

引用格式: LIU Ren-chen, LU Jing, LI Ang, *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

金属 Al 背电极二维 AZO 光栅的制备和陷光特性

刘仁臣¹, 陆静¹, 李昂¹, 丁娟¹, 全薇²

(1 吉林大学珠海学院, 广东 珠海 519041)

(2 吉林大学 通信工程学院, 长春 130012)

摘 要: 研究了背电极金属 Al 膜上二维 ZnO:Al 光栅的制备及其反射光谱特性. 在厚度为 300 nm 的 Al 膜上溅射 80 nm ZnO:Al 薄膜, 旋涂 AZ5206 光刻胶, 用波长为 325 nm 的激光进行光刻制作光栅掩模. 采用溶脱-剥离法在 Al 衬底上制备周期(624~1 250 nm)和槽深(100~300 nm)可独立调控的 ZnO:Al 二维光栅. 表面形貌采用原子力显微镜和扫描电镜观察, 反射光谱用带积分球的分光光度计测试, 双向反射分布函数用散射仪测量. 结果表明, 300 nm Al 膜上织构二维 ZnO:Al 光栅背电极结构, 当光栅槽深为 228 nm, 周期从 624 nm 增加到 986 nm 时, 背电极总反射率、漫反射率以及雾度均随光栅周期增大而显著增加, 而当周期从 986 nm 增加到 1 250 nm 时, 总反射率、漫反射率以及雾度略有增加. 双向反射分布函数测试结果进一步证实了上述实验结果, 即随着周期增大, 漫反射峰值越大, 衍射峰个数也增多. 提示背电极上槽深为 228 nm、周期为 986 nm 的二维 ZnO:Al 光栅具有较好的散射效果, 其中漫反射占总反射的百分比为 45%.

关键词: 二维光栅; 背电极; 双向反射分布函数; 掺铝氧化锌; 时域有限差分法

中图分类号: TK514

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204901.0124002

Preparation and Light Trapping Properties of Two-dimensional AZO Gratings on Metal Aluminum Back Contact

LIU Ren-chen¹, LU Jing¹, LI Ang¹, DING Juan¹, QUAN Wei²

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

(2 *College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

Abstract: To discuss the preparation and reflective spectral properties of two-dimensional aluminum-doped zinc oxide (ZnO:Al) gratings on back contact metal Al, a thickness of 80 nm ZnO:Al thin film was deposited on 300 nm Al substrate, then a layer of AZ5206 photo-resist was spin coated on ZnO:Al thin film. Mask pattern was acquired with 325 nm laser holographic lithography. Using lift off technology, two-dimensional ZnO:Al gratings with 624~1 250 nm periods and 100~300 nm heights on Al substrate were acquired. Grating periods and heights could be regulated independently. Surface morphologies were observed by atomic force microscopy and scanning electron microscopy, reflection spectrum was tested using spectrophotometer with integrating sphere, bidirectional reflectance distribution function was measured by scattering instrument. Results showed that total reflectivity, diffuse reflectivity and haze of those gratings with 228 nm heights all increased obviously as periods increasing from 624 nm to 986 nm. As periods increasing from 986 nm to 1 250 nm, the increment of total, diffuse reflectivity and haze were only small. The tested results of bidirectional reflectance

基金项目: 广东教育厅创新强校项目(No.2018KTSCX306), 吉林大学珠海学院创新培育重点项目(No. 2018XJCQSQ047), 吉林大学珠海学院教研项目(No.ZLGC20191004), 吉林省自然科学基金(No.20170101059JC)

第一作者: 刘仁臣(1976—), 男, 讲师, 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: 2019-09-09; 录用日期: 2019-10-08

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

distribution functions further confirmed the above conclusions, namely more large periods, more large diffuse reflectivity peak value, and more peak position numbers. It was concluded that back contact ZnO:Al grating with 986 nm period and 228 nm height had excellent scattering effects, such as the percentage of diffuse reflectivity to total reflectivity was up to 45%.

Key words: Two-dimensional gratings; Back contact; Bidirectional reflectance distribution function; Aluminum doped zinc oxide; Finite difference time domain method

OCIS Codes: 240.0310; 050.2770; 350.6050; 220.2740; 160.2100; 310.6845; 040.5350

0 引言

掺铝氧化锌(AZO)具有低电阻率、可见光波段内的高透射率、价格便宜、无毒且热稳定性好等多个优点。被广泛用作薄膜硅太阳能电池的透明前电极,以及金属背电极与硅吸收层之间的阻挡层^[1-3]。目前从降低成本和减小光致衰退效应出发,薄膜硅太阳能电池的硅吸收层厚度普遍只有几微米,远小于太阳光谱中长波段的可见光和近红外波段的光子吸收长度,导致这部分光子单次通过硅吸收层时不能被充分吸收,因而采用微纳结构进行陷光引起了学者们的广泛关注^[4-7]。在薄膜太阳能电池的金属背电极上织构光栅,可以将垂直入射光耦合成横向光波导模式,使到达背反层的光子被多次反射以及大角度的散射,以延长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^[8-10]。

