

# 晶体硅太阳电池金属电极光学损失的理论分析与实验研究<sup>\*</sup>

李 涛<sup>1)<sup>†</sup></sup> 周春兰<sup>1)</sup> 宋 洋<sup>2)</sup> 杨海峰<sup>3)</sup> 鄢志华<sup>2)</sup> 段 野<sup>2)</sup> 李友忠<sup>2)</sup> 刘振刚<sup>1)</sup> 王文静<sup>1)</sup>

1)(太阳能热利用及光伏系统重点实验室,电工研究所,中国科学院,北京 100190)

2)(中轻太阳能电池有限责任公司,北京 101111)

3)(中国检验检疫科学研究院,北京 100123)

(2010年11月4日收到;2010年12月15日收到修改稿)

本文基于丝网印刷和丝网印刷后光诱导电镀太阳电池,分析了太阳电池前表面金属电极引起的光学损失的各种情况。考虑到空气-玻璃界面和金属电极两侧边缘区域的反射,通过将金属电极截面近似为半椭圆形模拟了电极的光学损失,计算得到的有效宽度比约为金属电极几何宽度的40%。通过对不同类型样品反射谱的测量计算,同时在理论模拟和实验测量上得到了太阳电池前表面金属电极的光学损失,相应的理论与实验结果相符合。

**关键词:** 光学损失,有效宽度比,光诱导电镀,反射谱

**PACS:** 88.40.jj, 88.40.H-, 88.40.-j

## 1. 引 言

目前常规产业化晶体硅太阳电池前表面主要是由产生光电流<sup>[1-3]</sup>的氮化硅受光区域和收集电流的金属栅线电极组成,而由于电极电阻引起的电学损失和电极遮光引起的光学损失是制约太阳电池效率提升的主要因素。加大栅线宽度可以减低栅线的线电阻,减小电学损失,但是也同时增大了金属电极的遮光面积,优化的电池设计需要综合考虑电学损失和光学损失两方面的因素,例如在前表面制备大的高宽比的金属电极。德国 Fraunhofer 研究所为此采用了前表面双层金属电极的方法:首先采用丝网印刷在前表面制备金属电极种子层,然后应用光诱导电镀的方法加厚银电极,得到低栅线电阻的太阳电池。在光诱导电镀的过程中,太阳电池浸入银镀液,电池背表面与外电源阴极相连,前表面受光照产生光电流。与外电源阳极相连的银棒浸入电镀液体,在电势驱动下产生银离子沉积在前表面金属电极上。使用光诱导电镀技术得到了效率高达23.3%的实验室级的太阳电池<sup>[4]</sup>,而采用双层电

极技术得到了效率为18.4%的产业化高效太阳电池<sup>[5]</sup>。

在光诱导电镀过程中,栅线宽度不断增加,增大了前表面的光学损失,影响了效率的提升,因此分析前表面金属电极的所引起的光学损失的产生机理,研究平衡电学损失和光学损失矛盾的技术路线至关重要。已有文献将金属电极的截面假定为半圆形,通过在太阳电池表面覆盖异丙醇和玻璃半定量的分析了前表面电池的光学损失<sup>[6]</sup>。本文基于产业化太阳电池普遍采用的丝网印刷技术和新兴的丝网印刷后光诱导电镀技术,综合考虑了封装后乙烯醋酸乙烯脂共聚物(EVA)和玻璃的影响,分析了太阳电池前表面光学损失产生的各种情况,将金属电极近似为半椭圆形,通过扫描电子显微镜(SEM)观测和反射谱<sup>[7-9]</sup>测量,定量模拟计算了前表面金属电极引起的光学损失,并与实验上所得到的封装太阳电池的光学损失结果进行了比较。

## 2. 理论计算

当太阳光透过玻璃和EVA入射到晶体硅太阳

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KGCX2-YW-382)和国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA05Z437)资助的课题。

