

晶硅太阳能电池上表面增透膜研究

周涛 陆晓东 李媛 张鹏 张明

渤海大学新能源学院, 辽宁 锦州 121000

摘要 利用传递矩阵法(TMM)优化设计多种介质膜材料的单层、双层增透膜结构。利用Silvaco软件的ATLAS器件仿真模块建立基于优化增透膜结构的二维晶硅太阳能电池结构。对比分析了具有不同单层、双层增透膜结构的晶硅太阳能电池的光谱响应情况。结果表明:在200~1100 nm波长范围内,由多种不同介质材料组成的双层增透膜比单层增透膜具有更小的光反射损耗;双层增透膜结构可有效降低晶硅太阳能电池的光谱响应损耗,且性能优于单层增透膜情况。其中MgF₂/ZnS双层增透膜减反效果最好,对380~1000 nm波长范围的入射光,可将上表面光反射率降低到5%以下。

关键词 薄膜; 晶硅太阳能电池; 增透膜; 反射损耗; 光生电流

中图分类号 TK514 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.103101

Upper Surface Anti-Reflection Coating on Crystalline Silicon Solar Cell

Zhou Tao Lu Xiaodong Li Yuan Zhang Peng Zhang Ming

School of New Energy, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121000, China

Abstract Single- and double-layer anti-reflection coatings with many kinds of common dielectric coat materials are designed and optimized based on the transfer matrix method (TMM). A two-dimensional crystal line silicon solar-cell structure model based on different anti-reflect coatings is established using Silvaco ATLAS device simulation software. The effect of light absorption is analyzed and evaluated by comparing the spectral responses of cells with different single and double-layer anti-reflection coatings. The results show that the crystalline silicon solar cell with double-layer anti-reflection coatings has more effective absorption spectrum when the wavelength range is from 200 nm to 1100 nm. Compared with single-layer anti-reflection coatings, the double layers composed of different dielectric materials have smaller light reflection loss, the double-layer coatings can reduce the loss of the spectral response effectively, and its performance is better than single-layer coatings. MgF₂/ZnS double-layer coatings have the best anti-reflection effect and the light reflectance can be reduced to lower than 5% for the incident light with wavelengths of 380~1000 nm.

Key word thin films; crystalline silicon solar cell; anti-reflect coating; reflection loss; photo current

OCIS codes 310.1210; 310.6860; 040.5350; 040.6040

1 引言

提高太阳能电池光电转换效率是长期以来人们一直努力解决的问题^[1-2]。影响太阳能电池效率的一个重要因素是太阳能电池上表面入射光的反射损耗。为了最大限度地降低光反射损耗,通常在太阳能电池上表面制备单层或多层光学匹配的增透膜^[3-5],因此,太阳能电池增透膜的设计和制备已成为国际上的研究热点。

截至目前,国内外有很多关于太阳能电池增透膜的研究报道。Abdullah等^[6-7]优化设计了应用于硅太阳能电池上表面的SiO₂、Si₃N₄、ZnO以及ZnS单层增透膜,并对比分析了不同厚度的单层增透膜对电池光生电流、转

收稿日期: 2014-04-18; 收到修改稿日期: 2014-05-28; 网络出版日期: 2014-09-05

基金项目: 辽宁省教育一般项目(L2012401)

作者简介: 周涛(1983—),男,硕士,讲师,主要从事晶硅太阳能电池相关技术方面的研究。

E-mail: bhuzhoutao@163.com

* 通信联系人。E-mail: lxd2211@sina.com

换效率的影响;宫臣等^[8]针对CdTe薄膜太阳能电池的光谱响应范围,基于AM1.5辐照光谱,优化设计了MgF₂/H₂/Al₂O₃三层结构增透膜,并使用电子束蒸发技术制备了该增透膜,使得太阳能电池量子效率提高7.3%;Shu等^[9]对 α -Si/ α -SiN_x/ α -SiC三层增透膜结构进行优化设计,并将其应用于高效背接触异质结太阳能电池上表面,使得最大光电流密度达到40 mA/cm²。

虽然关于增透膜设计及制备的文献报道有很多,但是针对不同增透膜对电池光谱响应影响的详细分析报道较少。因此,本文首先利用传递矩阵法(TMM)优化晶硅电池上表面的多种介质增透膜,然后利用Silvaco软件的ATLAS器件仿真模块建立二维晶硅太阳能电池结构,并计算太阳能电池的光谱响应。最后通过光反射谱和太阳能电池光生电流曲线对增透膜增强电池上表面光吸收的效果进行详细分析,并给出减反射效果最佳的双层增透膜结构。

