

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

马 靖 林斯乐 程树英*

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350018)

摘要 利用光散射与导模共振的理论,设计了一种薄膜太阳能电池的陷光结构,对硫属化合物薄膜太阳能电池进行了优化设计,选择多孔氧化铝薄膜(PAA)作为散射层,模型结构层厚度为:窗口层(AZO)320 nm,缓冲层(In_2S_3)65 nm,吸收层(SnS)660 nm。研究表明,光散射与导模共振相结合的薄膜太阳能电池结构能够提高自身的光吸收率,其中由光散射结构提高的全光谱吸收率约为 3%。本设计可以优化薄膜太阳能电池的吸收光谱,提高其对近红外波段的光吸收能力,在波长 950 nm 位置的吸收率达到 85%,增强了薄膜太阳能电池的光利用率。

关键词 光学设计;陷光结构;薄膜太阳能电池;导模共振

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0431002

Application of Scattered Light Model and Guided Mode Resonant in Structure Design of Thin Film Solar Cells

Ma Jing Lin Sile Cheng Shuying

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350018, China)

Abstract A light trapping structure of solar cell is proposed by the theory of light scattering and guided mode resonant. The porous anodic alumina (PAA) is used as a scattering layer. The thicknesses of the model are: window layer (AZO) is 320 nm, buffer layer (In_2S_3) is 65 nm and absorbing layer (SnS) is 660 nm. The simulated and experimental results show that the absorption of solar cell structure can be enhanced by light scattering and guided mode resonant. The absorption is enhanced by about 3% by the light scattering structure. This design can optimize the absorption spectra of this film solar cell and improve the absorption ability of near-infrared light. The absorption at the wavelength of 950 nm is enhanced to 85%, and the solar energy is better used.

Key words optical design; light trapping structure; thin-film solar cells; guided mode resonance

OCIS codes 310.2790; 310.6805; 310.6860

1 引 言

陷光技术可以增强薄膜太阳能电池的光吸收能力,从而提高电池的光电转换效率。通常来说,薄膜太阳能电池的总厚度在 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 之间,而其吸收层的厚度通常为 $0.6\sim 1\ \mu\text{m}$,因而如此薄的吸收层并不能很好地吸收光能量。改善其光吸收能力的一个办法是增大吸收层厚度,但是,过厚的吸收层会增强电池中载流子的复合,从而降低电池的效率。出于以上的考虑,薄膜太阳能电池的吸收层不能太厚,而

薄的吸收层又不能很好地吸收可利用的光能,因此,需要有合适的陷光技术来提高薄的吸收层的光吸收能力。在近几年的研究中,普遍应用在太阳能电池上的陷光技术是通过在上表面加入适当的表面织构。该技术的理论模型是由 Yablonovitch^[1] 提出的,在薄膜太阳能电池中加入陷光结构可以提高电池的量子效率并增大短路电流^[2]。Zeman 等^[3] 研究了具有表面织构的非晶硅薄膜太阳能电池的陷光能力,实验结果表明,具有表面织构的电池的光生电流

收稿日期: 2013-11-11; 收到修改稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61076063)

作者简介: 马 靖(1977—),女,博士,副教授,主要从事激光光谱及非线性光学等方面的研究。

E-mail: majing@fzu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: sycheng@fzu.edu.cn

从 14.4 mA/cm^2 增大到 17.3 mA/cm^2 。Rowlands 等^[4]也研究了带有表面织构的非晶硅薄膜太阳能电池的陷光能力,得出织构表面可以增强电池的光吸收能力的结论。张超等^[5]研究了激光制绒对非晶硅薄膜太阳能电池陷光结构的影响。为进一步提高薄膜太阳能电池的光吸收能力,导模共振结构也被应用在电池结构中^[6-8]。Katsumi 等^[9]在 GaAs 太阳能电池中加入了导模共振结构,其量子效率在某些共振波段得到了增强。还有一些相关报道,例如寻找更合适的替代材料^[10-11]。

本文利用光散射与导模共振的模型设计了薄膜太阳能电池结构,并对其吸收光谱进行测试与分析,研究结果表明,该结构对于提高薄膜太阳能电池的光吸收效率有一定的效果。

2 实验原理

图 1 给出了表面织构的陷光结构原理。显然,散射光延长了光在吸收层中的有效光程,增大了光在吸收层中被吸收的概率,提高了光利用率。在一般情况下,与吸收层相邻的两个膜层材料的折射率都会低于吸收层[如透明导电氧化物(TCO)薄膜],或者背电极的光反射率较高,以至于光会在吸收层的两个界面上来回反射,其结果也是增大了光在吸收层中被吸收的概率,提高光利用率。Yablonovitch^[1]给出该模型的光强增强特性为 $I_{\text{int}} = 2n^2 \times I_{\text{inc}}$,其中 I_{int} 和 I_{inc} 分别为介质中与入射的光强, n 为介质的折射率。由于大部分吸收层的折射率为 3.4,所以由散射光引入的在吸收层中的光强增强效果还是比较显著的。

