

# 非晶硅太阳能电池的光学分析

曾湘波\* 苏大昭 张光寅

(南开大学物理系,天津)

1989年3月7日收到

我们采用一种新方法——光学导纳分析,把非晶硅太阳能电池看作由吸收膜和透明膜组成的多层膜系,计算了该膜系的光学导纳,分析了电池的光学性质。

电池吸收谱中存在干涉峰。通过考察各层膜光学参数对光吸收的影响,发现(i)高反射背接触的电池结构可增加 $0.6-0.7\mu\text{m}$ 的吸收;(ii)非晶硅膜厚能改变干涉峰在光谱中的位置;(iii)减反膜(AR)与短波区的反射率密切相关,选择最佳AR膜厚能够减少反射损失;并且AR最佳膜厚几乎与非晶硅膜厚无关。

**主题词** 非晶硅太阳能电池、光学导纳、光吸收

## 一、引言

非晶硅太阳能电池成本低,并可望达到较高的转换效率,是最有应用前景的光伏电池之一,但国内研制的非晶硅太阳能电池的转换效率一般仍在实用效率10%以下。

影响非晶硅太阳能电池转换效率提高的一个原因是材料对光的不完全吸收。在 $600-800\text{nm}$ 红光波区,非晶硅(a-Si)的吸收系数小,而大气质量为1(AM1),光辐照的光流量最大。增加a-Si膜厚显然能够增加光吸收。但对太阳能电池而言,只有膜增厚的同时(i)显著增大耗尽层厚度,或者(ii)增加少数载流子寿命才有可能使受光表面产生的载流子不被复合,到达背接触面,产生光电流。但耗尽层厚度和少数载流子寿命取决于a-Si的态密度分布;而态密度对一定的制备条件其分布是一定的。另外,增加膜厚使得串联电阻变大,所以不能随意增大膜厚,只能另寻途径。改善红光区光吸收的另两种可能途径是(i)研究多能隙太阳能电池,增加长波区的吸收;(ii)利用高反射背接触多次反射产生的干涉峰增加光吸收。

Boer<sup>[1]</sup>等研究了几种金属作背接触的肖特基型非晶硅太阳能电池,发现选择高反射率的背接触和适当的非晶硅膜厚能够增加电池在长波 $600-700\text{nm}$ 的收集效率;并指出,这是多次反射在非晶硅薄膜内产生干涉的结果。Demichelis<sup>[2]</sup>等从研究电池结构内的光能损失出发,把非晶硅太阳能电池看作一个多层膜系,并设第*i*层内的电磁场强度分别为:

\* 现在辽宁师范大学物理系

$$E_j(z, t) = A_j \exp \left\{ i \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j z + a_j \right) \right\} + B_j \exp \left\{ i \left( \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j z + b_j \right) \right\}$$

$$H_j(z, t) = \tilde{n}_j \left[ A_j \exp \left\{ i \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j z + a_j \right) \right\} - B_j \exp \left\{ i \left( \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j z + b_j \right) \right\} \right]$$

其中复折射率  $\tilde{n}_j = n_j - ik_j$ ; 四个参数  $A_j, B_j, a_j, b_j$  由麦克斯韦方程边界条件及初始条件确定, 从而求出电磁场强度  $E, H$ ; 最后得到反射率、透射率及电池的光吸收. 用这套方法, Demichelis 等人分析计算了几种类型的太阳能电池的透射、反射、吸收, 并选择各层膜厚使光能损失到达最小. 他们<sup>[3]</sup>把光吸收计算同电池的短路电流联系起来, 从而有可能定性地直观地看出光吸收对电池效率的影响.

与 Demichelis 等人不同, 本文采用光学导纳法, 分析了模拟成多层膜系的非晶硅太阳能电池, 考察了干涉对光吸收的影响, 从使电池光吸收最大的角度出发, 选择背接触金属、各层膜厚, 计算了相应的吸收谱和反射谱. 我们的计算结果和实验与文献已有结果基本一致. 导纳法最大的特点是每层只计算一个参量——导纳, 方法较简单.

## 二、计算模型和公式

非晶硅太阳能电池由基底、背接触电极、非晶硅材料和透明导电膜组成. 从光学上分析, 可把电池看作由吸收膜和透明膜组成的多层吸收膜系. 我们采用文献[4]所述的导纳递推法来分析非晶硅太阳能电池这个多层膜系.