2 不同增透膜结构光吸收效果分析与评价

2.1 不同增透膜结构的光反射谱分析

由于TMM是一种成熟的设计多层增透膜结构的方法,具有快速、准确、简单等特点,所以选择这种方法进行上表面增透膜结构的设计。设计过程中,假设各介质层均为无耗介质(即忽略各介质的介电常数虚部)。在设计和评估上表面增透膜减反射效果时,主要手段是计算不同波长入射光的反射谱以及采用不同增透膜结构时太阳能电池的光生电流曲线。

本文选择的介质膜材料包括MgF₂、SiO₂、Al₂O₃、Si₃N₄、ZnS以及ZnSe。计算过程中,各介质膜折射率及厚度的选择以最大限度降低可见光(400 nm < λ < 700 nm)的反射率为主要目的,可见光中心波长为 $\lambda = 550$ nm,选择的各介质膜折射率 n 为该波长所对应的折射率。参数选择如下: $n_{\text{Si}}=3.42$ 、 $n_{\text{air}}=1$ 、 $n_{\text{MgF}_2}=1.38$ 、 $n_{\text{SiO}_2}=1.46$ 、 $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}=1.76$ 、 $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}=2.05$ 、 $n_{\text{ZnS}}=2.4$ 及 $n_{\text{ZnSe}}=2.89$;各膜层厚度为 $L_{\text{MgF}_2}=99$ nm、 $L_{\text{SiO}_2}=94$ nm、 $L_{\text{Al}_2\text{O}_3}=78$ nm、 $L_{\text{Si}_3\text{N}_4}=67$ nm、 $L_{\text{ZnS}}=57$ nm及 $L_{\text{ZnSe}}=48$ nm[借鉴了光学镜片增透膜膜厚的设计准则^[10],将各介质膜厚度选为对可见光具有最小反射率的厚度,即介质膜厚度 $L=\lambda/(4n)$,式中 $\lambda=550$ nm]。

图1是利用TMM计算得到的入射角 $\theta=0^\circ$ 时不同增透膜组合结构的反射谱。由图1(a)单层增透膜的反射谱可见:420 nm < λ < 840 nm时,Si₃N₄和Al₂O₃单层增透膜可将裸硅表面的反射率降到10%以下。相对而言,MgF₂、SiO₂和ZnS单层增透膜的减反射效果要差一些,即 $\lambda < 450$ nm或 $\lambda > 750$ nm时,单层增透膜的反射率都大于10%。ZnSe单层减反射膜的减反射效果较差,200 nm < λ < 1100 nm时,光反射率大于18%。图1(b)为双层增透膜的光反射谱,在计算过程中,选择的双层增透膜组合为:MgF₂/ZnS、MgF₂/ZnSe、Al₂O₃/ZnS、SiO₂/ZnS以及SiO₂/ZnSe。由图1(b)可见:在400 nm < λ < 960 nm较宽波长范围内,5种不同结构的双层增透膜都可将表面光反射率降低到10%以下。380 nm < λ < 1000 nm时,SiO₂/ZnS和MgF₂/ZnS两种双层增透膜的减反射效果较好,可将光反射率降到5%以下;对于MgF₂/ZnSe、Al₂O₃/ZnS和SiO₂/ZnSe双层增透膜,440 nm < λ < 780 nm时,也可将光反射率降到5%以下。450 nm ≤ λ ≤ 750 nm时,MgF₂/ZnS双层增透膜的减反射效果最好,光反射率几乎为0。综上可知,200 nm < λ < 1100 nm时,减反射效果最好的是MgF₂/ZnS双层增透膜结构。

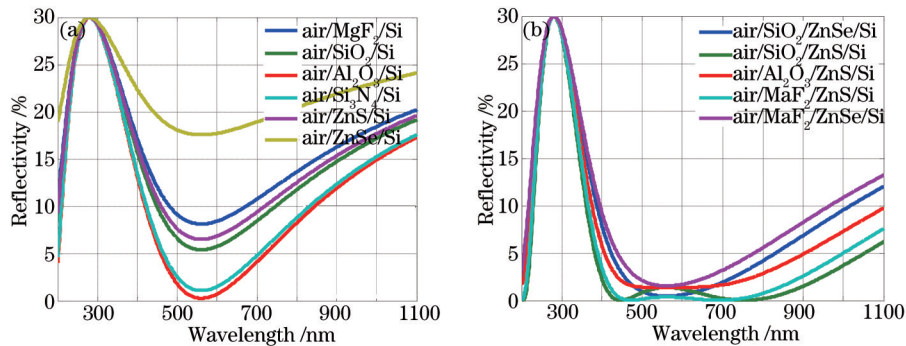


图1 (a)单层增透膜和(b)双层增透膜的反射谱

Fig.1 Reflection spectra of (a) single-layer anti-reflection coatings and (b) double-layer anti-reflection coatings

