

引用格式: LIU Ren-chen, LU Jing, CHENG He-ping, *et al.* Light Trapping Enhancement of Composite Rough Surface ZnO:Al Gratings in Thin Film Silicon Solar Cells[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **48**(9):0931002
刘仁臣, 陆静, 程和平, 等. 复合绒面 ZnO:Al 光栅增强薄膜硅电池陷光特性[J]. 光子学报, 2020, **48**(9):0931002

复合绒面 ZnO:Al 光栅增强薄膜硅电池陷光特性

刘仁臣¹, 陆静¹, 程和平², 梁钊铭³, 刘洋¹

(1 吉林大学珠海学院, 广东 珠海 519041)

(2 黄山学院 信息工程学院, 安徽 黄山 245041)

(3 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 探讨复合绒面 ZnO:Al 光栅对薄膜硅太阳能电池光俘获效率的影响. 构造了由关联长度(l_{cor})和平均高度(h_{ave})表征的绒面, 叠加到周期为 980 nm 和槽深为 160 nm 的一维正弦 ZnO:Al 光栅上, 形成复合绒面 ZnO:Al 光栅. 前电极 AZO 光栅, 当 l_{cor} 较小和 h_{ave} 较大时, 电池的短路电流较高. 若 l_{cor} 取 0.01, 则短路电流随 h_{ave} 的增大而升高, 由 $h_{\text{ave}} = 0.05$ 时的 21.93 mA/cm² 增加到 $h_{\text{ave}} = 0.80$ 时的 23.80 mA/cm². 置于背电极且 $l_{\text{cor}} = 0.01$ 时, 短路电流随 h_{ave} 的增加而逐渐减小, 由 $h_{\text{ave}} = 0.05$ 时的 25.50 mA/cm² 降到 $h_{\text{ave}} = 0.80$ 时的 24.81 mA/cm². 采用直流溅射和化学腐蚀方法分别制备了无绒面 ZnO:Al 光栅和 $l_{\text{cor}} = 0.01, h_{\text{ave}} = 0.14$ 的复合绒面 ZnO:Al 光栅. 反射率测试结果表明, 复合绒面 ZnO:Al 光栅总反射率(8.3%)较无绒面 ZnO:Al 光栅(10.2%)降低了 1.9%, 镜面反射率(4.7%)较无绒面 ZnO:Al 光栅(6.8%)降低了 2.1%. 以实验制备的两种光栅为模型用严格耦合波方法进行模拟, 计算结果表明与无绒面 ZnO:Al 光栅相比, 复合绒面 ZnO:Al 光栅的总反射率和镜面反射率均显著下降. 复合绒面 ZnO:Al 光栅由于具有较好的减反作用更适合用作薄膜电池前电极, 从而得到更高的短路电流; 而无绒面 ZnO:Al 光栅因具有较高的反射适用于背电极, 能将到达背电极的光子重新返回硅吸收层而获得更高的陷光效率.

关键词: 绒面; 光栅; 薄膜电池; 短路电流; 反射率

中图分类号: TK514

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204909.0931002

Light Trapping Enhancement of Composite Rough Surface ZnO:Al Gratings in Thin Film Silicon Solar Cells

LIU Ren-chen¹, LU Jing¹, CHENG He-ping², LIANG Zhao-ming³, LIU Yang¹

(1 Zhuhai College of Jilin University, Zhuhai, Guangdong 519041, China)

(2 School of Information Engineering, Huangshan College, Huangshan, Anhui 245041, China)

(3 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China)

Abstract: This paper discussed the influence of composite rough surface aluminum-doped zinc oxide (ZnO:Al) gratings on light trapping efficiency of thin film silicon solar cells. Rough surface was characterized by correlation length (l_{cor}) and average height (h_{ave}), and superimposed on a one-dimension sine ZnO:Al grating with 980 nm period and 160 nm groove depth. The short-circuit current was higher when front electrode AZO grating had smaller l_{cor} and larger h_{ave} . As $l_{\text{cor}} = 0.01$, short-circuit current raised with the increase of h_{ave} value, from 21.93 mA/cm² of $h_{\text{ave}} = 0.05$ to 23.80 mA/cm² of $h_{\text{ave}} = 0.80$.

基金项目: 广东省普通高校重点科研平台和科研项目 (No. 2018KTSCX306), 吉林大学珠海学院创新培育重点项目 (No. 2018XJCQS047), 吉林大学珠海学院教学研究项目 (Nos. ZLGC20191004, 2019JZDJ034)

第一作者: 刘仁臣 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为亚微米光栅及薄膜太阳能电池. Email: 744894076@qq.com

收稿日期: 2020-04-22; 录用日期: 2020-06-22

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

When used as back electrode, the short-circuit current decreased with the increase of h_{ave} , from 25.50 mA/cm² of $h_{ave}=0.05$ to 24.81 mA/cm² of $h_{ave}=0.80$. Composite rough surface ZnO:Al grating and non-rough surface ZnO:Al grating were fabricated by chemical etching and direct current sputter respectively. Reflectivity results showed that total reflection of composite rough surface ZnO:Al grating (8.3%) was 1.9% lower than that of non-rough surface ZnO:Al grating (10.2%), and specular reflection of composite rough surface ZnO:Al grating (4.7%) was 2.1% lower than that of non-rough surface ZnO:Al grating (6.8%). Rigorous coupled wave method was used to simulate reflection of ZnO:Al grating with and non-rough surface. Results further confirmed that composite rough ZnO:Al grating was more suitable for front electrode of thin film solar cells due to its better anti-reflection effect and could obtain a larger short-circuit current. Non-rough surface ZnO:Al grating could reflect more photons back to silicon absorption layer due to its higher reflection and was more suitable for back electrode.

