

doi: 10.3788/gzxb20164508.0831001

# 溶胶-凝胶法制备 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池梯度折射率减反膜

田冰涛, 王晓栋, 牛彦彦, 曹媛媛, 冯建斌, 张志华, 沈军

(同济大学 物理科学与工程学院, 上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为了减少太阳能电池表面反射, 提高多结太阳能电池效率, 针对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池和 AMO 光谱, 设计了折射率梯度排列的四层减反膜系结构. 利用溶胶-凝胶技术, 通过对材料折射率的定向调节, 制备了折射率梯度排列的  $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{酸性 SiO}_2/\text{碱性 SiO}_2$  四层减反膜. 实验结果表明, 镀膜后的三结太阳能电池在 300~1 700 nm 波长范围内的加权平均反射率由原先的 28.58% 降低至 4.86%, 最高反射率由 46.35% 降低至 15.45%.

**关键词:** 减反射膜; 溶胶-凝胶法; 梯度折射率; 太阳能电池; 多层膜系

中图分类号: O48

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0831001-7

## Sol-gel Preparation of Graded-refractive-index Antireflective Coatings for GaInP/GaAs/Ge Triple-junction Solar Cells

TIAN Bing-tao, WANG Xiao-dong, NIU Yan-yan, CAO Yuan-yuan, FENG Jian-bin,  
ZHANG Zhi-hua, SHEN Jun

(Shanghai Key Laboratory of Special Artificial Microstructure Materials and Technology,  
School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To reduce the reflection and improve the efficiency of multi-junction solar cell, a 4-layer antireflective coating with graded refractive index was designed for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell. Through adjusting the refractive indices of the different coatings, a 4-layer  $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{A-SiO}_2/\text{B-SiO}_2$  antireflective coating with graded refractive index was successfully prepared by sol-gel dip-coating method. The results shown that the average reflectance of the triple-junction solar cell coated with the AR coatings decreased from 28.58% to 4.86% while the maximum reflectance decreased from 46.35% to 15.45% in the wavelength range of 300~1 700 nm.

**Key words:** Antireflective coating; Sol-gel process; Graded refractive index; Solar cell; Multilayer films

**OCIS Codes:** 310.1210; 310.6860; 310.4165; 310.6188

## 0 引言

太阳能电池是航天器的主要能量来源. 随着航天技术的不断进步, 空间飞行器对电源系统的要求也越来越高, 人们迫切需要一种更高效率、更好抗辐射性的

太阳能电池. 在此需求背景下, III-V 族化合物半导体多结级联太阳能电池<sup>[1-4]</sup>应运而生. 三结级联太阳能电池<sup>[5-7]</sup>是 III-V 族太阳能电池发展历史的一个里程碑, 是目前最成熟的多结太阳能电池, 取得了令人瞩目的成就并得到了广泛的应用. 目前, 由于带隙宽度和晶格

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. U1230113, 11304228)、国家科技支撑计划(No. 2013BAJ01B01)、上海航天科技创新基金项目(No. SAST201370)、上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划”(No. 14CG19)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

**第一作者:** 田冰涛(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为溶胶-凝胶光学薄膜. Email: bingtao\_tian@163.com

**通讯作者:** 王晓栋(1984-), 男, 助理教授, 博士, 主要研究方向为溶胶-凝胶光学薄膜和新型纳米材料的喇曼光谱和光致发光光谱. Email: xiaodong\_wang@tongji.edu.cn

**收稿日期:** 2016-02-04; **录用日期:** 2016-04-08

<http://www.photon.ac.cn>

匹配的限制,三结电池的效率几乎达到了极限,从电池的材料和结构本身提高电池效率已经非常困难.而在太阳能电池表面由于光的反射作用,会导致较大的光能损耗.因此,减少太阳能电池表面的光反射成为提高太阳能电池转化效率的有效途径.在太阳能电池表面制备减反膜<sup>[8-10]</sup>,可以增加入射光吸收率,进而增加电子空穴对以增加光电流,从而进一步提升太阳能电池的光电转换效率.

目前,国内外已有一些关于多结太阳能电池减反膜的报道<sup>[11-13]</sup>,但大部分尚在膜系理论设计阶段.其中一些文献提出使用折射率梯度排列的方式来制备针对多结太阳能电池的宽谱减反射膜.如 Xing Yan 等<sup>[12]</sup>利用斜角度电子束沉积法制备出折射率为 1.11 的 SiO<sub>2</sub> 薄膜材料,在 GaInP/GaAs/GaInAs 三结电池上制备出折射率梯度变化四层减反射膜,实现了在 350~1 600 nm 波长范围内的宽谱减反射效果. Jheng-Jie Liu 等<sup>[13]</sup>结合使用电子束蒸镀法和旋转涂膜法,针对 350~1 600 nm 的波长范围和 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池结构,设计并制备了折射率梯度排列的三层减反射膜.这些报道所使用的主要制备方法,都是利用物理镀膜方式制备多层减反膜系或者在电池表面制作特殊微结构的方式来达到减反效果,而完全使用溶胶-凝胶法在多结电池表面制备多层宽谱减反膜的研究鲜有报道.