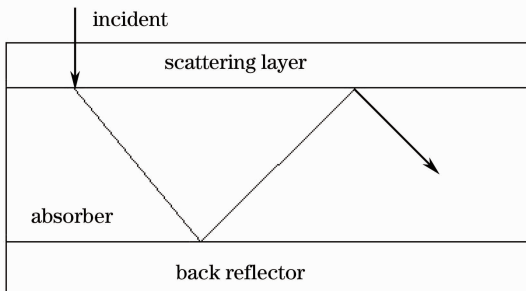


图 1 吸收层中的光散射

Fig. 1 Scattering light in absorption layer

对大多数的吸收层材料而言,其对可见光的吸收率较高,但是对近红外光的吸收率较低。也就是说,薄膜尺度的吸收层不能很好地吸收与利用近红外光,而对这个波段的光的利用率偏低将直接影响电池的输出特性^[11]。因此,需要设计一种具有增强

近红外光吸收率的电池结构,而导模共振的理论正适合应用在这种电池结构中。

在导模共振结构中,吸收层中的光强是按波长的分布周期性增减的,其表达式为^[9]

$$2\beta L + \phi_1 + \phi_2 = m\pi (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (1)$$

当 m 为偶数时,其结果是共振增强;当 m 为奇数时,其结果是共振减弱。其中 $\beta = 2n\pi/\lambda$ (λ 为波长, n 为折射率), ϕ_1, ϕ_2 是反射引入的相位差, L 为吸收层的厚度。从式中可以看出,满足导模共振的条件是依赖于波长的,即共振只是对吸收光谱的部分波段有增强的效果,因此希望这个增强效果可以出现在吸收光谱中更有提高空间和价值的波段。对于一般的硫属化合物薄膜太阳能电池,其吸收层的禁带宽度在 $1.3 \sim 1.6 \text{ eV}$,只有能量大于吸收层禁带的光子能够激发价带电子跃迁到导带,进而导带电子在内建电场的引导下定向移动形成电流。一般来说,吸收层材料对近红外波段(950 nm)附近的吸收率较低,而 950 nm 恰好对应于能量为 1.3 eV 的光子,因此近红外波段的光对于电池吸收利用是有价值的,其吸收率又有较高的提升空间,所以在陷光结构的设计中,可以将共振增强的波段设定在 950 nm 附近。

另一方面,由于模型中由散射层引入一部分的散射光,考虑相位差的时候,必须考虑光到膜层界面的入射角。当膜层厚度相同时,不同的入射角并不一定都满足共振条件,所以希望选取一个膜层厚度值,使之满足共振条件,同时又使得其对大部分不同入射角的光都有共振效果。选取波长 950 nm 为共振增强位置,模拟的结果如图 2 所示,不同的 m 值对应着不同的共振厚度,且对于某一个共振厚度,对绝大范围的入射角都有效。从图中可以看出,当吸收层厚度为 $740, 660, 580 \text{ nm}$ 时,其结构可以满足

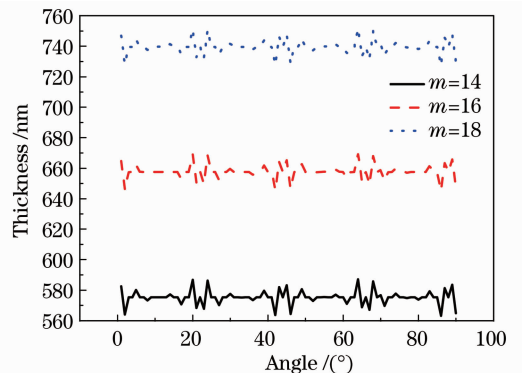


图 2 共振厚度模拟结果

Fig. 2 Simulation of resonant thickness

共振条件,也就是说从光学的角度来看,这几种吸收层厚度都可以做到共振增强。但是从电学性能角度考虑,硫属化合物薄膜太阳能电池的电学特性要求其吸收层的厚度应该至少大于 600 nm,以至于空间电荷区足够宽以传导载流子^[12],但吸收层也不能够太厚,过厚的吸收层会增加载流子的复合,从而降低电池效率。综上所述,在这些吸收层的共振厚度中,选取厚度为 660 nm 的吸收层($m=16$)作为结构参数,可以使得绝大多数入射角的光都满足共振条件。据此判断,这个模拟结果对于增强 950 nm 附近波段的光吸收能力是比较理想的。

