

超薄晶硅太阳电池的吸收损耗

陆晓东 张鹏 赵洋 王泽来 吴元庆 张宇峰 周涛

渤海大学新能源学院, 辽宁 锦州 121013

摘要 利用频域有限差分法,分析了两种典型晶硅电池结构的 Ag 背反镜的吸收损耗。研究表明:平板型晶硅电池 Ag 背反镜的损耗主要是由本征吸收和导模共振吸收引起,而表面等离子体共振吸收使 TM 模的吸收峰峰值大于 TE 模的吸收峰峰值;织构型的晶硅电池内部光场分布复杂,可在光垂直入射情况下,使 TE 模和 TM 模均在有源层中出现较强的导模共振效应,且 TM 模还可在 Ag 背反镜中激励起等离子体共振效应,从而使织构型晶硅电池 Ag 背反镜的吸收谱表现为多峰值特性,且其吸收峰峰值大于平板型晶硅电池的吸收峰峰值。

关键词 光学器件; 晶硅电池; 背反镜; 光吸收; 频域有限差分法

中图分类号 TK514 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060402

Absorption Losses of Ultrathin Crystalline Silicon Solar Cells

Lu Xiaodong Zhang Peng Zhao Yang Wang Zelai

Wu Yuanqing Zhang Yufeng Zhou Tao

Collage of New Energy, Bohai Univeristy, Jinzhou, Liaoning 121013, China

Abstract The absorption losses of the Ag back reflector in two typical silicon solar cells have been analyzed by frequency domain finite difference method. The results show that, in flat silicon solar cell, the losses of Ag back reflector are mainly caused by intrinsic absorption and the oscillation absorption of guided modes. The absorption peaks of TM modes caused by surface plasma oscillation are larger than those of TE modes. In the textured crystalline silicon cell, the distribution of light are complex, and strong guided modes oscillation in the active layer can be introduced by normally incident light of both TE and TM modes. Strong surface plasma oscillation in Ag back reflector can be produced by TM modes. Therefore, in the textured crystalline silicon cell, the absorption spectra show multi-peak characteristics and the values of absorption peaks are larger than those in the flat type crystalline silicon cell.

Key words optical devices; crystalline silicon solar cell; back reflector; light absorption; frequency domain finite difference method

OCIS codes 040.5350; 230.0040; 260.3910; 160.3900

1 引言

超薄晶硅电池具有成本低、效率高、稳定性好等优点,已被视为晶硅电池未来发展的主要方向之一^[1]。目前,研究人员已制备出晶片厚度(有源层)在十几至几十微米厚度范围内的超薄晶硅电池,且部分电池效率甚至超过 20%^[2]。由于超薄晶硅电池的有源层厚度很薄,光吸收能力较弱,所以其效率很难达到厚晶硅电池(晶片厚度 200 μm 左右)的水平^[2-6]。

为提高电池效率,超薄晶硅电池常采用各种高效陷光结构^[5-9]。在这些陷光结构中,金属背反镜(BR)(即底面金属反射镜)是常采用的陷光结构单元,其主要作用是:对单程通过有源层不能完全吸收的光场,产生有效的反射和散射作用,从而有效提高晶硅电池的光电流密度^[10-11]。在增强有源层吸光作用的同时,金属

收稿日期: 2016-01-04; **收到修改稿日期:** 2016-02-18; **网络出版日期:** 2016-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(11304020)、辽宁省教育厅一般项目(L2012401)

作者简介: 陆晓东(1977—),男,博士,副教授,主要从事高效晶硅太阳电池及功率器件方面的研究。

E-mail: lxd2211@sina.com

BR 对入射光场也会产生一定的吸收损耗。一般金属 BR 的吸收损耗很小,但在有源层很薄时,金属 BR 吸收损耗的影响将显著增强,所以在超薄有源层的电池结构设计中必须充分考虑^[12]。