与物理镀膜技术相比,在制备折射率梯度变化的多层膜方面,溶胶-凝胶镀膜技术<sup>[14-15]</sup>成本低,能够获得折射率在 1.2 以下的低折射率薄膜材料<sup>[16-17]</sup>.最关键的是,同种材料可以通过调节材料的微观结构,使其折射率在较大的范围内改变.即可以根据需要,调节各膜层材料的折射率,以达到最佳的膜系匹配效果.

本文针对 Ge 基三结太阳能电池,设计了一种折射率梯度排列的四层减反射膜系.基于溶胶-凝胶镀膜技术,选择酸性催化的 SiO<sub>2</sub> (A-SiO<sub>2</sub>)、碱性催化的 SiO<sub>2</sub> (B-SiO<sub>2</sub>)、ZrO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 等四种折射率高低不同的薄膜材料.通过调节薄膜微观结构定向改变薄膜折射率,制备出了折射率梯度排列的 TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>/A-SiO<sub>2</sub>/B-SiO<sub>2</sub> 四层减反射膜.

## 1 理论设计

本文采用的太阳能电池的结构如图 1. 该电池为 GaInP/GaAs/Ge 三级级联结构,各级电池之间用隧穿结(Tunnel Junction)联接,以 AllnP 作为窗口层(AllnP Window). 每个单结电池由数层具有不同功能的 III-V 族半导体材料薄膜构成(图中所示的是主要材料),整个电池由 10 层 III-V 族半导体材料的膜层组成,是一个十分复杂的多层膜系结构.多层减反膜系将直接制备于电池窗口层表面,在设计 and 制备上都存在一定难

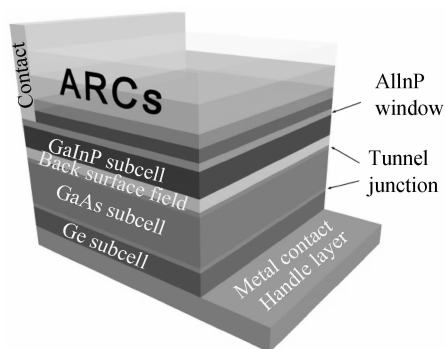


图 1 三结电池和减反膜系结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of triple-junction solar cell and AR coating structures

度.该电池的工作波长范围为 300~1 700 nm,因此要求减反射膜系在该宽光谱范围内有良好的减反射效果,使更多入射光能进入电池.考虑到该电池的应用对象是空间航天器,设计应针对 AM0 太阳光谱.由单个波长点反射率、入射光子通量,可计算出在整个光谱范围内的加权平均反射率为

$$R_{\text{average}} = \frac{\int_{300}^{1700} I_{\text{AM0}}(\lambda) \times R(\lambda) d\lambda}{\int_{300}^{1700} I_{\text{AM0}}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中,  $I_{\text{AM0}}(\lambda)$  为 AM0 光谱光强.

根据薄膜光学设计理论,结合三结电池样品的具体结构和溶胶-凝胶薄膜的光学特性,利用 Essential Macleod 光学薄膜设计软件,分别设计出双层膜结构、三层膜结构以及四层膜结构等多种折射率梯度排列的膜系结构,并采用模拟退火算法(Simulated Annealing)<sup>[18-19]</sup>计算各结构各膜层最优的折射率和膜层厚度.在设计的过程中,AM0 光谱能量作为权重赋给各波长,优先保证光谱能量大的波段反射率的降低,以达到加权平均反射率的最优化.

各结构对应的模拟优化反射率光谱如图 2. 由图 2 可见,双层膜结构仅能实现 300~800 nm 范围内的减反效果,而在大于 900 nm 的范围减反效果不明显;同

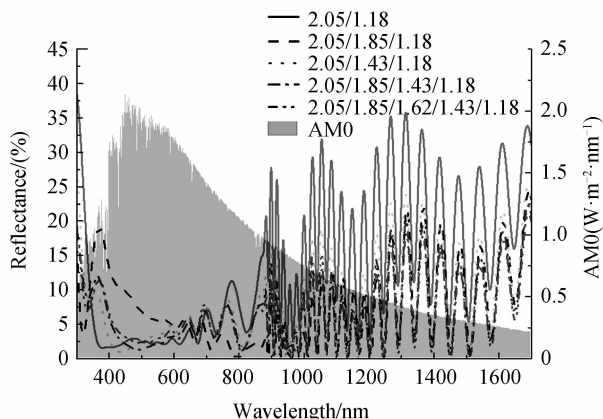


图 2 各种膜系结构的模拟优化反射率光谱

Fig. 2 Optimized reflectance spectra of solar cell coated with AR coatings

样, 对于三层膜系结构, 也难以实现 300~1 700 nm 内的宽谱减反效果. 表 1 分别为镀有四种膜系的电池优化设计结果, 其中, 折射率为波长 510 nm 处的值. 从反射率值分析, 随着膜层的增加, 加权平均反射率和最高反射率的提升幅度越来越小. 三层膜结构的加权反射率比两层膜结构降低了 2.33~2.73%, 最高反射率降低了 9.4~15.47%; 而五层膜结构的加权反射率仅比四层膜结构降低了 0.06%, 最高反射率仅降低了