光学导纳的定义式为:

$$Y \cdot (K \times E) = H \quad (1)$$

光波段  $\mu \approx 1$ , 导纳在数值上等于折射率, 单位是自由空间导纳  $y_0 = \frac{1}{377}$  西门子.

光学导纳法的基本点是薄膜的两个界面在数学上可用一等效界面来表示. 以单层膜为例, 在折射率为  $N_2$  的基底上敷有折射率为  $N_1$  的一层膜后(图 1(a)), 可用导纳为

$$\eta_0 (= N_0)$$

的入射媒质和组合导纳为  $Y$  的媒质间的单一界面(图 1(b)) 来等效,  $Y$  由下式决定:

$$Y = \frac{\eta_2 \cos \delta_1 + i \eta_1 \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + i (\eta_2 / \eta_1) \cdot \sin \delta_1} \quad (2)$$

(2) 式由麦克斯韦方程导出, 其中  $\eta_1, \eta_2$  分别是膜和基底的导纳.

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d \cos \theta_1.$$

对于多层膜系, 我们同样可从与基片相邻的底层膜开始, 逐层等效, 递推到第  $i$  层膜, 则有:

$$Y_i = \frac{Y_{i+1} \cos \delta_i + i \eta_i \sin \delta_i}{\cos \delta_i + i (Y_{i+1} / \eta_i) \cdot \sin \delta_i} = y_i^{(1)} + i y_i^{(2)} \quad (3)$$

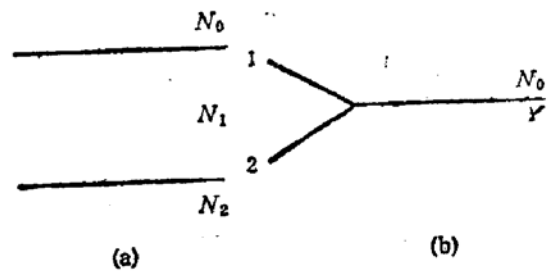


图 1 单层膜等效为单一界面

膜层相邻两界面上的能流密度之比  $\phi_j$  为<sup>[5]</sup>:

$$\phi_j = y_{j+1}^{(1)} / [y_j^{(1)} \cos \delta_j + i Y_{j+1} \cdot \sin \delta_j / N_j]^2 \quad (4)$$

这样,从基片开始递推到顶层,最后得到整个膜系的组合导纳为:

$$Y_1 = y_1^{(1)} + i y_1^{(2)} \quad (5)$$

反射率:

$$R = \frac{(N_0 - y_1^{(1)})^2 + (y_1^{(2)})^2}{(N_0 + y_1^{(1)})^2 + (y_1^{(2)})^2} \quad (6)$$

整个膜系的透射率:

$$T = (1 - R) \prod_{j=1}^k \phi_j \quad (7)$$

其中  $k$  为膜的层数,则膜系的吸收:

$$A = 1 - T - R \quad (8)$$

波长  $\lambda$  改变时,我们计算  $A$  随  $\lambda$  变化可得吸收谱  $A(\lambda)$ . 对具有  $S(\lambda)$  辐照分布的复色光照,总的平均吸收由下式给出:

$$\bar{A} = \frac{\int A(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (9)$$

如设吸收光子数和产生的电子-空穴对的数目为 1:1,则吸收的光子数为:

$$N(\lambda) = A(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{hc} \quad (10)$$

$$N_{\text{总}} = \int N(\lambda) \cdot d\lambda = \int A(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{hc} d\lambda$$

短路电流密度

$$J_{sc} = \int N(\lambda) \cdot f(\lambda) d\lambda = \int A(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot f(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

其中  $f(\lambda)$  是非复合因子.

### 三、结果和讨论

#### 1. 肖特基型太阳能电池

我们用这套方法分析肖特基型的非晶硅太阳能电池. 图 2 是这种结构电池的示意图. 我们选用文献 [1] 的数据;取金的厚度为  $75 \text{ \AA}$ , 非晶硅膜厚为  $0.35 \mu\text{m}$ , 背接触金属分别为 Mo 或 Ag; 金属的光学常数取自文献 [6], 非晶硅的折射率取自文献 [7], 吸收系数取自文献 [1], AM1 光辐照分布取自文献 [8].