† E-mail: litao@mail.iee.ac.cn

电池上时,入射到电池电极表面的太阳光部分被吸收,部分被反射出组件,部分反射到电池氮化硅受光区域。由于金属电极对太阳光的吸收会造成吸收损失,而电极将入射的太阳光反射出组件会造成反射损失,这两部分损失之和就是金属电极所产生的光学损失。决定晶体硅太阳电池前表面光学损失的因素并不是简单的细栅和主栅的几何宽度,而是根据栅线具体的形态所决定的有效宽度比。由于部分入射的太阳光被金属电极和封装玻璃反射到太阳电池的受光区域,与直接入射到太阳电池氮化硅减反薄膜的太阳光共同产生光电流,因此有效宽度比实际上明显小于金属电极的几何宽度。表征光学损失的有效宽度比定义为经太阳电池金属电极反射后离开电池组件的部分太阳光与入射到太阳电池表面的太阳光总量的比值。晶体硅太阳电池被封装在玻璃下面,其中封装材料EVA的厚度远大于入射太阳光的波长,因此可以忽略入射光的干涉效应<sup>[10-12]</sup>。根据太阳电池自动跟踪系统能够自动跟踪太阳的高度角与方位角,使得入射的太阳光始终垂直于封装的太阳电池阵列的表面以获取最大发电效率的特点,前表面银电极对太阳光的反射主要分为以下4种情况,如图1所示。

1) 金属电极的反射光线在空气-玻璃界面的反射角超过全反射的临界角,光线全反射回到太阳电池受光区域。

2) 太阳光入射到金属电极两侧边缘区域,直接反射到电池受光表面。

3) 太阳光透过玻璃和EVA入射到金属电极中间区域,然后经反射回到太阳电池表面。

4) 太阳光透过玻璃和EVA入射到金属电极中间区域,然后经折射离开组件。

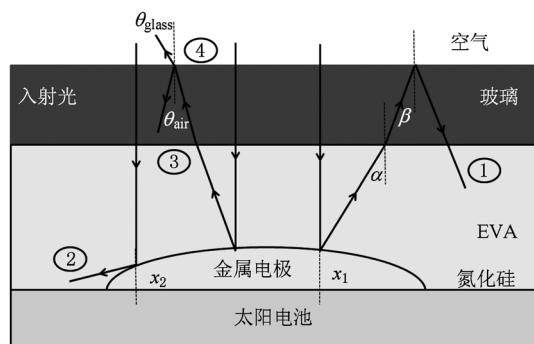


图1 太阳光被金属电极反射的四种不同情况

在第1), 2) 和 3) 种情况下, 太阳光虽然入射到

金属电极表面,但是还是被反射到太阳电池氮化硅受光区域,参与了光电流的产生。然而在第4) 种情况下, 太阳光被金属电极反射后在空气-玻璃界面折射出太阳电池组件, 决定了金属电极光学损失的有效宽度比。在可见光波段玻璃的折射率近似为  $n_{\text{glass}} = 1.52$ , EVA 的折射率为  $n_{\text{EVA}} = 1.48$ , 根据斯涅尔定律<sup>[13, 14]</sup>, 空气-玻璃界面的全反射临界角  $\beta$  和相应的玻璃-EVA 界面入射角  $\alpha$  表示为

$$\beta = \sin^{-1}(n_{\text{air}}/n_{\text{glass}}), \quad (1)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(n_{\text{air}}/n_{\text{EVA}}). \quad (2)$$

由于空气的折射率近似为  $n_{\text{air}} = 1$ , 因此在发生全反射时,  $\beta = 41.1^\circ$  和  $\alpha = 42.5^\circ$ 。根据实验上 SEM 的观测, 丝网印刷与丝网印刷后光诱导电镀太阳电池的金属电极的截面近似于半椭圆形。如果采用直角坐标系, 取坐标原点位于椭圆中心, 并且假设椭圆的长半轴为  $a$ , 离心率为  $e$ , 根据椭圆方程和反射定律, 恰好发生全反射的位置表示为

$$x_1 = \pm a \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \left( \frac{1}{1 + \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) - e^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

而当太阳光入射到金属电极边缘, 电极对光线的反射角逐渐变大, 则太阳光将直接反射到太阳电池氮化硅区域, 通过几何关系计算得到第2) 种情况中的临界位置表示为

$$x_2 = \pm a \cdot \left( \frac{1}{2 - e^2} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

根据光的波动理论和菲涅耳公式<sup>[15-17]</sup>, 将入射太阳光分为振动平面平行于入射面的水平偏振光和垂直于入射面的垂直偏振光<sup>[18]</sup>, 在空气-玻璃界面处的透射率表示为

$$T = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{2\sin\theta_{\text{air}}\cos\theta_{\text{glass}}}{\sin(\theta_{\text{air}} + \theta_{\text{glass}})\cos(\theta_{\text{glass}} - \theta_{\text{air}})} \right)^2 + \left( \frac{2\sin\theta_{\text{air}}\cos\theta_{\text{glass}}}{\sin(\theta_{\text{air}} + \theta_{\text{glass}})} \right)^2 \right], \quad (5)$$