1.18%. 可见五层膜系的结构对减反射效果的改善已经非常有限, 综合考虑各膜系结构的减反效果和实际溶胶-凝胶法制备多层膜的工艺稳定性, 在膜系设计中使用尽量少的膜层来实现最佳的减反射效果, 本文选择在电池样品上制备四层结构的减反射膜, 该结构加权反射率设计值为 5.23%, 最高反射率设计值为 22.23%.

表 1 AMO 光谱下各减反膜系结构的优化设计结果

Table 1 Optimization results of AR coating structures

Coating structures (Refractive index)	Coating thickness/nm	Average reflectance/%	Highest reflectance/%
2.05/1.18	45/98	8.84	38.68
2.05/1.85/1.18	46/82/109	6.51	24.21
2.05/1.43/1.18	46/58/98	6.11	29.28
2.05/1.85/1.43/1.18	30/35/82/97	5.32	22.23
2.05/1.85/1.62/1.43/1.18	34/17/40/62/86	5.26	21.05

## 2 实验的方法与表征

### 2.1 溶胶的制备

根据优化设计的结果, 为了实现多层膜系折射率的梯度变化, 本文最终选择 A-SiO<sub>2</sub>、B-SiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 等四种折射率高低不同的薄膜材料. 四种溶胶的制备过程如下:

将钛酸丁酯 (Ti(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>4</sub>, TBOT)、无水乙醇 (EtOH)、去离子水 (H<sub>2</sub>O)、冰醋酸 (HAc)、乙酰丙酮 (AcAc) 按照摩尔比 1:8:3:1.5:0.2 在温度约 20℃, 相对湿度低于 50% 的环境中充分搅拌 2 h, 然后老化 3~5 天即得透明的 TiO<sub>2</sub> 溶胶.

将锆酸丁酯 (Zr(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>4</sub>, TBOZ)、无水乙醇 (EtOH)、去离子水 (H<sub>2</sub>O)、冰醋酸 (HAc)、乙酰丙酮 (AcAc) 按照摩尔比 1:10:3:2:0.1 在室温下充分搅拌 2 h, 然后老化 5~7 天即得透明的 ZrO<sub>2</sub> 溶胶.

将正硅酸四乙酯 (TEOS)、去离子水 (H<sub>2</sub>O)、盐酸 (HCl) 和无水乙醇 (EtOH) 按照摩尔比 1:2.1:0.3:40 混合搅拌均匀后, 放置在稳定环境 (20℃, 相对湿度 20%) 下静置 5~7 天后即可获得无色透明的 A-SiO<sub>2</sub> 溶胶.

将正硅酸四乙酯 (TEOS)、氨水 (NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O) 和无水乙醇 (EtOH) 按照摩尔比 1:2:40 混合搅拌均匀后, 放置在稳定环境 (20℃, 相对湿度 20%) 下静置 5~10 天老化后即可获得淡蓝色透明的 B-SiO<sub>2</sub> 溶胶. 最后将老化的溶胶经 80℃ 回流 12h 后方可使用.

### 2.2 减反膜的制备

在相对湿度 < 50% 的清洁环境下, 用 CHEMAT DIPMASTER 200 提拉机进行浸渍-提拉镀膜. 依据所需的厚度要求, 提拉速度可在 2~12 inch/min 之间调节. 每层薄膜制备完成后, 使用快速退火炉 (Allwin21

AccuThermo AW410) 对薄膜进行不同温度的热处理, 即可得到最终的样品.

### 2.3 性能表征

使用紫外-可见-近红外分光光度计 (JASCO V-570 型) 测量玻璃基底镀膜样品的反射率、透射率光谱, 并使用 Film Wizard 软件计算材料折射率和消光系数. 使用紫外-可见-近红外分光光度计 (Agilent Cary 5000 型) 测量太阳能电池镀膜样品的反射率光谱. 使用场发射扫描电子显微镜 (Philips XL30 FEG 型) 和原子力显微镜 (Dimension Edge 型) 来观测薄膜的微观形貌特征.

