

文章编号: 0253-2239(2008)12-2394-06

# 硅片绒面形貌影响光线反射的数值研究

邱明波<sup>1,2</sup> 黄因慧<sup>1</sup> 刘志东<sup>1,2</sup> 田宗军<sup>2</sup> 汪 炜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)  
<sup>2</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 太阳能硅片表面绒面的光陷阱可以使光在其中经历多次反射,从而尽量减少光的反射损耗。不同光陷阱的形貌决定了光的不同多次反射路径而具有不同的反射效果。为了研究光陷阱形貌及光线入射角对减反射效果的影响,提出了数值仿真计算的方法跟踪每一条光线的反射过程计算加权出射系数,从而可以计算分析复杂形貌绒面的减反射效果并给出合理的优化方法,为制备高性能绒面结构提供理论依据。当光陷阱尺寸小于入射光线波长时,发生镜反射,将该尺寸的结构平滑处理。然后从光陷阱的深径比、高度、密度等方面计算分析光在不同入射角的情形下的加权出射系数。提出了理想的绒面光陷阱形貌,及获得最佳反射效果的入射角度。最后计算碱腐蚀及电火花加工产生的两种典型绒面的加权出射系数,并利用实验测量值验证了该计算方法。

**关键词** 表面光学; 太阳能电池; 减反射; 跟踪计算; 光陷阱; 入射角

**中图分类号** O435; TK519 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2394

## Numerical Study on Effect of Silicon Texture Structure on Reflectance of Light

Qiu Mingbo<sup>1,2</sup> Huang Yinhui<sup>1</sup> Liu Zhidong<sup>1,2</sup> Tian Zongjun<sup>2</sup> Wang Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*

<sup>2</sup>*College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*

**Abstract** The light trap on texture of silicon wafer surface makes the light reflect many times when it enters, and declines energy loss of light, and different structure of light trap produces different transmission path which makes a different effect of light reflectance. To study how structure of light trap and incident angle affect reflectance of light, a numerical method was proposed. Every light transmission process was tracked and then the weighted coefficient of reflectance of all lights was calculated. Subsequently the anti-reflection of complex texture with different incident angle was obtained, and a reasonable advice for change of process parameter was given, providing a theoretical basis for fabricating efficient texture. If the size of light traps is less than the wavelength of incident light, the reflection is specular, and the light trap is seen as smooth. Weighted coefficient of reflectance was got by calculating and analyzing different incident angle on light trap with aspect ratio, depth, and density of light trap, then ideal structure on fabric surface was proposed, and the incident angle with the best reflection effect was got. At the end, weighted coefficients of reflectance of two classic textures by alkaline corrosion and electrical discharge machining were calculated, and the validity of this method was proved by experimental measurement.

**Key words** surface optics; solar cell; anti-reflectance; tracing calculation; light trap; incident angle

收稿日期: 2008-04-01; 收到修改稿日期: 2008-05-15

基金项目: 江苏省高技术研究计划(BG2007004)资助课题。

作者简介: 邱明波(1982-),男,博士研究生,主要从事电火花加工、太阳能硅片线切割等领域的理论和应用等方面的研究。E-mail: qiumingbo@nuaa.edu.cn

导师简介: 黄因慧(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事特种加工等领域基础及应用等方面的研究。

E-mail: hyhlib@nuaa.edu.cn

# 1 引言

硅电池是一种较为广泛的太阳电池<sup>[1]</sup>。光陷阱的主要制备方法有碱腐蚀<sup>[2]</sup>、酸腐蚀<sup>[3]</sup>、机械刻槽<sup>[4]</sup>、激光刻槽<sup>[5-7]</sup>、离子刻蚀<sup>[8]</sup>、掩膜生长<sup>[9]</sup>、掩膜腐蚀<sup>[10]</sup>以及电化学腐蚀<sup>[11]</sup>等方法。这些方法对减少光的反射都起到了积极的作用,提高了光的利用效率。对于指定微观结构和具有多层膜结构的绒面的减反射效果以及射线跟踪法等的研究<sup>[1, 12, 13]</sup>使得分析绒面的减反射效果有了一定的理论依据,但是对于复杂绒面反射率的计算以及绒面的优化目标却没有过多的探讨。设一束平行光入射到硅片的绒面上,将平行光划分成极小光束,每一束光的反射情况可以跟踪计算出来。而光每反射一次反射系数都是一定值,因此可以得出每一束光的出射系数,然后综合所有光的出射系数便可计算出总的反射效果。计算所需要的绒面截面形貌可以从绒面的形貌特征得出,或者直接利用表面轮廓仪测量一个绒面的截面形貌,然后利用 Matlab 工具提供的插值函数将截面形貌的数据密集化插值,满足计算过程中的精度需要<sup>[14]</sup>。这种方法可以满足各种复杂绒面形貌的减反射效果研究,作为一种可以进行结构分析的计算工具,尤其适合于利用电火花放电加工等方法产生的复杂绒面。本文从光陷阱的表面形貌特征入手,利用数值计算的方法研究它的减反射机理。为比较不同光陷阱的陷光效果提供理论依据,并且可以用来对陷光结构进行优化设计分析,最大限度地发挥太阳能硅片的发电效率,降低太阳能电池的制造、使用成本。