Key words: Rough surface; Grating; Thin film solar cell; Short-circuit current; Reflectivity

OCIS Codes: 310.6845; 050.2770; 350.6050; 220.2740; 160.2100; 040.5350

0 引言

薄膜硅太阳能电池以其用料少、制作简单且易于大面积制备等成为研究热点^[1-3].与晶体硅电池相比,薄膜电池的硅吸收层厚度一般只有几微米,而间接带隙的硅材料,在带隙波长附近($\lambda_g=1.107\ \mu\text{m}$)的光子吸收系数较低,尤其是 800~1 100 nm 波段,对光子吸收长度达到 10 $\mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$,远超出了硅吸收层的厚度,从而导致薄膜硅电池效率不高.在前、背电极制备微纳结构是提高薄膜硅电池光俘获效率的重要途径^[4-6].铝掺杂氧化锌(AZO)由于具有良好的导电性能、可见光范围高透射率和性能稳定等优点,被普遍用于太阳能电池的前表面窗口层,或者用于阻挡背部金属向硅吸收层扩散的插入层^[7-9].对前电极 AZO 制备微纳结构可以降低窗口层的反射损失;对背部 AZO 织构微纳图案可以将更多的光子进行大角度反射回硅吸收层,或者将垂直入射光耦合成横向光波导模式,延长了光子在硅吸收层中的距离和增加被吸收的概率,从而提高薄膜太阳能电池的光电转换效率^[10-12].织构随机绒面形貌和周期性光栅结构是增强薄膜硅电池光俘获效率的两种重要途径.两种结构主要区别在于波导模的角分布不同,随机绒面结构对于不同波长的散射光在所有角度上连续分布,波导模连续;而周期性光栅结构的波导模只能在特定波长下耦合产生,且沿特定角度传播^[5].课题组前期模拟了前背双光栅对薄膜电池效率的影响,发现前光栅抑制了窗口层反射,背光栅增强了长波段吸收,尤其是前背光栅侧向位移引起的非对称因素可将短路电流提高近 20%^[13].另外,在背电极金属 Al 膜上制备的二维 AZO 光栅,当周期在 900~1 100 nm 范围有较好的散射特性^[4].EISELE C 等报道了不同周期和槽深的前电极 ZnO 光栅,具有良好的减反效果,当周期为 978 nm 和槽深为 160 nm 时,电池反射率降到 10% 以下,短路电流明显增大^[14].

BITTKAU K 等计算了叠加有绒面形貌的不同形状光栅的陷光特性,发现复合绒面光栅的陷光效果均远优于单独绒面结构或单独光栅结构^[2].ISABELLA O 等比较了 Asahi U 型和 AZO 两种随机绒面结构与一维矩形光栅结构的性能,发现调控随机绒面的粗糙度,光栅的周期和槽深等均可以有效调节薄膜电池的光管理,但是表面形貌和光学参数之间的联系尚未建立^[15].目前,国内外学者对单独随机绒面和单独光栅结构均有广泛深入的研究^[3-6].但是,对叠加有随机绒面的光栅结构在薄膜电池中的影响研究较为缺乏.因此,本文采用 Rsoft Diffraction 模块计算了在周期为 980 nm 和槽深为 160 nm 的正弦 AZO 光栅上复合随机绒面后分别用作薄膜硅太阳能电池的前电极和背电极,探讨其对短路电流的影响.实验方面,直流溅射得到的 AZO 薄膜表面粗糙度较小,为无绒面结构;而 AZO 薄膜经稀盐酸腐蚀后表面粗糙度较大,形成随机绒面结构.以激光干涉光刻得到的光刻胶光栅为掩模,采用化学腐蚀和磁控溅射分别将掩模图案转移到 AZO 薄膜上,制备出复合绒面的 AZO 光栅和无绒面的 AZO 光栅.两种光栅的反射光谱分别采用分光光度计进行测量,再将上述两种 AZO 光栅形貌导入 Rsoft 软件进行数值模拟,将计算得到的结果与实验结果进行比较,进一步阐明复合绒面 AZO 光栅结构的陷光效果.

1 复合绒面 AZO 光栅对薄膜硅电池短路电流影响的理论模拟

1.1 薄膜硅太阳能电池的结构

图 1 为将复合绒面 AZO 光栅分别置于薄膜硅太阳能电池的前、背电极示意图.前光栅电池依次由 AZO

光栅层,250 nm AZO 薄膜层,1 000 nm 硅吸收层,50 nm AZO 阻挡层,300 nm Ag 反射层组成,见图 1(a)。背光栅电池依次由 50 nm AZO 层,1 000 nm 硅吸收层,AZO 光栅层,250 nm AZO 薄膜层,300 nm Ag 反射层组成,见图 1(b)。入射端媒质为空气,以 TE 波从太阳能电池顶部正入射。计算所用的透明电极 AZO、硅和银等材料随波长变化的折射率数据均取自文献[16]。