## 3 结果与讨论

### 3.1 改进型提拉镀膜方法

提拉镀膜法<sup>[20-21]</sup>是十分常见的溶胶-凝胶镀膜方法之一, 具有工艺简单、成本低、膜厚与均匀性容易控制等优点. 在传统的提拉方法中, 夹具直接固定在基底的表面, 以匀速将基底从溶胶中提拉出来, 在此过程中, 溶胶会沉积在基底的前后两个表面上, 溶胶干燥后形成薄膜. 然而, 本文所使用的 Ge 基多结电池样品质地很脆, 十分易碎, 无法直接使用夹具固定; 且由于背面有金属电极, 有机溶胶膜会降低其导电性, 只能单面镀膜. 所以不宜使用传统的提拉镀膜方法在多结太阳能电池上制备减反射膜.

本文针对多结电池易碎、需单面镀膜的特点, 采用了一种改进型提拉镀膜方式. 如图 3(a), 电池片样品被粘附在一块面积较大的玻璃基板上, 将夹具固定在基板上, 使电池片样品随基板一起匀速运动. 这种方式避免了夹具对电池样品的直接损伤, 而且可以使整个电池表面都被减反膜层覆盖. 此外, 提拉镀膜过程中, 在基板与液面脱离的瞬间, 由于溶胶扩散与表面张力的

变化,即马兰戈尼效应<sup>[22]</sup>,会使基板下沿的薄膜出现不均匀过渡区域.当基板的镀膜面积较大时,这种不均匀的区域面积所占比例较小,不会影响最终的镀膜效果.然而三结电池样品制造工艺复杂、制造成本较高,本文使用的电池样品尺寸只有 $1.5 \times 1.5$  cm,所以不均匀区域占整个镀膜面积的比例会很大,直接影响减反膜的实际效果.为达到更好的镀膜效果,本文对镀膜方式进行了进一步的改进(如图3(b)),正方形的电池片以顶点向下的方式放置,电池片在与溶胶液面分离的瞬间,接触面积很小,形成类似点接触的效果,让表面张力的变化最小,最大限度地避免薄膜不均匀的情况出现.

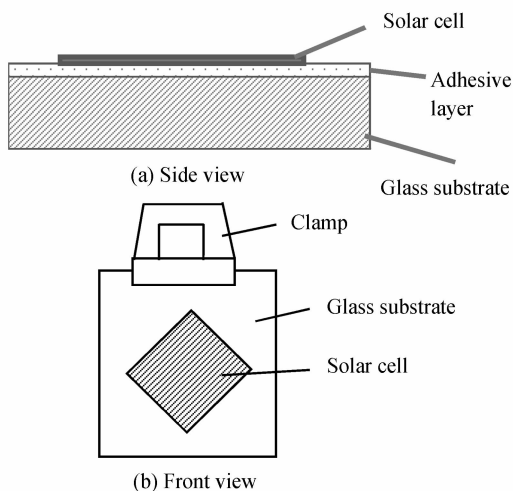
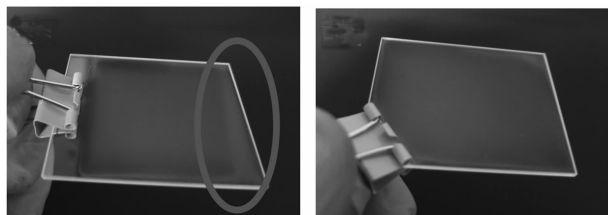


图3 改进浸渍-提拉法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of improved dip-coating method

如图4(a),使用传统的浸渍-提拉法镀膜,可以清楚地看到玻璃底端有一个明显的不均匀区域(圆圈内).而图4(b)中,使用改进后的浸渍提拉法镀膜,在玻璃的底端几乎观察不到不均匀区域.由此可见,改进后的镀膜方法可以改善镀膜的效果.



(a) Traditional dip-coating method (b) Improved dip-coating method

图4 传统浸渍-提拉法和改进型浸渍-提拉法镀膜效果对比  
Fig. 4 Photographs of AR coating prepared by traditional and improved dip-coating methods

### 3.2 薄膜微结构控制和形貌表征

薄膜的性能与溶胶结构密切相关,因此可以通过调节溶胶的结构,实现对薄膜结构和性能的控制.对于 $\text{SiO}_2$ 薄膜,反应的催化条件的不同,溶胶颗粒和团簇的生长模式也会不同.在酸性条件下,A- $\text{SiO}_2$ 溶胶中会形成Si-O-Si的三维链状网络结构,在溶胶形成薄膜

后,结构较为致密,孔隙率低,薄膜的折射率也相对较高(约为1.43).而在碱性催化条件下,B- $\text{SiO}_2$ 溶胶中主要以 $\text{SiO}_2$ 颗粒或团簇为主,在溶胶形成薄膜后,结构较为疏松,孔隙率高,薄膜的折射率也相对较低(约为1.18).图5为酸、碱不同催化条件下的 $\text{SiO}_2$ 薄膜的扫描电子显微镜图像.由图可见,A- $\text{SiO}_2$ 薄膜(图5(a))中很难观测到纳米尺度的 $\text{SiO}_2$ 颗粒,整个薄膜体现出致密的交联结构;而在B- $\text{SiO}_2$ 薄膜中(图5(b)),薄膜由 $\text{SiO}_2$ 纳米颗粒沉积而成,同时具有十分明显的孔隙结构.由此可以看出,通过控制反应条件来调节溶胶结构,可以达到调控薄膜折射率的目的.