目前,时域有限差分法(FDTD)是评估金属 BR 吸收损耗的主要方法,且评估过程中,先假设有源层介质无损(即在 FDTD 算法中,假设介电常数的虚部为零),然后利用电池结构的反射谱获得金属 BR 的吸收性质^[4-6,12]。研究表明^[11-12]:金属 BR 的吸收主要包括金属的本征吸收、有源层导模振荡吸收和表面等离子体共振吸收三部分;金属 BR 的吸收损耗不仅与光场性质、材料属性有关,而且还与具体的陷光结构有关。由于超薄晶硅电池的有源层较其他薄膜电池要厚很多,所以尽管在各类薄膜电池领域对金属 BR 吸收损耗的研究很多,但在超薄晶硅电池领域对金属 BR 吸收损耗的研究还很少^[4-6,11-13]。本文主要采用二维频域有限差分法(FDFD)对超薄晶硅电池常用的 AgBR 的吸收情况进行评估。与 FDTD 相比,FDFD 的优势在于易于分辨共振频率、便于控制入射光场方向等,利用 FDFD 的这种特点,可十分方便地研究超薄晶硅电池的导模振荡吸收和等离子体振荡吸收等现象^[13]。

2 数值计算方法和电池结构模型

2.1 数值计算方法

FDFD 是一种处理复杂电磁场问题的严格方法^[15]。这种方法先利用 Yee 氏网格,将麦克斯韦方程在频域表示成差分形式;然后,结合计算空间的格点分布情况,将差分形式的麦克斯韦方程表达成一系列线性代数方程;最后将激发源引入到线性代数方程中,求取稳态情况下的场量,具体求解过程参见文献[15-16]。求解时,先设振幅为“1”的平面波以某一角度入射,在感兴趣的位置提取入射光场的振幅,然后通过傅里叶变换,即可获得单一波长的谱信息。在距太阳电池上、下表面一段距离处,设置光场的接收平面,则可得到透射率 T 和反射率 R 的信息,而介质的吸收几率可通过下式得到:

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

计算过程中,格点分辨率选为最小波长或最小特征尺寸二者较小值的 $1/10$,扫描波长的分辨率为 1 nm 。

2.2 电池结构

选用两种典型的晶硅电池结构,具体如图 1 所示,其中 h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 分别表示增透膜(ARC)厚度、有源层厚度、AgBR 厚度和织构结构的高度, L 表示织构结构的周期, α 为织构角度。图 1(b)中, $h_5 = h_1 / \cos\theta$ 。在织构结构中,参数 L 及内部介质的占空比与织构结构的设计波长有关(设计波长与有源层材料的吸收系数及厚度有关),参数 h_4 和 α 与织构结构的陷光效果有关。在电池结构设计过程中,一般需对这些参数进行整体优化,才能实现最优的陷光效果。计算过程中,采用文献[13]中提供的基本数据,即 ARC 为 SiO_2 和 Si_3N_4 双层介质膜构成,其厚度 h_1 为 161 nm (即 SiO_2 层厚 94 nm , Si_3N_4 层厚 67 nm);有源层厚度 $h_2 = 11 \mu\text{m}$;Ag BR 的厚度 $h_3 = 360 \text{ nm}$;织构高度 $h_4 = 1 \mu\text{m}$; $\alpha = 55.78^\circ$, $L = 850 \text{ nm}$,织构结构的占空比为 0.8 , SiO_2 的折射率为 1.54 , Si_3N_4 折射率为 2.05 。此外,Ag 和晶硅材料的折射率数据源自专业数据网站,太阳辐射功率密度采用 ASTM Global Tilt 的太阳辐射数据。

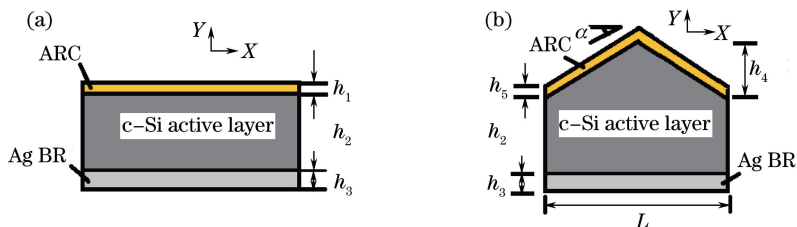


图 1 晶硅太阳能电池结构模型。(a) 平板型晶硅电池;(b) 织构形式的晶硅电池

Fig. 1 Crystalline silicon solar cell structural model. (a) Flat crystalline silicon cell; (b) textured crystalline silicon cell

2.3 光场的入射角和 Ag BR 的吸收损耗

图 1(a)和图 1(b)的电池结构可视为平板波导结构和上表面带周期光栅结构的波导结构。对两种电池结构而言,导模形成的条件为:光在 Y 方向满足驻波条件,在 X 方向存在不为零的波矢分量。两种电池结构的差别在于:平板电池结构对外部入射光的耦合主要借助于 ARC 实现;织构型电池结构对外部入射光的耦