研究人员使用严格耦合波理论数值模拟了在薄膜硅太阳能电池吸收层下面即背电极上刻蚀光栅结构,可以显著增强电池对长波段太阳光的吸收率^[9]。SHENG P等精确计算了具有背电极光栅结构的中心层厚度为 0.5 μm 非晶硅薄膜电池,结果显示,二维正交光栅增强光子吸收方面在较宽的波段内均优于一维光栅;且光栅周期比槽深对电池的影响更为灵敏^[4]。目前有关光栅的实验制备,多数是在前电极透明导电薄膜上制备一维或二维亚波长光栅用于减反^[11]。而背电极陷光结构的实验制备多数是采用阳极氧化法或者纳米压印技术制备金属光栅^[5]。由于阳极氧化法制备的弹坑状光栅结构,周期、槽深和占空比等参数均不易调控,具有很大的随机性,而采用纳米压印技术成本太高。激光干涉曝光技术,无需昂贵的设备,且具备大面积光刻的潜能,因而在薄膜硅电池微纳结构的制备方面发挥重要作用^[11-12]。我们前期采用 Rsoft Diffraction 模块计算了背电极 Ag 上织构有不同周期(200~1 200 nm)和不同槽深(20~300 nm)ZnO 光栅结构的薄膜硅太阳能电池(中心层厚度为 1 μm),对结构模型进行了优化,结果表明当光栅周期为 900 nm 和槽深为 200 nm 时,显著增加了近红外波段高衍射级次的反射,从而使短路电流最大可提高 16.8%^[13]。基于在金属背电极上制备 ZnO 光栅以用于增强薄膜硅太阳能电池的大角度散射方面的实验研究较为缺乏,本文采用激光双光束干涉光刻技术在金属 Al 薄膜上制备了二维 AZO 光栅,探讨了不同周期对反射光谱的影响。结合基于时域有限差分方法的 Rsoft 软件对实验制备的光栅样品进行了数值模拟,以期得到具有良好反射特性的背电极光栅结构。

1 金属 Al 膜上 AZO 光栅背电极的实验制备和反射光谱特性

1.1 仪器和试剂

实验仪器和试剂分别为:He-Cd 激光器(日本 Kimmon IK3501R-G),TEM00 模式,波长 325 nm,输出功率 50 mW;BSDF 散射测量仪 Reflect-180°(法国 Light Tec);DI-3100 原子力显微镜;Dektak 3 台阶仪(美国 Veeco);TM-1000 扫描电镜(日本 Hitachi);D450-3 镀膜机(上海三井);带积分球 Cary 500 分光光度计(美国 Varian);KW-4A 匀胶机(北京鑫有研公司);AZ5206 正型光刻胶(美国安智公司)。

1.2 样品制备过程

为增强 Al 和玻璃的黏附性,先在玻璃上采用电子束蒸发工艺蒸镀 50 nm 铬(Cr),再用热蒸发工艺蒸镀金属 300 nm Al。蒸发材料 Cr 和 Al 纯度均为 99.99%,蒸发时真空室本底真空为 5×10^{-4} Pa,AZO 薄膜用直流磁控溅射沉积,靶材为高密度氧化锌铝陶瓷靶(掺杂 2 wt% Al_2O_3),工作气体为纯度 99.999%的氩气,靶材与衬底间距为 75 mm。溅射条件为:氩气流量 8 Sccm,溅射功率 160 W,工作气压 0.6 Pa。根据台阶仪测得的膜厚除以溅射时间,计算得到该条件下的溅射速率为 16 nm/min。

在 AZO 薄膜上旋涂 700 nm 光刻胶,置于 90 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中加热 5 min 使之固化。冷却后将样品固定在劳埃镜上曝光约 30 s,之后将样品旋转 90 $^{\circ}$ 再次曝光,干涉曝光系统见参考文献[12]。为消除驻波效应,样品在 110 $^{\circ}\text{C}$ 条件下后烘 3 min。用 0.5% NaOH 显影后,置于镀膜机中溅射 AZO 薄膜,经丙酮超声去除光刻胶,获

取不同结构的二维 AZO 光栅.光栅周期由曝光系统的入射角度调控,槽深由溅射 AZO 薄膜的时间(5~25 min)调控.

1.3 实验结果与讨论

1.3.1 背电极 300 nm Al 膜上 AZO 光栅的制备

若金属背电极 Al 膜与硅吸收层之间没有阻挡层,它们将会直接接触形成硅化物而导致背电极反射率下降,插入 AZO 阻挡层能增强背部反射和提高电池的短路电流^[14].本文采用 325 nm 的 He-Cd 激光光刻,基于 AZO 薄膜在 325 nm 处有强烈的吸收,因而它不仅是太阳能电池背电极与硅之间阻挡层的理想材料,同时也可用作高反射 Al 衬底上制备掩模时的天然减反层.加上 AZ5206 光刻胶在 325 nm 处也有强烈吸收,因而在 300 nm Al 衬底上沉积 80 nm 的 AZO 薄膜,再在其上旋涂 700 nm 的 AZ5206 光刻胶即可使返回光刻胶的反射率降到 5% 以下,结合后烘工艺可完全消除驻波影响,确保制备出高质量的光栅掩膜.

激光干涉光刻制备 AZO 光栅常用方法有稀盐酸湿法刻蚀或者溶脱-剥离法,采用溶脱-剥离法制备的 AZO 光栅表面比较平滑,湿法刻蚀制备的 AZO 光栅表面较粗糙^[12].湿法刻蚀制备 AZO 光栅的槽深与稀盐酸刻蚀 AZO 薄膜的速率有关,受外界环境影响显著,槽深不易精确控制,而溶脱-剥离法采用磁控溅射控制光栅槽深,槽深易于调控.结合我们前期数值计算结果和文献报道,用于背电极陷光的微纳结构,表面粗糙度小更有利于增加薄膜硅太阳能电池效率^[15].因此,本文选取溶脱-剥离法在 Al 膜上制备表面相对平滑的 AZO 光栅.

