

# 亚元对称双光栅增强非晶硅薄膜太阳能电池吸收率

安倩 侯金 王文珍 杨春勇 钟志有

中南民族大学电子信息工程学院智能无线通信湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 提出在非晶硅薄膜太阳能电池吸收层的上下表面采用亚元对称光栅来提高薄膜电池吸收率。采用严格耦合波分析法研究发现,对于厚度为400 nm的非晶硅薄膜,在600~750 nm波长范围内,这种新型光栅能有效地减少从上表面反射的入射光和从下表面透射的泄漏光,并增强吸收层的吸收率。仅在上表面采用亚元对称光栅,优化后的吸收率可以增强71%;仅在下表面采用光栅,吸收率增强24%;在上下表面同时采用光栅,太阳能电池的吸收率可以增强81%。本研究为设计易于制作的具有高吸收率的薄膜太阳能电池提供了新的思路。

**关键词** 光电子学; 光栅; 硅薄膜太阳能电池; 吸收增强; 严格耦合波分析

**中图分类号** TN302 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0325001

## Symmetric Substructure Dual Gratings for Enhancement of Light Absorption in Amorphous Silicon Film Solar Cells

An Qian Hou Jin Wang Wenzhen Yang Chunyong Zhong Zhiyou

Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, College of Electronics and Information Engineering, South-Central University For Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** Symmetric substructure dual gratings on the upper and bottom surface of the absorption layer are proposed to enhance the sunlight absorption for amorphous silicon thin-film solar cells. Using rigorous coupled wave method, it is found that in 600~750 nm wavelength range, the new gratings can effectively reduce the reflection from the upper surface of the incident light, the leakage transmittance from the bottom surface, and can enhance the absorption of amorphous silicon thin film solar cells with a thin absorption layer thickness of 400 nm. When the grating is adopted only at the upper surface, the optimized absorption can be increased by 71%; when it is adopted only at the bottom surface, the absorption can be increased by 24%; while for the case in which the gratings are adopted at both surfaces, the absorption can be enhanced by 81%. The study can provide new idea on designing high absorption and easily fabricated solar cells.

**Key words** optoelectronics; gratings; silicon thin film solar cells; absorption enhancement; rigorous coupled wave analysis

**OCIS codes** 250.5590; 050.1950; 230.1950; 310.6628; 350.4238; 350.6050

## 1 引言

非晶硅薄膜太阳能电池具有用料省、成本低和适于大规模生产等优点,在光伏产业中备受青睐<sup>[1-2]</sup>,但厚度薄却也导致了其光电转换效率不高<sup>[3-13]</sup>、推广受限等问题。解决此类问题以提高薄膜电池效率,目前主要有两种途径:1)是在材料生长中形成多异质叠层,从而提高光子转换为电子的内量子效率<sup>[10]</sup>;2)是在电池表面

收稿日期: 2015-05-11; 收到修改稿日期: 2015-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(11504435, 11147014)、湖北省自然科学基金(2013CFA052)、中南民族大学中央高校基本科研业务费(CZW15044)

作者简介: 安倩(1993—),女,本科生,主要从事光栅方面的研究。E-mail: qianan1015@foxmail.com

导师简介: 侯金(1981—),男,博士,副教授,主要从事光电器件方面的研究。

E-mail: houjin@mail.scuec.edu.cn(通信联系人)

采用微纳结构来增强陷光能力,从而增进光子参与光电转换过程的机率<sup>[3-13]</sup>。采用表面陷光结构不仅能提高吸收率,还能减少材料用量、降低成本,因而是当前研究的一个热点<sup>[3-13]</sup>。