较为合适的窗口层与缓冲层厚度分别为 300 nm 与 50 nm^[13]。同理,用共振减弱的条件来设计窗口层与缓冲层厚度,希望光在这两个辅助层中的损耗最小。结合文献中提到的具有高效率的电池结构膜层参数,计算结果为:窗口层(AZO)320 nm,缓冲层(In_2S_3)65 nm,吸收层(SnS)660 nm。其中,窗口层与缓冲层的计算结果满足共振减弱条件。图 3 给出了所研究的硫属化合物薄膜太阳能电池的结构示意图。

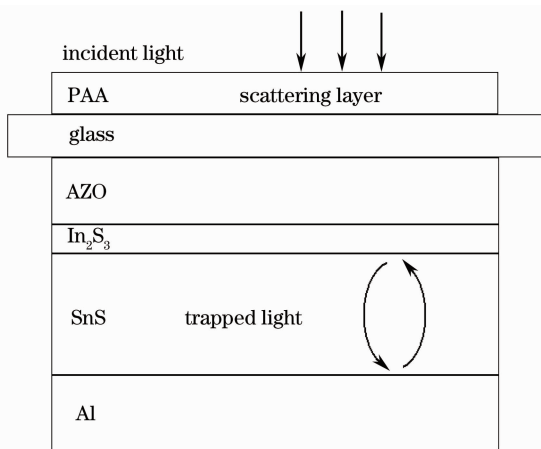


图 3 薄膜太阳能电池结构

Fig. 3 Structure of thin film solar cell

3 实 验

采用浮法玻璃作为基片,所有基片都依次在去离子水、丙酮、酒精中清洗干净。散射层 PAA 的做法:用真空蒸镀的方法制备铝膜,使用的真空蒸镀设备为 WTX500/650-1SD-3,使用的镀膜材料为纯度 99.98% 的铝条,蒸发时的真空度保持在 5×10^{-4} Pa 以下。之后,将铝膜放置在 0.3 mol/dm^3 的草酸溶液中,用 10 V 的电压进行电化学氧化。氧化一定时间后,将样品浸入到 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 5% (质量分数) 的磷酸

溶液中一段时间进行扩孔。最后将样品放到 $480 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境中退火 5 h。

AZO 薄膜是用射频磁控溅射的方法制备的,使用的是 Zn-Al 合金靶(Al 的质量分数为 2%),溅射气体使用 Ar(99.99%),流量为 60 sccm(sccm 为标准状况下 1 mL/min),氧气比例为 4.2%。SnS 与 In_2S_3 薄膜也是使用真空热蒸镀的方法制备,蒸发料纯度为 99.9%。

样品的反射光谱通过分光光度计(Cary 5000-Scan UV-vis-NIR Spectrometer)来测试。样品膜厚通过台阶仪测试(TENCOR D100)。

实验所用的 4 组样品的具体参数如表 1 所示。S1 与 S2 的区别在于有无 PAA 散射层,且 S1 与 S2 没有按照陷光结构来设计;S4 的结构参数是按照实验原理中计算好的陷光结构参数来设计的,S3 只是增加了吸收层的厚度。

表 1 样品参数

Table 1 Parameters of the samples

Samples	PAA	AZO /nm	In_2S_3 /nm	SnS /nm
S1	Without	317	55	515
S2	With	317	55	515
S3	With	320	65	670
S4	With	320	65	659

4 实验结果与讨论

由于 PAA 薄膜的表面是多孔的结构,较为粗糙,且是透明材料,将其作为光散射层,可以引入一定量的散射光,以提高电池结构的光散射能力。PAA 表面形貌如图 4 所示,可以看出表面是一种多孔结构,并非致密薄膜,对于提高光散射能力有一定作用^[14]。

图 5 给出了样品 S1 与 S2 的吸收光谱,S2 比 S1 在全波段光吸收率提高了约 5%,显然,这是由 PAA 薄膜带来的提高。在结构中加入 PAA 薄膜就是想要通过其光散射特性来提高电池结构的陷光能力。从图 5 中可以看出,波长 $900 \sim 1000 \text{ nm}$ 范围的吸收率较低,都低于 50%,然而这部分光往往对太阳能电池是有用的,所以需要通过优化电池的结构设计以提高这部分光的吸收率,从而提升电池的整体输出特性。

由于 PAA 薄膜与玻璃基片的组合具有一定的减反射特性,吸收率的提高可能是由于 PAA 薄膜的减反射特性导致的,故进一步测试了 PAA 薄膜的反射光谱,如图 6 所示。反射光谱的测试结果显