AZO 光栅的周期与光刻胶掩模相同,取决于双光束曝光时的入射角.对于波长为 325 nm 的激光,周期为入射角 θ 的单值函数, $P = \lambda / 2 \sin \theta$ ^[16].实验中将入射角 θ 先后固定在 7.5° 和 14.5° ,均曝光两次,即初次曝光后将样品旋转 90° 再曝光一次.根据公式计算对应的周期分别为 1 245 nm 和 624 nm.光栅槽深由溅射 AZO 的时间调控.将这两个样品分别置于镀膜机中溅射 AZO 14 min 和 8 min,由溅射速率计算的槽深分别为 224 nm 和 128 nm.用原子力显微镜对样品形貌进行了观察,如图 1(a) 和 1(c) 所示.由图可见,制备的

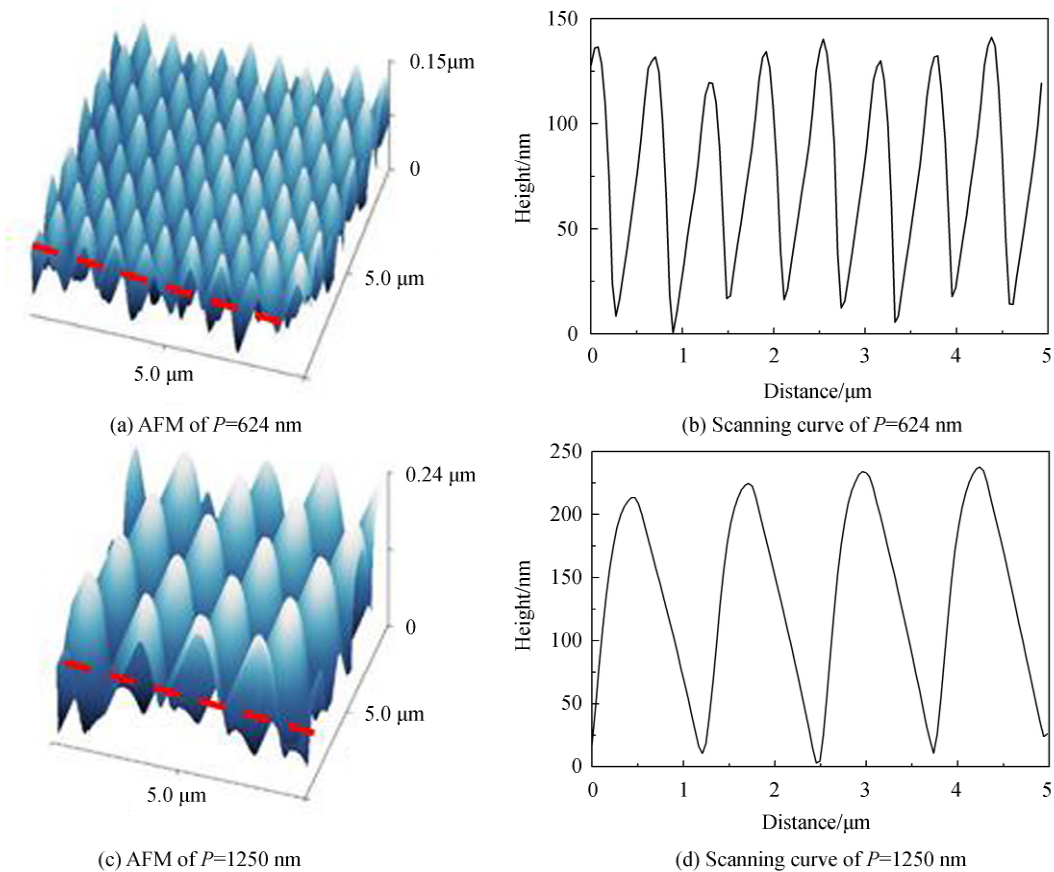


图 1 Al 膜上二维 AZO 光栅的 AFM 形貌和横截面扫描曲线

Fig.1 AFM morphologies and cross section scanning curves of 2-D AZO gratings on aluminum film

AZO 二维光栅表面平滑,呈周期性分布.图 1(b)和图 1(d)分别为图 1(a)和图 1(c)中虚线对应的横截面扫描曲线.该曲线显示光栅实际周期分别为 624 nm 和 1 250 nm,平均槽深分别为 123 ± 9 nm 和 228 ± 3 nm.由此可见,实际周期与理论预期值误差不到 1%;实槽深与根据溅射速率计算的结果误差在 4% 以内.

1.3.2 背电极 300 nm Al 膜上不同周期 AZO 光栅的反射光谱

为了考察光栅周期对背电极反射光谱的影响,采用上述方法在 300 nm Al 膜上制备了周期 P 分别为 1 250 nm、986 nm、815 nm 和 624 nm,槽深均为 228 nm 的二维 AZO 光栅,其中, $P=0$ nm 表示没有光栅的平面薄膜,即对照组.图 2(a)~(d)是所制备 AZO 光栅的 SEM 形貌图(放大倍数为 10^4 倍),图片显示光栅呈二维点阵周期性分布,周期逐渐减小.