##### (1) 背接触金属对吸收的影响

图 3 是我们计算所得的吸收谱和反射谱. 我们可以看到: (i) 吸收谱在  $0.6-0.7 \mu\text{m}$  有一吸收峰,这是背接触金属多次反射,在非晶硅薄膜内干涉增强的结果; (ii) Mo 和 Ag 作背接触所造成的干涉峰的强度不同. 我们计算了 a-Si:H/Ag 和 a-Si:H/Mo

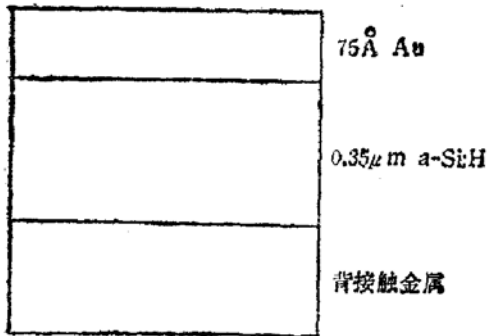


图2 肖特基型电池示意图

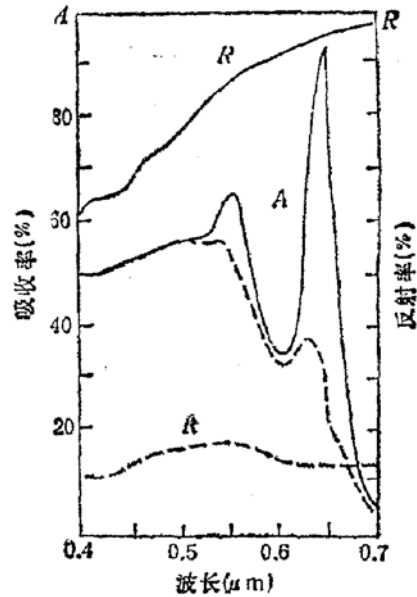


图3 不同金属作背接触的计算吸收谱和反射谱

—Ag ---Mo

界面的反射率,如图所示,由反射谱可以看出 Ag 作背接触的反射率要比 Mo 作背接触的反射率高,这说明吸收谱中干涉峰的强弱与作背接触金属的反射率大小有关。反射率越大,干涉作用越明显;(iii) 吸收谱短波区 Mo 和 Ag 曲线一致。这是因为光在达到背接触以前被完全吸收,背接触没有反射光,非晶硅薄膜内不会有干涉,因而短波吸收和背接触无关。

由上述讨论可看出,适当地选择背接触金属,可增加红光区的光吸收。Boer<sup>[1]</sup> 等测量并计算金-肖特基型电池,指出 Ag 作背接触可使电池的转换效率从 1.6% (Mo) 增加到 1.8% (Ag)。我们计算的吸收谱图 3 和 Boer 等人的结果一致。

### (2) 非晶硅膜对吸收的影响

日常的阳光是复色光,我们应考虑复色光吸收。我们采用 AM1 的光辐照分布,计算吸收,积分区间  $0.35-0.70 \mu\text{m}$ , 更长波长光子对光电流的贡献可以忽略<sup>[2]</sup>。图 4 是 AM1 积分吸收随非晶硅膜厚度的变化。从中可以看出:(i) 积分吸收不是随膜厚增加而单调增加,而是呈现一种“波动”上升趋势;(ii) “波动”在小于  $0.5 \mu\text{m}$  膜厚的薄电池上表示明显;膜厚增加,“波动”幅度逐渐减小。

为了探究“波动”的来源,我们计算了不同膜厚的吸收谱,如图 5 所示。由图中可以看出,膜增厚时干涉峰向长波方向移动,即非晶硅膜厚  $d$  可改变干涉峰波长的位置。图 4 中我们算出  $d = 0.28 \mu\text{m}$  积分吸收极大;而  $d = 0.32 \mu\text{m}$ , 积分吸收极小。相应地在图 5 中可看到,对于  $d = 0.28 \mu\text{m}$ , 在  $0.6-0.7 \mu\text{m}$  区间有一干涉极大;而对于  $d = 0.32 \mu\text{m}$ , 在此区间则为干涉极小。因此,积分吸收随膜厚“波动”是干涉的结果。膜厚改变干涉峰波长位置,干涉峰在红光区  $0.6-0.7 \mu\text{m}$  可增加总的积分吸收。对于积分吸收相同的电池,膜越薄越利于光电流产生,因为随着厚度减薄,电子、空穴复合机率减小,非复合因子  $f$  增大。电容-电压法测量表明,零偏置下大多数非晶硅太阳能电池的耗尽层厚度小于  $0.4$