入射光倾斜入射时,增透膜仍保持较低的反射率是衡量其效果的重要指标。图2为不同入射角度时,

MgF₂/ZnS 双层增透膜的反射谱,其折射率和厚度与图 1 相同。入射光垂直入射时,入射光的横电(TE)模与横磁(TM)模是简并的,其反射谱曲线一致,而当以入射光以某一倾角入射时,二者间简并解除,呈现出不同的反射特性。由图 2 可见,随着入射角的增加,TE 模的反射率呈增加趋势。对于 TM 模的反射率,当入射角由 0° 增加到 45°,反射率略有降低的趋势,380 nm < λ < 800 nm 时,对于任何角度的入射光, TM 模的反射率都在 5% 以下;光入射角小于 45° 且 350 nm < λ < 780 nm 时,TE 模和 TM 模的反射率基本处于 10% 以下。因此这种双层膜结构具有很好的增透效果。

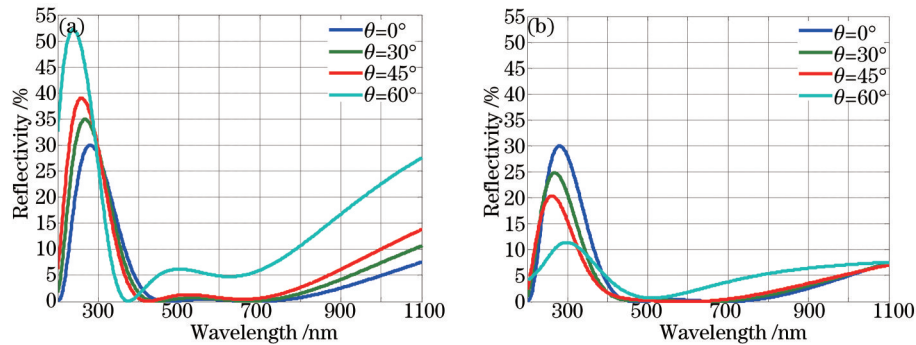


图 2 光波以不同入射角入射时 MgF₂/ZnS 双层介质增透膜的反射特性。(a) TE 模的反射情况;(b) TM 模的反射情况

Fig.2 Reflection properties of MgF₂/ZnS double layer anti-reflection coating when light is incident at different angles. (a)

Reflection of TE modes; (b) reflection of TM modes

2.2 具有不同增透膜结构的太阳能电池光生电流曲线分析

前期已对超薄晶硅太阳能电池结构进行了研究^[11-13],得到最佳的电池厚度为 10~20 μm 的结论,并对厚度为 12 μm 的超薄晶硅电池的表面织构结构进行了优化设计。优化得到的超薄晶硅电池增强因子 EF 值可达 2.25 以上,该超薄晶硅电池具有结构简单、材料消耗少,转换效率高的特点。最优超薄晶硅电池结构如图 3 所示,具体结构参数为:单元尺寸 a=750 nm,表面织构结构由沿 x 方向周期性排列的硅条构成,硅条宽度 b=450 nm,各硅条沿 y 方向的高度 h=1000 nm,选择 P 型单晶硅体区均匀掺杂,掺杂原子数为 5×10¹⁵ cm⁻³,厚度为 12 μm。Ag 背反射镜厚度为 360 nm。ARC 为增透膜结构。

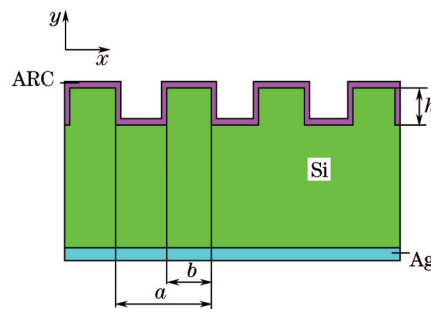


图 3 二维晶硅太阳能电池结构

Fig.3 Structure of two-dimensional crystalline silicon solar cell

当入射光照射在晶硅太阳能电池表面时,入射光能量大于硅的禁带宽度就可以使电子从价带跃迁至导带,而超过禁带宽度的那部分能量一般与晶格声子作用转变为热能,从而使这部分入射光被吸收。对晶体硅而言,禁带宽度在室温下约为 1.12 eV,对应的本征吸收限波长为 1.1 μm,即波长小于 1.1 μm 的光均可被晶硅太阳能电池吸收并产生光生电流。不同波长入射光的能量不同,在晶硅电池中的吸收深度也不一样。晶硅电池对短波长光的吸收系数较大,吸收深度较浅。对长波长光的吸收系数较小,吸收深度较深。图 4 给出了硅材料的吸收光谱和吸收深度^[14]。