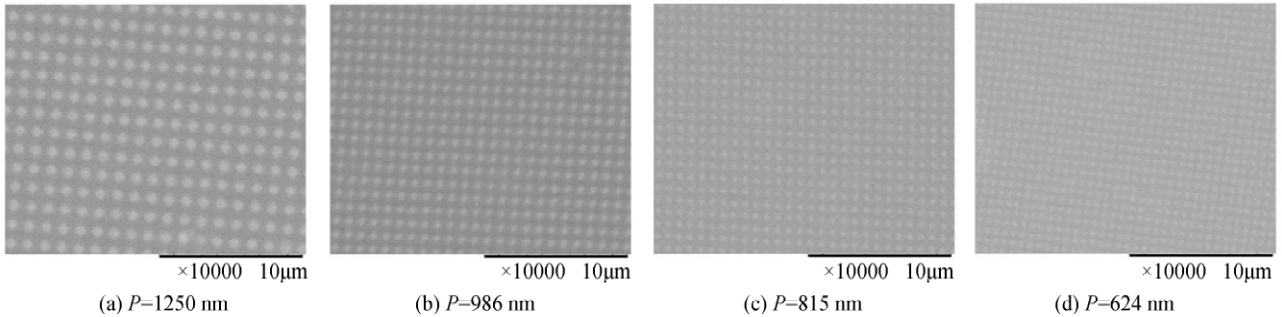


图 2 槽深均为 228 的不同周期二维 AZO 光栅 SEM 图片

Fig.2 SEM images of 2-D AZO gratings with 228 nm height and different periods

对上述样品的总反射率和镜面反射率进行了测试,见图 3(a)和图 3(b).图 3(a)显示,当周期从 624 nm 增加到 986 nm 时,二维 AZO 光栅的总反射率随着周期的增大而明显增大,而当光栅周期从 986 nm 增加到 1 250 nm 时,总反率射的增幅不明显.虽然光栅结构的总反射率在 300~1 100 nm 整个波段内均较 AZO 薄

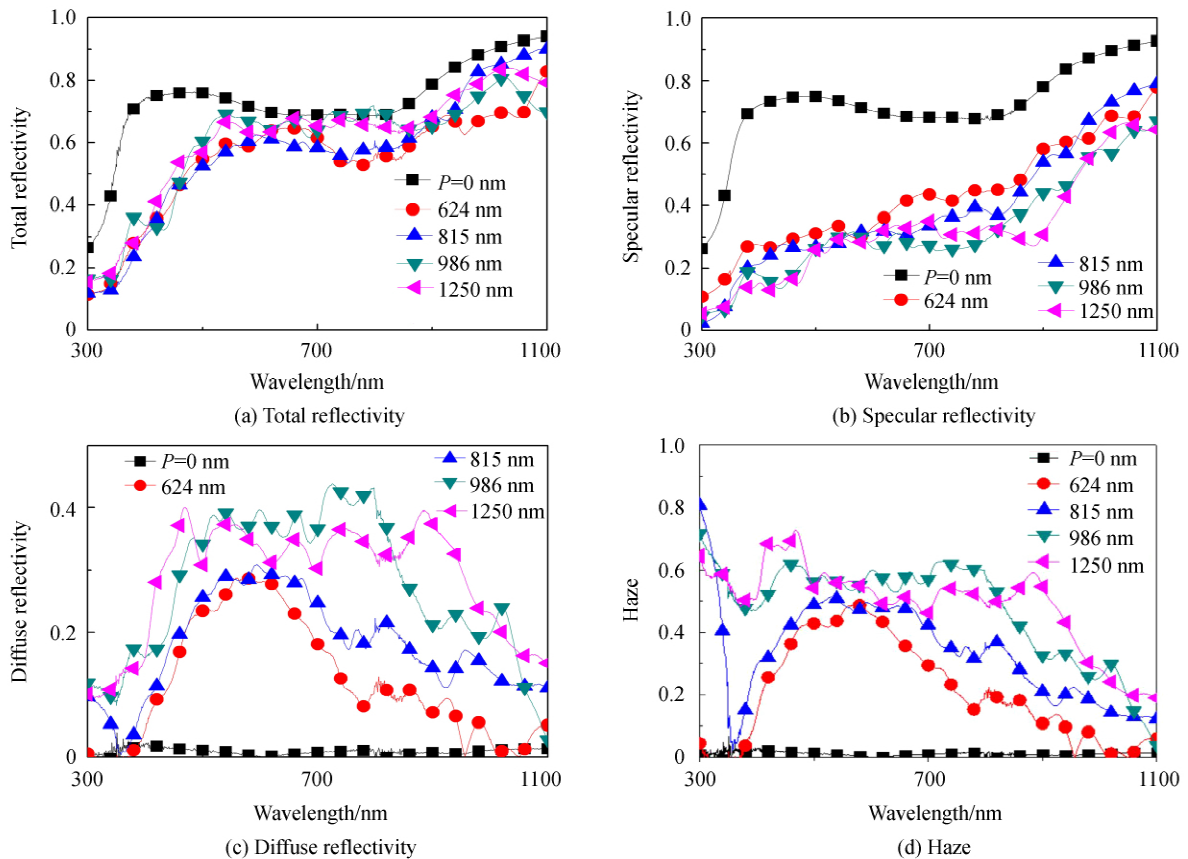


图 3 槽深均为 228 nm 的不同周期二维 AZO 光栅反射光谱

Fig.3 Reflective spectrum of 2-D AZO gratings with 228 nm height and different periods

膜有所下降,但是随着光栅周期增大到986 nm时,在 700~1 100 nm 波段的总反射率越来越接近 AZO 薄膜.图 3(b)进一步表明,镜面反射率也是随着光栅周期从 624 nm 增加到 986 nm 而明显下降,周期从 986 nm 增加到 1 250 nm 时,这种下降趋势不再显著.由于漫反射率为总反射率减去镜面反射率,雾度为漫反射率与总反射率的比值,根据图 3(a)和图 3(b)的对应曲线,计算得到漫反射率和雾度曲线分别为图 3(c)和图 3(d).图 3(c)和图 3(d)表明,当光栅周期从 624 nm 增加到 986 nm 时,700~1 100 nm 内的漫反射率和雾度均显著增加,而当周期从 986 nm 增加到 1 250 nm 时,漫反射率和雾度增幅变缓.