光栅作为经典的表面结构,被很自然地作为太阳电池表面的微纳结构,用来提高吸收率。1995年,常规介质光栅、闪耀光栅和台阶型光栅就被提出用于太阳电池的宽带抗反射层和底部陷光结构<sup>[14]</sup>。此后,各国研究人员又先后提出了吸收层后表面光栅<sup>[15]</sup>、前表面光栅<sup>[16]</sup>、周期塔形光栅<sup>[17-18]</sup>、周期反向塔形光栅<sup>[19-20]</sup>、表面等离子体激元金属光栅<sup>[21]</sup>、双填充因子的介质光栅<sup>[22]</sup>、慢光光栅<sup>[23]</sup>、正弦结构的广角吸收光栅<sup>[24]</sup>和上下表面均引入光子晶体的双光栅<sup>[25]</sup>等形态各异的表面光栅结构来进一步提高太阳电池吸收率。其中,塔形光栅因能在宽谱范围内获得较高的吸收率而被广泛研究<sup>[16-20]</sup>,但其结构同时存在着表面内和垂直表面方向上的尺寸变化,为大规模制造这种电池带来了困难。而二元台阶光栅的光栅齿高度固定,并且没有垂直方向上的连续改变,因此结构相对简单,在制造上也较为容易<sup>[22,25]</sup>。所以,找到一种新型的光栅结构,使之既保持二元光栅台阶状的结构特征,又能等效或逼近塔形光栅与入射阳光作用的过程,将能在维持高吸收率的同时获得容易制作的优点。基于上述考虑,利用等效折射率的观点,本文提出将塔形光栅在垂直高度上连续变化的特征,离散而成为包含对称亚元结构的二元光栅的想法,并采用严格耦合波法<sup>[26]</sup>,系统研究了一维亚元对称光栅对非晶硅薄膜太阳电池的吸收率增强情况。结果表明这种亚元对称光栅能有效地降低上表面入射光的反射逸出和下表面出射光的透射泄漏,增强太阳电池的光吸收率。

## 2 光栅薄膜电池的结构与研究模型

为了说明等效过程,图1为本文所研究的亚元对称光栅非晶硅薄膜太阳电池的结构及演化原理图。其中,图1(a)为经典的塔形光栅硅薄膜太阳电池的截面结构图。为简化研究,只考虑了电池吸收层表面一维尺寸上( $X$ 坐标方向)的结构变化,即认为 $Y$ 坐标方向结构保持不变。此时,塔形光栅简化成了 $XZ$ 面上的等腰三角光栅。从图1(a)出发,利用等效折射率的方法,设计出顶部亚元对称光栅电池,如图1(b)所示。对于该亚元对称光栅的形成,等效过程如下:将等腰三角光栅的整个光栅周期离散为三个子周期,各子周期的尺寸等于 $1/3$ 周期;又因等腰三角形的中间最高且两边具有对称性,所以中间子周期所含有的光栅齿宽 $D_1$ 要大于两边子周期中的光栅齿宽 $d_1$ 。基于相同的思路,又提出了图1(c)所示的吸收层底部采用亚元对称光栅的太阳电池。更进一步,借鉴最新的研究和工艺发展成果<sup>[25]</sup>,还研究了在吸收层上下表面同时采用亚元光栅的双光栅结构对太阳电池吸收率的增强情况,如图1(d)所示。

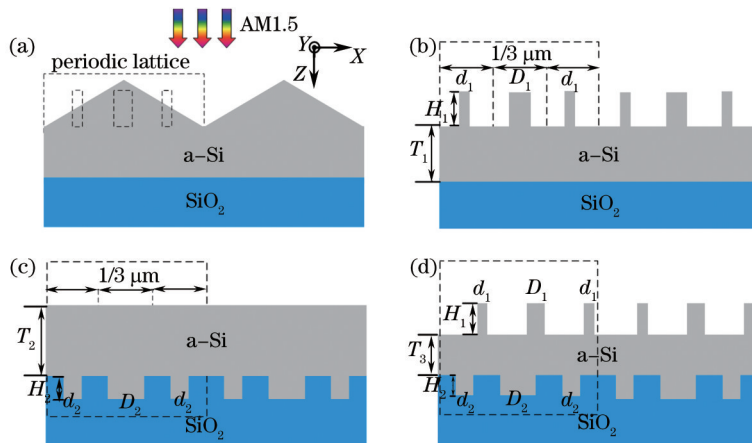


图1 几种光栅电池截面结构和等效进化原理图。(a) 等腰三角形光栅;(b) 顶部亚元对称光栅;  
(c) 底部亚元对称光栅;(d) 双光栅

Fig.1 Cross sections of several kinds of grating cells and the equivalent evolution principle. (a) Isosceles triangle grating; (b) top sub symmetric grating; (c) bottom sub symmetric grating; (d) dual gratings

