

亚微米 AZO 光栅及其漫透射分布特性

刘仁臣 吴永刚 夏子奂 唐平林 梁钊铭

(同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要 探讨亚微米掺铝氧化锌(AZO)光栅的漫透射光谱特性。在 AZO 薄膜上涂布光刻胶,用 325 nm 激光双光束干涉曝光得到掩模图案。将其置于质量分数为 0.5% 的稀盐酸溶液中湿法刻蚀,制备出周期(780~1280 nm)和高度(60~300 nm)能独立调控的 AZO 一维光栅。正入射双向透射分布函数(BTDF)测试结果表明,400~900 nm 波段内平均镜面透射率随光栅周期增大而降低,与紫外-可见分光光度计测得的结果吻合;同时,周期越大被衍射到 30°~80°范围内的漫透射比重和漫透射峰值均越大,而峰位角越小。根据光栅方程对实验结果给出了合理的解释。

关键词 光栅;掺铝氧化锌;双向透射分布函数;激光干涉法;湿法刻蚀

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0731001

Submicron AZO Gratings and Diffuse Transmittance Distribution

Liu Renchen Wu Yonggang Xia Zihuan Tang Pinglin Liang Zhaoming

(Institute of Precision Optical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Transmittance spectrum distribution of submicron aluminum-doped zinc oxide (AZO) is discussed. A layer of positive photoresist (PR) is spin coated on AZO thin film and PR mask pattern is acquired with two-beam holographic interference exposure of 325 nm laser. Then it is immersed into 0.5% HCl (mass fraction) water solution to form one-dimensional AZO gratings. The periods and heights of the gratings are adjusted independently from each other and vary between 780~1280 nm and 60~300 nm, respectively. Results show that specular transmittance of 400~900 nm decreases rapidly with grating periods increasing. Bidirectional transmittance distribution functions (BTDF) with normal incidence not only verify this result, but also confirm that diffuse transmittance in the angular range of 30°~80° increases accordingly. The larger the period is, the higher the peak of diffuse transmittance is, and the peak position angle decreases slightly, which is consistent with the law of diffraction angular change with periods obtained by grating equation.

Key words gratings; aluminum-doped zinc oxide; bidirectional transmittance distribution function; laser interference technology; wet etching

OCIS codes 310.6188; 120.5820; 220.4000; 050.1950

1 引 言

掺铝氧化锌(AZO)薄膜是一种典型的半导体薄膜,室温禁带宽度约 3.37 eV,在可见光范围内具有高透射率和低电阻率。AZO 薄膜价格便宜、环境友好,在高温氢等离子体环境中化学稳定性高,是薄膜太阳能电池理想的透明电极材料^[1~3]。研究表明,在 AZO 薄膜上制备微纳结构能增强薄膜太阳

能电池的陷光效果^[2,3]。随着对光栅光谱特性^[4]和光栅槽型控制^[5]等领域的深入研究,将光栅用于提高薄膜电池的光电转换效率的研究已经引起学者们的高度关注^[6~9]。Haase 等^[6]采用 Microwave Studio 5 软件计算了一维光栅微晶硅薄膜电池的量子效率和短路电流,结果发现,在红光照射下,光栅周期为 0.7~1.2 μm、高度约 300 nm 时,短路电流

收稿日期: 2011-12-22; 收到修改稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(10576021,60977028)和上海市重点科研项目基金(09JC1413800)资助课题。

作者简介: 刘仁臣(1976—),男,博士研究生,主要从事亚微米光栅及薄膜太阳能电池等方面的研究。

E-mail: lrc0322@yahoo.com.cn

导师简介: 吴永刚(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事低维光子晶体、薄膜太阳能电池微纳结构、真空紫外、极紫外及软 X 射线滤光薄膜等方面的研究。E-mail: ygwu@tongji.edu.cn

最大。目前,光栅结构在薄膜硅电池中应用的研究以理论模拟居多^[6~8],实验方面的报道相对缺乏。相对电子束、X射线等光刻技术而言,激光干涉曝光无需昂贵的设备、短波长光源和高性能抗蚀剂等苛刻条件,具备大面积光刻的潜能,在薄膜太阳能电池微纳结构制备方面将发挥重要作用^[10,11]。