# 2 计算模型

假设已知一种陷光结构的横截面,曲线方程可以求得,一束极细光线入射到其表面,经过多次反射之后离开绒面(图 1)。光线经过一次反射,其反射光与入射光强度之比称为反射系数  $R^{[15]}$ 。经过  $t$  次反射之后,反射出绒面光线与入射光线强度之比称

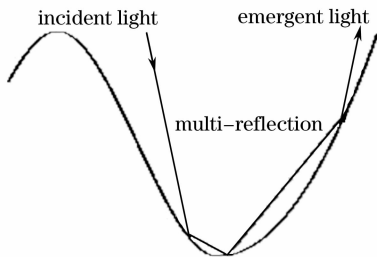


图 1 光陷阱中光多次反射示意图

Fig. 1 Schematic for multi-reflection in light trap

为出射系数  $\beta$

$$\beta = R^t, \tag{1}$$

如图 2 所示,一束宽度为  $d$  的平行光入射到陷光结构表面时,那么可以将这束平行光在宽度方向平均分成  $n$  等分,反射情况如图 2 所示。当  $n$  足够大时,第  $k$  条光线的反射次数为  $t_j$ ,出射系数  $\beta_j$ ,则出射光总强度与入射光总强度之比称为加权出射系数  $\gamma$

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \beta_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R^{t_j}, \tag{2}$$

设方程中反射次数  $t_j = j$  的项数为  $n_j (1 \leq n_j \leq n)$ ,则方程可改写为

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{\infty} R^{t_j} = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i R^i, \tag{3}$$

式中满足

$$\sum_{i=1}^{\infty} \xi_i = 1, \quad \xi_i = \frac{n_i}{n}, \quad i = 1, 2, \dots \tag{4}$$

$\xi_i$  为反射次数  $i$  的光线占总光线的比例。

普通硅片其反射系数  $R = 0.33^{[16]}$ 。当  $i = 19$  时,总反射系数  $\beta = R^i = 7.1 \times 10^{-10}$ 。而  $\xi_i < 1$ ,因此当  $i > 19$  时,后面的计算项可以忽略,则加权出射系数  $\gamma$

$$\gamma = \sum_{i=1}^{19} \xi_i R^i. \tag{4}$$

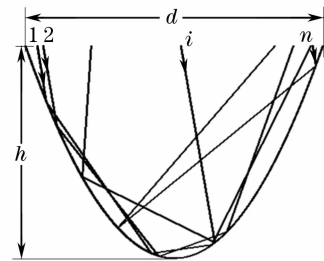


图 2 平行光束在光陷阱中多次反射示意图

Fig. 2 Multi-reflection schematic of parallel light in trap

# 3 计算方法

为了计算加权出射系数,首先得到光陷阱的曲线方程,然后跟踪每一束极细光线。根据反射角等于入射角的反射定律,计算每一束光线的反射次数。用 VC++ 进行计算,并用折线模拟光线的反射传输过程。计算的基本流程图如图 3 所示。 $P_0(x_0, y_0)$  为初始点,  $k_0$  为初始斜率,  $P_i(x_i, y_i)$  和  $k_i$  为动态点及其斜率,为单条光线反射后  $x$  方向的位置增加量。

光陷阱尺寸小于入射光的波长时,则忽略该尺寸的光陷阱,认为是光滑表面<sup>[17]</sup>。从图 4 几种常用的太阳能电池的光谱响应曲线可知<sup>[18]</sup>,光伏电池对