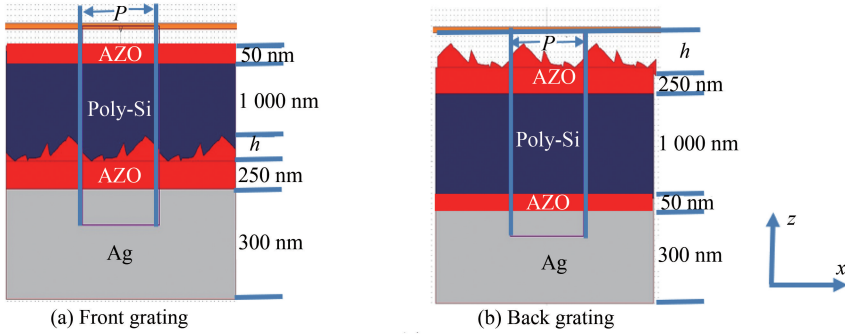


图 1 具有复合绒面 AZO 光栅的薄膜硅太阳能电池示意

Fig.1 Schematic diagram of thin film silicon solar cell with composite rough AZO grating

由计算机生成具有指定自相关函数随机绒面的具体步骤参见文献[17]。根据 WOLD H 等提出的分解理论,任何一个离散静态过程都可表示为两个完全不相干过程,一个为确定性过程,另一个为非确定性过程^[18]。基于此理论,本文通过分离表面的周期光栅和随机绒面成分来模拟周期性绒面结构,模拟过程中的周期分量是一个正弦分量。AZO 光栅由周期 $p=980$ nm 和栅脊高度 $h=160$ nm 的正弦光栅($\sin(x)$)与随机绒面(ranline (Seed, l_{cor} , h_{ave}))复合而成,表示为

$$z = \sin(x) + \text{ranline}(\text{Seed}, l_{\text{cor}}, h_{\text{ave}}) \quad (1)$$

式中,ranline 为随机函数,Seed 为种子数, l_{cor} 为 x 方向的关联长度,定义为光栅周期的倍数, h_{ave} 为 z 方向的平均高度,定义为光栅栅脊高度的倍数。

采用 Rsoft 软件基于严格耦合波分析的衍射模块进行数值模拟,用特征参数短路电流 J_{sc} 来表征薄膜硅太阳能电池的效率,计算时假设所有的电子-空穴对都贡献了光电流,在 400~1 100 nm 波段的短路电流可表示为^[19]

$$J_{\text{sc}} = e \int_{400 \text{ nm}}^{1100 \text{ nm}} \frac{\lambda}{hc} A(\lambda) I_{\text{AM1.5}}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中, e 为电子电量, λ 为真空中的波长, h 为普朗克常量, c 为真空中的光速, $A(\lambda)$ 为在 λ 波长位置处被太阳能电池吸收层吸收的光能量, $I_{\text{AM1.5}}(\lambda)$ 为垂直入射的 AM1.5 太阳光谱。

1.2 复合绒面 AZO 光栅前电极优化

首先对 AZO 前光栅结构($p=980$ nm, $h=160$ nm)中的绒面大范围扫描,关联长度 l_{cor} 取 0.1~0.5,平均高度 h_{ave} 取 0.05~0.80,入射光波长范围为 400~1 100 nm。计算结果以 h_{ave} 为横坐标, l_{cor} 为纵坐标,颜色填充的等高图表达短路电流,见图 2。结果表明:关联长度 l_{cor} 较小(<0.2)和平均高度 h_{ave} 较大(>0.6)的绒面 AZO 光栅用作电池前电极时,短路电流较高,图 2 右下角区域。

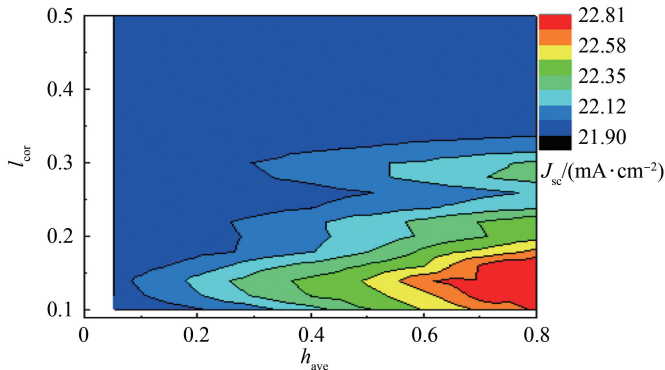


图 2 薄膜电池短路电流 J_{sc} 随 AZO 前光栅绒面 h_{ave} 和 l_{cor} 的变化

Fig.2 Short circuit current J_{sc} varied with front AZO gratings rough h_{ave} and l_{cor}

为了进一步优化前光栅结构和获得更高的短路电流,取 l_{cor} 范围为 $0.001 \sim 0.02$ 和 h_{ave} 范围为 $0.05 \sim 0.80$ 进行扫描.结果表明,关联长度 l_{cor} 对短路电流 J_{sc} 的影响较弱,而平均高度 h_{ave} 对短路电流影响较为显著,且 h_{ave} 越大 J_{sc} 越高,见图 3(a).当 l_{cor} 为 0.01 , h_{ave} 在 $0.6 \sim 0.8$ 范围内均有较高的短路电流,最高值为 23.80 mA/cm^2 .因此,将 l_{cor} 设置为 0.01 ,计算复合绒面 AZO 前光栅薄膜电池的短路电流随 h_{ave} ($0.05 \sim 0.80$) 的变化,见图 3(b).结果显示,短路电流随着 h_{ave} 的增加而增大,由 h_{ave} 为 0.05 时的 21.93 mA/cm^2 增加到 h_{ave} 为 0.80 时的 23.80 mA/cm^2 .由此可见,用作薄膜电池前电极的 AZO 光栅,当 x 方向关联长度 l_{cor} 较小, z 方向平均高度 h_{ave} 较大时,电池的短路电流较大.