在具体研究过程中,采用严格耦合波分析法研究了各种情形下光栅太阳电池的吸收率、反射率和透射率。研究时,空气的介电常数  $\epsilon_{\text{air}}$  设为1,非晶硅  $\epsilon_{\text{a-si}}$  和二氧化硅  $\epsilon_{\text{SiO}_2}$  的介电常数取值来源于国际折射率数据库<sup>[27]</sup>,电池均以二氧化硅玻璃作为衬底,并假定入射光沿平面 $Z$ 轴正向从空气中垂直入射到电池表面。由

于本文关注的重点为亚元对称光栅,所以在固定光栅高度的情况下,只选择光栅  $X$  轴上的参量  $D$  和  $d$  为研究变量,其他参数的设置参考先前报道的结果<sup>[25]</sup>:波长范围取为 600~750 nm;薄膜吸收层的总厚度设为 400 nm (其中对于顶部亚元对称光栅电池,非晶硅吸收层基础厚度  $T_1$  为 320 nm,顶部亚元光栅层  $H_1$  为 80 nm;对于底部亚元对称光栅电池,吸收层基础厚度  $T_2$  为 340 nm,光栅层  $H_2$  为 60 nm;而对于双光栅电池,吸收层基础厚度  $T_3$  为 260 nm,上下表面的光栅层  $H_1$  和  $H_2$  利用前面所设参量,即 80 nm 和 60 nm)。采用严格耦合波分析法,可以计算出亚元对称光栅硅薄膜太阳电池对不同波长入射光的吸收率  $P_{\text{abs}}(\lambda)$ 。但考虑到,一方面入射太阳光所含有的各个波长分量的强度不一样;另一方面不同波长的光所具有的能量也不一样;所以通常采用积分量子效率(IQE,  $E_{i0}$ )来衡量电池对太阳光的吸收效果。 $E_{i0}$ 由(1)式得到<sup>[28]</sup>:

$$E_{i0}(\lambda) = \frac{\int \lambda I_{\text{sun}}(\lambda) P_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda}{\int \lambda I_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中  $I_{\text{sun}}(\lambda)$  为太阳光中波长为  $\lambda$  的光入射强度,具体值选自 AM1.5 太阳能标准辐射光谱。

### 3 结果与分析

#### 3.1 顶部亚元对称光栅电池

为了提高硅薄膜太阳电池的吸收率,在常规平板硅太阳电池的基础上,考虑了在吸收层顶部采用亚元对称光栅的情况,如图 1(b)所示。因光栅高度固定,所以此时只有两个光栅参量可用于调节薄膜电池的吸收率:中心光栅齿宽  $D_1$  和两侧光栅齿宽  $d_1$ ,他们的变化范围由前一节介绍的等效原理限制。图 2 所示为不同  $D_1$  和  $d_1$  组合,波长范围取为 600~750 nm 时,薄膜电池  $E_{i0}$  的变化情况。为了确认吸收率最大的参数出自等效原理的限制范围内,实际计算时,还适当扩增了  $D_1$  和  $d_1$  的变化区域,如图 2 中对角虚线下方部分所示。从图 2 可以看出,在  $d_1 = 30$  nm、 $D_1 = 40$  nm 周围和  $d_1 = 150$  nm、 $D_1 = 180$  nm 周围这两个局部区域内, $E_{i0}$  相对较高。并且,当保持  $D_1$  固定时,随着  $d_1$  的增加, $E_{i0}$  呈现出先增大后减小的变化趋势;当保持  $d_1$  固定时,随着  $D_1$  的增加, $E_{i0}$  同样也呈现先增后减的变化趋势。进一步还可发现,与  $d_1$  相比, $D_1$  对  $E_{i0}$  的影响相对较小。可见,亚元对称光栅太阳电池的光吸收对  $D_1$  的尺寸变化不敏感。选取两局部区域中  $E_{i0}$  更高的区域,即  $d_1 = 30$  nm、 $D_1 = 40$  nm 附近的区域做进一步研究发现:当  $d_1 = 20$  nm、 $D_1 = 26$  nm 时, $E_{i0}$  达到最大值 72%,在满足了等效原理限制的原则下获得了最大吸收率。此时,与吸收层为 400 nm 厚的无光栅平板硅太阳电池 42% 的吸收率相比,顶部亚元对称光栅电池的吸收率增强了 71%。