不同波长的响应灵敏度是不同的,能够产生光伏效应的太阳辐射波长范围一般在  $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 。当绒面尺寸小于  $0.4 \mu\text{m}$  时,有效波长都大于该尺寸,将发生镜反射,不能产生陷光效果,应该将它视为光滑平面;当绒面尺寸大于  $1.2 \mu\text{m}$  时,有效波长都小于该尺寸,将发生漫反射;当绒面尺寸在  $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$  之间时,将发生部分镜反射部分漫反射,需要对特定波长的光的反射进行分段计算,将小于入射光波长的绒面视为光滑平面考虑。绒面进行上述处理之后,可以认为整个绒面对于入射光都是漫反射。

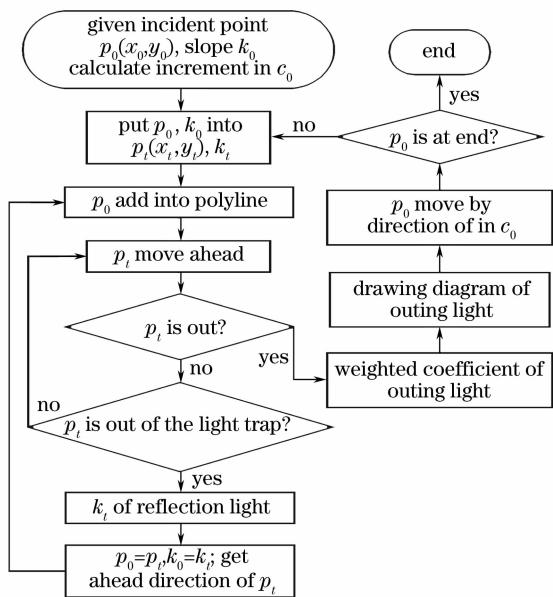


图 3 加权出射系数计算流程图

Fig. 3 Flow chart for weighted coefficient of outing light

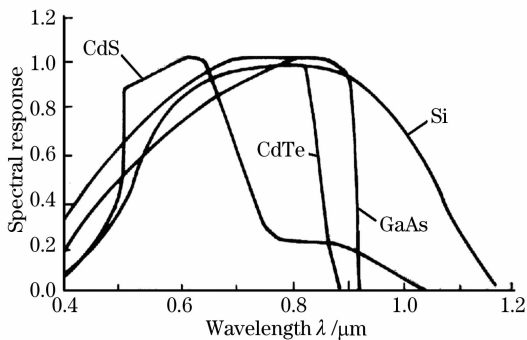


图 4 太阳能电池光谱响应曲线

Fig. 4 Spectral response curves of solar cells

光陷阱的表面轮廓可以利用表面轮廓仪测量,原理基于光的反射条纹,测量范围能达到  $0.2 \sim 25 \mu\text{m}$ <sup>[19]</sup>。或者从绒面的表面及截面微观结构图中观察画出表面的微观结构轮廓线。轮廓线的表示可以用方程表达,也可以用离散的数据点描述。得到光陷阱曲线的截面轮廓线方程之后,平移、放大缩小

归一化处理不会影响计算结果。为了方便计算,可以将曲线方程进行归一化处理,使它满足下列条件:

$$y < 0, \quad -1 \leq x \leq 1$$

数据点选取的间隔可能比较大,计算精度难以保证,需要对这些点进行密集化处理。在相邻的两点之间根据曲线的走势进行插值计算,保证计算过程中有足够的点。本文用 Matlab 提供的三次样条插值函数,不但可以减少数据点的采集工作,而且还可以保证计算精度。

光线的起始点  $p_0$  可以从  $(-1, 0)$  开始选取,然后  $p_0$  的  $x_0$  每次增加  $2/n$  的距离,到  $(1, 0)$  结束。此时计算得出的  $\gamma$  便是该绒面加权出射系数。当  $n$  的值不同时,计算出的  $\gamma$  会有所不同。当  $n$  大于一个数值时,  $\gamma$  就能基本上保持一个定值。图 2 所示的曲线是经过  $(-1, 0), (0, -1), (1, 0)$  三个点的二次样条曲线,平行入射光斜率为  $-5.6$ ,  $n$  取不同的值时的计算加权出射系数  $\gamma$  的结果。通过上面可以看出当  $n > 20$  的时候计算的误差已经在  $2\%$  之内,完全满足工程的需要。因此在计算的时候,在一个光陷阱范围之内,选取二十个点计算即可求得满意的结果如表 1 所示。

