

双层光栅结构减小非晶硅薄膜太阳能电池的反射

黄祥军 张耀举* 安鸿昌

温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035

摘要 设计了一种基于非晶硅的太阳能电池新结构。在所设计的结构中,减反膜由双层光栅构成。硅(Si)薄膜被刻蚀成阵列菲涅耳波带片(非周期性光栅)结构,可以使得光聚焦到非晶硅薄膜中,并且可以节约Si材料的用量。Si薄膜上的氧化铟锡(ITO)薄膜被刻蚀成亚波长、无规则的光栅阵列结构。所设计的双光栅减反膜可以减少光的反射、增加光的宽带透射。使用时域有限差分(FDTD)方法模拟了反射和透射场的强度分布。模拟结果显示,与无光栅的常规非晶硅薄膜太阳能电池相比,所设计的太阳能电池结构可以将光的吸收率提高39.2%,短路光电流密度提高19.9%,这些结果优于文献中所报道的具有周期性双光栅减反膜结构的太阳能电池的性能。

关键词 光栅; 太阳能电池; 减反膜; 时域有限差分

中图分类号 TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.073101

Reduction of Reflection in Amorphous Silicon Thin Film Solar Cell with Double Grating Structure

Huang Xiangjun Zhang Yaoju An Hongchang

Department of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

Abstract A new amorphous silicon film solar cell structure is designed, where the antireflective coating consists of double layer gratings. The Si film is etched into the array of Fresnel zone plate (nonperiodic grating) structure to focus light to the amorphous silicon film and amount of Si can be saved. The indium tin oxide (ITO) film on Si is etched into a subwavelength and nonperiodic grating array. The designed double grating antireflective film can reduce reflection and increase the broadband transmission of light. The intensity distribution of reflection and transmission fields are simulated by using the finite difference time domain (FDTD) method. The simulation results show that, compared with the conventional amorphous silicon film solar cell without grating antireflective film, the absorptivity of light and the short-circuit photocurrent density can be improved by 39.2% and 19.9%, respectively. These results are better than results of the reported solar cell with an antireflective film of double layer periodic gratings and a metal grating back electrode.

Key words grating; solar cell; antireflective film; finite difference time domain

OCIS codes 310.4165; 310.1210; 050.1950

1 引言

随着能源危机环境恶化以及各国能源政策的调整,太阳能作为清洁廉价且可持续的新能源得到了世界上很多国家的重视。尽管受到了薄膜太阳能电池和有机高分子太阳能电池的挑战,由于硅材料在地球上蕴含丰富,没有毒性,对环境友好,硅系太阳能电池(包括晶体硅和薄膜硅)一直是业界发展的重点。在单晶硅上堆积非晶硅薄膜制成的混合硅太阳能电池可以兼顾到成本和效率。硅基p-i-n-i-n异质结太阳能电池可以取得23%的效率^[1]。以晶体硅为代表的p-n结型太阳能电池的效率不可能无限地提高,在理论上存在一个转换效率的极限值,单晶硅太阳能电池的极限效率只有31%^[2]。到目前为止,实验室最高纪录值是澳大利亚新南威尔士大学研究的电池,其转换效率达到25%^[3],实际规模化产品转换效率一般在17%~19%左右。

收稿日期: 2015-02-10; 收到修改稿日期: 2015-03-19; 网络出版日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61377021)

作者简介: 黄祥军(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜及其应用方面的研究。E-mail: 1072795893@qq.com

导师简介: 张耀举(1960—),男,博士,教授,主要从事光栅衍射和微纳光学等方面的研究。

E-mail: zhangyj@wzu.edu.cn(通信联系人)