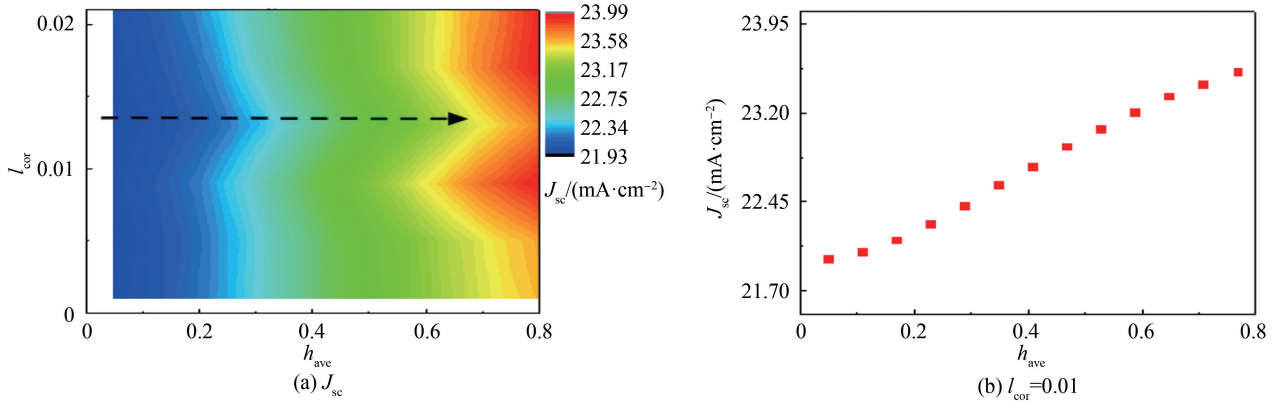


图3 薄膜电池短路电流 J_{sc} 随 AZO 前光栅绒面 h_{ave} ($0.05 \sim 0.80$) 和 l_{cor} 的变化

Fig.3 Short-circuit current J_{sc} varied with AZO front grating rough h_{ave} ($0.05 \sim 0.80$) and l_{cor}

1.3 复合绒面 AZO 光栅背电极优化

对 AZO 背光栅结构 ($p = 980 \text{ nm}$, $h = 160 \text{ nm}$) 中的绒面 l_{cor} ($0.001 \sim 0.02$) 和 h_{ave} ($0.05 \sim 0.8$) 扫描.由图 4(a) 可见,关联长度 l_{cor} 对薄膜电池短路电流的影响相对较弱,平均高度 h_{ave} 对短路电流的影响较显著,这与 AZO 光栅作为前电极得到的结论相一致.但是, AZO 光栅作为背电极时,短路电流随着 h_{ave} 的增加而逐渐减小,与 AZO 光栅作为前电极得到的结论恰好相反.图 3(a) 显示,前电极 AZO 光栅,对应于 l_{cor} 取 $0.001 \sim 0.02$ 范围内的某一个值,沿着图中虚线箭头方向,短路电流均随着 h_{ave} 在 ($0.05 \sim 0.8$) 范围内的增大而增大,表示短路电流的色彩由蓝色过渡为黄红色.图 4(a) 显示,背电极 AZO 光栅,对应于 l_{cor} 取 $0.001 \sim 0.02$ 范围内的任何一个值,短路电流均随着 h_{ave} 在 $0.05 \sim 0.8$ 范围内的增大而减小,表示短路电流的色彩由红黄色过渡为蓝色.在 $h_{\text{ave}} < 0.2$ 范围内短路电流相对较高,在 $h_{\text{ave}} > 0.2$ 范围内短路电流较低.进一步计算 $l_{\text{cor}} = 0.01$ 时,短路电流随 h_{ave} ($0.05 \sim 0.80$) 的变化,见图 4(b).薄膜硅电池的短路电流 h_{ave} 由 0.05 时的 25.50 mA/cm^2 降低到 0.80 时的 24.81 mA/cm^2 .由此可见, AZO 光栅用作薄膜硅电池的背电极时, h_{ave} 越小,电池的短路电流越大.提示 AZO 光栅用作背电极时,无绒面 AZO 光栅结构较复合绒面 AZO 光栅对增强电池的短路电流效果更好.

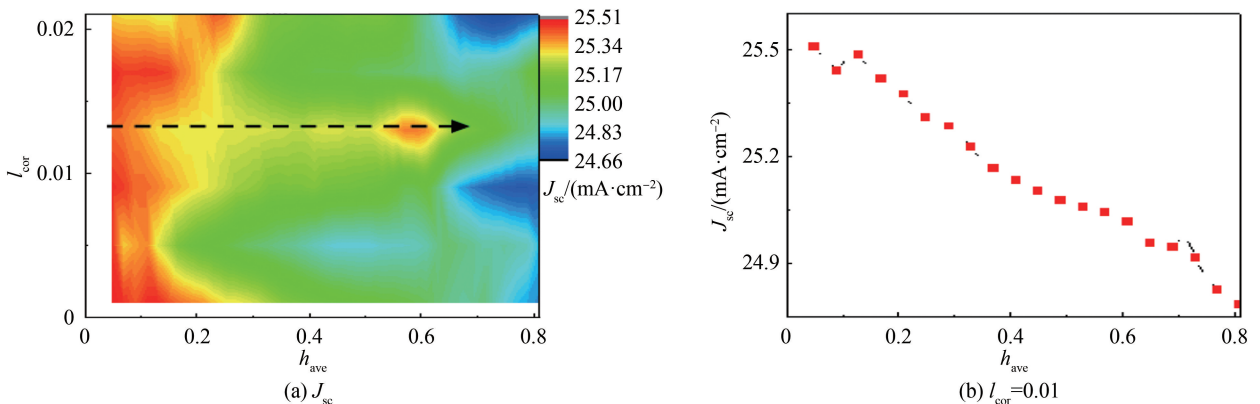


图4 薄膜电池短路电流 J_{sc} 随 AZO 背光栅绒面 h_{ave} ($0.05 \sim 0.80$) 和 l_{cor} 的变化

Fig.4 Short circuit current J_{sc} varied with rough AZO back grating h_{ave} ($0.05 \sim 0.80$) and l_{cor}