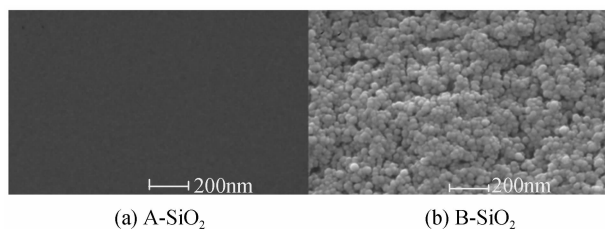


图5 薄膜的SEM图像

Fig. 5 SEM images of coatings

除了控制溶胶结构,对薄膜进行热处理也是改变溶胶-凝胶薄膜微观结构并调控薄膜光学性能的常用手段.不同温度的热处理对薄膜性能会产生明显的影响,图6为不同温度的快速退火处理10 min后,溶胶-

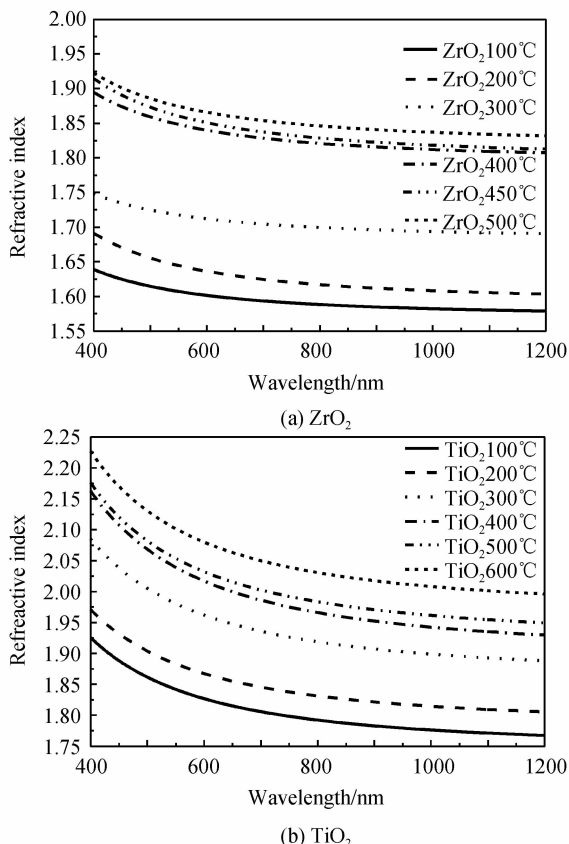


图6 不同温度快速退火处理后的折射率变化

Fig. 6 Refractive index variation of coatings annealed by rapid thermal annealing at different temperatures

凝胶法制备出的  $ZrO_2$  和  $TiO_2$  两种薄膜材料的折射率变化. 由图 6(a)可知, 处理温度在  $100\sim 300^\circ C$  区间内,  $ZrO_2$  薄膜的折射率虽然有所升高, 但一直维持在较低的数值(510 nm 处, 折射率为 1.61~1.72). 这是因为经  $100\sim 300^\circ C$  的温度处理后, 薄膜仍然含有大量结构水和有机化合物, 薄膜处于无定形态. 而经  $400^\circ C$  温度处理之后, 薄膜折射率有了显著提高, 一下跃升至 1.85 (510 nm 处, 下同), 这是因为经这一温度处理后, 薄膜中的有机物被大量去除, 薄膜开始晶化<sup>[23]</sup>, 由无定形态向四方相晶体结构转变, 导致薄膜的折射率大幅提高. 进一步升高处理温度至  $500^\circ C$  后, 一方面薄膜维持四方相结构, 晶态结构在热处理过程中不断完善, 薄膜也逐渐致密化, 使薄膜折射率升高; 另一方面, 薄膜中的有机物被去除后留下的孔隙促使薄膜折射率降低. 两者因素综合作用, 使得薄膜折射率没有太大的变化, 在  $450^\circ C$  处理后,  $ZrO_2$  折射率为 1.87,  $500^\circ C$  处理后折射率为 1.88.

对于  $TiO_2$  薄膜, 由图 6(b)可知, 热处理温度在  $100\sim 300^\circ C$  之间时, 无定形态的  $TiO_2$  薄膜折射率均在 2.0 以下. 经  $400^\circ C$  温度处理之后, 薄膜折射率升至 2.06, 这是因为  $TiO_2$  已经开始晶化<sup>[24]</sup>, 由无定型态向锐钛矿相转变. 在  $500^\circ C$  处理后, 在薄膜持续晶化和有机物除去后孔隙率增加的双重因素作用下, 薄膜折射率变化幅度不大, 仅升高至 2.07. 进一步提高处理温度至  $600^\circ C$  后, 高温引起的晶粒长大使得膜层的堆积密度逐步升高, 薄膜折射率也进一步提高至 2.12.