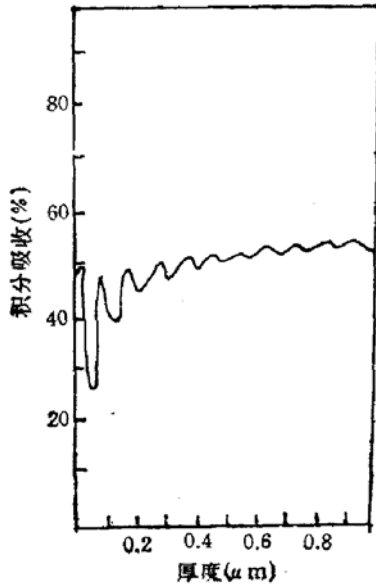


图4 Au-(a-Si:H)/Ag AM1 积分吸收随非晶硅膜厚的变化

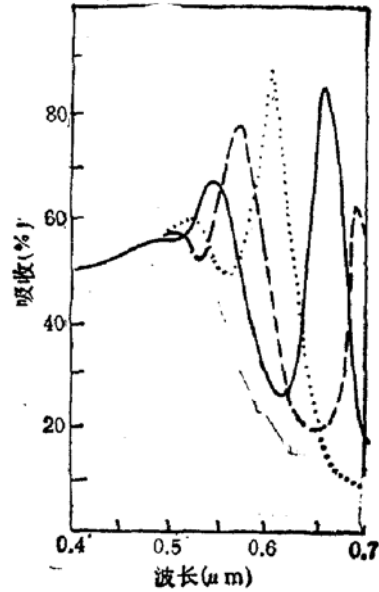


图5 不同膜厚非晶硅的吸收谱  
——0.28μm ----0.30μm .....0.32μm

$\mu\text{m}$ 。假设耗尽层厚度为  $0.4 \mu\text{m}$ ，并且忽略耗尽层内电子、空穴复合，则可设膜厚小于  $0.4 \mu\text{m}$  电池的  $f=1$ 。在此前提下，我们算得

$$J_{sc}(0.28\mu\text{m}) = 8.98\text{mA}/\text{cm}^2, J_{sc}(0.32\mu\text{m}) = 8.52\text{mA}/\text{cm}^2,$$

即在这种膜厚相近的情况下，优化膜厚可使短路电流提高 5%。

膜厚大于  $0.5 \mu\text{m}$  “波动”幅度减小，是因为随着膜厚增加，干涉峰峰宽变窄，使得积分

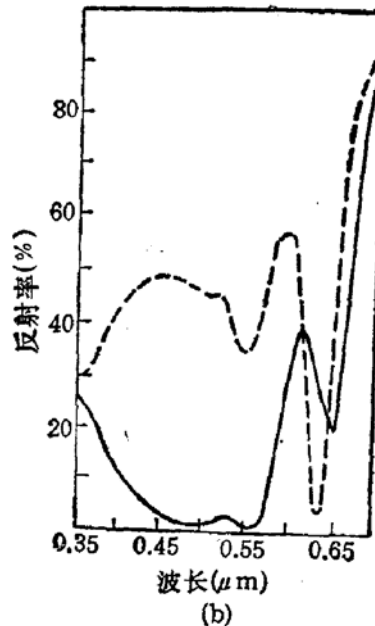
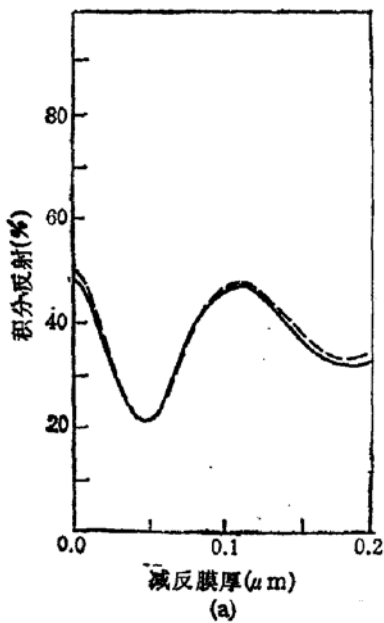