其中  $\theta_{\text{air}}$  和  $\theta_{\text{glass}}$  分别代表在空气-玻璃界面处, 出射太阳光的入射角和折射角。当太阳光入射在金属电极的中间区域, 即在第3) 和第4) 种小角度反射的情况下, 反射的太阳光被折射出电池组件的透射率超过95%; 而当太阳光入射在金属电极两侧区域, 即在第1) 种大角度反射的情况下, 透射率为0, 发生全反射, 如图2所示。

考虑到实际中太阳电池金属电极表面的起伏, 并非所有入射在金属电极中间区域的太阳光都会被直接小角度反射, 金属电极表面更接近于漫反射

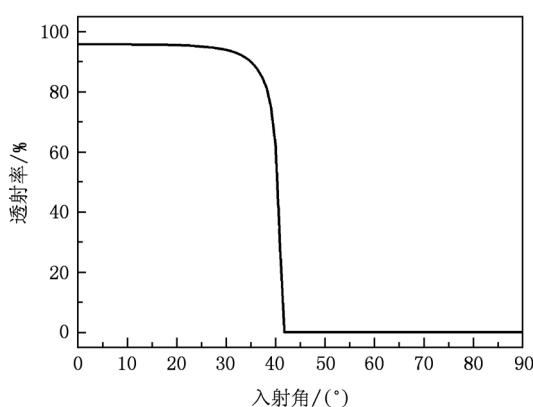


图2 空气-玻璃界面处透射率与入射角度的关系

太阳光的朗伯面<sup>[19]</sup>,如图3所示.最终可能被折射出电池组件的太阳光在金属电极上的反射角应该小于 $\alpha/2$ ,因此入射在金属电极中间区域的太阳光最终被反射出电池组件的比例可以表示为

$$\rho = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\alpha} \sin\theta d\theta, \quad (6)$$

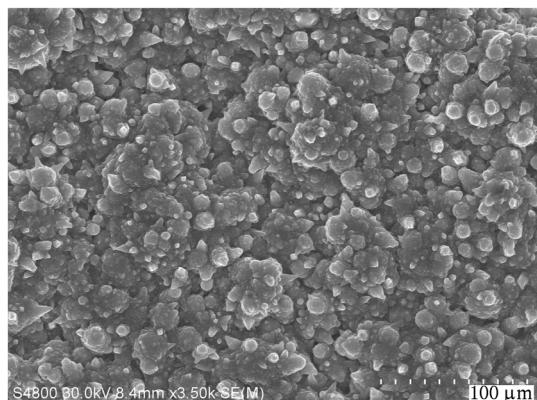


图3 太阳电池金属电极表面微结构

其中 $\theta$ 和 $\varphi$ 分别代表球坐标系中的方位角和仰角.太阳光入射到金属电极后,部分会被银电极吸收,造成金属电极的吸收损失.如果假设金属银电极对太阳光的吸收系数为 $\eta_{silver}$ ,那么表征光学损失的金属电极的有效宽度比可以表示为

$$OL_{contact} = \eta_{silver} + (1 - \eta_{silver}) \cdot T \cdot \rho \cdot \frac{x_1}{a}. \quad (7)$$

太阳电池金属电极的光学损失是包括氮化硅受光区域在内的电极吸收损失和反射损失之和与入射总光强的比值,表示为

$$OL_{cell} = \frac{OL_{contact}}{S/2a}, \quad (8)$$

其中, $S$ 代表金属电极的间距.

### 3. 样品制备

本文实验采用电阻率 $2 \Omega \cdot \text{cm}$ ,太阳能级的p型 $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 单晶硅片作为样品.单晶硅片经过 $\text{NaOH}$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 和IPA的碱式制绒,三氯氧磷管式热扩散(方块电阻为 $60 \pm 2 \Omega/\square$ ), $\text{CF}_4$ 和 $\text{O}_2$ 的等离子体去边,去除表面残余磷硅玻璃,平板式PECVD沉积折射率2.05,厚度80nm的 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反钝化薄膜,然后丝网印刷背电极和背电场.将样品分为两部分:一部分丝网印刷前表面银电极,其中栅线间距2mm;另一部分丝印银电极后进行光诱导电镀银增加前表面电极几何面积.取部分样品作为参考片进行SEM的观测,其余样品使用EVA和玻璃封装这两种电池样品,然后进行确定前表面光学损失的反射谱测试.我们使用美国光伏测量公司(PV Measurements, Inc.)的QEX7测试系统测试反射谱,其中采用氙弧灯作为太阳光的模拟光源,入射的圆形光斑直径为1cm.单晶硅太阳电池前表面