图 5(a)~(b)是利用 ATLAS 器件仿真模块计算得到的晶硅太阳能电池对于不同波长入射光的光生电流曲线。图 5(c)~(e)为具有双层增透膜晶硅太阳能电池光生电流曲线在不同入射光波长范围的放大图。计算过程中采用标准地面 AM1.5 太阳光谱。图 5(a)~(e)中顶部直线表示与太阳入射光子总数等价的电流曲线,其他曲线表示被太阳能电池实际吸收的入射光子产生的电流曲线。光生电流曲线越接近光源等价电流曲线,表示

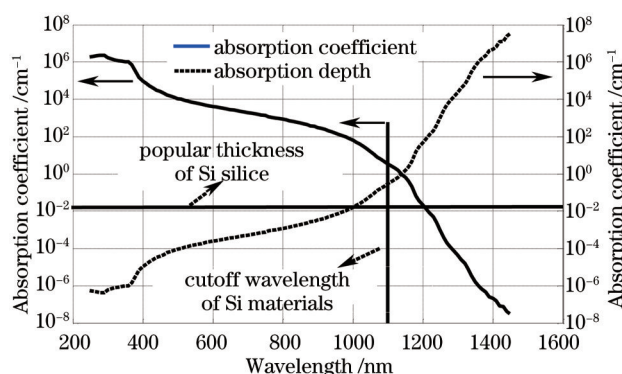


图4 硅材料的吸收光谱和吸收深度

Fig.4 Optical absorption coefficient and depth of Si materials

光谱响应损失越低,入射光利用率越高。

由图5可见,对于 $270\text{ nm} < \lambda < 370\text{ nm}$ 范围内的短波入射光,各光生电流曲线均严重偏离光源等价电流曲线。对于该高能波段范围的入射光,由于晶硅电池对其吸收系数很大(图4),因此可忽略入射光的透射损失。短波光生电流偏离光源等价电流曲线的原因:无论是单层增透膜还是双层增透膜,对该波段范围入射光的减反射效果都不理想,光反射率较大(图1),因此,在短波段,即使采用增透膜结构,晶硅电池光生电流曲线仍严重偏离光源等价电流曲线。

对于 $770\text{ nm} < \lambda < 1100\text{ nm}$ 范围内的长波入射光,随着波长增加,光生电流曲线也迅速偏离光源等价电流曲线。原因为对于该低能波段范围的长波入射光,晶硅电池对其吸收深度为 $100\sim 200\text{ mm}$ (图4)。由于本文计算过程中所采用的晶硅电池厚度为 $12\text{ }\mu\text{m}$,长波入射光需要通过电池内部上表面和背面多次反射回硅片才能被吸收。入射光波长越长,需要被反射的次数越多,损失越严重。因此,在长波段,波长越大,光生电流曲线偏离光源等价电流曲线越严重。

对于 $370\text{ nm} < \lambda < 770\text{ nm}$ 范围内的入射光,由于该波段范围入射光的吸收深度为 $0.1\sim 15\text{ mm}$ (图4),因此,该波段入射光不经晶硅电池内部反射而直接被电池完全吸收。对于无增透膜[图5(a)中的air/Si曲线]的情况,各波长入射光产生的光生电流明显比具有增透膜结构的晶硅电池的光生电流小得多,说明如果不采用增透膜结构,入射光反射损失非常严重。对于单层增透膜的情况,各光生电流曲线均在中心波长(550 nm)附近,比较接近光源等价电流曲线,离中心波长越远,光生电流曲线越偏离光源等价电流曲线,表明单层增透膜仅对中心波长附近的入射光具有较好的减反效果。对于双层增透膜的情况,在较宽的波长范围($370\text{ nm} < \lambda < 770\text{ nm}$)内,光生电流相比于单层增透膜情况有了明显提高,光生电流曲线非常接近光源等价电流,说明双层增透膜在较宽波长范围内可以更加有效地降低光反射损耗,提高入射光的吸收率,增加为光生电流做贡献的光子数。在 $370\text{ nm} < \lambda < 770\text{ nm}$ 波段,光生电流曲线与图1增透膜光反射谱曲线基本吻合,即入射光反射率越低,该波长对应的光生电流值越接近光源等价电流值。对于减反效果最好的 MgF_2/ZnS 双层增透膜,其光生电流曲线最接近光源等价电流曲线。因此,对于太阳电池来说,欲获得较高的光谱响应,采用减反特性较好的增透膜是非常必要的。

