到的结果相类似^[3]。业已知道,实际应用中的太阳能电池处于正向偏压工作状态,因此,靠近 n^+/i 结面的低场“死层”还要扩大,于是随着光辐照时间的加长,电池对光生载流子的收集率随之下降,填充因子和 J_{sc} 首先表现衰退^[14,15],电池性能的光致衰退现象也随之发生。图6是这时电池中空间电荷密度分布。*i*层中 p^+/i 一侧大部分区域上正空间电荷密度增加,密度约 10^{16} cm^{-3} 。而负电荷仅存在于靠近 n^+/i 结附近较小范围的区域上,这里是电池有源区上的低场“死层”。这些结果与Carlson等^[6]实验测得的光辐照过的PIN型非晶硅太阳能电池*i*层中的表面光生电势(因而电场)纵向分布图也很类似。

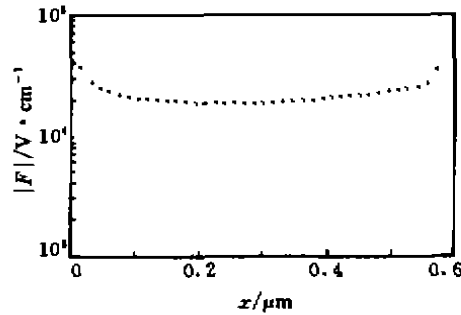
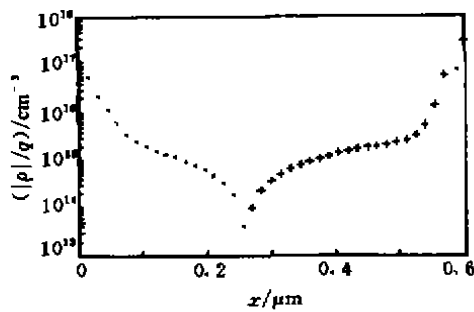


图3 电池器件 $L=0.6 \mu\text{m}$, $G_{\text{opt}}=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 的空间电荷分布
(•):正电荷,(+):负电荷

图4 图3电池器件的电场强度分布

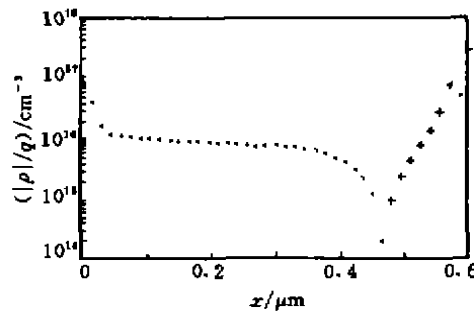
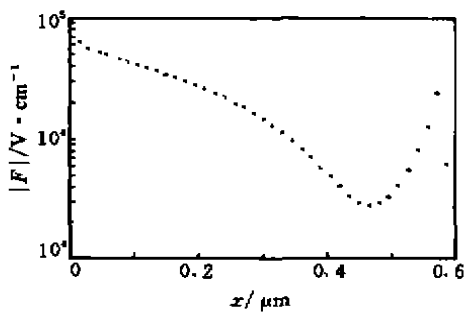