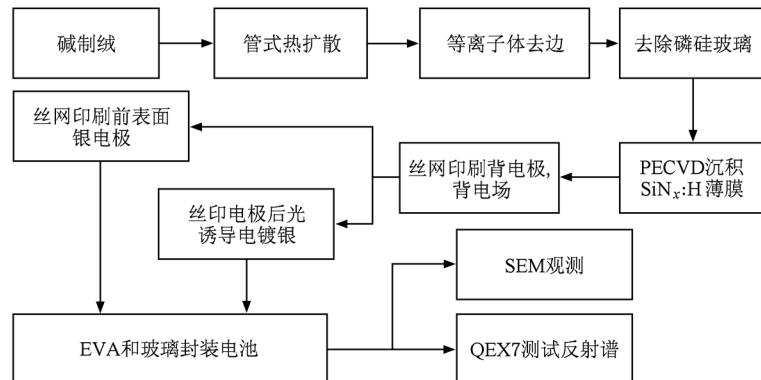


图4 晶体硅太阳电池金属电极光学损失实验流程

光学损失实验的基本流程如图 4 所示。

通过 SEM 的观测可知,丝网印刷样品的金属电极截面宽度约为  $102 \mu\text{m}$ ,而丝网印刷后光诱导电镀

银的样品电极截面宽度为  $118 \mu\text{m}$ ,因此理论计算的椭圆半长轴长分别取为  $51 \mu\text{m}$  和  $59 \mu\text{m}$ ,如图 5 所示。

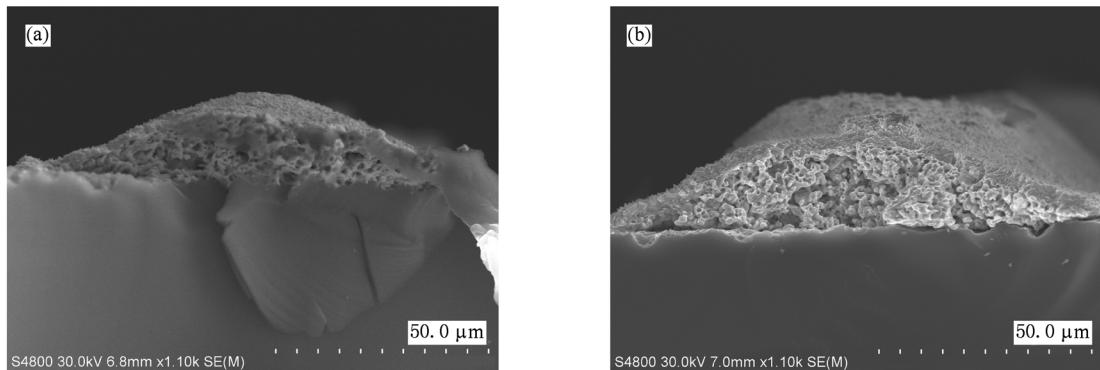


图 5 太阳电池金属电极截面图 (a) 丝网印刷;(b)丝网印刷后光诱导电镀

#### 4. 结果与讨论

介绍前表面银电极所引起的光学损失是电极的吸收损失和反射损失之和,需要通过测量计算五种不同类型的样品的反射谱获得,分别是:丝网印刷太阳电池、丝网印刷后光诱导电镀太阳电池、表面丝网印刷栅线面积超过反射谱测量光斑尺寸的太阳电池、表面光诱导电镀银电极面积超过反射谱测量光斑尺寸的太阳电池、表面只有氮化硅的太阳电池。通过在测量过程中改变样品类型和入射光斑的覆盖区域可以测量得到不同物理含义的反射谱:入射光斑同时覆盖金属电极栅线和氮化硅受光区域得到太阳电池的反射谱  $R_{\text{cell}}$ ;入射光斑完全照射在太阳电池金属电极区域可以获得银电极的反射谱  $R_{\text{silver}}$ ;入射光斑完全照射在氮化硅表面得到参考反射谱  $R_{\text{SiN}}$ ,因此实验上太阳电池前表面金属电极所引起的光学损失表示为<sup>[9]</sup>

$$\text{OL}_{\text{cell}} = (1 - R_{\text{silver}}) \cdot \frac{A_{\text{silver}/\text{cell}}}{A_{\text{silver}}} + \left( R_{\text{cell}} - R_{\text{SiN}} \cdot \frac{A_{\text{SiN}/\text{cell}}}{A_{\text{SiN}}} \right), \quad (9)$$