3 结 论

通过对比不同单层、双层增透膜的光反射谱和晶硅太阳电池的光生电流曲线,对所设计的不同增透膜结构的光吸收效果进行分析和评价。结果表明: MgF_2/ZnS 、 MgF_2/ZnSe 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnS}$ 、 SiO_2/ZnS 以及 SiO_2/ZnSe 双层增透膜比单层增透膜具有更小的光反射损耗。在 $400\text{ nm} < \lambda < 960\text{ nm}$ 较宽波长范围内,这5种双层增透膜都可将表面光反射率降低到10%以下。200 nm < λ < 1100 nm时,减反射效果最好的是 MgF_2/ZnS 双层增透膜结构。

晶硅电池采用双层增透膜后,在较宽的波长范围($370\text{ nm} < \lambda < 770\text{ nm}$)内,可以更加有效地降低光反射损耗,提高入射光的吸收率,增加为光生电流做贡献的光子数,使得光生电流相比于单层增透膜情况有明显提高,光生电流曲线非常接近光源等价电流。因此,在晶硅电池制备过程中,可通过电子束离子束蒸镀、

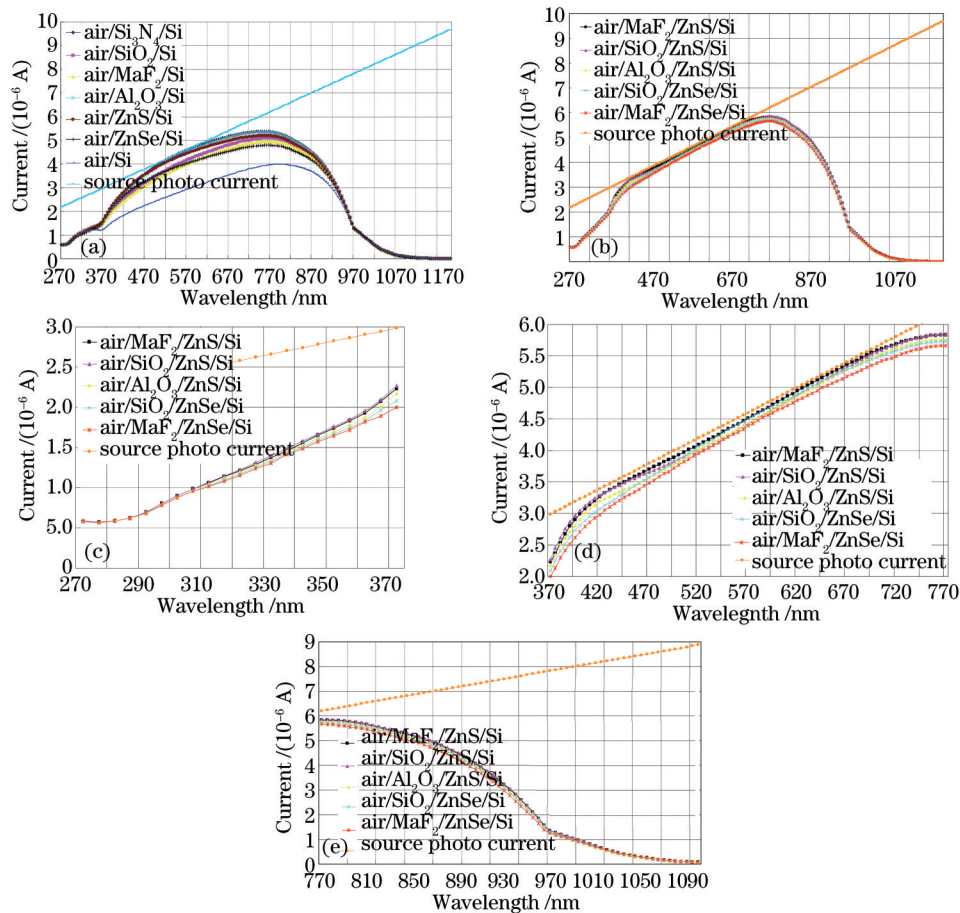


图5 晶硅太阳能电池对于不同波长入射光的光生电流曲线。(a) 无增透膜和单层增透膜情况; (b) 双层增透膜情况; (c) 270~370 nm 双层增透膜; (d) 370~770 nm 双层增透膜; (e) 770~1100 nm 双层增透膜