本文采用直流溅射得到 AZO 薄膜,结合紫外激光全息干涉和湿法刻蚀制备亚微米 AZO 光栅。使用扫描电镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)观察薄膜的表面形貌特征,使用紫外-可见分光光度计和散射仪测试薄膜的透射光谱,根据光栅方程对测试结果进行分析。阐明光栅周期对正入射双向透射分布函数(BTDF)的影响,以期得到具有良好散射特性的光栅结构,为高陷光效应的薄膜电池制作建立基础。

2 仪器和方法

2.1 仪器和试剂

氦-镉(He-Cd)激光器(日本 Kimmon IK3501R-G),TEM00 模式,波长 325 nm,输出功率 50 mW;散射测量仪(法国 STIL REFLECT-180);DI-3100 原子力显微镜和 Dektak 3 台阶仪(美国 Veeco);TM-1000 扫描电镜(日本 Hitachi);D450-3 镀膜机;UV757CRT 分光光度计;KW-4A 匀胶机;GP-1810 正型光刻胶。

2.2 AZO 薄膜的制备

参考文献[12]给出的方法采用直流磁控溅射制备 AZO 薄膜。溅射靶材为高密度氧化锌铝陶瓷靶(Al_2O_3 质量分数为 2%),工作气体为纯度 99.999% 的氩气,靶基间距 75 mm。将真空室本底抽至 5×10^{-4} Pa 后通入氩气,预溅射 10 min 去除陶瓷靶表面的杂质。正式溅射时基片以 15 r/min 的速率自转以提高 AZO 薄膜的均匀性。

电阻率和透射率作为衡量 AZO 薄膜光电性能的两个重要指标,多数情况下不能同时达到最优值。因此,对镀膜工艺进行优化依据的原则是使优化参数 $\phi_{\text{TC}}(\phi_{\text{TC}} = T^{10}/R_s)$,透射率 10 次方 T^{10} 与方块电阻 R_s 的比值)指标最大^[13]。由此确定溅射功率为 160 W,工作气压为 2.6 Pa,氩气流量为 8 sccm (sccm 表示标准状态下即 0 °C, 1 atm 时毫升每分),沉积温度为 200 °C。

2.3 激光干涉法制备 AZO 一维光栅

将镀有 AZO 薄膜的基片在 90 °C 烘箱中加热 10 min,以增加基片与光刻胶(PR)的附着力;冷却后用匀胶机(先以 800 r/min 低速旋涂 6 s,再以

3500 r/min 高速旋涂 40 s)涂布一层厚度约 700 nm 的 PR 层;置于 90 °C 的烘箱烘 5 min,使 PR 固化;然后置于样品架上,干涉曝光 2.0~2.5 min,用质量分数为 0.5% 的 NaOH 溶液显影 10~20 s;去离子水清洗干净后,在 90 °C 烘箱中坚膜 12 min;室温下浸入质量分数为 0.5% 的 HCl 溶液中刻蚀 5~30 s,用丙酮去除残余光刻胶,得到 AZO 光栅。

干涉曝光系统如图 1 所示,光源为 325 nm 氦-镉激光器, M_1 和 M_2 为反射镜, f_1 和 f_2 是焦距分别为 10 mm 和 200 mm 的凸透镜。透镜焦点处放一孔径为 10 μm 的空间滤波器(SF),过滤杂散光。劳埃德镜系统由互相垂直的反射镜 M_3 和样品架组成,固定在能够精确调节角度的旋转台上。激光器出射光扩束后分为两束,一束直接入射到样品上,另一束经 M_3 反射后再入射到样品上,构成双光束干涉曝光系统。根据光栅周期公式