表 1 取不同  $n$  值的计算结果及分析

Table 1 Calculated result and analysis by different  $n$

$n$	$\gamma$	Error /%	Time /s
5	13.85	-15.3	0.1
20	16.05	-1.79	0.3
40	16.61	1.58	0.7
200	16.27	-0.44	3.8
1000	16.38	0.19	16
5000	16.35	0	79

## 4 绒面形貌对减反射效果的影响

### 4.1 深径比及入射角的影响

如图 2 所示陷光结构中,深度  $h$  与开口宽度  $d$  比值称为该结构的深径比  $r$ 。为考察不同绒面形貌的减反射效果,计算不同深径比下加权出射系数随入射斜率的变化,在双对数坐标系下绘制成曲线图像(图 5)。从图中可以看出,深径比越大,减反射效果越好。当深径比  $r=8$  时,  $\gamma_{\min}=0.47\%$ , 此时减反射效果已经很理想。当深径比  $1 < r < 8$  时,获得最好减反射效果的入射角的斜率  $k \approx 2r$ ; 当  $k < 1$  时,最佳入射斜率  $k > 2r$ ; 当  $k > 8$  时最佳入射斜率  $k < 2r$ , 并且其他入射角的减反射效果也很好。

原因从图 6 可以看出。当  $k \approx 2r$  时,入射光与光陷阱的一边平行,光可以到达底部,有效吸光面积

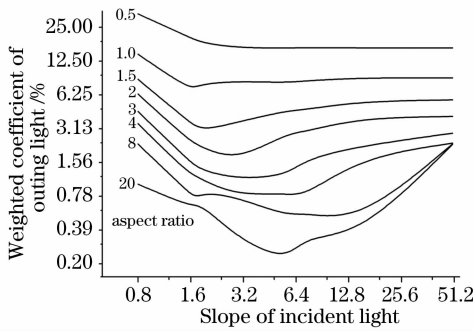


图 5 不同深径比下加权出射系数随斜率的变化

Fig. 5 Relationship of weighted coefficient of outgoing light and slope under different aspect ratio

较大;当  $k < 2r$  时,入射光很多都不能到达光陷阱的底部,有效吸光面积较小;当  $k > 2r$  时,光线几乎垂直入射,虽然有效吸光面积也很大,但是底部光线几乎垂直反射回去,反射的次数较少,因而减反射效果比  $k \approx 2r$  时差。又由于底部面积通常不会太大,因而减反射效果一般会比  $k < 2r$  时好。对于深径比较大的光陷阱结构只需要保证入射光线的入射角度不要太小即可,在接近垂直或者偏向于垂直有一定的入射斜率都可以达到很好的减反射效果;但是对于光陷阱深径比较小的时候,入射角对减反射效果的影响就很大了,入射斜率应该控制在深径比的 2 倍附近,才能发挥光陷阱的最大作用。

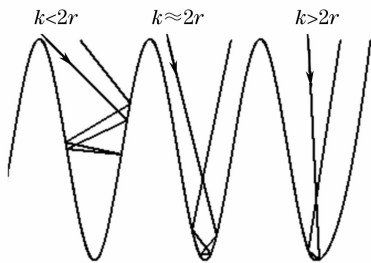


图 6 不同入射斜率光的传输

Fig. 6 Light transmission with different incident slopes

### 4.2 绒面高度的影响

绒面是由一系列不同深径比的陷光结构组成。假设深径比为  $r_i$  的加权出射系数  $\gamma_i$ ,这种陷光结构具有的采光面积占总采光面积的比例为  $\zeta_i$ ,那么整个绒面的加权出射系数  $\gamma$

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \zeta_i \gamma_i. \tag{5}$$

根据(5)式可知,图 7 所示的两种绒面含有的陷光结构深径比一样,而且他们采光面积所占的比例也相同,所以它们具有的加权出射系数  $\gamma$  是一样的。就减反射效果而言这两种陷光结构是相同的。但是,实际绒面制备过程中希望获得的是右边高度小

密度大的,一方面原因是减小了光在光陷阱空中传输的距离,可以降低光的损耗,提高光的吸收;另一方面主要原是因为高度小密度大的绒面在制作过程中可以较少地去除材料,既有利于提高制绒效率,又能增强薄硅片基体的强度。考虑到对入射光有效发电波长的因素,绒面的高度应该大于最大有效波长,即大于  $1.2 \mu\text{m}$ 。