为了定量分析光栅周期对反射率的影响,对图 3 中所有曲线在 400~1 100 nm 波段的平均值进行了计算,见表 1.由表 1 可见,当光栅周期从 624 nm 增加到 986 nm 时,总反射率从 0.59 增加到 0.65,漫反射率由 0.13 增加到 0.29,雾度由 0.22 增加到 0.45.光栅周期从 986 nm 增加到 1 250 nm 时,增幅明显变缓,总反射率从 0.65 增加到 0.67,漫反射率从 0.29 增加到 0.31,雾度由 0.45 增加到 0.46.综合图 3 和表 1 可得:Al 膜上二维 AZO 光栅的反射率随周期变化情况为,周期越大,总反射率、漫反射率和雾度均越大,镜面反射率越小.且当周期达到 986 nm 时,这种变化已趋于平缓.

表 1 槽深均为 228 nm 不同周期 AZO 光栅在 400~1 100 nm 平均总反射率、镜面反射率、漫反射率和雾度
Table 1 The total reflectivity, specular reflectivity, diffuse reflectivity and haze in the range 400~1 100 nm of AZO gratings with 228 nm height and different periods

Period	Total	Specular	Diffuse	Haze
0 nm	0.76	0.76	0.0	0.0
624 nm	0.59	0.47	0.13	0.22
815 nm	0.63	0.43	0.20	0.32
986 nm	0.65	0.36	0.29	0.45
1 250 nm	0.67	0.36	0.31	0.46

依据光栅方程

$$n_r \sin(\Phi_m) = n_i \sin(\Phi_i) + \frac{m\lambda}{P} \quad (1)$$

式中, Φ_i 为入射角, Φ_m 为反射 m 级衍射角, n_i 、 n_r 分别为入射介质和反射介质的折射率(本文中 $n_i = n_r = 1$), P 为周期.式(1)变形得

$$m = \frac{P[\sin(\Phi_m) - \sin(\Phi_i)]}{\lambda} < \frac{P}{\lambda} \quad (2)$$

对于同一波长 λ , 周期 P 越小, 衍射级次 m 也越少, 当周期远小于波长时, 只有零级反射.光栅镜面反射对应零级反射, 漫反射对应高衍射级次 ($m > 0$).由此可见, 周期增大, 衍射级次增多, 对应的漫反射率增加.薄膜太阳能电池背电极结构不仅要使长波段光子返回硅吸收层, 而且还应使返回来光子尽可能散射到一定的角度以增加有效光程.为厘清背电极 AZO 光栅反射光谱的角分布情况, 采用散射仪测试了光栅双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF).BRDF 是描述材料反射特性的重要参数, 它表征反射方向 (θ_r, φ_r) 上的反射亮度 $L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 与入射方向 (θ_i, φ_i) 的入射照度 $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 比值, 用 f_r 表示为^[17].

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dL_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (3)$$

式中, θ 和 φ 是球坐标的天顶角和方位角, 下表 i 和 r 分别对应入射量和反射量, f_r 的值可在 $0 \sim \infty$ 之间变化, 量纲为球面度倒数 (S_r^{-1}).

为更加接近太阳光谱辐照情况, 本实验采用入射光谱为 400~1 100 nm 连续非偏振光卤钨灯光源(功率 100 W), 入射角 θ 分别为 0° 、 7° 、 30° 和 60° , φ 固定在 0° ; 探测器旋转角为 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 采集间隔为 0.1° .为了与分光光度计在固定入射角为 7° 时的反射结果进行比较(图 3), 首先对入射角为 7° 的 BRDF 进行了分析(图 4).将图 4(a)中的反射分布情况进行放大, 即纵坐标取 $0.001 \sim 1$ 得到图 4(b).结果显示: 光栅周期分别为 986 nm 和 1 250 nm 时, 漫反射峰值均较显著, 但是周期为 986 nm 时, 峰位角(峰值对应的角度)较周期为 1 250 nm 时更大, 与光栅方程(1)计算的结果基本一致, 即对应于同一衍射级次, 周期大对应的衍射角小.