图5 图3电池受光辐照过(空穴俘获优先)的电场强度分布

图6 图5电池的空间电荷密度分布
(•):正电荷,(+):负电荷

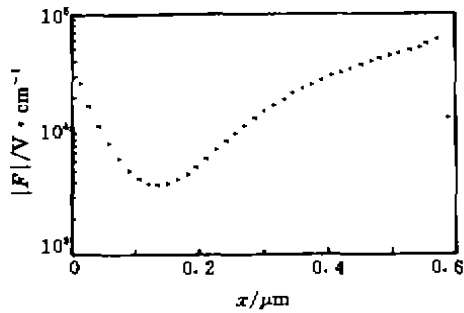


图7 图3电池受光辐照过(电子俘获优先)的电场强度分布

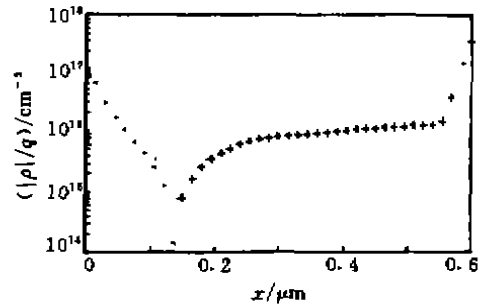


图8 图7电池器件的空间电荷密度分布
(•):正电荷,(+):负电荷

图7是经过光辐照后的图3电池内部电场强度分布。但现在载流子俘获过程中电子优先,电池内增加了一个均匀分布的负净空间电荷量 $N^- = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。与图5的电场强度分布基本上对称,即高电场集中在 n^+/i 结面,而在 p^+/i 结附近区域上有低场“死层”区域,最低强度比图5低场区的稍大一点, $\sim 3.7 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 。与前面分析一样,这将降低电池中光生载流子的收集,使电池性能衰退。图8是其空间电荷密度分布,也与图6对称, n^+/i 结一侧大部分区域上的负空间电荷密度基本上是均匀的,密度增至 $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,而正空间电荷区则出现在 p^+/i 结附近狭小地段上。

所以光照射下 $a\text{-Si:H}$ 中发生的光生载流子俘获,不管是空穴还是电子,但只要有一种载流子俘获过程占主导,都将导致空间电荷正或负净增加量出现,PIN型非晶硅太阳能电池内部电场将受到调制,其分布要发生变化,这个变化带来的有源区中低场“死层”的出现则预示着电池性能光致衰退的开始。这就进一步证实了 Epstein 和 Moore 等^[1]提出的有关 PIN 型非晶硅太阳能电池光致性能衰退的物理机制。显然,可以设想如果光辐照下 $a\text{-Si:H}$ 中发生的电子俘获与空穴俘获这两个过程达到均衡, $a\text{-Si:H}$ 中就没有净空间电荷的增加或减少,电池内部电场强度分布没有发生改变,PIN型非晶硅太阳能电池性能不会因光辐照而衰退,因而也就有可能制造稳定性高的非晶硅太阳能电池。

最后值得提及的是,关于 $a\text{-Si:H}$ 中存在光致亚稳态缺陷时电子与空穴的俘获效应 Crandall^[16]进行过系统的研究。他指出这些亚稳态缺陷都会因俘获空穴或电子而带电,俘获空穴荷正电,而俘获电子则处于荷负电状态,致使 $a\text{-Si:H}$ 中空间电荷密度的大小和符号发生变化。但是,不管电子俘获还是空穴俘获,都将导致 $a\text{-Si:H}$ 太阳能电池性能光致衰退的发生。一般情况下, $a\text{-Si:H}$ 在光照射下主要发生空穴载流子的俘获,这是产生 Staebler-Wronski 效应的原因^[16]。实验上观测到反常 Staebler-Wronski 效应,例如掺 B 或重掺杂 P 的 $a\text{-Si:H}$ 样品在光照射下其暗电导和光电导都增大而不是下降^[17,18],在补偿 $a\text{-Si:H}$ 材料上也观察到同样的效应^[19]。Crandall 证明这是 $a\text{-Si:H}$ 中电子俘获造成的。据报道^[20],在非晶硅太阳能电池中反常 S-W 效应的主要特征之一是电池在光照射下工作时其能量转换效率不是下降反而升高。所以,理论分析和实验研究表明,进一步开展不同制备条件和不同掺杂工艺下非晶硅中电子俘获与空穴俘获的研究,对于研制有高稳定性能的非晶硅太阳能电池有重要的实际意义。