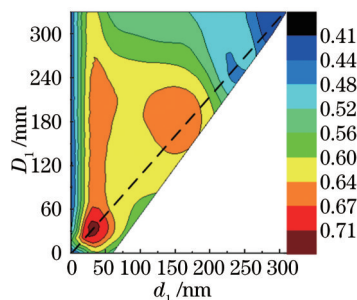


图 2 不同  $D_1$  和  $d_1$  组合的积分量子效率

Fig.2 Integrated quantum efficiencies for different combinations of  $D_1$  and  $d_1$

为了探讨亚元光栅太阳电池吸收率增强的原因,研究对比了吸收层表面无光栅的平板硅太阳电池、顶部亚元对称光栅电池和顶部等效介电常数电池等三种电池结构的吸收谱、反射谱和透射谱,如图 3(a)和 3(b)所示。对于顶部等效介电常数电池,是以顶部亚元光栅电池为参考,将顶部亚元光栅层替换为相同高度的具有顶部亚元光栅等效介电常数的均质层。该等效介电常数的计算公式为:  $\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{a-si}} P_{\text{a-si}} + \epsilon_{\text{air}} P_{\text{air}}$ 。其中,  $P_{\text{a-si}}$  为亚元光栅中非晶硅光栅齿的体积比例系数,  $P_{\text{air}}$  为亚元光栅中空气的体积比例系数。从图 3(a)中可以看到,与平板硅太阳电池相比,顶部等效介电常数电池虽然在整个光谱范围内都能提高光吸收率,但效果不明显。与此同时,顶部亚元对称光栅对太阳电池的光吸收率改善巨大,特别是在短波长的 620 nm 波长左右和长波长的 710 nm 左右,可明显观察到两个吸收增强峰,但对于 670~690 nm 的中间波长段则增强效果稍弱。

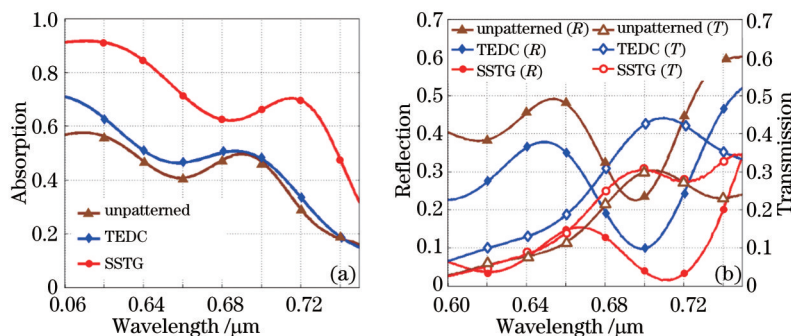


图3 平板硅太阳能电池(unpatterned)、顶部等效介电常数电池(TEDC)和优化的顶部亚元对称光栅 (SSTG)的(a) 吸收谱,(b) 反射谱 (实心曲线)和透射谱(空心曲线)

Fig.3 (a) Absorption, (b) reflections (solid curves) and transmission (void curves) spectra of unpatterned, the top effective dielectric constant (TEDC) solar cell, and the optimization symmetric substructure top grating (SSTG) cell