图 7 为  $100^\circ C$  和  $500^\circ C$  处理后的  $ZrO_2$  和  $TiO_2$  薄膜的原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 图像. 首先,  $ZrO_2$  (图 7 (a)) 和  $TiO_2$  (图 7 (c)) 薄膜表现出良好的表面平整性,  $100^\circ C$  处理后, 均方根粗糙度分别为 0.294 和 0.192 nm. 经过  $500^\circ C$  处理之后,  $ZrO_2$  (图 7 (b)) 和  $TiO_2$  (图 7 (d)) 薄膜的粗糙度分别增大为 0.327 和 0.367 nm, 说明两种材料的颗粒尺寸均有所变大, 薄膜由无定型态到晶态变化, 这验证了前文关于折射率变化的分析, 也解释了薄膜折射率变大的原因.

利用上述方法, 将各薄膜材料的折射率调整至优化设计的目标值. 图 8 为各薄膜材料的折射率  $n$  和消光系数  $k$  的色散曲线, 随波长减小, 折射率表现出正常

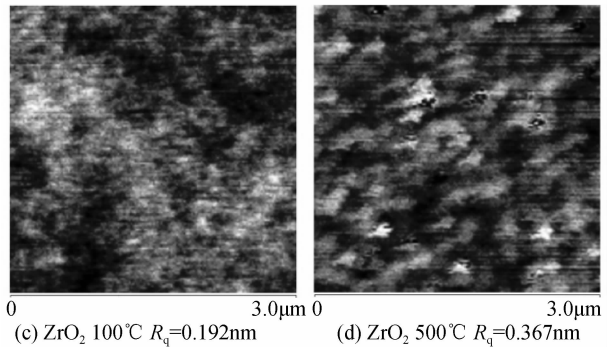
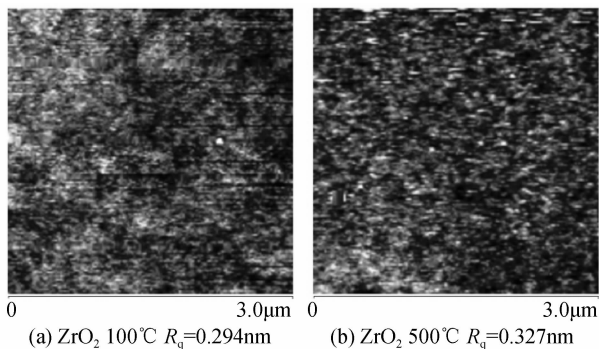
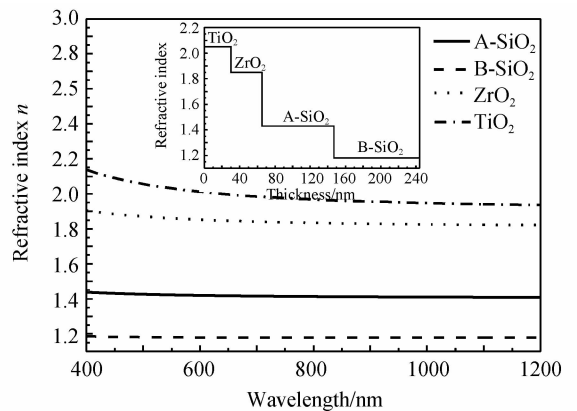


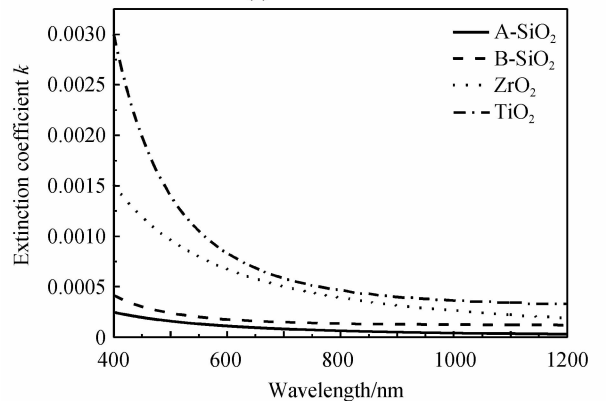
图 7 经  $100^\circ C$  和  $500^\circ C$  快速退火处理后的  $ZrO_2$  和  $TiO_2$  薄膜的 AFM 图像

Fig. 7 AFM images of  $ZrO_2$  and  $TiO_2$  coatings annealed by rapid thermal annealing at  $100^\circ C$  and  $500^\circ C$