2 实验制备复合绒面和无绒面 AZO 光栅及其反射光谱特性

上述计算结果表明前电极宜采用复合绒面 AZO 光栅,背电极宜采用无绒面 AZO 光栅.周期为 980 nm 和高度为 160 nm 的 AZO 光栅,绒面结构 l_{cor} 取 0.005~0.02 对应的关联长度 5~20 nm, h_{ave} 取 0.05~0.8 对应的平均高度 8~108 nm.实验方面,分别采用化学腐蚀和磁控溅射法制备复合绒面 AZO 光栅和无绒面 AZO 光栅,制备过程见参考文献[11].采用分光光度计测试两种光栅的反射光谱.

2.1 复合绒面和无绒面 AZO 光栅的实验制备

在厚度 2 mm 的玻璃上采用直流磁控溅射制备厚度分别为 250 nm 和 410 nm 的 AZO 薄膜(溅射功率为 160 W,温度为 150 °C,氩气流量为 8 Sccm),再在其上旋涂厚度约 500 nm 的 AZ5206 光刻胶,采用 325 nm He-Cd 激光器进行双光束曝光,根据光栅周期公式 $p = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$,调节入射角到 9.5°,显影后获得周期为 980 nm 槽深约 500 nm 的光刻胶光栅掩模.将膜厚为 410 nm 的 AZO 样品(其上有掩模光栅)室温下置于 0.5% 的稀盐酸中腐蚀 12~16 s,丙酮去胶后得到周期为 980 nm 槽深为 160 nm 的复合绒面 AZO 光栅.将膜厚为 250 nm 的 AZO 样品(其上有掩模光栅)置于真空室中溅射一层 160 nm AZO 薄膜,丙酮去胶后得到周期为 980 nm 槽深 160 nm 的无绒面 AZO 光栅.

2.2 复合绒面和无绒面 AZO 光栅的形貌

图 5(a)依次为直流溅射制备的 AZO 薄膜、无绒面 AZO 光栅及对应的横截面扫描曲线.图 5(b)依次为化学腐蚀后的 AZO 绒面、复合绒面 AZO 光栅及对应的横截面扫描曲线.图 5 可见,直流溅射得到的 AZO 薄膜表面较平整,均方根粗糙度较小为 6.9 nm.置于稀盐酸刻蚀后形成的 AZO 绒面,均方根粗糙度显著增加为 26.7 nm.以相同的光刻胶光栅($p=980$ nm, $h=160$ nm)为掩模,将上述两种表面结构转移到 AZO 上,制备 AZO 光栅.图 5(a)中 AZO 光栅的周期为 980 ± 3 nm,栅脊的平均高度为 162 ± 5 nm,对应的 $l_{cor} < 0.005$, $h_{ave} < 0.05$,视为无绒面 AZO 光栅.图 5(b)中 AZO 光栅的周期为 980 ± 12 nm,栅脊的平均高度为 165 ± 22 nm,对应的 $l_{cor} = 0.01$, $h_{ave} = 0.14$,视为复合绒面 AZO 光栅,AFM 横截面扫描图显示周期性光栅与随机