这些现象可从图3(b)所示的反射谱和透射谱中得到解释。与平板硅太阳能电池相比,顶部等效介电常数电池的上表面反射谱和底部透射谱形状几乎相同,只是有整体的上下移动,说明顶部等效介电常数电池对降低上表面反射的效果和对底部透射率的影响对所有波长几乎都相同。这主要是因为等效介电常数的采用,降低了界面的折射率差值,从而导致了上表面反射率的降低和从底部泄漏光的透射率的增加。但综合起来,对于上表面反射率的降低要高于透射率的增加,因而具有增加电池吸收率的效果,只是效果不明显。与此不同的是,顶部亚元光栅电池的上表面反射谱和底部透射谱的变化则很大,反射谱在620 nm波长左右和710 nm左右出现了两个反射低谷,而在670~690 nm波长段的反射相对较强,但也低于其他两种电池。这说明顶部亚元光栅能显著地降低电池表面的反射率,并且降低的程度和波长相关。顶部亚元光栅电池的透射谱则略高于平板硅太阳能电池,但低于顶部等效介电常数电池。这说明顶部亚元光栅对电池底部的透射率几乎没有改善作用,但也没有大幅度增加从底部透射的泄漏光。综合来看,顶部亚元光栅电池能够有效地增强电池吸收率,而等效介电常数电池对吸收增强则相对较弱。还可发现,顶部亚元光栅电池的吸收增强不仅来自于有效折射率差值降低带来的表面反射率下降,还应该引入亚元光栅,使得同时出现了慢光和谐振等与波长有关的物理现象的缘故<sup>[23]</sup>。与此同时,由于底部透射谱所占的比例相对较小,因此对于图3(a)中吸收影响有限。

### 3.2 底部亚元对称光栅电池

基于相同的思路考虑在吸收层底部采用亚元对称光栅的情况,如图1(c)所示。这时,也只有 $D_2$ 和 $d_2$ 两个光栅参量可用于调节薄膜电池吸收率。图4为不同 $D_2$ 和 $d_2$ 组合下,波长范围取为600~750 nm时,相应的薄膜电池 $E_{10}$ 变化图。可以看出,图中只有一个高吸收率区域,即以 $d_2 = 115$  nm、 $D_2 = 120$  nm为中心点的区域。并且当保持 $D_2$ 固定时,随着 $d_2$ 的增加, $E_{10}$ 呈现出先增后减的变化趋势;当保持 $d_2$ 固定时,随着 $D_2$ 的增加, $E_{10}$ 呈现出递减趋势。还可发现,与 $d_2$ 相比, $D_2$ 对 $E_{10}$ 的影响相对较小。可见,亚元对称光栅太阳能电池的光吸收对 $D_2$ 的尺寸变化同样不敏感。且在该区域内,当 $d_2 = 100$  nm, $D_2 = 150$  nm时, $E_{10}$ 达到最大值52%。此时,与平板硅太阳能电池相比,底部亚元对称光栅电池的吸收率增强了24%。

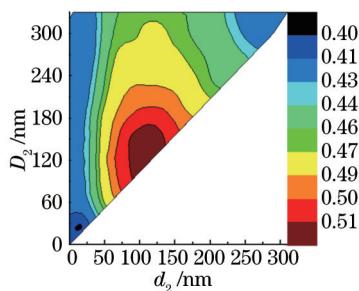


图4 不同 $D_2$ 和 $d_2$ 组合的积分量子效率

Fig.4 Integrated quantum efficiencies for different combinations of  $D_2$  and  $d_2$

同样地,对比平板硅太阳能电池、底部亚元对称光栅电池和底部等效介电常数电池等三种电池的吸收谱、反射谱和透射谱,如图 5(a)和 5(b)所示。从图 5(a)中可以看到,相比平板硅太阳能电池,底部等效介电常数电池在整个光谱范围内的光吸收率反而降低了,不具有增强效果;而底部亚元光栅电池仍然具有提高光吸收率的能力,特别在 620 nm 和 690 nm 处观察到的两个吸收增强峰。

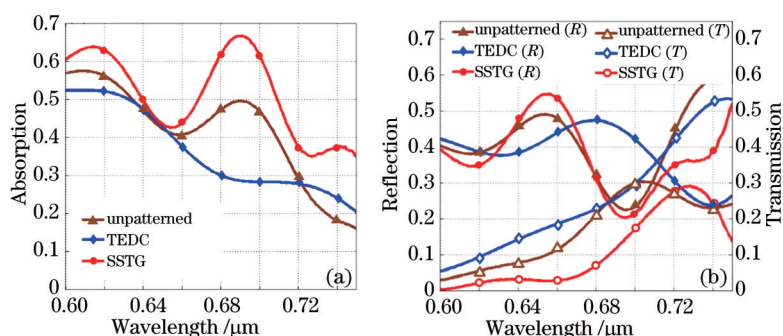


图 5 平板硅太阳能电池(unpatterned)、底部等效介电常数电池(BEDC)和优化的底部亚元对称光栅电池(SSBG)的 (a) 吸收谱, (b) 反射谱(实心曲线)和透射谱(空心曲线)