BRDF 这一结果与图 3 中分光光度计测得的实验数据也相吻合。

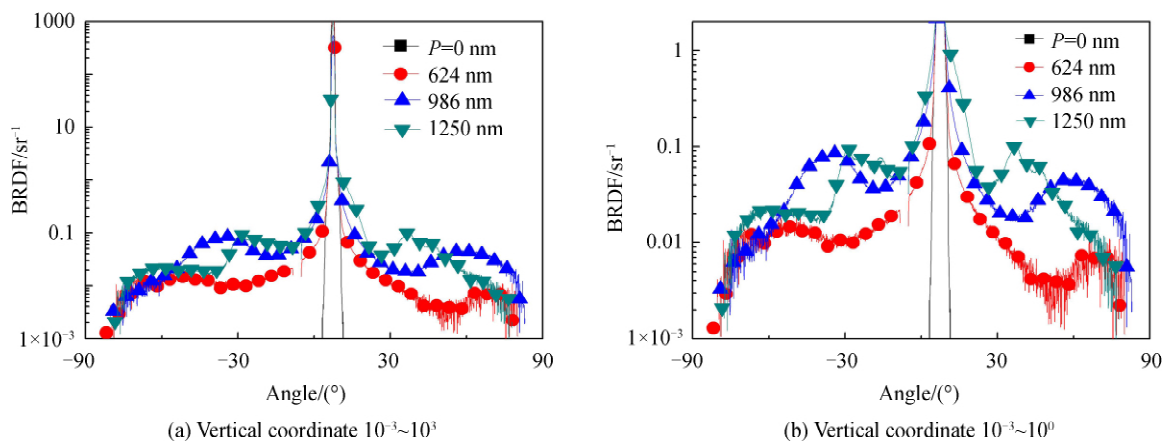


图 4 7°入射 BRDF 数据

Fig.4 BRDF data at the incident angle of 7°

图 5 是入射角分别为 0°、30°和 60°时的 BRDF.图 5(a)显示 0°入射时,漫反射关于镜面反射对称分布,两侧的漫反射峰值相等,两侧峰位角绝对值也是相等,这一结果间接反映了实验制备的二维 AZO 光栅分布均匀且对称性较好(见图 1).0°正入射时漫反射峰值和峰位角随周期变化的规律与 7°入射时相同.即周期大,峰值大,对应峰位角变小.图 5(a)中周期为 986 nm 时漫反射的峰位角为 50°,周期为 1 250 nm 时峰位角为 30°.

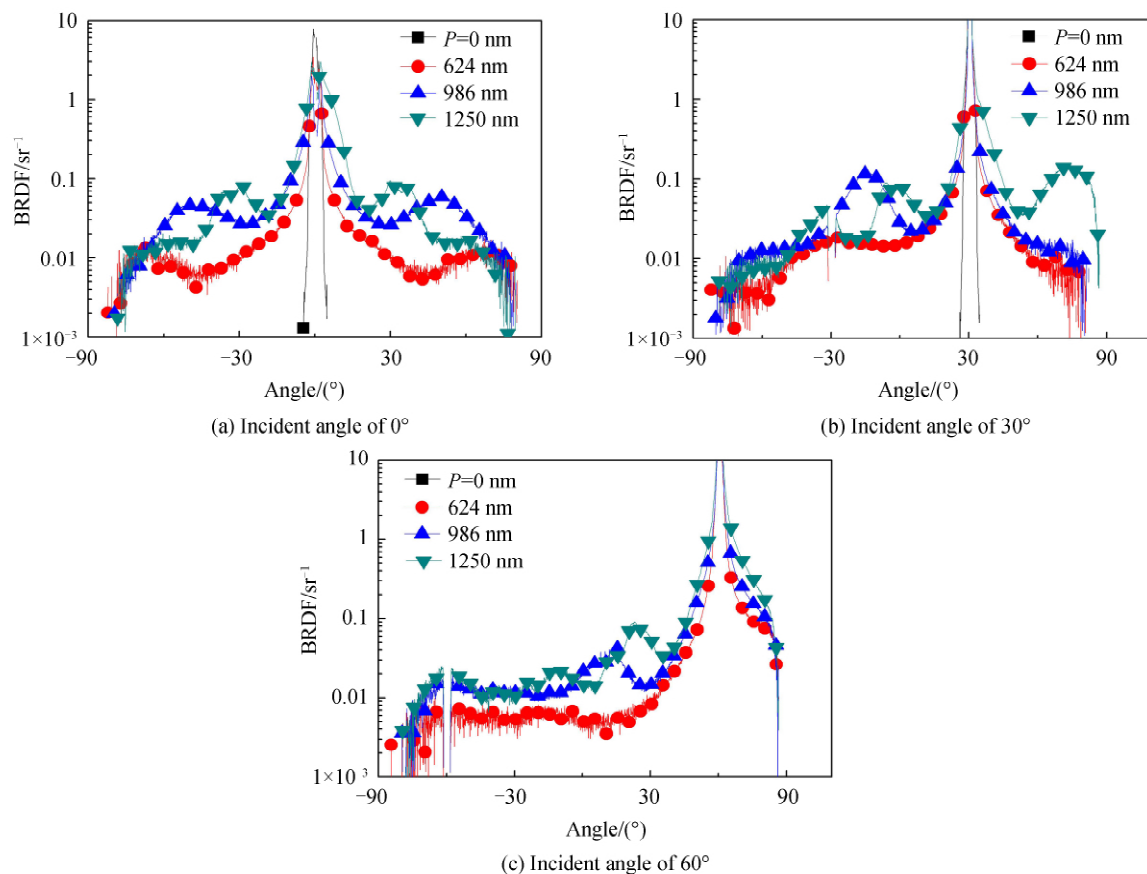


图 5 不同入射角时的 BRDF 数据

Fig.5 BRDF data at different incident angles

图 5(b)和 5(c)中,当入射角分别为 30°和 60°时,漫反射均随周期增大而增加,周期为 986 nm 和 1 250 nm 的背电极光栅有明显的漫反射峰,而且周期为 986 nm 时,反射光的散射角度较 1 250 nm 时更大.这与本课题前期计算结果相一致,即背电极光栅设置为周期 900 nm,槽深 200 nm 时,镜面反射(0 级衍射)

较弱,而漫反射(1 级衍射)较强^[13].