合主要借助于织构结构实现。在两种电池结构中,平板型电池内存在最大的折射角 θ_{in} [如图 2(a)所示, θ 代表从空气入射到晶硅电池的入射角, θ_{in} 为外部光入射到金属 BR 的实际入射角,对晶硅材料而言, θ_{in} 的最大值为 16°];如图 2(b)所示,织构型电池内光场的衍射光为主,更易满足导模形成条件。根据有源层和 Ag BR 的吸收性质,可知:导模主要集中在长波段,即晶硅材料的弱吸收区;由于 Y 向有源层的厚度远大于光波长,所以图 1 的电池结构实际为多模波导。在形成导模的波长处,光场将多次与 Ag BR 接触而产生较强的吸收损耗,反之光场主要以图 1 波导结构的泄露模式存在,将很快从电池顶部逃逸掉,从而产生较小的 Ag BR 吸收损耗。

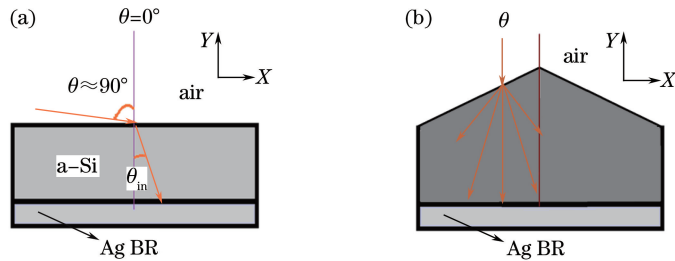


图 2 (a) 平板型晶硅电池中光的折射过程; (b) 织构型晶硅电池中光的衍射过程

Fig. 2 (a) Refraction of light in flat crystalline silicon cells; (b) diffraction of light in textured crystalline silicon cells

为了评估 Ag BR 的损耗情况,本课题组先假设晶硅材料的折射率虚部为 0,计算吸收光谱,然后依据入射光单程通过有源层(存在吸收)的透射谱,获得实际 Ag BR 的吸收谱,即:

$$A_{BR}(\lambda) = [1 - R_{BR}(\lambda)] \times T_{sp}(\lambda), \quad (2)$$

式中, R_{BR} 为有源层不存在吸收时,非晶硅电池结构的反射谱; T_{sp} 为光单程通过电池有源层后的透射谱(注意此透射谱为有源层存在吸收时的透射谱)。根据实际晶硅电池内的光传输过程不难发现:(2)式仅考虑了光场单程通过有源层的吸收,忽略了入射光经 Ag BR 反射后在有源层内发生的二次及以上吸收过程,从而使计算结果较 Ag BR 的实际吸收值略大。

3 结果与讨论

3.1 平板型晶硅电池中 Ag BR 的吸收损耗

图 3 给出了平板型晶硅电池的多种吸收谱。图 3(a)为入射角 $\theta = 0^\circ$ 时,不同情况下的吸收谱,其中 Ag mirror 曲线表示入射光不经电池结构,直接入射到 Ag 反射镜上的吸收谱; whole absorption 曲线表示图 1(a)中晶硅电池的实际吸收谱; only Ag BR 曲线表示晶硅有源层不存在吸收(即晶硅材料折射率的虚部为 0)时,计算得到的 Ag BR 吸收谱; real absorption 曲线表示利用 2.3 节中的方法计算得到的实际晶硅电池 Ag BR 吸收谱。