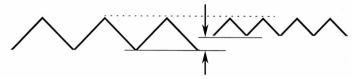


图 7 不同密度的两种绒面形貌

Fig. 7 Two fabric structures with different densities

## 5 两种绒面加权出射系数的计算

### 5.1 碱腐蚀绒面

制备单晶硅绒面常用碱腐蚀法,得到的表面(图 8)通常是比较均匀的金字塔形貌,顶角在  $70^\circ$  左右<sup>[11]</sup>。由此容易计算出它的深径比为 0.71,可以给定深径比确定轮廓线。利用图 3 流程图的方法计算不同入射角度时的加权出射系数,计算值在 9.3%~10.5%之间。实际绒面制备中由于并不所有的面上都能形成金字塔结构,所以一般生产中测量减反射率通常 11%~13%之间<sup>[2]</sup>,计算值与实际结果比较相符。

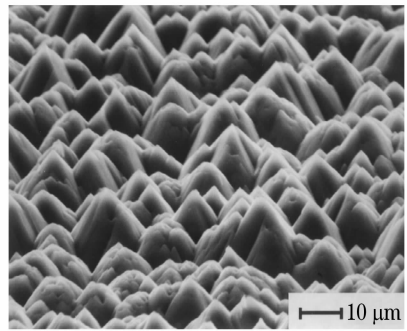


图 8 碱腐蚀表面形貌

Fig. 8 Surface structure with alkali etching

### 5.2 电火花放电加工绒面

多晶硅表面各向同性而不能使用碱腐蚀的方法制备深径比大的金字塔绒面。因而研究了很多其他的制绒方法,典型的有离子蚀刻、酸腐蚀、电化学腐蚀等的方法。电火花放电在多晶硅表面制绒的方法成本低、效果好,产生的绒面形貌深径比较大,有很好的减反射效果<sup>[1, 20]</sup>。图 9(a)是电火花加工方法下产生的表面形貌。有很多的微小孔洞,直径在  $2 \mu\text{m}$  左右;从图 9(b)的截面图中可以观察到,小孔的深径比很大,许多小孔都已经穿透侧面,因而其深

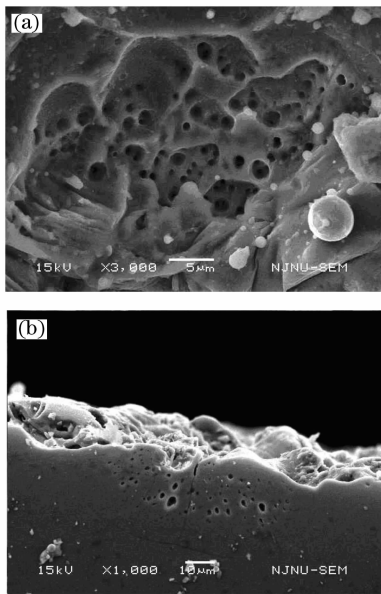


图9 电火花切割硅片微观形貌。(a)表面,(b)截面  
Fig.9 Microstructure of electrical discharge machined silicon. (a) Surface, (b) cross section

度在  $10\sim 20\ \mu\text{m}$  之间,其深径比在  $5\sim 10$  之间,计算其加权出射系数  $0.6\%\sim 2.3\%$ ,测量反射率值在  $5\%\sim 6\%$  之间。主要是因为实际的表面会存在一些没有光陷阱的结构,计算与实验是比较吻合的。微小孔洞的存在使得电火花加工制备的绒面减反射效果良好,为了更深入研究其形貌与减反射效果之间的关系,可以将它的界面曲线描绘出来,得到的加权反射系数将更精确。

### 5.3 计算值偏小的原因

通过以上两种绒面的计算发现计算值偏小,原因主要来自两方面。首先是因为绒面制备过程中,实际表面可能存在一些未制绒区域,没有陷光效果,而计算过程中却认为那部分也存光陷阱结构;其次是由于光陷阱底部的尺寸相对于入射光线波长较小,发生了镜反射,而计算过程中将它视为漫反射处理,光线的反射次数会增加,导致计算结果偏小。

## 6 结 论

通过测量分析绒面形貌可以计算出绒面的加权出射系数,并且可以反馈到绒面的制备工艺,从而进行有针对性的改进,为这一步的工作提供了理论依据。利用 VC++ 进行光线传输的模拟计算。

光陷阱尺寸过小的绒面是镜反射,将它视为光滑平面;

光陷阱的深径比越大,绒面的加权出射系数越小,减反射效果越好;

当绒面的形貌已经确定时,通常在入射角的斜率为光陷阱深径比的 2 倍时,减反射效果能达到最好,而且垂直入射比小角度入射的减反射效果要好;