Fig.5 (a) Absorptions, (b) Reflections (curves with various solid shapes) and transmissions (curves with various void shapes) spectra of unpatterned, the bottom effective dielectric constant (BEDC) solar cell, and the optimization symmetric substructure bottom grating cell (SSBG)

这些现象也可从图 5(b)所示的反射谱和透射谱中得到解释。对于底部等效介电常数电池,在 680 nm 出现了反射峰,在 740 nm 则出现了反射谷,说明抗反射效果不均匀;并且其底部透射谱几乎在整个研究的光谱范围内最高,说明底部透射泄漏很大;综合来看,电池吸收率最低,不具有增强吸收的效果。这主要是因为等效介电常数的采用,降低了界面的折射率差值,从而导致了底部透射率的增加,使得电池吸收率较平板硅太阳能电池更低。对于底部亚元对称光栅电池,其上表面反射谱相比平板硅太阳能电池总体略低,主要表现在 700 nm 后的长波长光谱范围,这说明底部亚元对称光栅对电池上表面的反射率改善也不明显。当观察底部亚元对称光栅电池的底部透射谱时,除了在长波长区发现有一小段的高透射区外,大多波长下的透射泄漏都很小,并且远低于另两种电池的底部透射。这说明底部亚元光栅对于降低电池底部的透射泄漏有很大帮助。综合来看,底部亚元对称光栅电池能够有效地增强电池的吸收率,而底部等效介电常数电池则不能增强吸收。可见,底部亚元对称光栅电池的吸收增强不是来自于有效折射率差值的降低,而应该是亚元光栅的引入使之出现了能减少谐振波长附近光泄漏的导模谐振等物理现象的缘故<sup>[29]</sup>。

### 3.3 亚元对称双光栅电池

为了进一步提高薄膜太阳能电池的光吸收率,在先前研究的启发下<sup>[25]</sup>,进一步考虑了在吸收层表面及底部均采用亚元对称光栅的情况,如图 1(d)所示。为简化研究,直接采用前两节所得的最优光栅参数,故保持前面所述顶部及底部的 4 个光栅参量值不变,只对上下光栅层组合的水平相对位置做调整,即沿坐标 X 轴平行移动上下光栅层的光栅齿相对位置。研究发现,当顶部光栅层与底部光栅层的各光栅齿呈反向齿轮状错位排列于吸收层表面与底部时,光吸收率最高,达 76%。此时,较平板硅太阳能电池吸收率增强了 81%。图 6(a)和 6(b)分别给出了优化的双光栅电池和平板硅太阳能电池在波长为 600~750 nm 范围内的吸收谱、反射谱和透射谱。图 6(a)中可以看出,双光栅电池的吸收率在整个光谱范围内较平板硅太阳能电池得到大幅提高。特别是在短波长的 630 nm 左右和长波长的 710 nm 左右观察到有两个吸收增强峰,而对于 650~690 nm 波长段的增强效果则相对较弱,但也远高于平板硅太阳能电池。这些现象也可从图 6(b)所示的反射谱和透射谱中得到解释。图 6(b)中,相对于平板硅太阳能电池,双光栅电池的上表面反射谱的形状与之大致相同,几乎只是整体下移,并且在 630 nm 左右和 720 nm 左右出现的两个谷值均不足 0.1 的反射谷,说明双光栅的引入使得电池减反效果得到很大提高。而观察到的底部透射谱在几乎整个研究的光谱范围内完全低于平板硅太阳能电池,特别在 680~710 nm 波长段的透射率降低了近 25%,说明双光栅电池的减透效果也十分突出。可见,双光栅电池的双层光栅复合结构综合了单层顶部和底部光栅的减反、减透性能,降低了上表面的反射率及下表面的透射率,增强了电池的光吸收率<sup>[25]</sup>。此外,如