由图 3(a)可见:光垂直入射时,TE 模和 TM 模发生简并,且入射光在 Y 方向不存在波矢分量, TM 模仅能激励起等离子振荡,但无法形成传输的等离子波; only Ag BR 曲线的峰值是由有源层导模振荡和等离子振荡共同作用产生, only Ag BR 曲线出现多个振荡峰,并出现对 Ag mirror 曲线的偏离; real absorption 曲线保持了 only Ag BR 曲线的吸收峰,但其振荡幅度受到入射光初次通过有源层透射谱的影响,吸收峰的幅度较 only Ag BR 曲线小。由图 3(b)可见:在光场倾斜入射时,由于 TE 模不能激励起等离子体共振效应,所以其吸收谱出现的吸收峰主要是由有源层内导模振荡引起;当入射角较大时,由于 Ag BR 的古斯汉欣相移的作用,导致不同角度的吸收峰间出现相对移动的现象,且移动方向为长波方向。由图 3(c)可见:由于受入射角的限制 $\theta_{in} \leq 16^\circ$, TM 模激励起的表面等离子体波的传播常数很小,所以 TM 模的吸收峰保持了 TE 模吸收峰的基本特征,如当 $\theta = 60^\circ$,在波长 1100~1200 nm 范围, TE 模和 TM 模均出现 15 个吸收峰; TM 模的吸收峰值略大于 TE 模的吸收峰值,且在入射角 θ 值较大时,其峰值较 TE 模增加得十分明显; TM 模的吸收峰向长波方向移动得更为明显。由图 3(b)和图 3(c)对比可见: TE 模与 TM 模均出现了多个共振吸收峰,且吸收率基本小于 10%,对如图 3(a)所示的 Ag mirror 曲线出现了较大的偏移。

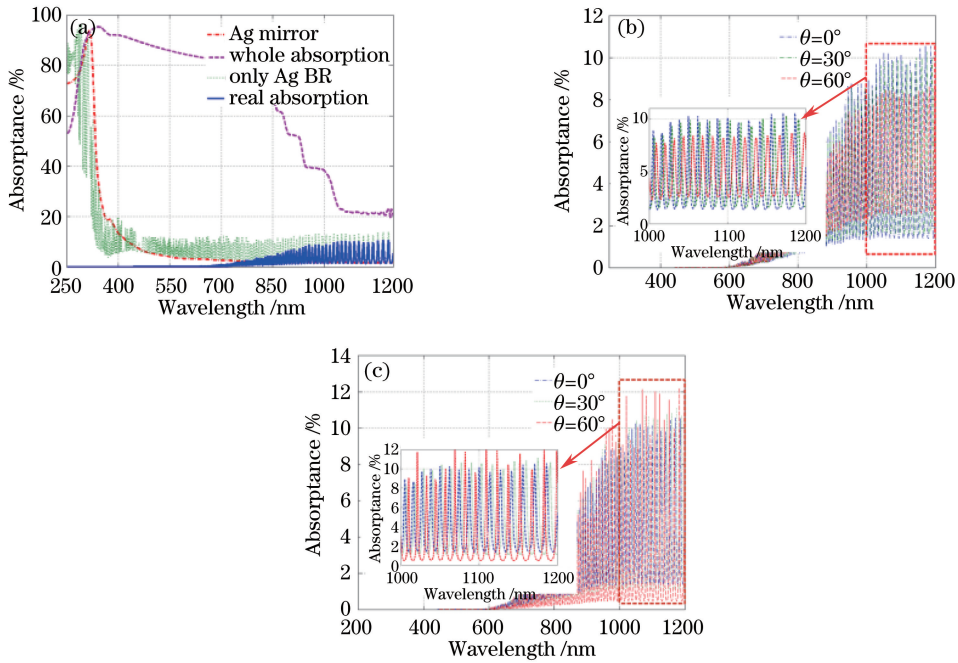


图3 平板型晶硅电池的吸收情况。(a) 光垂直入射时,不同情况下的吸收损耗情况;
(b) TE 模的 Ag BR 吸收损耗谱;(c) TM 模的 Ag BR 吸收损耗谱

Fig. 3 Absorption of flat crystalline silicon cell. (a) Absorption losses of normally incident light under different conditions;
(b) absorption spectra of Ag BR for TE modes; (c) absorption spectra of Ag BR for TM modes

3.2 织构型晶硅电池中 Ag BR 的吸收损耗

图4为入射光场垂直入射时,两个特殊波长的TE模和TM模在晶硅电池内部的分布情况。图4(a)和图4(b)的坐标值是利用计算空间的网格数及空间步长值给出,各区域边界依据赋值后介电常数的分布边界给出,相应的场强值用各图右侧色带的颜色表示。图4(c)和图4(d)为图4(a)和图4(b)在Ag BR附近的局部放大图。由图4(a)和图4(b)可见:对织构型晶硅电池结构而言,入射光经晶硅电池上表面织构结构后,将会在源层中产生明显的衍射效应,并使入射到Ag BR的光出现较大入射角的情形;由于有源层上表面出现布拉格反射,下表面Ag BR反射,此时导模振荡在有源层内部形成明显的干涉图样;在靠近有源层的Ag BR表面,TE模呈现出明显的衰减趋势,即光场在Ag BR内为倏逝波[如图4(c)所示],而TM模却呈现出较强振荡特性,表明Ag BR表面形成表面等离子体波[如图4(d)所示]。