Fig.5 Photo current curves of crystalline silicon solar cells for incident light of different wavelengths. (a) Coatings without anti-reflection and single-layer anti-reflection coatings; (b) double-layer anti-reflection coatings; (c) 270~370 nm double-layer anti-reflection coating; (d) 370~770 nm double-layer anti-reflection coatings; (e) 770~1100 nm double-layer anti-reflection coatings

化学气相沉积以及磁控溅射等多种成熟的薄膜制备技术,在太阳电池表面制备 MgF_2/ZnS 双层增透膜来降低太阳电池的光反射损耗,提高太阳电池的光电转换效率,进一步降低晶硅太阳电池的发电成本。

参考文献

- 1 Qu Xiaosheng, Zhang Sisi, Xiong Liling, *et al.*. Research progress of quantum-dot intermediate band solar cell[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020008.
屈晓声, 张思思, 熊丽玲, 等. 量子点中间带太阳电池的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020008.
- 2 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Zhang Ming, *et al.*. Crystalline silicon solar-cell development status and trends[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030002.
周涛, 陆晓东, 张明, 等. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030002.
- 3 Xiao Xiangjiang, Tu Jielei. Analysis of reflectance performance of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ antireflection coating on GaAs substrate[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2012, 41(1): 69-73.
肖祥江, 涂洁磊. GaAs 基底 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 减反射膜的反射率性能分析[J]. 人工晶体学报, 2012, 41(1): 69-73.
- 4 Yu Yuebo, Meng Fanying, Guo Qunchao, *et al.*. Application of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ dlar coation on solar cells[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30(11): 1465-1468.
余跃波, 孟凡英, 郭群超, 等. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 双层减反膜在太阳电池上的应用[J]. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1465-1468.
- 5 Zhang Chao, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.*. Texturing process with 355 nm laser for amorphous silicon film solar cell[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0707004.

- 张超, 张庆茂, 郭亮, 等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光制绒工艺[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0707004.
- 6 H Abdullah, A Lennie, I Ahmad. Modelling and simulation single layer anti-reflective coating of ZnO and ZnS for silicon solar cells using Silvaco software[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(6):1180-1184.
- 7 A Lennie, H Abdullah, S M Mustaza. Photovoltaic properties of Si₃N₄ layer on silicon solar cell using silvaco software[J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 29(4): 447-453.
- 8 Gong Chen, Zhang Jingquan, Feng Lianghuan, *et al.*. The optimization of triple layer anti-reflection coatings and its application on solar cells[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(4): 603-606.
- 宫臣, 张静全, 冯良桓, 等. 三层减反射膜的模拟及其在太阳能电池中的应用[J]. 功能材料, 2013, 44(4): 603-606.
- 9 B Shu, U Das, L Chen, *et al.*. Design of anti-reflection coating for surface textured interdigitated back contact silicon hetero-junction solar cell[C]. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, 2012. 002258-002262.
- 10 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principles of Optical Films[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990. 35.
- 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 35.
- 11 Lu Xiaodong, Lun Shuxian, Zhou Tao, *et al.*. Ultrathin-Si solar cell based on the light trapping schemes of one dimensional photonic crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(4): 630-634.
- 陆晓东, 伦淑娴, 周涛, 等. 基于一维光子晶体陷光的超薄晶硅太阳能电池研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(4): 630-634.
- 12 Lu Xiaodong, Lun Shuxian, Zhou Tao. Upper-surface light-trapping structures on ultra-thin crystalline silicon solar cells(I)[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(11): 2066-2073.
- 陆晓东, 伦淑娴, 周涛. 超薄晶硅太阳能电池的上表面陷光结构研究(I)[J]. 光电子·激光, 2012, 23(11): 2066-2073.
- 13 X Lu, S Lun, T Zhou, *et al.*. A low-cost high-efficiency crystalline silicon solar cell based on one-dimensional photonic crystal front surface textures[J]. Journal of Optics, 2013, 15(7): 075705.
- 14 M A Green, M Keevers. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K[J]. Progress in Photovoltaics, 1995, 3(3): 189-192.