图 1(d)所示,还发现优化后的下光栅非晶硅光栅齿宽要宽于上光栅的齿宽,这一现象也和先前的报道相似<sup>[25]</sup>。这可以通过有效折射率理论来定性地理解为:界面两侧的有效折射率差值越大,反射越大。上表面要减小反射,而下表面要利用反射,因此产生了图 1(d)所示的现象。

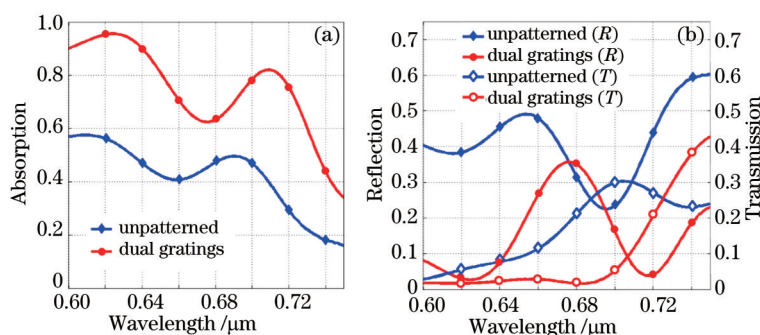


图 6 平板硅太阳能电池(unpatterned)、和优化的双光栅电池(dual gratings)的(a)吸收谱,(b)反射谱(实心曲线)和透射谱(空心曲线)

Fig.6 (a) Absorption, (b) reflection (solid curve) and transmission (void curve) of unpatterned solar cell, and the optimization substructure dual gratings cell (dual gratings)

## 4 结 论

提出了在非晶硅薄膜太阳能电池的吸收层上下表面采用一维的亚元对称光栅来提高电池吸收率,降低塔形光栅加工难度的想法,并利用严格耦合波法分析了三种不同情况下亚元对称光栅对吸收层光吸收率的影响规律。研究表明:顶部亚元光栅的慢光和谐振等作用可使大部分光波在入射耦合时改变光路,增加耦合,减少反射光泄漏;底部亚元光栅的衍射作用可使大部分出射光波在底部透射时形成导模谐振,减少透射光泄漏;两者结合能使薄膜电池反射率及透射率大幅下降,从而有效提高电池的吸收率。在 600~750 nm 波长范围内,对于吸收层基础厚度为 260 nm、上下表面光栅层的厚度分别为 80 nm 和 60 nm 的亚元对称双光栅电池,吸收相对增强可达 81%。由于双光栅电池的参数直接采用了单光栅电池的优化结果,未综合考虑上下光栅之间耦合的影响,所以报道的亚元对称双光栅电池的吸收率还有进一步提升的空间。光被材料吸收后,光能大部分转化为电能,小部分转化为热能。因此,光吸收率的提升对提高光电转换效率有很大的帮助。本研究为设计具有高吸收率的易于制作的薄膜太阳能电池提供了新思路。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Xiaoming, Zhao Jing, Hou Guofu, *et al.*. Investigation of light trapping structure and performance in PIN-type and NIP-type thin film silicon solar cells[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(12): 120101.  
于晓明, 赵 静, 侯国付, 等. PIN型和NIP型硅薄膜太阳能电池中绒面陷光结构和陷光性能研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 120101.
- 2 Qin Feifei, Zhang Haiming, Wang Caixia, *et al.*. Design and simulation of anodic aluminum oxide nanograting double light trapping structure for thin film silicon solar cells[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(19): 198802.  
秦飞飞, 张海明, 王彩霞, 等. 基于阳极氧化铝纳米光栅的薄膜硅太阳能电池双重陷光结构设计与仿真[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 198802.
- 3 Wu Fengbing, Zhang Dawei. The light trapping in solar cells based on periodic nano-structures gratings[J]. *Laser Journal*, 2010, 31(5): 15-17.  
吴奉炳, 张大伟. 太阳能电池中微纳陷光光栅结构[J]. *激光杂志*, 2010, 31(5): 15-17.
- 4 Shah A, Schade H, Vanecek M, *et al.*. Thin-film silicon solar cell technology[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, 12(2): 113-142.
- 5 Yu Z, Raman A, Fan S. Fundamental limit of nanophotonic light trapping in solar cells[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(41): 17491-17496.
- 6 Battaglia C, Hsu C M, Söderström K, *et al.*. Light trapping in solar cells: can periodic beat random?[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(3): 2790-2797.
- 7 Polman A, Atwater H A. Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(3): 174-177.
- 8 Moulin E, Steltenpool M, Boccard M, *et al.*. 2-D periodic and random-on-periodic front textures for tandem thin-film silicon solar cells