参 考 文 献

- 1 Epstein K, Tran N, Jeffrey F, *et al.* *Appl Phys Lett*, 1986; **49**(3):173
- 2 Smith Z, Wagner S, Faughnan B. *Appl Phys Lett*, 1985; **46**(11):1 078
- 3 Hegedus S, Lin Hong-sheng, Moore A R. *J Appl Phys*, 1988; **64**(3):1 215
- 4 Crandall R S. in *Semiconductors and Semimetals*, edited by Pankove J I (Academic, Orlando, FL, 1984), Vol. 21, Part B, 285-287
- 5 Williams R, Crandall R S. *RCA Rev.* 1979; **40**(4):371
- 6 Tiedje T, Wronski C, Abeles B, *et al.* *Sol Cells*, 1980; **2**(3):301
- 7 Moore A R, Lin Hong-sheng. *J Appl Phys*, 1987; **61**(10):4 816
- 8 Carlson D. in *Semiconductors and Semimetals*, edited by Pankove J I (Academic, Orlando, FL, 1984), Vol. 21, Part D, 27-30
- 9 Lin Hong-sheng. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1993; **30**(4):367
- 10 McElheny P J, Arch J K, Lin Hong-sheng, *et al.* *J Appl Phys*, 1988; **64**(3):1 254
- 11 Scharfetter K L, Gummel H K. *IEEE Trans Electron Devices*, 1969; **ED-16**(1):64
- 12 Tasaki H, Kim W Y, Hallerdt M, *et al.* *J Appl Phys*, 1988; **63**(2):550
- 13 Faughnan B W, Moore A, Crandall R. *Appl Phys Lett*, 1984; **44**(6):613
- 14 Tawada Y, Nishimura K, Nanomura S, *et al.* *Sol Cells*, 1983; **9**(1-2):53
- 15 Crandall R S, Carlson D E, Catalano A, *et al.* *Appl Phys Lett*, 1984; **44**(2):200
- 16 Crandall R S. *Phys Rev B*, 1987; **36**(5):2 645
- 17 Jang J, Lee C. *J Appl Phys*, 1983; **54**(7):3 943
- 18 Jang J, Kim T M, Hynn J K. *J Non-cryst Solids*, 1983; **59 & 60**(Part 1):429
- 19 Mell H, Beyer W. *J Non-cryst Solids*, 1983; **59 & 60**(Part 1):405
- 20 Volltrauer H, Gau S C, Kampas F J, *et al.* in *Proceedings of the 18th IEEE Photovoltaic Specialist Conference* (IEEE, New York, 1985), 1 760



林鸿生 男, 1939年生, 1963年毕业于北京大学物理系, 同年分配至中国科学院半导体研究所, 从事晶体管、半导体集成电路测试分析等工作, 1973年调入中国科学技术大学物理系, 担任教学并进行非晶硅半导体方面的研究工作。现为中国科技大学物理系副教授。1985年起曾在美国 Univ. of North Carolina, Univ. of Delaware 和 Pennsylvania State Univ. 等3所大学参加研究, 集中在非晶硅薄膜光电性质与非晶硅太阳能电池研究课题上。在美国3年, 先后在国际性刊物、国际性会议上发表论文多篇。

世界固体电子新闻

采用光集成电路的无光损耗传输技术

据日本《O Plus E》杂志1993年第164期报道, 日本日立制作所的中央研究所为了使信息大容量、超高速传输, 已制成采用光集成电路的无光损耗传输技术。半导体的光放大器和光波导电路作在同一衬底上, 并与开关和调制器等一起装入电路中。采用几个光器件, 弥补由分支所引起的光损耗。除了能使光远距离传输外, 也提高了光电路的可靠性。可望应用于2000年以后的实用光通信网络的光交换器和提高光强度的升压器以及将来的光计算机。

(蕙宁)

附 录

本附录列出 PIN 型 α -Si:H 太阳能电池经强光辐照后的载流子浓度、空间电荷密度以及电场强度分布的模拟计算结果。计算中电池器件被等分成 400 段, 但本表仅记录每隔 10 点的输出数据。其中电子浓度 $n(I)$, 空穴浓度 $p(I)$, 受俘空穴浓度 $p_v(I)$, 受俘电子浓度 $n_v(I)$ 和空间电荷密度 $\rho/q(I)$, 单位均为 $(1/\text{cm}^3)$, 电场强度 $F(I)$ 单位为 (V/cm) 。