图6 (a) AM1 积分反射随  $d_{AR}$  变化

——0.35μm ----0.32μm

(b) 不同  $d_{AR}$  的反射谱

——0.048μmAR ----0.11μmAR

吸收趋于一致。另外膜增厚,光在到达背接触前大部分被吸收,也削弱了干涉效果。

综上所述,选择适当的非晶硅膜厚,可使干涉峰处在光谱的红光区,增加长波吸收,有利于太阳能电池的改善。

### (3) 减反膜对吸收的影响

在吸收谱上,我们注意到,即使是吸收系数较大,光在到达背接触前被完全吸收的短波区,其吸收率也只有 50% 左右。这说明几乎有一半光能根本没有进入非晶硅太阳能电池,这部分光能因表面反射而损失掉了。因此,通常在电池表面镀一层透明导电膜作减反膜 (AR), 以增加短波区的吸收率。

对镀有折射率  $n = 2$  减反膜的肖特基型太阳能电池,我们计算了积分反射随减反膜厚度的变化。如图 6(a) 所示,我们看到积分反射随减反膜增厚出现极大、极小。积分反射极小出现在膜厚  $d = 0.048 \mu\text{m}$ 。我们考察不同减反膜厚度的反射谱(分别对应积分反射极小  $d_{AR} = 0.048 \mu\text{m}$ , 积分反射极大  $d_{AR} = 0.1 \mu\text{m}$ ), 发现  $d_{AR}$  变化并不显著地改变干涉峰波长的位置,但对短波反射率有较大的影响。正是这短波区反射率随  $d_{AR}$  的变化影响总的积分反射。

我们还计算了非晶硅薄膜取不同厚度时,积分反射随减反膜厚度的变化,如图 6(a) 虚线所示,发现尽管吸收谱和反射谱中干涉峰随非晶硅膜厚移动,积分反射数值大小稍有改变,但积分反射随减反膜厚度变化的趋势并不改变。我们认为这是减反膜显著影响短波区的反射,相比之下,因  $d_{a-si}$  改变所引起的反射率变化较小。积分反射极小的  $d_{AR}$  基本上不随  $d_{a-si}$