2 金属 Al 膜上 AZO 光栅背电极的理论模拟

2.1 理论模拟总反射和镜面反射

为了对上述实验结果进行验证,本文采用基于 FDTD 方法的 Rsoft 软件数值模拟计算,分析比较金属 Al 膜上 AZO 光栅背电极结构对总反射率和镜面反射的影响.模拟的太阳光源为沿 y 轴负向垂直入射,在 x 方向上使用周期性边界条件, y 方向上使用完全匹配层(Perfectly Matched Layer,PML)边界条件,波长范围为 300~1 100 nm.如图 6 所示,基本结构包括 300 nm Al 膜,80 nm AZO 薄膜,不同周期 AZO 光栅.入射端媒质为空气,以 TE 波(电场方向平行于光栅条纹)垂直入射.总反射率和镜面反射率计算方法见参考文献^[14].将实验制备的 AZO 光栅 AFM 横截面扫描曲线分别导入 Rsoft 软件中进行计算,得到周期分别为 624 nm、815 nm、986 nm、1 250 nm 和 1 435 nm,槽深均为 228 nm 的二维 AZO 光栅总反射曲线和镜面反射曲线,见图 7(a)和图 7(b),AZO 折射率取 1.9.根据反射曲线求出在 400~1 100 nm 波段的平均总反射率和平均镜面反射率,计算结果见表 2.将理论模拟结果与实验结果进行对比,发现有类似的规律,即随着周期增大,总反射率增大,镜面反射率降低.当周期为 624 nm 时,在长波段(700~1 100 nm)的总反射和镜面反射率均较小,而周期为 986 nm 时,在该长波段的总反射率有显著的增强.

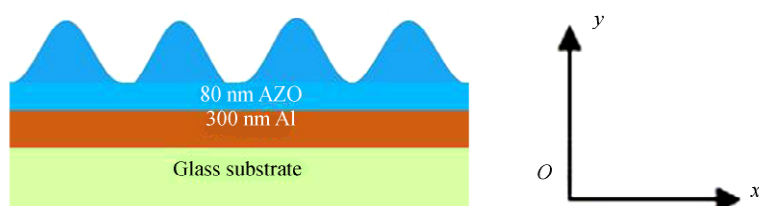


图 6 背电极结构(300 nm Al 膜+80 nm AZO 膜+AZO 光栅)示意图

Fig.6 Sketch map of back electrode structure (300 nm Al film +80 nm AZO film + AZO grating)

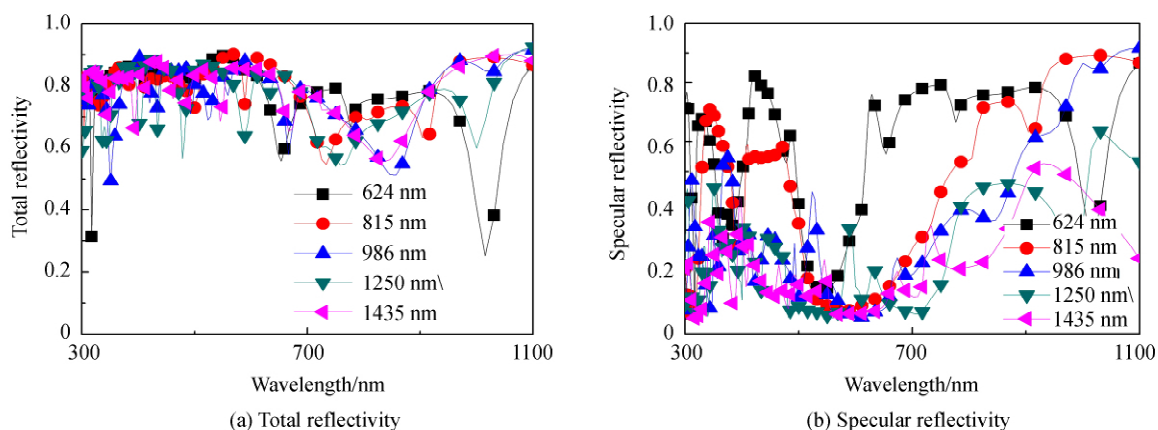


图 7 槽深均为 228 nm 的不同周期二维 AZO 光栅反射光谱的理论曲线

Fig.7 Reflective spectrum theoretical curves of 2-D AZO gratings with 228 nm height and different periods

表 2 槽深为 228 nm 不同周期 AZO 光栅在 400~1 100 nm 总反射率和镜面反射率的理论模拟和实验结果

Table 2 The theoretical and experimental results of total and specular reflectivity of AZO gratings with 228 nm height at 400~11 00 nm

Reflectivity		$P=624$ nm	815n m	986 nm	1 250 nm
Total	Theoretical	69	74	76	79
	Experimental	59	63	65	67
Specular	Theoretical	46	41	28	23
	Experimental	47	43	36	36

2.2 理论模拟双向反射分布函数

为验证散射仪测得的 BRDF 数据,进一步采用 Rsoft 软件数值计算了 300 nm Al 膜上周期为 1 250 nm,

槽深为 228 nm AZO 光栅结构的 BRDF.图 8 为数值计算得到的反射率在 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的分布情况(光线 0° 正入射)为黑色曲线,红色曲线为实验测得的 BRDF.由图可见,理论模拟曲线的反射峰位置($28^{\circ}\sim 42^{\circ}$)与实验曲线中反射分布函数的峰位($27^{\circ}\sim 45^{\circ}$)几乎重合,而且左右两边均具有高度的对称性,这再次证实了溶脱剥离法制备的二维 AZO 光栅结构具有高度对称性.