I	$p(I)$	$n(I)$	$F(I)$	$p_v(I)$	$n_v(I)$	$\rho/q(I)$
1	2.7021D+14	1.9509D-05	-4.1450D+04	4.7884D+17	1.1913D+04	-1.0886D+16
11	1.1535D+13	4.5699D-04	-6.0430D+04	3.0864D+16	9.0499D-01	4.0876D+16
21	4.2200D-11	1.2492D-02	-5.4567D+04	6.5979D+15	1.5680D+01	1.6598D+16
31	1.9664D-10	2.6809D-01	-5.1338D+04	2.3436D+15	2.2052D+02	1.2344D+16
41	1.0854D+09	4.8570D+00	-4.8598D+04	1.4878D+15	2.6800D+03	1.1488D+16
51	6.9912D+07	7.5404D-01	-4.6001D+04	9.4768D+14	2.8510D+04	1.0948D+16
61	5.2187D+06	1.0101D-03	-4.3507D+04	5.6833D+14	2.6708D+05	1.0568D+16
71	4.4911D+05	1.1738D-04	-4.1094D+04	2.4001D-14	2.2133D+06	1.0240D+16
81	4.4359D+04	1.1884D+05	-3.8753D+04	1.3134D-12	6.3722D+13	9.9376D+15
91	5.0082D+03	1.0526D+06	-3.6481D-04	4.2498D+11	3.4581D-14	9.6546D+15
101	6.4389D+02	8.1871D+06	-3.4273D+04	1.4707D+11	6.1110D+14	9.3890D+15
111	9.3929D+01	5.6123D+07	-3.2124D+04	5.4331D+10	8.6005D+14	9.1400D+15
121	1.5496D+01	3.4020D+08	-3.0031D+04	2.1390D+10	1.0931D+15	8.9069D+15
131	2.8818D+00	1.8293D+09	-2.7990D+04	8.9598D+09	1.3107D+15	8.6893D+15
141	6.0241D-01	8.7508D+09	-2.5998D+04	3.9871D+09	1.5133D+15	8.4867D+15
151	1.4116D-01	3.7344D+10	-2.4051D+04	1.8822D+09	1.7016D+15	8.2984D+15
161	3.6986D-02	1.4253D+11	-2.2146D+04	9.4137D+08	1.8768D+15	8.1231D+15
171	1.0810D-02	4.8766D+11	-2.0281D+04	4.9821D+08	2.0412D+15	7.9583D+15
181	3.5165D-03	1.4991D+12	-1.8454D+04	2.7869D+08	2.1998D+15	7.7987D+15
191	1.2705D-03	4.1493D+12	-1.6663D+04	1.6459D+08	2.3618D+15	7.6340D+15
201	5.0864D-04	1.0364D+13	-1.4913D+04	1.0250D+08	2.5426D+15	7.4471D+15
211	2.2510D-04	2.3419D+13	-1.3207D-04	6.7235D+07	2.6999D+15	7.2767D+15
221	1.0985D-04	4.7987D+13	-1.1542D+04	4.6390D+07	2.8975D+15	7.0546D+15
231	5.8941D-05	8.9438D+13	-9.9433D+03	3.3616D+07	3.2018D+15	6.7087D+15
241	3.4606D-05	1.5233D+14	-8.4409D+03	2.5522D+07	3.6288D+15	6.2189D+15
251	2.2087D-05	2.3867D+14	-7.0692D+03	2.0232D+07	4.1770D+15	5.5843D+15
261	1.5195D-05	3.4692D+14	-5.8596D+03	1.6673D+07	4.8269D+15	4.8262D+15
271	1.1154D-05	4.7262D+14	-4.8368D+03	1.4208D+07	5.5472D+15	3.9802D+15
281	8.6373D-06	6.1033D+14	-4.0168D+03	1.2448D+07	6.3064D+15	3.0833D+15
291	6.9717D-06	7.5615D+14	-3.4082D+03	1.1142D+07	7.0848D+15	2.1590D+15
301	5.7929D-06	9.1001D+14	-3.0172D+03	1.0124D+07	7.8841D+15	1.2059D+15
311	4.8918D-06	1.0776D+15	-2.8536D+03	9.2762D+06	8.7338D+15	1.8851D+14
321	4.1407D-06	1.2731D+15	-2.9409D+03	8.5098D+06	9.7021D+15	-9.7523D+14
331	3.4581D-06	1.5244D+15	-3.3293D+03	7.7526D+06	1.0917D+16	-2.4418D+15
341	2.7929D-06	1.8875D+15	-4.1201D+03	6.9415D+06	1.2626D+16	-4.5137D+15
351	2.1199D-06	2.4868D+15	-5.5188D+03	6.0188D+06	1.5352D+16	-7.8386D+15
361	1.4436D-06	3.6518D+15	-7.9751D+03	4.9338D+06	2.0411D+16	-1.4063D+16
371	8.0668D-07	6.5349D+15	-1.2657D-04	3.6513D+06	3.2102D+16	-2.8637D+16
381	2.9626D-07	1.7794D+16	-1.3739D+04	2.1747D+06	7.2752D+16	-8.0546D+16
391	9.3617D-08	5.6310D+16	-6.2095D+03	2.6781D-08	9.0029D+17	5.3398D+16
401	5.9104D-08	8.9191D+16	-2.0271D+04	2.1965D+08	1.2110D+18	-2.9021D+17