理想情况是,一个太阳能电池应该吸收所有有用的光子。然而由于硅的高折射率,对于波长在 300~800 nm 范围的太阳光谱,入射光垂直入射,一个抛光的硅表面将大约 35%左右的入射光反射掉。有两种方法可以减少光在硅表面的反射,一种是利用单层或者多层梯度折射率薄膜^[4-7],另一种是在硅表面沉积纳米结构的防反射光栅薄膜^[8-13]。目前广泛应用的提高太阳能电池转换效率的方法是用等离子体化学沉积的方法在硅表面沉积四分之一波长的单层氮化硅防反射涂层^[9-10],但是薄膜的厚度只能针对某一特定的波长和入射角来优化,当光的波长偏离目标波长,入射角偏离目标入射角时反射率会迅速增加。

人们注意到利用亚波长光栅的衍射效应制作出的亚波长光栅可以作为宽带的、方向无关的减反膜^[14-17]。最近几年,一些研究者提出用二维光子晶体光栅作为减反膜^[18-19],这种方法是诱人的。但是,受到技术的挑战,短时间内很难在工业上得到应用。为了平衡吸收效率和技术挑战,一些作者提出了一维(1D)双重周期性光栅和背面金属反射周期性光栅构成的复合结构来减少光在太阳电池上的反射^[17,20]。这种结构需要在电池板的背面制作出金属反射亚波长光栅。菲涅耳波带片可以用于聚焦和光调制^[21-25]。本文基于菲涅耳波带片设计了一种减少太阳光反射的非周期性光栅结构,而且没有金属反射亚波长光栅背电极。时域有限差分(FDTD)模拟显示,所设计的结构可以达到文献[26-27]的结构(具有背面金属反射光栅)相同的减反效果。

2 模型和方法

图 1 显示出所设计的太阳电池结构的一个单元。金属银(Ag)薄膜作为电池的背电极,非晶硅(a-Si)在金属薄膜上。非晶硅上面的单晶硅薄膜被刻蚀成一个二元相位菲涅耳波带(FZP)光栅结构(称为光栅 1),波带片的区域边界为

$$x_j = \pm \sqrt{j} x_1, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 x_1 为中心区域的边界, N 是一个 FZP 单元中边界的数目。波带片的上方的氧化铟锡(ITO)电极材料也被设计成一个光栅结构(称为光栅 2)。光栅 2 的设计方法如下: FZP 的中心区域上的 ITO 被量化成 $2M-1$ 个脊(其中中心脊的宽度为其它宽度的 2 倍)。FZP 的其它脊区上的 ITO 被量化成 M 个脊。整个太阳电池是将 FZP 单元在 x 方向的周期性排列。由于 Si 薄膜被设计成了 FZP 结构,因此,所设计的太阳电池结构减少了 Si 材料的使用量。采用双层光栅的减反膜设计是为了实现宽波段波长范围反射率的减小。假设 p-偏振(TM)平面波垂直入射到所设计的太阳电池上。依照 FZP 的聚焦原理,入射光被聚焦在 Si 材料内,这样可以增强光的吸收,达到减小反射的目的。在下一节中用 Comsol 4.3 仿真软件对所设计的太阳电池结构的反射场和透射场进行模拟。

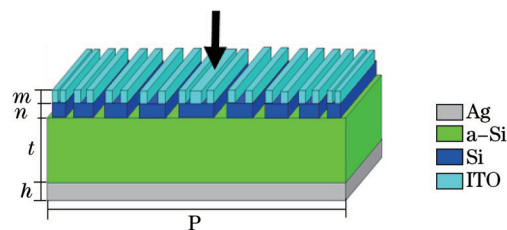


图 1 双光栅薄膜太阳电池的一个基本单元

Fig.1 An unit cell of a-Si based thin film solar cells with a double grating structure

3 模拟结果

当表面无光栅时,太阳电池 ITO、Si、a-Si 和 Ag 四层薄膜的层叠结构,表 1 给出了每种材料的折射率随波长的变化。在模拟中,取 ITO 薄膜的厚度为 $m=80$ nm, Si 薄膜的厚度为 $n=100$ nm, a-Si 的厚度为 $t=500$ nm, Ag 薄膜的厚度为 $h=100$ nm。在使用 Comsol 软件进行时域有限差分(FDTD)建模时,在 ITO 上面增加 50 nm 厚的空气层,在空气层上方添加的完美匹配层(PML)材料也设置为空气。同样的方法,在模型底部也添加一个 50 nm 空气层,在空气层下的 PML 层也设置为空气,这样做的目的是提高仿真的精确度。在有限元网格剖分时每个波长至少要划分 5 个网格,即每个网格的尺寸不得超过 $\lambda/5$ 。

由于在材料中入射波的波长随材料折射率 n 的变化而变化,所以每个网格尺寸不超过 $\lambda/5n$ 。入射端口采用周期性端口,边界采用 Floquet 周期性边界条件。单光栅结构是在无光栅的基础上将 ITO 和 Si 两层刻

成条状菲涅耳光栅。设定 FZP 的第一个区域边界为 $x_1=400\text{ nm}$, 每个 FZP 周期单元中有 5 个环带。双光栅的结构如图 1 所示, 它是在单光栅的基础上将 ITO 薄膜刻蚀成在上一节中所描述的结构。在模拟中, 取 $M=2$ 。对于无光栅、单光栅和双光栅三种情况, 均假设 TM 偏振的平面波垂直入射到太阳电池上。

表 1 材料的折射率随波长的变化

Table 1 Refractive index of materials versus wavelength

Wavelength /nm	Material			
	TTO	Si	a-Si	Ag
300	2.3434+0.1174i	4.9660+4.2587i	3.2614+3.7385i	1.4945+0.9057i
320	2.2407+0.0517i	5.0510+3.3470i	3.8381+3.6143i	0.7790+0.5760i
340	2.1634+0.0281i	5.2509+3.0290i	4.3464+3.3291i	0.2789+1.0207i
360	2.1097+0.0198i	6.0325+3.0893i	4.7289+2.9592i	0.1822+1.3965i
380	2.0691+0.0145i	6.6447+0.9729i	4.9686+2.5470i	0.1523+1.6708i
400	2.0355+0.0109i	5.6458+0.3251i	5.0952+2.1535i	0.1405+1.9007i
420	2.0065+0.0084i	5.1321+0.1724i	5.1361+1.8153i	0.1363+2.1040i
440	1.9806+0.0066i	4.8095+0.1060i	5.1345+1.5268i	0.1353+2.2915i
460	1.9568+0.0054i	4.5832+0.6781i	5.0976+1.2751i	0.1359+2.4680i
480	1.9347+0.0046i	4.4128+0.0404i	5.0386+1.0642i	0.1373+2.6367i
500	1.9136+0.0039i	4.2860+0.0247i	4.9796+0.8900i	0.1392+2.7997i
520	1.8933+0.0036i	4.1855+0.0130i	4.9077+0.7332i	0.1415+2.9583i
540	1.8734+0.0033i	4.1059+0.0079i	4.8253+0.6039i	0.1439+3.1134i
560	1.8539+0.0032i	4.0403+0.0059i	4.7786+0.4680i	0.1464+3.2659i
580	1.8344+0.0031i	3.9863+0.0042i	4.6973+0.4004i	0.1491+3.4162i
600	1.8149+0.0031i	3.9390+0.0024i	4.6237+0.3267i	0.1519+3.5645i
620	1.7952+0.0032i	3.8998+0.0012i	4.5574+0.2641i	0.1549+3.7113i
640	1.7754+0.0033i	3.8655+0.0011i	4.4975+0.2189i	0.1579+3.8688i
660	1.7752+0.0035i	3.8347+0.0021i	4.4335+0.1654i	0.1610+4.0010i
680	1.7347+0.0037i	3.8076+0.0024i	4.3752+0.1289i	0.1643+4.1143i
700	1.7136+0.0039i	3.7834+0.0026i	4.3199+0.0989i	0.1676+4.2867i
720	1.6921+0.0042i	3.7619+0.0025i	4.2717+0.0833i	0.1711+4.4283i
740	1.6701+0.0045i	3.7425+0.0026i	4.2322+0.0590i	0.1746+4.5693i
760	1.6474+0.0048i	3.7253+0.0043i	4.1764+0.0444i	0.1783+4.7096i
780	1.6240+0.0053i	3.7113+0.0019i	4.1315+0.0380i	0.1821+4.8493i
800	1.5999+0.0057i	3.6959+0.0047i	4.1013+0.0297i	0.1860+4.9886i