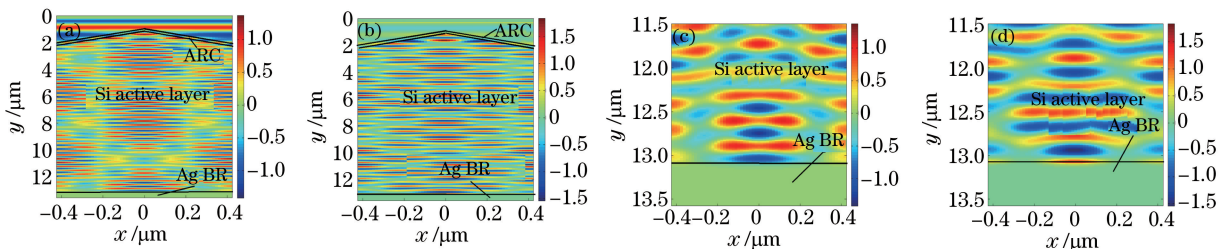


图4 光垂直入射时,晶硅电池内形成的典型光场分布。(a) $\lambda = 1005$ nm时,TE模;
(b) $\lambda = 1052$ nm时,TM模;(c) (a)的局部放大图;(d) (b)的局部放大图

Fig. 4 Typical distributions of normally incident light inside crystalline silicon cell. (a) TE mode, $\lambda = 1005$ nm;
(b) TM mode, $\lambda = 1052$ nm; (c) partial enlargement figure of (a); (d) partial enlargement figure of (b)

图5为织构型晶硅电池Ag BR的吸收谱和入射光单程通过有源层后的透射谱,其中图5(a)和图5(b)的左侧纵轴代表Ag BR的吸收谱,右侧纵轴代表入射光单次通过有源层后的透射谱。由图5可见:图1(b)所示结构的单程完全吸收波长范围为250~600 nm;当入射角小于30°时,TE模和TM模的单程不能完全吸收的光场(波长范围600~1200 nm)具有几乎相等透射率(约100%);当入射角大于30°时,在TE模的透

射率小于 TM 模的透射率;当入射角大于为 60° ,且光波长处于 $1000\sim 1200\text{ nm}$ 时,在 TE 模的透射率接近 85% ,TM 模的透射率接近 95% 。

对 TE 模而言,因不存在等离子体振荡吸收,所以其损耗主要是由 Ag BR 的本征吸收和有源层导模振荡吸收引起。由于织构型晶硅电池上表面织构结构对入射光场产生了明显的衍射作用[如图 2(b)和图 4(a)],所以与平板形式的晶硅电池相比,图 5(a)中 TE 模吸收谱出现了更多的导模振荡吸收峰,且其吸收峰的峰值比平板型晶硅电池的吸收峰有明显增加。对 TM 模而言,除了本征吸收和有源层导模共振吸收外,还存在较强的等离子体共振吸收[如图 4(b)所示],所以其吸收谱[图 5(b)]较图 5(a)和图 3(b)表现出现了较大的差异,即出现了更多的吸收峰,且长波段的吸收损耗明显增加。此外,对比图 3 和图 5 还可以看出:在临界波长右侧的长波区域,织构型晶硅电池的 Ag BR 具有更大的吸收损耗。