其中,  $A_{\text{silver}/\text{cell}}$  和  $A_{\text{SiN}/\text{cell}}$  分别表示测量反射谱  $R_{\text{cell}}$  时入射光斑照射在银电极区域的面积和氮化硅区域的面积,而  $A_{\text{silver}}$  和  $A_{\text{SiN}}$  则分别表示测量反射谱  $R_{\text{silver}}$  和  $R_{\text{SiN}}$  时入射光斑的面积,如图 6 所示。通过将银电极的吸收系数确定为  $\eta_{\text{silver}} = 1 - R_{\text{silver}}$ ,根据(7)和(8)式可以得到理论上太阳电池前表面光学损失的数值,因此丝网印刷和丝网印刷后光诱导电镀太阳

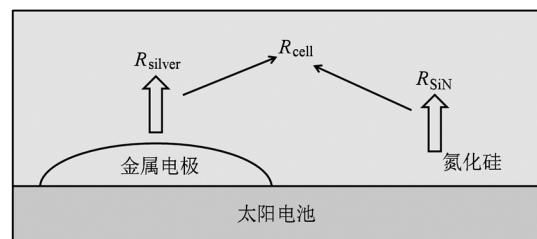


图 6 样品反射谱测量示意图

电池前表面光学损失的实验与理论曲线如图 7 所示。根据(8)式中有效宽度比与金属电极光学损失的关系,可以得到丝网印刷和丝网印刷后光诱导电镀太阳电池的有效宽度比的实验数据,  $\text{OL}_{\text{contact}} = \text{OL}_{\text{cell}} \cdot S/2a$ , 有效宽度比的理论和实验曲线如图 8 所示。其中,有效宽度比数值都在 40% 以下,说明在

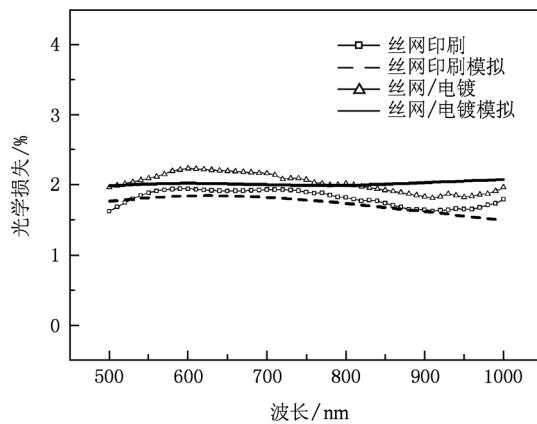


图 7 丝网印刷和丝网印刷后光诱导电镀太阳电池的前表面光学损失的实验与理论曲线

直接入射到金属电极上的太阳光中,约有 60% 的光仍然会参与产生光电流。此外,丝网印刷后光诱导电镀银太阳电池具有更大的金属电极面积,增大了反射损失,因此有更大的光学损失。进行光诱导电

镀银后,金属电极的宽度增加了 15.7%,理论光学损失平均增加了 8.5%,实验光学损失平均增加了 10.9%,理论与实验的相差主要来自于理论计算所采用的 SEM 观测的参考电池栅线宽度与测量反射谱所采用的太阳电池栅线实际宽度的差异。

## 5. 结 论

本文分析了产业化太阳电池前表面光学损失的各种情况,研究了常规丝网印刷和新兴的丝网印刷后光诱导电镀太阳电池的前表面金属电极的光学损失,通过将太阳电池前表面金属电极截面近似为半椭圆形,结合 SEM 的观测和不同类型样品反射谱的测量计算,理论模拟和实验测量了金属电极的有效宽度比和光学损失。结果表明表征光学损失的电池电极的有效宽度比约为金属电极几何宽度的 40%,理论模拟的有效宽度比和光学损失结果与相应的实验测量结果相符合。