的色散关系. 四种材料的折射率呈现出明显的梯度排列(图 8(a)), 在 510 nm 波长处,  $TiO_2$  薄膜的折射率为 2.05,  $ZrO_2$  薄膜的折射率为 1.85, A- $SiO_2$  薄膜折射率为 1.43, B- $SiO_2$  薄膜的折射率为 1.18. 这证明, 通过改变催化方式和热处理温度均能有效地调节材料折射率, 可根据不同的材料和需求选择不同的调节方式. 一般来说, 对于  $SiO_2$  这类低折射率材料, 为了利用其低折射率的性质, 常采用改变催化方式的方法来调节材料折射率; 而对于  $TiO_2$  和  $ZrO_2$  这类高折射率材料, 则



(a) Refractive index  $n$



(b) Extinction coefficient  $k$

图 8 四种材料的折射率和消光系数的色散曲线  
Fig. 8 Dispersion curves of refractive index and extinction coefficient of four materials

常使用热处理的方式使薄膜晶化,使其表现出高折射率的性质。此外,各薄膜材料的消光系数均很小(图 8 (b)),数量级在  $10^{-4}$  到  $10^{-3}$  之间,这表明材料对光的吸收可以忽略不计,不会影响薄膜的透光率。

### 3.3 光谱表征

图 9 为镀膜前后电池样品实际测量结果的反射率光谱和四层膜模拟优化设计的反射率谱线。由图可知,镀膜后的三结太阳能电池的反射率在 300~1 700 nm 的宽波长范围内都有了显著的降低。根据式(1)计算可得,三结电池镀膜前的加权平均反射率为 28.58%,镀膜后为 4.86%,降低了 23.72%;镀膜前的最高反射率为 46.35%,镀膜后为 15.45%,降低了 30.90%。很显然,与镀膜前相比,镀膜后三结电池的反射率最大值和平均值均显著降低。

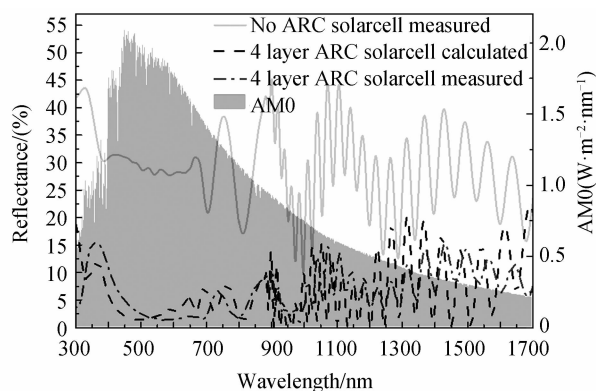


图 9 镀膜后三结电池的实测反射率曲线与理论反射率曲线  
Fig. 9 Simulated and measured reflectance spectra of triple-junction solar cell coated with AR coatings

图 10 为镀膜前后电池样品的实物图。左边为未镀膜的电池样品,中间为镀膜后的电池样品,右边为一块纯黑色的纸片。对比三者可以发现,未镀膜的电池样品反射很强,可以清晰地看到电池表面反射出的纸面上的文字;而镀膜后的样品反射明显降低,几乎看不到文字的倒影。与右方的黑纸片相比,镀膜后的样品虽可见少量剩余反射,但两者颜色已十分接近,呈现出暗黑

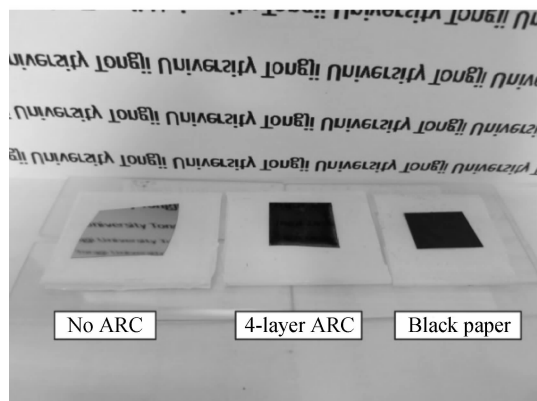


图 10 镀膜前后电池样品实物图

Fig. 10 Photographs of triple-junction solar cell coated with AR coatings

色。由此可直观地看出,镀膜后的电池片的减反射效果相当优良。

## 4 结论

溶胶-凝胶镀膜技术成本低、工艺稳定简单,且能够大范围地调节薄膜材料的折射率,根据膜系优化设计的结果,制备出折射率梯度排列的  $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{A-SiO}_2/\text{B-SiO}_2$  四层减反膜。镀膜后的三结电池样品,在 300~1 700 nm 波长范围内,AM0 光谱下加权平均反射率降低至 4.86%,比未镀膜样品降低了 23.72%;最高反射率降低至 15.45%,比未镀膜样品降低了 30.90%。实验结果表明,折射率梯度排列的四层溶胶-凝胶减反膜表现出了十分优良的减反射效果。