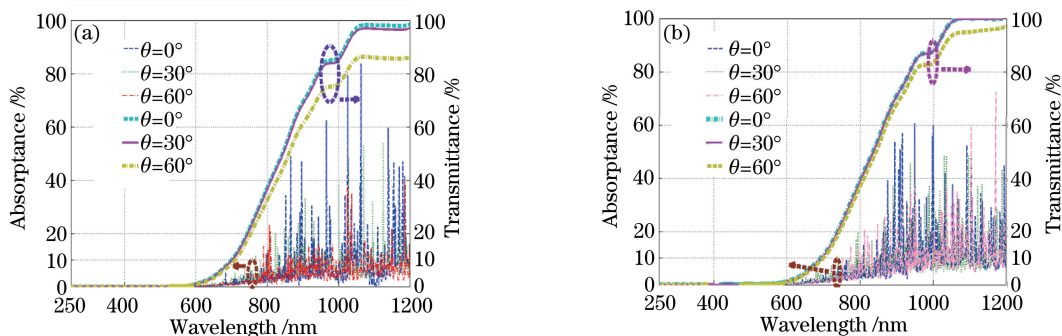


图 5 织构型晶硅电池 Ag BR 的吸收谱和入射光单次通过有源层的透射谱。(a) TE 模; (b) TM 模

Fig. 5 Absorption spectrum of Ag BR in textured crystalline silicon cell and the transmission spectrum of light in a single passing through active layer. (a) TE mode; (b) TM mode

4 结 论

系统分析了平板型和织构型晶硅电池 Ag BR 的吸收损耗,具体结论如下:平板型晶硅电池 Ag BR 的吸收损耗主要由本征吸收、有源层导模共振吸收和离子体共振吸收组成,但由于平板型晶硅电池可获得的最大入射角 $\theta_{in}\approx 16^\circ$,所以其 TM 模只能激励起较弱的等离子体共振效应;织构型非晶硅电池 Ag BR 吸收损耗主要受有源层导模共振吸收和等离子体共振吸收影响,TE 模和 TM 模的吸收谱均呈现多吸收峰特性,且 TM 模 Ag BR 的吸收损耗大于 TE 模 Ag BR 的吸收损耗。

参 考 文 献

- 1 Kowalczewski P, Andreani L C. Towards the efficiency limits of silicon solar cells: how thin is too thin[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 143: 260-268.
- 2 Willeke G P. Thin crystalline silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2002, 72: 191-200.
- 3 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.
- 4 Reuter M, Brendle W, Tobail O, *et al.*. 50 μm thin solar cells with 17.0% efficiency[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009, 93: 704-706.
- 5 Jeong S, McGehee M D, Cui Y. All-back-contact ultra-thin silicon nanocone solar cells with 13.7% power conversion efficiency[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2950.
- 6 Hilali M M, Saha S, Onyegam E, *et al.*. Light trapping in ultra-thin 25 μm exfoliated Si solar cells[J]. Applied Optics, 2014, 53(27): 6140-6147.
- 7 Soumyadeep M, Linwei Yu, Martin F, *et al.*. High efficiency and stable hydrogenated amorphous silicon radial junction solar cells built on VLS-grown silicon nanowires[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 118: 90-95.
- 8 Arvind S, Etienne M, Christophe B. Technological status of plasma-deposited thin-film silicon photovoltaics[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 119: 311-316.

- 9 Lin Y J, Corsin B, Mathieu B, *et al.*. Amorphous Si thin film based photocathodes with high photovoltage for efficient hydrogen production[J]. *Nano Lett*, 2013, 13(11): 5615-5618.
- 10 Fisker C, Pedersen T G. Optimization of imprintable nanostructured a-Si solar cells: FDTD study[J]. *Opt Express*, 2013, 21(S2): A208-A220.
- 11 Sainidou R, Abajo F J G. Plasmon guided modes in nanoparticle metamaterials[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4499-4506.
- 12 Yang X, Zhou S, Wang D, *et al.*. Light trapping enhancement in a thin film with 2D conformal periodic hexagonal arrays [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10: 284.
- 13 Lu Xiaodong, Zhang Peng, Zhou Tao, *et al.*. Optimal design of ultrathin c-Si solar cell with light trapping structure of one dimensional photonic crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(11): 2919-2934.
陆晓东, 张 鹏, 周 涛, 等. 基于一维光子晶体陷光的超薄晶硅太阳能电池光学结构优化[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(11): 2919-2934.
- 14 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Li Yuan, *et al.*. Upper surface anti-reflection coating on crystalline silicon solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 103101.
周 涛, 陆晓东, 李 媛, 等. 晶硅太阳能电池上表面增透膜研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 103101.
- 15 Zhao Yang, Wang Zelai, Zhang Peng, *et al.*. Application of finite difference method in simulation of solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 030401.
赵 洋, 王泽来, 张 鹏, 等. 有限差分法在太阳能电池性质仿真中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 030401.
- 16 Lu X D, Lun S X, Zhou T, *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.