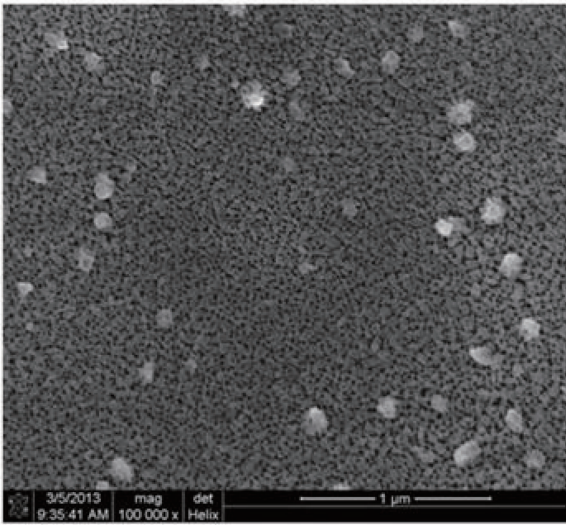


图 4 PAA 薄膜的表面形貌

Fig. 4 Surface topography of PAA film

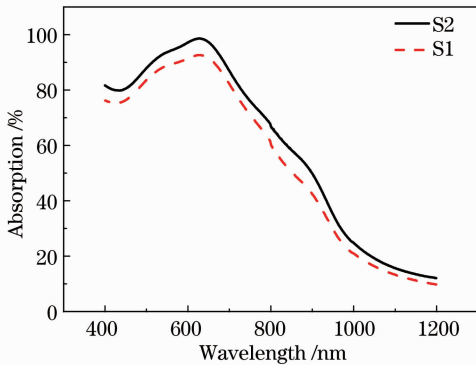


图 5 S1 与 S2 的吸收光谱

Fig. 5 Absorptionspectrum of S1 and S2

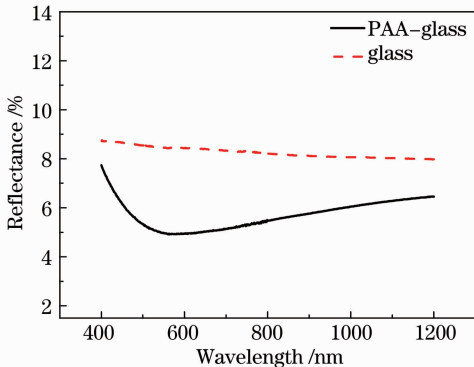


图 6 PAA-glass 与 glass 的反射光谱

Fig. 6 Reflectance spectrum of PAA-glass and glass

示,有 PAA 样品的全光谱反射率减小了约 2%,也就是说,全光谱提高的 5%吸收率中约有 3%是来源于散射光的贡献。对比 S1 与 S2 样品,S2 样品的全光谱范围吸收率的提高同时受 PAA 薄膜的减反射特性与光散射特性的影响。

应用导模共振的理论来设计电池结构。S4 样

品的结构参数满足理论优化的导模共振薄膜太阳能电池结构,而 S3 的膜层结构略微偏离了理论优化的计算结果。图 7 给出了 S3 和 S4 的吸收光谱,从图中可以看出,相较于 S1 与 S2(没有导模共振结构),S3 和 S4 样品在可见光波段的平均吸收率并无太大变化,而在波长 950 nm 附近的吸收率明显得到提高,S4 在 950 nm 附近的吸收率可以达到 85%。对比 S3 与 S4,可以看到 S4 的吸收率要高于 S3,而实际上 S3 的吸收层厚度要比 S4 厚,因而在共振增强的条件下,电池的光吸收效率得到了一定程度的改善。同时,S3 与 S4 在 900~1000 nm 中出现的吸收峰有偏差,S4 的吸收峰位置要比 S3 小约 38 nm,即 S3 与 S4 共振增强的波长位置不一样,这是由共振条件所决定的,而影响 S3 与 S4 共振条件差异的就是二者的吸收层厚度。所以,由两组样品在近红外波段吸收峰的偏差,进而可以通过调整膜层结构(如吸收层厚度)来设计具有波长选择吸收增强特性的陷光结构,这在薄膜太阳能电池结构的设计中有一定的优势。对比 400~1000 nm 波段的吸收光谱(电池有效利用光谱),S4 的平均吸收率为 86.4%,而 S3 的平均吸收率为 84.0%。同样,吸收层更薄的 S4 的整体吸收率比 S3 要更高,因而可以在节约太阳能电池材料的同时利用更多的光能,这也证实了陷光结构的有效性。

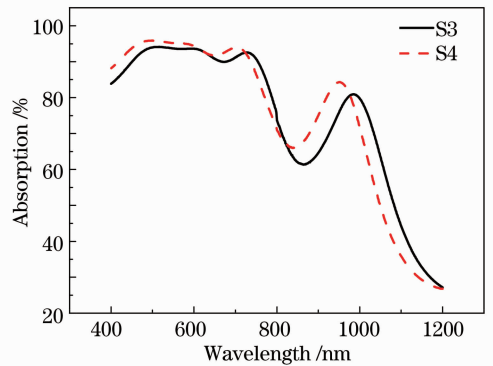


图 7 S3 与 S4 的吸收光谱

Fig. 7 Absorption spectrum of S3 and S4

从吸收谱的图形来看,在 950 nm 附近出现的吸收峰并不是很尖锐,因而吸收增强的波段可以较多,950 nm 附近整体的光吸收能力的增强效果较好。对比类似的研究,如用光栅引入散射光的方法^[15],在吸收光谱上表现为明显的振荡,吸收峰很尖锐,虽然某特定波长的光吸收率可以增强到 90%以上,但得到增强的光波长范围较窄,在太阳能电池的应用中不利于电池效率的增强。

5 结 论

在理论上利用光散射与导模共振模型改善薄膜太阳能电池吸光谱,并用实验结果验证了理论上的优化计算。由光散射结构提高的全光谱吸收率约为3%,另一方面,波长在900~1000 nm的吸收能力通过导模共振结构得到了较为显著地增强,950 nm位置的吸收率提高到85%。应用光散射与导模共振结合的理论来设计薄膜太阳能电池的陷光结构,可以增加电池的光利用率。

参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Statistical ray optics [J]. J Opt Soc Am, 1982, 72(7): 899-907.
- 2 Y Hamakawa. Thin-Film Solar Cells. Next Generation Photovoltaics and Its Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 2004. 95-125.
- 3 J Kr M Zeman, F Smole, M Topic. Optical modeling of a-Si:H solar cells deposited on textured glass/SnO₂ substrates [J]. J Appl Phys, 2002, 92(2): 749-755.
- 4 Sally-anne F Rowlands, John Livingstone, Christopher P Lund. Optical modeling of finely textured amorphous silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2002, 71(3): 399-405.
- 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 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Ling Leijie, *et al.*. Guided-mode resonance spectral characteristics in tunable orthogonal grating [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 32(5): 0505002.
王振华,吴永刚,凌磊婕,等.正交双光栅结构的导模共振光谱特性[J].光学学报,2011,32(5):0505002.
- 7 Liu Wei, Hou Jing, Lu Qisheng, *et al.*. Anti-resonant reflecting optical waveguide model for metallic photonic crystal fibers [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 369-372.
刘伟,侯静,陆启生,等.金属光子晶体光纤的反共振反射光学波导模型[J].中国激光,2009,36(s1):369-372.
- 8 Guo Lingwei, Ma Jianyong. High-sensitive biosensor based on GMR in self-suspended grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(12): 1480-1487.
郭凌伟,麻健勇.基于导模共振效应的自支撑超灵敏生物探测器[J].光子学报,2012,41(12):1480-1487.
- 9 Katsumi Kishino, M Selim Unlü, Jen-Inn Chyi, *et al.*. Resonant cavity-enhanced (RCE) photodetectors [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1991, 27(8): 2025-2034.
- 10 J Nelson. The Physics of Solar Cells [M]. London: Imperial College Press, 2003.
- 11 Ning-Ning Feng, Jurgen Michel, Lirong Zeng, *et al.*. Design of highly efficient light-trapping structures for thin-film crystalline silicon solar cells [J]. IEEE Transactionson Electron Devices, 2007, 54(8): 1926-1933.
- 12 Roland Scheer, Hans-Werner Schock. Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices [M]. Weinheim, Wiley-VCH, 2011.
- 13 N Naghavi, S Spiering, M Powalla, *et al.*. High-efficiency copper indium gallium diselenide (CIGS) solar cells with indium sulfide buffer layers deposited by atomic layer chemical vapor deposition [J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2003, 11(7): 437-443.
- 14 J Peelen, R Metselaar. Light scattering by pores in polycrystalline materials: transmission properties of alumina [J]. J Appl Phys, 1974, 45(1): 216-220.
- 15 Xianqin Meng, Emmanuel Drouard, Guillaume Gomard, *et al.*. Combined front and back diffraction gratings for broad band light trapping in thin film solar cell [J]. Opt Express, 2012, 20(s5): A561-A571.

栏目编辑:韩峰