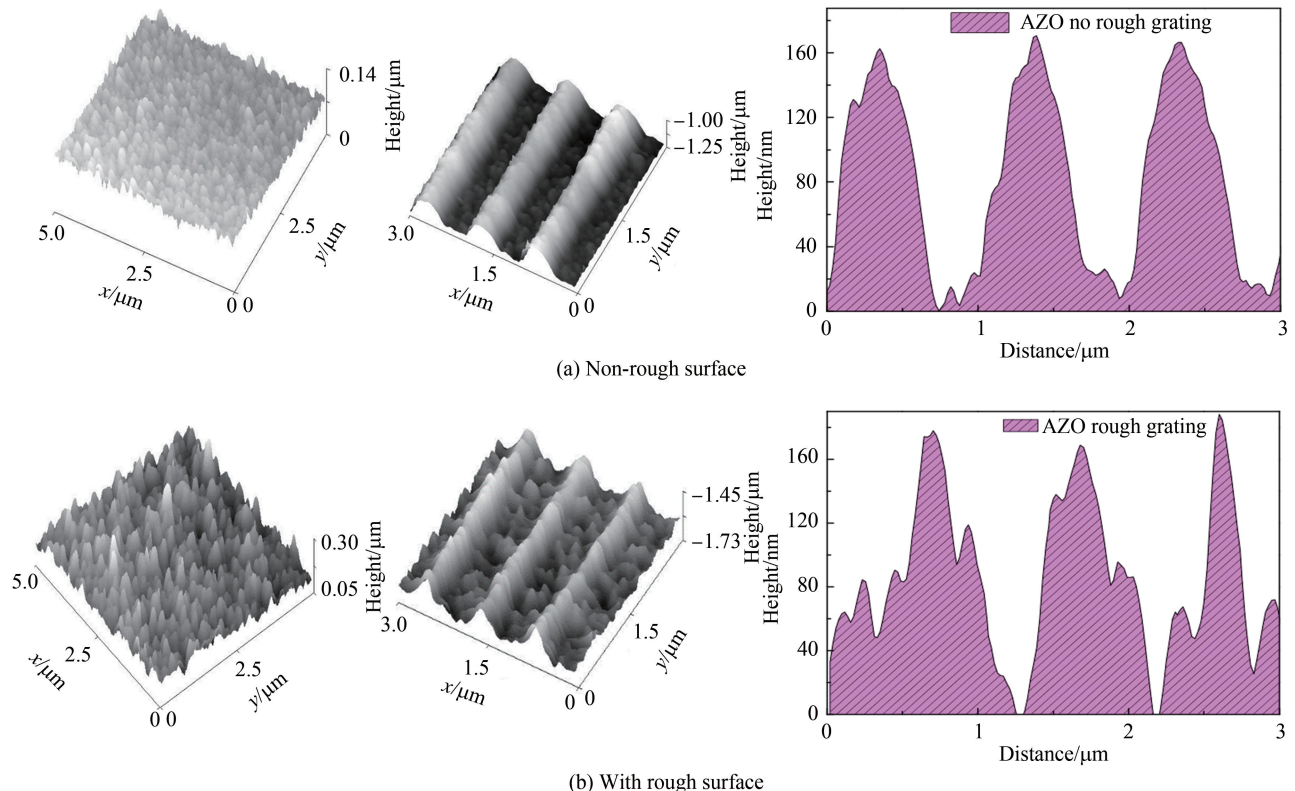


图 5 AZO 薄膜、AZO 光栅的原子力显微镜图及对应的横截面扫描曲线

Fig.5 AZO film and AFM surface morphologies and cross-sectional curves of AZO grating

绒面的叠加结果.

2.3 复合绒面 AZO 光栅和无绒面 AZO 光栅反射光谱特性

对实验制备的无绒面和复合绒面 AZO 光栅反射光谱测试.图 6(a)是采用带积分球的分光光度计测得的总反射光谱,显示光栅结构的总反射较 AZO 薄膜显著下降.固定入射角和反射角均为 7° 时测得的镜面反射光谱见图 6(b),结果显示 AZO 光栅在 $400\sim 1\ 000\text{ nm}$ 波段内的镜面反射均较 AZO 薄膜显著下降.进一步计算表明,总反射率在 $400\sim 1\ 000\text{ nm}$ 内的平均值,复合绒面 AZO 光栅和无绒面 AZO 光栅分别由 AZO 薄膜的 12.3% 下降到 8.3% 和 10.2% ,镜面反射率的平均值分别由 AZO 薄膜的 12.3% 下降到 4.7% 和 6.8% .用总反射减去镜面反射,得到两种光栅的平均漫反射率分别为 3.6% 和 3.4% .图 6(a)可见,相较于无绒面光栅,复合绒面 AZO 光栅的总反射率在 $400\sim 1\ 000\text{ nm}$ 波段的平均值降低了 1.9 个百分点(镜面反射降低了 2.1 个百分点,漫反射率增加了 0.2 个百分点),即相对下降了 $1.9/10.2=18.6\%$,下降比较显著,而且在 $800\sim 1\ 000\text{ nm}$ 波段下降更为明显,达到 2.3 个百分点.

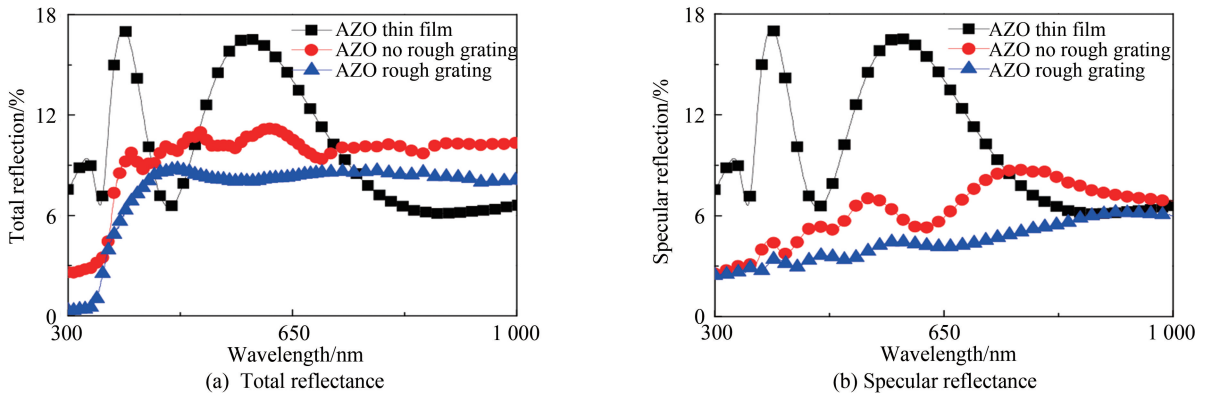


图 6 实验制备的无绒面 AZO 光栅和复合绒面 AZO 光栅的反射光谱

Fig.6 Reflection spectrum of AZO gratings with rough surface and no rough surface fabricated by experiment

3 数值模拟复合绒面和无绒面 AZO 光栅的反射光谱特性

将图 5(a)无绒面和图 5(b)复合绒面 AZO 光栅的原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)横截面扫描曲线分别导入 Rsoft 软件衍射模块中数值模拟光栅的反射光谱,模拟示意图见图 7.图 7(a)依次为周期为 980 nm 槽深为 160 nm 的无绒面 AZO 光栅、 250 nm AZO 薄膜、玻璃,图 7(b)依次为周期为 980 nm 槽深为 160 nm 的复合绒面 AZO 光栅、 250 nm AZO 薄膜、玻璃.入射光从顶部正入射.计算所用的透明电极 AZO 随波长变化的折射率数据取自文献[16].