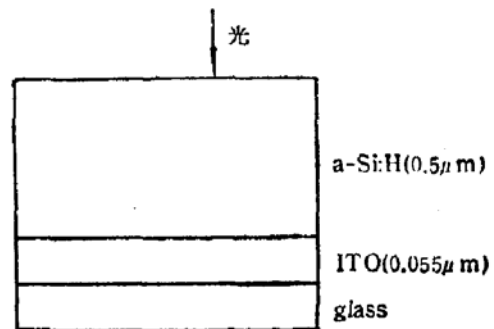


图7 无铝电极电池模型

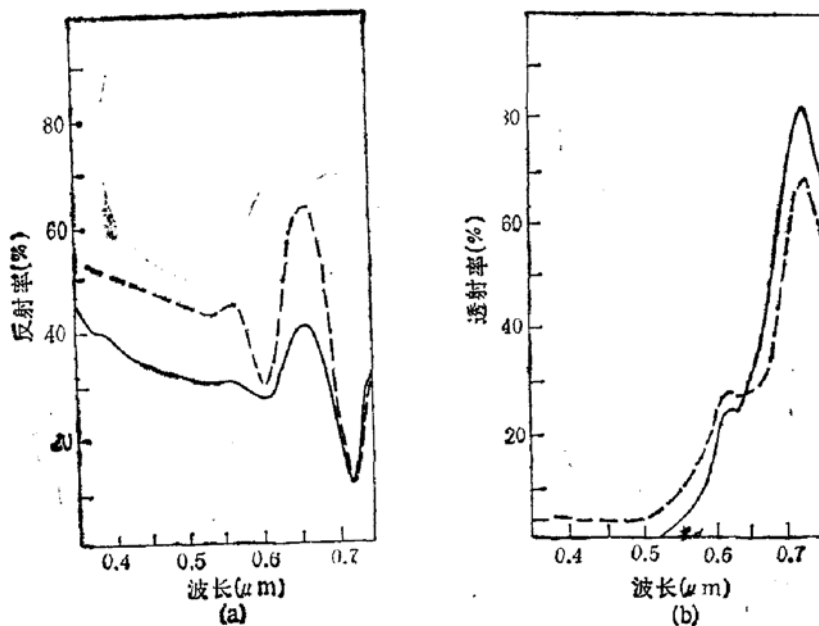


图8 无铝电极 pin 电池光谱

(a) 透射谱 (b) 反射谱

——理论 ---实验

改变,这使我们在减少反射损失时,可以不考虑  $d_{a-Si}$  来选择最佳减反膜厚。

由上述讨论可得出结论,适当地选择减反膜厚度,可减少短波区反射损失,从而增加短波区的光吸收;并且最佳减反膜厚不随非晶硅膜厚改变,给这种选择带来了方便。

## 2. pin 氢化非晶硅太阳能电池的实验验证

对一块制成的 pin 氢化非晶硅太阳能电池,我们用 UV-365 测量了电池上未镀铝电极部分的透射谱和反射谱;并用椭偏仪 TP83 和 1451 型光学多道分析器测量了 a-Si:H 膜厚,  $d = 0.5 \mu\text{m}$ 。

我们用导纳法计算未镀铝电极部分的透射谱和反射谱。无铝电极电池结构如图 7 所示,实验时将 a-Si:H 作为入射表面。ITO 膜的折射率为 2,  $d_{AR}$  取作  $550 \text{ \AA}$ , 玻璃的光学常数来源文献 [6], a-Si:H 膜的吸收系数仍取自文献 [1] 的值, 折射率用椭偏仪 TP83 实验测值 3.51。图 8 是我们得到的结果,其中虚线是实验所测,实线为计算所得。由图可看出,理论和实验的干涉峰波长位置吻合。

## 四、结 论

我们把非晶硅太阳能电池看作多层吸收膜系,采用光学导纳法分析,所得结果与文献及我们的实验结果基本一致,说明导纳法可用于分析非晶硅太阳能电池。这种导纳法计算简便,计算量为文献 [2] 的四分之一。但电池的电学性质不能由导纳法直接求出。

我们用导纳法考察非晶硅太阳能电池各层膜光学常数对光吸收的影响,发现: (i) 适当金属作背接触可增加长波 ( $0.6-0.7 \mu\text{m}$ ) 干涉峰的吸收率; (ii) 非晶硅膜厚影响干涉峰在吸收谱中的位置,适当选择膜厚,使其处于长波区 ( $0.6-0.7 \mu\text{m}$ ), 有利于光电流产生; (iii) AR 膜厚和短波区反射损失密切相关,选择适当的 AR 膜厚可减少光反射损失,并且最佳 AR 膜厚度几乎和 a-Si:H 膜厚无关。

本工作得到南开大学电子科学系孙钟林老师的帮助,谨表衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] W. Den Boer and M. Ondris, *Sol. Cells*, **3**, 209(1981).
- [2] F. Demichelis, A. Tagliaferro and E. Tresso, *Sol. Cells*, **11**, 378 (1984).
- [3] F. Demichelis, E. Minetti, A. Tagliaterra and E. Tresso, *J. Appl. Phys.*, **55**(8), 3140 (1984).
- [4] 唐晋发、郑权,应用薄膜光学,48,上海科技出版社(1984).
- [5] J. A. Berning and P. H. Berning, *J. Opt. Soc. Am.*, **50**(8), 813(1960).
- [6] American Institute of Physics Handbook, 6-124, McGraw-Hill, New York, (1972).
- [7] P. J. Zanzucchi, C. R. Wronski and D. E. Carlson, *J. Appl. Phys.*, **48**, 5227 (1977).
- [8] A. A. M Sayigh, *Solar Energy Engineerings*, **52**, Academic Press, New York, (1977).

## Optical Analysis of Amorphous Silicon Solar Cell

Zeng Xiangbo, Shu Dazhao and Zhang Guangyin

*(Department of Physics, Nankai University, Tianjin)*

### Abstract

In this paper a new method—optical admittance analysis is adopted. Considering an amorphous silicon solar cell as a multilayer system composed of absorbing and non-absorbing materials, we work out the optical admittance of the cell and analyse the optical process in the cell. There are interference peaks in the absorption spectrum of the cell. By analysis of each layer, we find that (i) highly reflecting back contacts can increase the absorption in the region of 0.6—0.7 $\mu\text{m}$ ; (ii) the variation in the thickness of a-Si:H can cause the frequency shift of the peak; (iii) antireflection (AR) film can greatly change the reflectivity in the short wavelength region, and the effect of AR is little dependent on the thickness of a-Si:H.

**Key words** Amorphous silicon, Solar cell, Optical admittance, Optical absorption