- [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(5): 1177–1184.
- 9 Bittkau K, Hoffmann A, Carius R. Improvement of light trapping in thin-film silicon solar cells by combining periodic and random interfaces[J]. Canadian Journal of Physics, 2014, 92(7): 888–891.
- 10 Priolo F, Gregorkiewicz T, Galli M, *et al.*. Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics[J]. Nat Nano, 2014, 9(1): 19–32.
- 11 Ma Jing, Lin Sile, Cheng Shuying. Application of scattered light model and guided mode resonant in structure design of thin film solar cells[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0431002.  
马 靖, 林斯乐, 程树英. 光散射与导模共振模型在薄膜太阳能电池结构设计中的应用[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0431002.
- 12 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.
- 13 Kong Weijin, Cao Kaihua, You Chenglong, *et al.*. Optimization of wide spectrum anti-reflective grating for solar cell[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1205001.  
孔伟金, 曹凯华, 由成龙, 等. 太阳能电池用宽光谱减反射光栅的优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1205001.
- 14 Heine C, Morf R H. Submicrometer gratings for solar energy applications[J]. Appl Opt, 1995, 34(14): 2476–2482.
- 15 Llopis F, Tobias I. The role of rear surface in thin silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, 87(1): 481–492.
- 16 Llopis F, Tobias I. Texture profile and aspect ratio influence on the front reflectance of solar cells[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(12): 124504.
- 17 Haase C, Stiebig H. Fundamental optical simulations of light trapping in microcrystalline silicon thin-film solar cells[C]. Photonics for Solar Energy Systems, Proc SPIE, 2006, 6197: 619705.
- 18 Sai H, Kanamori Y, Arafune K, *et al.*. Light trapping effect of submicron surface textures in crystalline Si solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007, 15(5): 415–423.
- 19 Haase C, Stiebig H. Thin-film silicon solar cells with efficient periodic light trapping texture[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(6): 061116.
- 20 Mavrokefalos A, Han S E, Yerci S, *et al.*. Efficient light trapping in inverted nanopillar thin crystalline silicon membranes for solar cell applications[J]. Nano Letters, 2012, 12(6): 2792–2796.
- 21 Čampa A, Krč J, Smole F, *et al.*. Potential of diffraction gratings for implementation as a metal back reflector in thin-film silicon solar cells[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(20): 6963–6967.
- 22 Lee Y C, Huang C F, Chang J Y, *et al.*. Enhanced light trapping based on guided mode resonance effect for thin-film silicon solar cells with two filling-factor gratings[J]. Opt Express, 2008, 16(11): 7969–7975.
- 23 Park Y, Drouard E, Daif O E, *et al.*. Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells[J]. Opt Express, 2009, 17(16): 14312–14321.
- 24 Wang P, Menon R. Simulation and analysis of the angular response of 1D dielectric nanophotonic light-trapping structures in thin-film photovoltaics[J]. Opt Express, 2012, 20(S4): A545–A553.
- 25 Schuster C S, Kowalczewski P, Martins E R, *et al.*. Dual gratings for enhanced light trapping in thin-film solar cells by a layer-transfer technique[J]. Opt Express, 2013, 21(S3): A433–A439.
- 26 Liu V, Fan S. S4: A free electromagnetic solver for layered periodic structures[J]. Computer Physics Communications, 2012, 183(10): 2233–2244.
- 27 Polyanskiy M. Refractive index database[J]. Refractiveindex, Info, 2014.
- 28 Fisker C, Pedersen T G. Optimization of imprintable nanostructured a-Si solar cells: FDTD study[J]. Opt Express, 2013, 21(102): A208–A220.
- 29 Khaleque T, Magnusson R. Light management through guided-mode resonances in thin-film silicon solar cells[J]. Journal of Nanophotonics, 2014, 8(1): 083995.

栏目编辑: 张浩佳