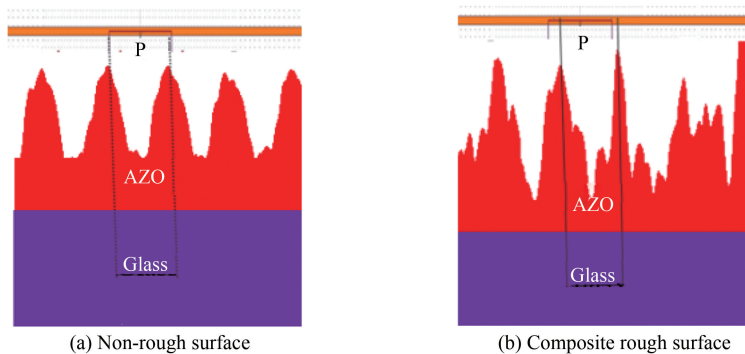


图 7 数值模拟无绒面和复合随机绒面 AZO 光栅的反射光谱示意图

Fig.7 Schematic diagram of numerical simulation AZO grating with rough surface and no rough surface

模拟结果见图 8,两种光栅结构的总反射(图 8(a))和镜面反射(图 8(b))均较 AZO 薄膜下降.定量计算表明, $400\sim 1\ 000\text{ nm}$ 波段内的平均总反射率分别由 AZO 薄膜的 11.8% 下到 7.8% (复合绒面 AZO 光栅)和 9.3% (无绒面 AZO 光栅),平均镜面反射率由 AZO 薄膜的 11.8% 下降到 5.3% (复合绒面 AZO 光栅)和

6.9%(无绒面 AZO 光栅),对应的漫反射率分别为 2.5%(复合绒面 AZO 光栅)和 2.4%(无绒面 AZO 光栅).实验测出的光谱(图(6))和数值计算的光谱(图(8))均显示复合绒面 AZO 光栅在 400~1 000 nm 整个波段的总反射和镜面反射均较无绒面 AZO 光栅显著下降.定量分析见表 1,数值计算结果进一步证实了实验规律,即复合绒面 AZO 光栅在减反射效果方面较无绒面 AZO 光栅更加明显,在薄膜硅太阳能电池中,前电极时采复合绒面光栅效果更佳.结合我们前期研究和文献报道,由互易定理可知,复合绒面 AZO 光栅由于对称性较无绒面 AZO 光栅明显破坏,界面反射回来的衍射光与零级出射光耦合后一同出射引起的反射损失减小,因此抗反射性能更好^[11,18].

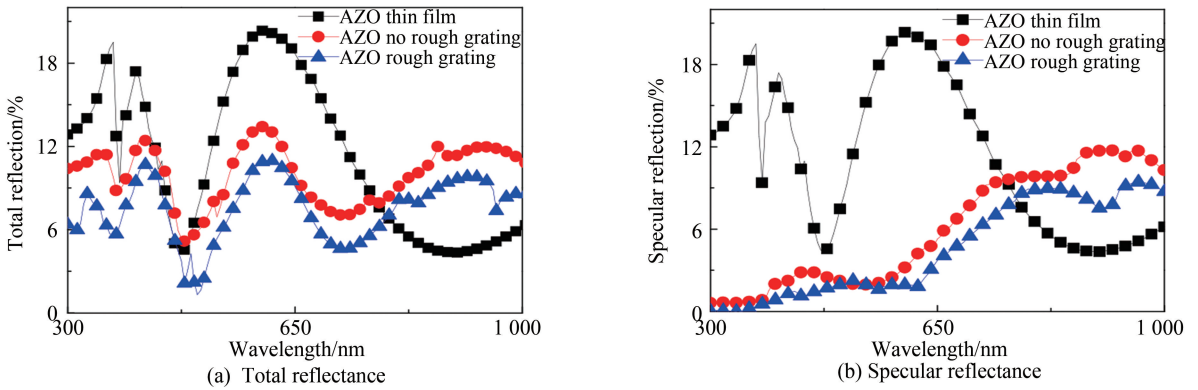


图 8 数值模拟的无绒面 AZO 光栅和复合绒面 AZO 光栅的反射光谱

Fig.8 Reflection spectra of AZO gratings with rough surface or non-rough surface calculated by simulation

表 1 复合绒面和无绒面 AZO 光栅在 400~1 000 nm 的平均总反射、镜面反射和漫反射的模拟和实验结果

Table 1 Theoretical and experimental results of Total Reflectance (TR), Specular Reflectance (SR) and Diffuse Reflectance (DR) of AZO rough and non-rough gratings at 400~1 000 nm

		TR/%	SR/%	DR/%
Experiment	AZO film	12.3	12.3	0
	AZO rough grating	8.3	4.7	3.6
	AZO no rough grating	10.2	6.8	3.4
Simulation	AZO film	11.8	11.8	0
	AZO rough grating	7.8	5.3	2.5
	AZO no rough grating	9.3	6.9	2.4