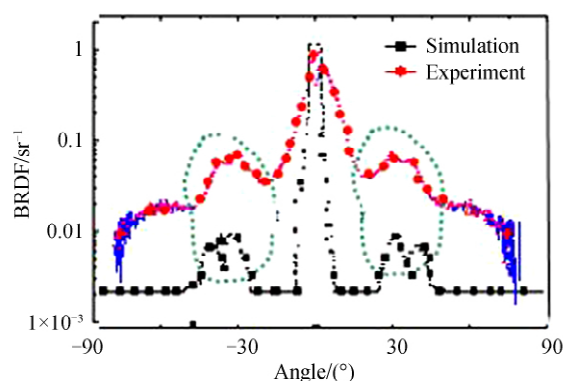


图 8 周期为 1 250 nm 槽深为 228 nm AZO 光栅的双向反射分布函数实验与模拟曲线比较.

Fig.8 Comparing experiment and simulation BRDF data of AZO grating with 1 250 nm period and 228 nm height

3 结论

利用 AZO 薄膜 325 nm 处较强的吸收特性,在高反射金属 Al 衬底上制备了无垂直驻波高质量的二维光栅掩模.结合溶脱-剥离工艺转移图形,制备了周期和槽深可独立调控的 AZO 光栅.利用分光光度计和散射仪实验测量和 Rsoft 软件理论模拟相结合,对所制备的背电极 AZO 光栅陷光特性进行了分析.反射光谱曲线结果表明,对于槽深相同、周期在 624~1 250 nm 的光栅,周期越小,总反射下降得越多,漫反射比重和雾度参数也越小.由于背电极光栅是用于将长波段光子大角度反射回硅吸收层,因此,选择周期适当大一些的背电极光栅更有利于实现宽光谱的大角度反射.周期为 986 nm 时,漫反射的比重高达 45%.BRDF 数据证实了这一结果,清楚地显示了镜面反射和漫反射在不同角度的分布情况,即周期越大,漫反射峰值越大,与峰值所对应的峰位角越小,这一实验结果与由光栅方程得到的结果相吻合.当入射角增加到 60° 时,仍然是周期较大的光栅结构漫反射比重更占优势.因此,作为薄膜硅太阳能电池的背反电极,适当增大光栅周期有利于光线的散射.当然,光栅槽深和占空比作为影响光散射特性的因素之一,值得进一步研究.

参考文献

- [1] EFKERE H I, TATAROGLU A, CETIN S S, *et al.* The effect of thickness on the optical structural and electrical properties of ZnO thin film deposited on n-type Si[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2018; S0022286018304538.
- [2] DONG X U, YIN S, ZENG X, *et al.* Structural, optical and electrical properties of ZnO: B thin films with different thickness for bifacial a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2017, **10**(1): 1-7.
- [3] ZENG X, WEN X, SUN X, *et al.* Boron-doped zinc oxide thin films grown by metal organic chemical vapor deposition for bifacial a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells[J]. *Thin Solid Films*, 2016, **605**: 257-262.
- [4] SHENG P, BLOCH A N, STEPLEMAN R S. Wavelength-selective absorption enhancement in thin-film solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, **43**(6): 579-581.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] DENG C, TAN X Y, JIANG L H, *et al.* Efficient light trapping in silicon inclined nanohole arrays for photovoltaic applications[J]. *Optics Communications*, 2018, **407**: 199-203.
- [8] CHEN Ke, WANG Yuan-yuan, ZHENG Hong-mei, *et al.* Optical absorption of one-dimensional aluminum back grating crystalline silicon thin film solar cell[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1125001.
陈科,汪圆圆,郑红梅,等.一维铝背栅单晶硅薄膜太阳能电池光吸收分析[J].光子学报, 2015, **44**(11): 1125001.
- [9] GJESSING J, MARDTEIN E S, SUDBO A. 2D back-side diffraction grating for improved light trapping in thin silicon solar cells[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 5481-95.
- [10] SHI Xin, SUN Cheng, WANG Xiao-qin. One-dimensional diffraction grating structure for rear reflection surface of thin film silicon solar cells[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**: 010501.

- 石鑫,孙诚,王晓秋.适用于薄膜硅太阳能电池背反射面的一维衍射光栅结构[J].激光与光电子学进展,2018,**55**: 010501.
- [11] DYCK T, HAAS S. A model for direct laser interference patterning of ZnO:Al-predicting possible sample topographies to optimize light trapping in thin-film silicon solar cells[J]. *Applied Physics A*, 2016, **122**(4): 445.
- [12] LIU Ren-chen, WU Yong-gang, XIA Zi-huan, *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,夏子奂,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.
- [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] YANG C Y, WAN D Y, WANG Z, *et al.* Intrinsic ZnO films fabricated by DC sputtering from oxygen-deficient targets for Cu(In,Ga)Se₂ solar cell application[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(10): 86-89.
- [15] YU Xiao-ming, ZHAO Jing, HOU Guo-fu, *et al.* Investigation of light trapping structure and performance in PIN-type and NIP-type thin film silicon solar cells[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(12): 505-505.
于晓明,赵静,侯国付,等.PIN 型和 NIP 型硅薄膜太阳能电池中绒面陷光结构和陷光性能研究[J].物理学报,2013,**62**(12):1-7.
- [16] PRODAN L, EUSER T G, WOLFEREN H, *et al.* Large-area two-dimensional silicon photonic crystals for infrared light fabricated with laser interference lithography[J]. *Nanotechnology*, 2004, **15**: 639-642.
- [17] LI Q, PAN K, XING K, *et al.* Analysis on bidirectional reflectance distribution function of rough earth surface in remote sensing imaging[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **575**: 825-828.