光陷阱深径比相同时,虽然获得的减反射效果相似,但高度低、密度大的绒面更适合商业生产,有利于提高生产效率,增强硅片强度。

## 参 考 文 献

- 1 V. Y. Yerokhov, R. Hezel, M. Lipinski *et al.*. Cost-effective methods of texturing for silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2002, **72**(1~4): 291~298
- 2 Y. Nishimoto, K. Namba. Investigation of texturization for crystalline silicon solar cells with sodium carbonate solutions[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, **61**(4): 393~402
- 3 Sun Xiaofeng, Wang Haiyan, Lu Jingxiao *et al.*. Preparation of large area textured polycrystalline silicon [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(3): 197~200  
孙晓峰, 王海燕, 卢景霄等. 大面积多晶硅绒面的制备[J]. *半导体光电*, 2004, **25**(3): 197~200
- 4 C. Zechner, G. Hahn, W. Jooss *et al.*. Systematic study towards high efficiency multicrystalline silicon solar cells with mechanical surface texturization[C]. *Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE*, 1997. 243~246
- 5 J. J. Yu, J. Y. Zhang, I. W. Boyd. Laser-assisted mechanical texturing of magnetic media[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2001, **72**(6): 687~690
- 6 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin *et al.*. Study of silicon microstructuring using ultra-short laser pulses[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1688~1691  
李平, 王煜, 冯国进等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1688~1691
- 7 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Cao Xiansuo *et al.*. Analysis of silicon surface profile of pulsed laser bending processing [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1589~1593  
吴东江, 马广义, 曹先锁等. 脉冲激光弯曲成形技术中硅片表面形貌分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1589~1593
- 8 A. R. Burgers, J. H. Bultman, C. Beneking *et al.*. Silicon solar cells textured by reactive ion etching with natural lithography [C]. *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2000. 1427~1430
- 9 K. J. Weber, A. W. Blakers, K. R. Catchpole. The epilift technique for Si solar cells[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1999, **69**(2): 195~199
- 10 J. H. Zhao, A. H. Wang, P. Campbell *et al.*. A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, **46**(10): 1978~1983
- 11 Chen Yongsheng, Wang Haiyan, Yang Shi'e. Application of light trapping in the crystal silicon cell [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(5): 56~58  
陈永生, 王海燕, 杨仕娥. 光陷阱在晶硅太阳能电池中的应用[J]. *激光与光电*, 2004, **41**(5): 56~58
- 12 Feng Shimeng, Tian Chen, Wang Yuxing. Effect of energy monochromaticity and interfacial roughness on multilayer reflectivity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1892~1895  
冯仕猛, 田晨, 王宇兴. 入射光单色性与界面粗糙度对多层膜反射性能的不同影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1892~1895
- 13 D. Thorp, S. R. Wenham. Ray-tracing of arbitrary surface textures for light-trapping in thin silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, **48**(1~4): 295~301
- 14 Zhang Shanwen, Lei Yingjie, Feng Youqian. MATLAB

- Application in Time Series Analysis* [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2007. 86~96
- 张善文, 雷英杰, 冯有前. MATLAB在时间序列分析中的应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007. 86~96
- 15 Wang Haiyan. *Study on Materials and Structures of Light Trap on Silicon Solar Cells* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2005
- 王海燕. 硅基太阳能电池陷光材料及陷光结构的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005
- 16 Lu Jingxiao, Sun Xiaofeng, Wang Haiyan *et al.*. The texturisation of multicrystalline silicon by chemical techning[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2004, **25**(2): 138~141
- 卢景霄, 孙晓峰, 王海燕等. 化学腐蚀法制备多晶硅的绒面[J]. 太阳能学报, 2004, **25**(2): 138~141
- 17 Tan Heping, Xia Xinlin, Lin Linhua *et al.*. *Numerical Calculation of Infrared Radiation and Transmission — Calculation of Thermal Radiation* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. 36~38
- 谈和平, 夏新林, 刘林华等. 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006. 36~38
- 18 Li Ding'an. *Solar Photovoltaic Systems Engineering* [M]. Beijing, Beijing Industrial University Press, 2001. 108~109
- 李定安. 太阳能光伏发电系统工程[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001. 108~109
- 19 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1636~1640
- 刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1636~1640
- 20 J. Qian, S. Steegen, E. Vander Poorten *et al.*. EDM texturing of multicrystalline silicon wafer and EFG ribbon for solar cell application [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, **42**(15): 1657~1664