4 结论

采用 Rsoft 软件对复合随机绒面的 AZO 光栅作为前电极和背电极薄膜硅太阳能电池的短路电流等进行了计算.结果发现:1)平行于周期方向的关联长度(l_{cor})对电池短路电流的影响较小,而垂直于周期方向的平均高度(h_{ave})对电池的影响较大.2)前电极采用复合绒面 AZO 光栅较无绒面 AZO 光栅更能有效降低前表面的反射,且 l_{cor} 较小 h_{ave} 较大的绒面光栅结构更能提高短路电流.背电极采用无绒面 AZO 光栅结构因具有较高的总反射,使得短路电流得以提高.在实验制备方面,无绒面 AZO 光栅的结构(周期、槽深和占空比)由磁控溅射镀膜参数调控,比较容易获得所需参数的光栅结构.而复合绒面 AZO 光栅结构由于主要是化学腐蚀调控,化学腐蚀受环境影响较大,因而制备所需 l_{cor} 和 h_{ave} 的光栅结构需要更多的实验探索.

参考文献

- [1] LANZ T, LAPAGNA K, ALTAZIN S, *et al.* Light trapping in solar cells: numerical modeling with measured surface textures [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(11): A539-A546.
- [2] BITTKAU K, HOFFMANN A, CARIUS R. Improvement of light trapping in thin-film silicon solar cells by combining periodic random interfaces[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2014, **92**(8): 888-891.
- [3] CHEN P Z, YU L Y, NIU P J, *et al.* Numerical study on conical two-dimensional photonic crystal in silicon thin-film solar cells [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(2): 325-334.

- 陈培专,于莉媛,牛萍娟,等. 锥形二维光子晶体太阳能电池数值模拟 [J]. 物理学报, 2018, **67**(2): 325-334.
- [4] LIU R C, LU J, LI A, *et al.* Preparation and light trapping properties of two-dimensional AZO gratings on metal aluminum back contact [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(1): 0124002
刘仁臣,陆静,李昂,等. 金属 Al 背电极二维 AZO 光栅的制备和陷光特性 [J]. 光子学报, 2020, **49**(1): 0124002.
- [5] HU Z J. Analysis of the physical mechanism of 2-D grating pile structure to improve the utilization of light in solar cells. [J]. *Journal of Nankai University*, 2017, **50**(3): 20-23
胡志坚. 2 维光栅绒面结构提高太阳能电池中光利用率物理机理分析 [J]. 南开大学学报, 2017, **50**(3): 20-23
- [6] LIANG Z M, WU Y G, XIA Z H, *et al.* Influence of front and back grating period on light trapping of dual-grating structure thin film solar cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(19): 198801.
梁钊铭,吴永刚,夏子免,等. 前后光栅周期对于双光栅结构薄膜太阳能电池光俘获效应的影响 [J]. 物理学报, 2014, **63**(19): 198801.
- [7] YU X, YU, X M, ZHANG, J J, *et al.* Light-trapping Al-doped ZnO thin films for organic solar cells [J]. *Solar Energy*, 2017, **153**(9): 96-103.
- [8] REESON K, SEONG L Y, SONG F K, *et al.* Effects of background gases and pressure in pulsed laser deposition of Al-doped ZnO [J]. *Thin Solid Films*, 2020, **701**(5): 137953
- [9] KAUR G, MITRA A, YADAY K L. Pulsed laser deposited Al-doped ZnO thin films for optical applications [J]. *Progress in Natural Science*, 2015, **25**(1): 12-21.
- [10] QIN F, ZHANG H, WANG C, *et al.* Anodic aluminum oxide nanograting for back light trapping in thin c-Si solar cells [J]. *Optics Communications*, 2014, **331**: 325-329.
- [11] LIU R C, WU Y G, XIA Z H, *et al.* Fabrication of submicron ZnO:Al gratings with wet etching and lift-off technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(11): 2613-2617
刘仁臣,吴永刚,夏子免,等. 湿法和溶脱法的亚微米 ZnO:Al 光栅制备 [J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(11): 2613-2617.
- [12] RAGHVENDRA S, DUBEY S, SIGAMANI. Light trapping enhancement in thin film silicon solar cell with different backreflector [J]. *International Journal of Electrical Components and Energy Conversion*, 2017; **3**(5): 83-87.
- [13] LIU R C, XIA Z H, WU Y G, *et al.* Light trapping enhancement in thin film silicon solar cells with different front and back grating periodicities [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(12): 6-8.
- [14] EISELE C, NEBEL C E, STUTZMANN M. Periodic light coupler gratings in amorphous thin film solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(12): 7722-7726.
- [15] ISABELLA O, KLAUS J, ZHAO L, *et al.* Light scattering properties of surface-textured substrates [J]. *Physica Status Solidi*, 2010, **7**(3): 945-948.
- [16] EDWARD D P. Handbook of optical constant of solids [M]. Academic Press Inc, 1985
- [17] ZHANG Q S, WANG X C, XIE M. Numerical simulation of random rough surfaces based on Gauss distribution [J]. *Journal of Yanshan University*, 2008, **3**(6): 503-509.
张起生,王晓春,谢鸣. 符合 Gauss 分布规律的随机粗糙表面数值模拟 [J]. 燕山大学学报, 2008, **3**(6): 503-509.
- [18] WOLD H. A study in the analysis of stationary time series [M]. Almqvist and Wilsell, 1938.
- [19] XIA Z H, WU Y G, LIU R C, *et al.* Misaligned conformal gratings enhanced light trapping in thin film silicon solar cells [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): A548-A557.