### 参考文献

- [1] ZHOU Xun, LUO Mu-chang, ZHAO Hong, *et al.* Progresses on GaAs-based III-V multi-junction solar cells[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(5): 639-646. 周勋, 罗木昌, 赵红, 等. GaAs 基 III-V 族多结太阳能电池技术研究进展[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(5): 639-646.
- [2] YAMAGUCHI M. III - V compound multi-junction solar cells: present and future[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, **75**(1): 261-269.
- [3] BETT A, DIMROTH F, STOLLWERCK G, *et al.* III-V compounds for solar cell applications[J]. *Applied Physics A*, 1999, **69**(2): 119-129.
- [4] ZHOU Mei, ZHAO De-gang. Effect of p-InGaN layer thickness of the performance of p-i-n In GaN solar cells[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 534-538. 周梅, 赵德刚. p-InGaN 层厚对 p-i-n 结构 InGaN 太阳能电池性能的影响及机理[J]. *发光学报*, 2015, **36**(5): 534-538.
- [5] GEISZ J, KURTZ S, WANLASS M, *et al.* High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(2): 3502.
- [6] GEISZ J, FRIEDMAN D, WARD J, *et al.* 40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 123505.
- [7] DIMROTH F. High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors[J]. *Physica Status Solidi C*, 2006, **3**(3): 373-379.
- [8] PERL E E, MCMAHON W E, BOWERS J E, *et al.* Design of antireflective nanostructures and optical coatings for next-generation multijunction photovoltaic devices[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(105): A1243-A1256.
- [9] 肖祥江. 溶胶-凝胶法制备新型宽光谱纳米三层减反射膜的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.
- [10] XIAO Xiang-jiang, TU Jie-lei, BAI Hong-yan. ZnS/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub> antireflection coating with wide spectrum for GaAs multi-junction solar cells[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, **35**(4): 670-674. 肖祥江, 涂洁磊, 白红艳. GaAs 多结电池宽光谱 ZnS/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub> 减反射膜的设计与分析[J]. *应用光学*, 2014, **35**(4): 670-674.
- [11] BERNAL-CORREA R, MORALES-ACEVEDO A, PULZARA MORA Á, *et al.* Design of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs/InyGa<sub>1-y</sub>As triple junction solar cells with anti-reflective coating[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*,

- 2015, **37**: 57-61.
- [12] YAN X, POXSON D J, CHO J, *et al.* Enhanced omnidirectional photovoltaic performance of solar cells using multiple-discrete-layer tailored-and low-refractive index anti-reflection coatings [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, **23**(5): 583-590.
- [13] LIU J J, HO W J, LEE Y Y, *et al.* Simulation and fabrication of SiO<sub>2</sub>/graded-index TiO<sub>2</sub> antireflection coating for triple-junction GaAs solar cells by using the hybrid deposition process[J]. *Thin Solid Films*, 2014, **570**: 585-590.
- [14] AEGERTER M, ALMEIDA R, SOUTAR A, *et al.* Coatings made by sol-gel and chemical nanotechnology[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2008, **47**(2): 203-236.
- [15] MINAMI T. Advanced sol-gel coatings for practical applications[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2013, **65**(1): 4-11.
- [16] MEZZA P, PHALIPPOU J, SEMPERE R. Sol-gel derived porous silica films[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, **243**(1): 75-79.
- [17] WANG X, SHEN J. Sol-gel derived durable antireflective coating for solar glass[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2010, **53**(2): 322-327.
- [18] BOUDET T, CHATON P, HERAULT L, *et al.* Thin-film designs by simulated annealing[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(31): 6219-6226.
- [19] CHANG Y J, CHEN Y T. Broadband omnidirectional antireflection coatings for metal-backed solar cells optimized using simulated annealing algorithm incorporated with solar spectrum[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(S4): A875-A887.
- [20] SCRIVEN L. Physics and applications of dip coating and spin coating[C]. MRS proceedings, Cambridge Univ Press, 1988, pp. 717.
- [21] BRINKER C, FRYE G, HURD A, *et al.* Fundamentals of sol-gel dip coating[J]. *Thin Solid Films*, 1991, **201**(1): 97-108.
- [22] VELARDE M G, ZEYTOUNIAN R K. Interfacial phenomena and the marangoni effect[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [23] AGUILAR D H, TORRES-GONZALEZ L C, TORRES-MARTINEZ L M, *et al.* A Study of the Crystallization of ZrO<sub>2</sub> in the Sol-Gel system; ZrO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2001, **158**(2): 349-357.
- [24] WANG X, WU G, ZHOU B, *et al.* Optical constants of crystallized TiO<sub>2</sub> coatings prepared by sol-gel process[J]. *Materials*, 2013, **6**(7): 2819-2830.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. U1230113, 11304228), the National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2013BAJ01B01), the Innovation Foundation of Shanghai Academy of Spaceflight Technology (No. SAST201370), the “Chenguang Program” Supported by Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission (No. 14CG19) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities