

文章编号: 1000-7032(2013)06-0753-05

一种增加光吸收的非晶硅薄膜太阳能电池的设计

沈宏君*, 张 瑞, 卢辉东

(宁夏大学 物理电气信息学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 分别设计与优化了非晶硅薄膜太阳能电池的上表层和电池底部结构,采用严格耦合波方法(RCWA)数值计算了电池的光吸收。计算结果表明:在仅考虑 TM 偏振的情况下,优化后的增透膜与无增透膜相比,300~840 nm 波长范围内的吸收平均提高了35%左右;优化后的背反射器与无背反射器相比,700~840 nm 波长范围内的吸收平均提高了23%左右。该非晶硅薄膜太阳能电池结构在全角宽频范围内有较高吸收,可以提高太阳能电池的转化效率。

关键词: 增透膜; 衍射光栅; 光子晶体; 吸收; 太阳能电池

中图分类号: O431 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20133406.0753

Design of An Amorphous Silicon Thin-film Solar Cell with Absorption Enhancement

SHEN Hong-jun*, ZHANG Rui, LU Hui-dong

(School of Physics and Electrical Information, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

* Corresponding Author, E-mail: shenhongj2004@126.com

Abstract: The front-surface and the bottom of amorphous silicon (a-Si) thin-film solar cell are designed respectively. Light absorption is calculated by using the rigorous coupled wave analysis (RCWA). In TM polarization, the absorption of solar cells with optimized AR coating can be increased by an average of 35% compared with that without AR coating in the range of 300~840 nm. Furthermore, the absorption of solar cells with optimized back reflector can be increased by an average of 23% compared with that without back reflector in the range of 700~840 nm. The amorphous silicon (a-Si) thin-film solar cell that we design has broadband and omnidirectional absorption, so that it can improve the conversion efficiency of solar cells.

Key words: antireflection coatings; diffraction gratings; photonic crystals; absorption; solar cells

1 引 言

非晶硅薄膜太阳能电池能够降低成本,但光吸收效率随着电池吸收体变薄也随之降低。薄的活性层厚度和长波段内光子吸收厚度之间的矛盾

是限制非晶硅薄膜电池效率提高的主要原因。采用陷光机制可以增加吸收,进而提高薄膜太阳能电池的效率^[1-2]。陷光方式通常有两种:一是在电池上表层加增透膜^[3];二是在电池底部增加具有陷光效果的背反射层^[4]。2007年, Peter Bermel^[5]

收稿日期: 2012-12-26; 修订日期: 2013-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61167002)资助项目

作者简介: 沈宏君(1970-), 男, 河南商丘人, 博士, 主要从事光子晶体在太阳能电池中的应用的研究。

E-mail: shenhongj2004@126.com

对一维光子晶体、矩形光栅加一维光子晶体和三角晶格加一维光子晶体 3 种不同结构的太阳能电池背反射器的陷光效果进行了比较。2008 年, Dayu Zhou 等^[6]采用布拉格结构与矩形衍射光栅相结合的后反射器来增加电池的吸收。2012 年, Wei Zhang 等^[7]以金属三角光栅作为背反射器, 以矩形介质光栅作为增透膜设计了一种非晶硅太阳能电池。在他们的研究中, 或者采用矩形衍射光栅或者采用三角金属衍射光栅, 然而矩形光栅的效率较低, 金属衍射光栅也存在固有损耗缺陷。

本文中由三角介质光栅和一维光子晶体构成的背反射器不但弥补了金属反射器存在的固有损耗缺陷, 而且效率也高于矩形光栅^[8]。太阳能电池的上表层由 4 层从低到高渐变的介质材料构成, 在宽频和全角范围内减少了太阳光在电池器件表面的反射损耗。此外, 运用严格耦合波方法对非晶硅薄膜太阳能电池各个部分的光吸收进行了模拟和讨论。优化后的太阳能电池在全角高频范围内对太阳光有较高的吸收。

2 结构设计

非晶硅薄膜太阳能电池示意图如图 1 所示。所设计的非晶硅薄膜太阳能电池从电池顶部向下的介质材料分别为 SiO_2 、 TiO_2 、ITO、Si 和 a-Si。渐变介质构成的增透膜层、活性层、三角介质衍射光栅和一维光子晶体的厚度分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 h 和 d_6 。ITO 的折射率 $n = 1.9$, Si 的折射率 $n = 3.5$ 。 SiO_2 的折射率色散用柯西公式计算:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (1)$$

其中 $A = 1.491$, $B = 0.00686$, $C = -0.0007648$ 。

TiO_2 的折射率色散公式为:

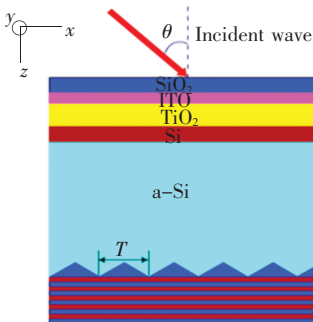


图 1 非晶硅薄膜太阳能电池示意图

Fig. 1 Schematic of the amorphous Si thin-film solar cell

$$n(\lambda) = \sqrt{5.913 + \frac{0.2441\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0803}}, \quad (2)$$

公式(1)、(2)中波长 λ 的单位为 μm 。介质衍射光栅的周期设定为 $1 \mu\text{m}$, 一维光子晶体由 Si/ SiO_2 组成。下面利用严格耦合波理论^[9-10]数值仿真所设计的结构。

3 参数优化

根据折射率定律, 对增透膜的各层厚度进行优化。优化后的厚度分别为 $d_1 = 120 \text{ nm}$, $d_2 = 80 \text{ nm}$, $d_3 = 50 \text{ nm}$, $d_4 = 20 \text{ nm}$, 活性层厚度 $d_5 = 2 \mu\text{m}$, 三角形衍射光栅的槽深度 $h = 480 \text{ nm}$ ^[11]。一维光子晶体是由不同介质材料 Si 和 SiO_2 交替组成的, Si 层的厚度为 $a = \lambda/4n_1$, SiO_2 的厚度为 $b = \lambda/4n_2$, 其中 n_1 和 n_2 分别是 Si 和 SiO_2 的折射率。在一定频率范围内, 这种类型的光子晶体构成布拉格反射镜。为了在长波长范围有高反射率, 选取中心波长为 700 nm , 对应的 Si 和 SiO_2 的折射率为 3.5 和 1.46, 它们的厚度分别为 $a = 50 \text{ nm}$, $b = 112 \text{ nm}$, 5 层一维光子晶体的总厚度 $d_6 = 810$

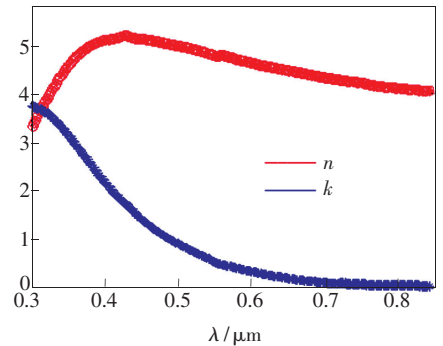


图 2 非晶硅的折射率色散关系

Fig. 2 Refractive index of the amorphous as a function of wavelength

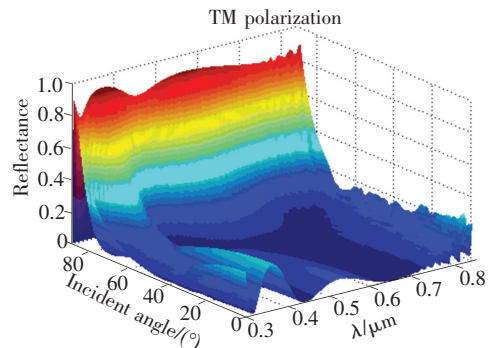


图 3 增透膜的透射光谱(蓝色表示低反射)

Fig. 3 Transmission spectrum of AR coating, the blue area represents low reflection.

nm。图2为非晶硅的折射率色散图。

图3为TM偏振下增透膜的反射光谱,可以看出当入射角小于60°时,增透膜在300~840nm范围的透射效率很高,光很容易进入电池吸收层。

图4为三角介质衍射光栅加Si/SiO₂一维光子晶体的反射光谱,5层Si和SiO₂交替构成的一维光子晶体结构使得光接近于全反射,同时三角光栅的衍射使得整个反射波沿电池的横向传播,延长了光子在吸收层的光程。

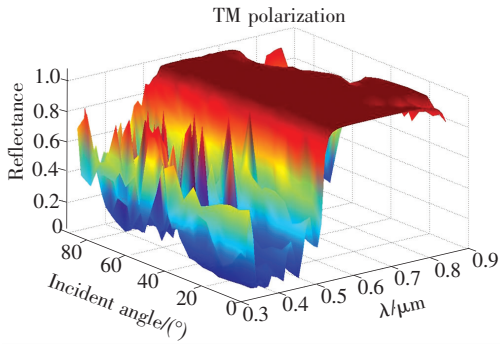


图4 介质三角光栅加一维Si/SiO₂光子晶体的反射谱(红色表示高反射)

Fig.4 Reflection spectra of dielectric triangular grating and one-dimensional Si/SiO₂ photonic crystal, the red area represents high reflection.

4 仿真计算和讨论

RCWA是对麦克斯韦方程组的严格求解,利用RCWA方法可以计算出入射平面波在本文设计结构的反射率R和透射率T,从而根据A=1-R-T得出吸收率。在数值模拟中,为了避免出现数值不稳定,通常使用增强透射矩阵方法,对TE、TM偏振的入射光可以获得收敛、稳定的解^[12-13]。

图5所示为TM偏振下,0°、30°和60°入射角对应的吸收光谱。使用RCWA的计算结果显示,如果没有增透膜,光在空气和非晶硅的界面就有50%左右的光子被反射而不能进入活性层参与吸收。背反射层接收到的主要是波长在500~840nm范围内的光子,把它们再次反射回电池体进行吸收,吸收率平均可以提高23%。

从图6可以看出,在光垂直入射情况下,非晶硅薄膜太阳能电池加上高透射的增透膜可以提高整个波段的吸收,可见光范围的吸收率可以增加近35%,700~840nm之间的吸收率也增加了23%左右。对于300~680nm的短波,2μm厚的

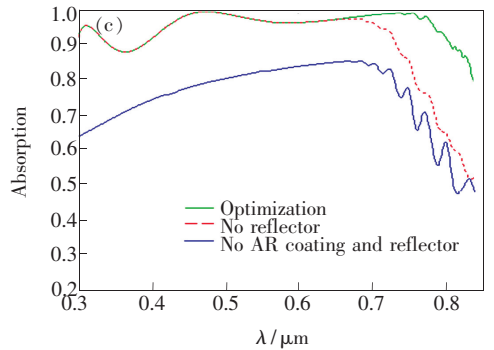
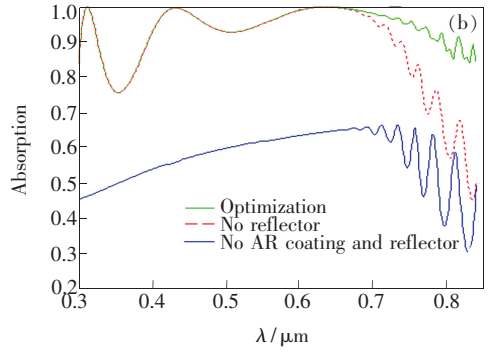
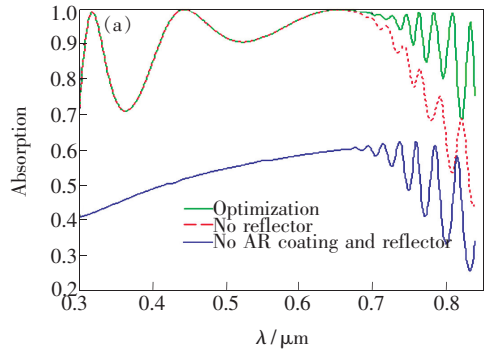


图5 TM偏振下的光吸收,入射角分别为0°(a)、30°(b)和60°(c)。

Fig.5 Light absorption for TM polarized waves, the incident angles are 0°(a), 30°(b), and 60°(c), respectively.

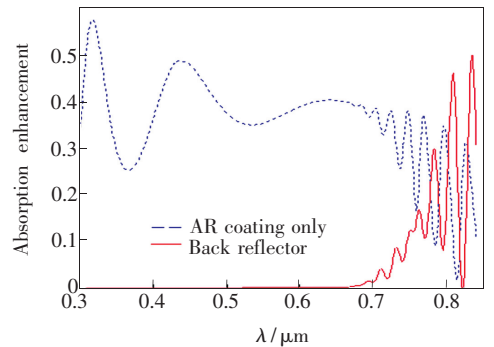


图6 吸收增强光谱

Fig.6 The absorption enhancement spectra

非晶硅可以完全吸收;而680~840nm之间的长波则很大一部分会透过吸收层。加上背反射层

后,透射下去的长波将再次被反射回电池体进行吸收,提高了吸收率。

仿真计算的太阳能电池吸收光谱如图 7 所示。对于 TM 偏振,当入射角为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 时,波长

在 $400 \sim 840 \text{ nm}$ 之间有 90% 以上的吸收。在 TE 偏振下,吸收有所下降,入射角度为 $0^\circ \sim 70^\circ$ 时,波长在 $400 \sim 840 \text{ nm}$ 之间有高于 90% 的吸收。

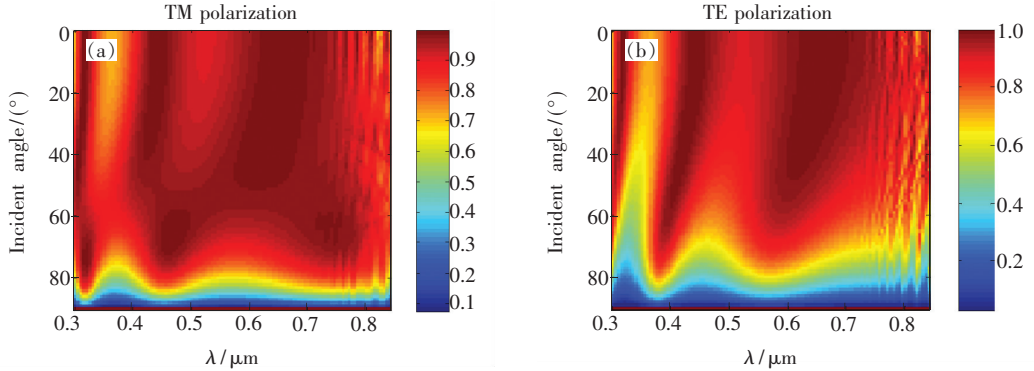


图 7 太阳能电池吸收光谱,红色表示高吸收。(a) TM 偏振;(b) TE 偏振。

Fig. 7 Spectra of the solar cell light absorption with varying incident angles. The red area represents high absorption. (a) TM polarization. (b) TE polarization.

5 结 论

设计了一种能够有效增加陷光和光吸收的非晶硅薄膜太阳能电池结构。增透膜的设计使得光容易进入活性层,三角介质衍射光栅加一维光子

晶体结构的背反射层是为了使电池更充分地吸收长波长光子。利用 RCWA 方法仿真计算了 TM 和 TE 偏振下的吸收情况。该设计能够使非晶硅薄膜太阳能电池在全角宽频范围内有效增加对光的俘获,提高太阳能电池的转化效率。

参 考 文 献:

- [1] Zeng L, Yi Y, Hong C Y, *et al.* Efficiency enhancement in Si solar cells by textured photonic crystal back reflector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(11):111111-1-3.
- [2] Zheng G G, Xian F L, Li X Y. Enhancement of light absorption in thin film silicon solar cells with metallic grating and one-dimensional photonic crystals [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, 28(5):05421-1-4.
- [3] 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):251108-1-3.
- [4] Springer J, Poruba A, Mullerova L, *et al.* Absorption loss at nanorough silver back reflector of thin-film silicon solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(3):1427-1429.
- [5] Bermel P, Luo C Y, Zeng L R, *et al.* Improving thin-film crystalline silicon solar cell efficiencies with photonic crystals [J]. *Opt. Exp.*, 2007, 15(25):16986-17000.
- [6] Zhou D Y, Biswas R. Photonic crystal enhanced light-trapping in thin film solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, 103(9):093102-1-5.
- [7] Zhang W, Zheng G G, Li X Y. Design of light trapping structures for light-absorption enhancement in thin film solar cells [J]. *Optik*, 2012, Available online.
- [8] Chutinan A, Kherani N P, Zukotynski S. High-efficiency photonic crystal solar cell architecture [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(11):8871-8878.
- [9] Moharam M G, Gaylord T K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 72(10):1385-1392.
- [10] Moharam M G, Pommet D A, Grann E B. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: Enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12(5):1077-1084.

- [11] Shen H J, Lu H D, Cheng X Z. Back reflectors of thin-film silicon solar cells consisting of one-dimensional diffraction gratings and one-dimensional photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(6):633-639 (in Chinese).
- [12] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12(5):1068-1076.
- [13] Kong W J, Wang S H, Wei S J, *et al.* Diffraction property of broadband metal multi-layer dielectric gratings based on rigorous coupled-wave analysis [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2011, 60(11):114214-1-7 (in Chinese).

欢迎订阅 欢迎投稿

《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,青年科学家曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国权威学术期刊(RCCSE)
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省精品期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compindex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国 INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PJK)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网

中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

地址:长春市东南湖大路3888号

《光学 精密工程》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)86176855

传真:(0431)84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn

gxjmgc@vip.sina.com

http://www.oepe.net

国内邮发代号:12-166

国外发行代号:4803BM

定价:50.00元/期

帐户:中国科学院长春光学
精密机械与物理研究所

银行:建行长春朝阳支行

帐号:22001360300054506148