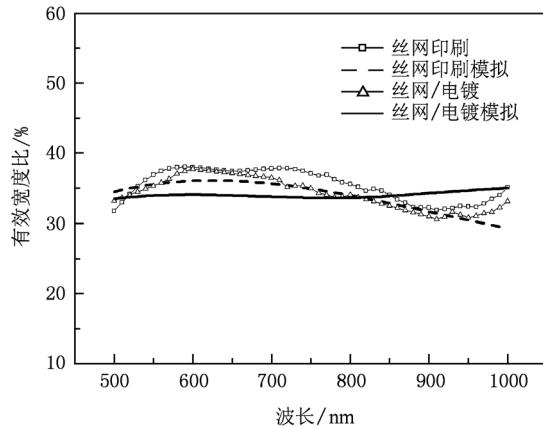


图 8 丝网印刷和丝网印刷后光诱导电镀太阳电池有效宽度比的实验与理论曲线

- [1] Wang N N, Yu J S, Zang Y, Jiang Y D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 038602
- [2] Zhou Y H, Yang Z F, Wu W C, Xia H J, Wen S P, Tian W J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2136
- [3] Liu X D, Xu Z, Zhang F J, Zhao S L, Zhang T H, Gong W, Song J L, Kong C, Yan G, Xu X R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 118601
- [4] Glunz S W, Knobloch J, Biro D, Wettling W 1997 *Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference* Barcelona, Spain, 1997 p392
- [5] Mette A, Schetter C, Wissen D, Lust S, Glunz S, Willeke G 2006 *Proceedings of the 4th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Waikoloa, Hawaii, 2006 p1056
- [6] Blakers A 2009 *J. Appl. Phys.* **71** 5237
- [7] Luo Z H, Tang D S, Hai K, Yu F, Chen Y Q, He X W, Peng Y H, Yuan H J, Yang Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 026102
- [8] Ding P, Liu F M, Zhou C C, Zhong W W, Zhang H, Cai L G, Zeng L G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 118102
- [9] Stuckings M, Blakers A 1999 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **59** 233
- [10] Wu J H, Yuan J M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5283
- [11] You H L, Zhang C F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 349
- [12] You H L, Zhang C F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2096
- [13] Wu J F, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034201
- [14] Wu J F, Zhang C M, Zhang Y T, Liu H C, Zhai X J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2504
- [15] Ouyang Q Y, Zhang X R, Jiang L, Chang Q, Wang Y X, Song Y L 2006 *Chin. Phys.* **15** 1810
- [16] Shi Y L, Zhou Q L, Zhang C L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5511
- [17] Shi P, Cao G W, Li Y P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074201
- [18] Tao R C, Yu T J, Jia C Y, Chen Z Z, Qin Z X, Zhang G Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2603
- [19] Liu Z M, Liu W Q, Gao M G, Tong G G, Zhang T S, Xu L, Wei X L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4184

# Theoretical analysis and experimental study of optical loss of metal contacts of crystalline silicon solar cells \*

Li Tao<sup>1)†</sup> Zhou Chun-Lan<sup>1)</sup> Song Yang<sup>2)</sup> Yang Hai-Feng<sup>3)</sup> Gao Zhi-Hua<sup>2)</sup> Duan Ye<sup>2)</sup> Li You-Zhong<sup>2)</sup>  
Liu Zhen-Gang<sup>1)</sup> Wang Wen-Jing<sup>1)</sup>

1) (*The Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing 100190, China*)

2) (*Chinalight Solar Co. Ltd., Beijing 101111, China*)

3) (*Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100123, China*)

(Received 4 November 2010; revised manuscript received 15 December 2010)

## Abstract

One main factor of restricting industrial crystalline solar cell efficiency is the optical losses caused by the metal front side contacts, including the absorption loss and reflection loss. Based on screen-printed and screen-printed seed layers thickened by light-induced electroplating solar cells, in this paper various cases of optical losses due to the metal contacts are analyzed. Taking into account the reflections in the air-glass interface and the edge regions of metal contacts, the optical losses are simulated by assuming approximately half-oval cross-section of metal contacts. The results show that the effective width ratio is about 40% of the metal contact geometry width. By measuring and calculating the reflection spectra of different types of samples, the optical losses of the metal front side contacts of solar cells are obtained in theoretical simulation and experimental measurement. The corresponding theory and the experimental results are in good agreement with each other.

**Keywords:** optical losses, effective width ratio, light-induced electroplating, reflection spectra

**PACS:** 88.40. jj, 88.40. H -, 88.40.-j

\* Project supported by the Main Direction of Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KGCX2-YW-382) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA05Z437).

† E-mail: litao@mail.iee.ac.cn