图 2 显示出所获得的反射率随波长的变化。从图中可以看出, 在所模拟的太阳光谱范围内, 双层光栅起到了很好的减反效果。最大反射率为 0.14, 这个值比文献[26]所报道的最大反射率 0.24 小 41.7%。

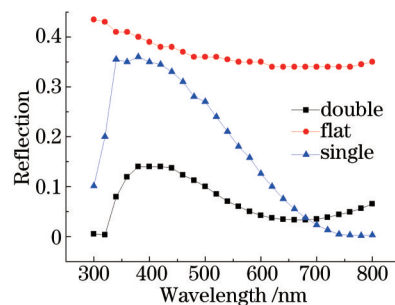


图 2 不同表面结构的薄膜太阳电池的反射率

Fig.2 Reflectance of solar cell with different structure of surface

图 3 显示出对于 500、600、700 nm 三个特殊的波长反射场的分布。从图中可以看到, 无光栅时[图 3(a)], 反射场的强度很大, 而且是均匀分布, 这是在预料之中的。当 $\lambda=500\text{ nm}$ 时, 单光栅结构的反射光具有聚焦光斑出现, 这是由于所设计的单 FZP 光栅对于这个波长刚好满足聚焦条件。

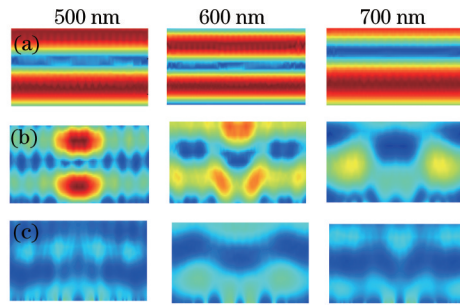


图3 在波长为500、600、700 nm时的反射场分布,其中(a)、(b)和(c)分别为无光栅、有一个光栅和有双层光栅时的反射场
Fig.3 Reflection field distributions for different wavelengths of 500, 600, 700 nm, where (a), (b) and (c) are the cases without any grating, with a single grating and with a double-layer grating, respectively

随着入射波长远离500 nm (即偏离聚焦条件),聚焦效果愈来愈差,如图3 (b)所示。在光栅1的基础上再刻蚀光栅2,即双光栅结构,反射光的强度大大减弱,且基本上没有聚焦作用。这是由于光栅2不是一个FZP结构,而是一个纳米线阵列^[8],它对入射光起到漫散射的效果,所以反射光和透射光不再有聚焦作用。图4显示了在450、550、650 nm三个不同波长入射的情况下,双光栅结构太阳能电池体内的散射场分布。显然,波长为450 nm的透射光强比其他两个波长的透射光强小,这是由于对这个波长的反射强度大(见图2)所造成的。图4也说明了所设计的太阳能电池对于不同波长的光的透射是不均匀的。

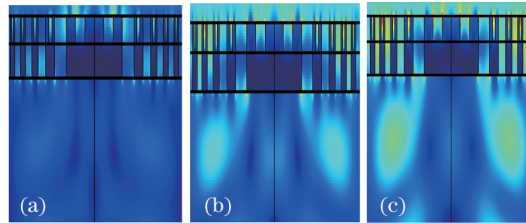


图4 具有双光栅结构的薄膜太阳能电池内部的场分布,其中(a)、(b)和(c)分别是入射波长为450、550和650 nm的情况
Fig.4 Field distributions within the solar cells with a double layer grating, where (a), (b) and (c) are the cases for 450, 550 and 650 nm wavelengths of incidence

图5画出了在对于三种不同结构太阳能电池的吸收率 a 随着波长的变化。整个太阳能电池的吸收率 A 用(2)式计算^[26]

$$A = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} a(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)d\lambda}, \quad (2)$$

式中 $a(\lambda)$ 是用FDTD计算所获得的太阳能电池的吸收谱, $S(\lambda)$ 是太阳光谱分布。依照(2)式,计算出了无光栅、单光栅和双光栅三种太阳能电池的整个吸收率分别为67.8%,88.7%和94.4%。利用所设计的双光栅结构,可以将平板太阳能电池的吸收率提高39.2%。知道了太阳能电池的吸收谱,可以利用(3)式来估算太阳能电池短路光电流密度(J_{sc})^[26]。

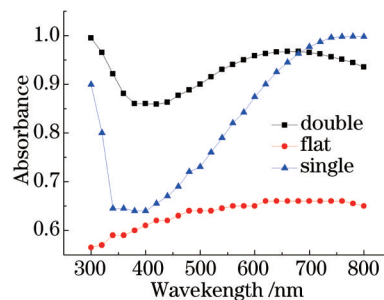


图5 不同表面结构的薄膜太阳能电池的吸收率
Fig.5 Absorption of solar cell with different structure of surface

$$J_{sc} = \frac{e}{hc} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda a(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中 e 是电子电量, h 是普朗克常数, c 为在真空中的光速。根据(3)式,计算出双光栅时的电流密度为22.6 mA/cm²,单光栅时电流密度为21.4 mA/cm²,而无光栅时的电流密度为18.9 mA/cm²。与无光栅时相比,双光栅结构太阳电池的短路电流提高了19.9%。

4 结 论

提出了减小太阳电池反射率的一种新方法,将Si薄膜刻蚀成阵列菲涅耳波带片结构,将ITO薄膜刻蚀成纳米线阵列,金属背电极是一个平面结构。使用FDTD方法模拟了电场的分布。结果显示,所设计的太阳电池结构比文献中所报道的金属背电极制成光栅形状的太阳电池的反射率低^[26]。与无光栅情况相比,所设计的太阳电池结构可以将光的吸收率提高39.2%,短路光电流密度提高19.9%。

参 考 文 献

- 1 Okamoto S, Mikami R, Ozaki R, *et al.*. High-efficiency multi-crystalline silicon solar cells using screen-printed electrode and wet etching textured surface[C]. Proc IEEE 4th World Conf Photovoltaic Energy Conversion, 2006: 1259-1262.
- 2 Shockley W, Queisser H J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32 (3): 510-519.
- 3 Green M, Emery K, Hishikawa Y, *et al.*. Solar cell efficiency tables[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012, 20(1): 12-20.
- 4 Doshi P, Jellison G E, Rohatgi A. Characterization and optimization of absorbing plasma-enhanced chemical vapor deposited antireflection coatings for silicon photovoltaics[J]. Applied Optics, 1997, 36(30): 7826-7837.
- 5 Mahdjoub A. Graded refraction index antireflection coatings based on silicon and titanium oxides[J]. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2007, 10(1): 60-66.
- 6 Aiken D J. High performance anti-reflection coatings for broadband multi-junction solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, 64(4): 393-404.
- 7 Chhajed S, Schubert M F, Kim J K, *et al.*. Nanostructured multilayer graded-index antireflection coating for Si solar cells with broadband and omnidirectional characteristics[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(25): 251108.
- 8 Peng K, Xu Y, Wu Y, *et al.*. Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications[J]. Small, 2005, 1 (11): 1062-1067.
- 9 Min W, Jing B, Jiang P. Bioinspired self-cleaning antireflection coatings[J]. Adv Mater, 2008, 20(20): 3914-3918.
- 10 Sun C, Jiang P, Jiang B. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(6): 061112.
- 11 Phillips B M, Jiang P, Jiang B. Biomimetic broadband antireflection gratings on solar-grade multicrystalline silicon wafers[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(19): 191103.
- 12 Fu Xiuhua, Sun Yingjie, Liu Dongmei, *et al.*. Study and fabrication of visible and Infrared Broadband antireflection coating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0331002.
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反膜的研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0331002.
- 13 Yeung K M, Luk W C, Tam K C, *et al.*. 2-Step self-assembly method to fabricate broadband omnidirectional antireflection coating in large scale[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(2): 699-703.
- 14 Kanamori Y, Roy M, Chen Y. Antireflection sub-wavelength gratings fabricated by spin-coating replication[J]. Microelectronic Engineering, 2005, 78-79(728): 287-293.
- 15 Striemer C C, Faychet P M. Dynamic etching of silicon for broadband antireflection applications[J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(16): 2980-2982.
- 16 Song Y M, Jang S J, Yu J S, *et al.*. Bioinspired parabola subwavelength structures for improved broadband antireflection[J]. Small, 2010, 6(9): 984-987.
- 17 Meng X, Drouard E, Gomard G, *et al.*. Combined front and back diffraction gratings for broad band light trapping in thin film solar cell[J]. Opt Express, 2012, 20(S5): A560-A571.
- 18 Gomard G, Drouard E, Letartre X, *et al.*. Two-dimensional photonic crystal for absorption enhancement in hydrogenated amorphous silicon thin film solar cells[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(12): 123102.

- 19 Gjessing J, Marstein E S, Sudb A. 2D back-side diffraction grating for improved light trapping in thin silicon solar cells [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5481-5495.
- 20 Shi Y, Zhang C, Zhang H, *et al.*. Low (sub-1-volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophore shape[J]. *Science Magazine*, 2000, 288(5463): 119-122.
- 21 Huang Chong, Zou Min, Ouyang Yandon, *et al.*. Fabrication and polarized optical texture of fresnel liquid crystal lens [J]. *Journal of Shantou University (Natural Science Edition)*, 2013, 28(2): 8-12.
黄 翀, 邹 敏, 欧阳艳东, 等. 菲涅尔液晶透镜的制备及偏光织构研究[J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(2): 8-12.
- 22 Qu Biao, Pu Jixiong. Spectral anomalies of the fully, spatially coherent light diffracted by a fresnel zone plate[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2007, 28(1): 46-50.
渠 彪, 蒲继雄. 菲涅耳波带片衍射产生光谱奇异现象[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(1): 46-50.
- 23 Shen Hongbin, Zhou Jingtao, Zhang Lei, *et al.*. Design of amplitude-fresnel zone plate for rapid realization with Matlab [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(15): 4281-4283.
沈洪斌, 周景涛, 张 磊, 等. Matlab编程快速实现振幅型菲涅尔的设计[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(15): 4281-4283.
- 24 Fu Wenyu, Liu Zhengqi. Numerical simulation for diffraction properties of laser zone-plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(11): 1756-1760.
付文羽, 刘正岐. 激光波带片衍射性质的数值模拟[J]. *光子学报*, 2006, 35(11): 1756-1760.
- 25 Zhang Qinqin, Zhu Siwei, Yuan Xiaocong. Focal depth properties of modified fractal zone plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0823001.
张芹芹, 朱思伟, 袁小聪. 改进型分形波带片的焦深特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0823001.
- 26 Zhang W, Jiang L, Li X. Broadband light harvesting enhancement with front double and back metallic gratings in thin film solar cells[J]. *Optics Communications*, 2014, 317: 83-87.
- 27 Bhattacharya J, Chakravariy N, Pattnaik S, *et al.*. A photonic-plasmonic structure for enhancing light absorption in thin film solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 99(13): 131114.

栏目编辑: 刘丰瑞