$$P = \lambda / 2 \sin \theta, \quad (1)$$

对于波长为 325 nm 的激光束,光栅周期仅是入射角 θ 的单值函数,通过水平转动固定劳埃德镜的旋转台以调节入射角的大小,从而得到不同周期的光栅。

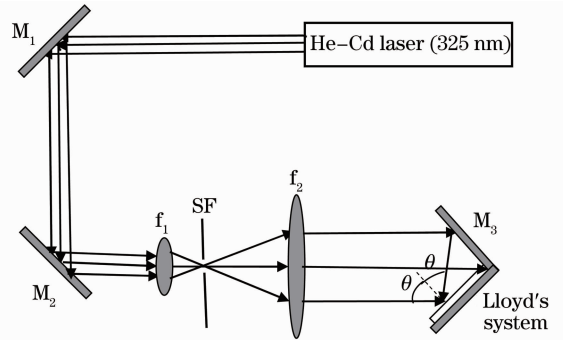


图 1 激光干涉曝光系统示意图

Fig. 1 Sketch of exposure system for laser interference lithography

3 结果与讨论

3.1 光刻胶掩模图案的 SEM 图片

掩模图案的质量直接影响到 AZO 光栅的形貌和光谱特性。因此,首先探索槽底干净、周期和高度能独立调控的 PR 掩模光栅的制备工艺。光栅周期由入射角度调控,光栅高度取决于曝光前 PR 的厚度和留膜率。本实验中留膜率接近为 1,光栅高度近似为涂布的 PR 厚度。光栅槽底是否干净取决于曝光量和显影时间。若曝光或显影不足,沟槽刻蚀不干净;若曝光或显影过度,光刻胶掩模条纹变窄变细,甚至无条纹。先确定恰当的曝光量,逐渐延长显

影时间,直到光刻胶光栅条纹出现断裂为止,然后在条纹已经断裂和即将断裂的显影时间内缩小范围,重新实验直到确定最佳显影时间。

图 2 为 SEM 观测的光刻胶掩模图案(放大倍数为 10^4),亮纹为栅脊,暗纹为光栅沟槽。图 2(a)是在

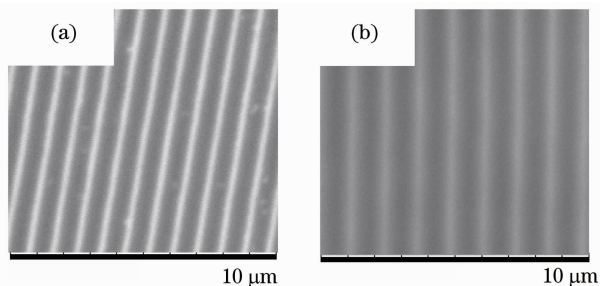


图 2 周期分别为(a)910 nm 和(b)1280 nm 的光刻胶光栅 SEM 图片

Fig. 2 SEM pictures of photoresist gratings with (a) 910 nm and (b) 1280 nm periods, respectively

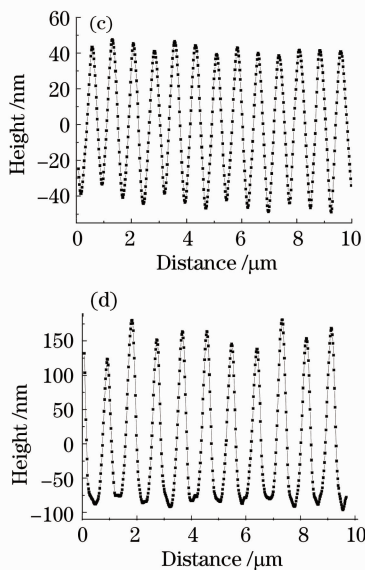
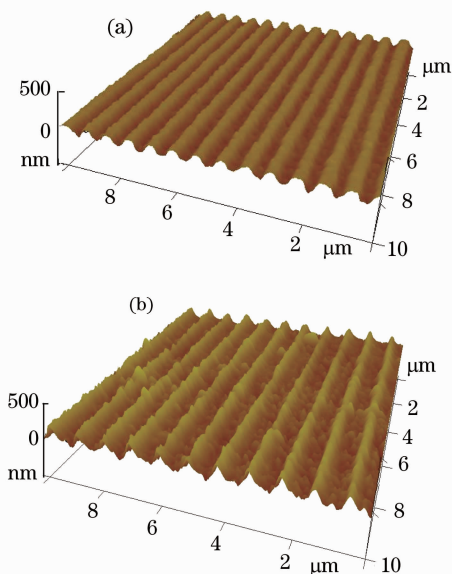


图 3 周期分别为 780 nm 和 910 nm 的 AZO 光栅(a)、(b) AFM 表面形貌和(c)、(d)扫描曲线

Fig. 3 (a), (b) AFM surface morphologies and (c), (d) scanning curves of AZO gratings with 780 nm and 910 nm periods respectively

3.3 AZO 光栅制备过程中透射率的变化

为研究光栅高度对透射率的影响,实验中对图 3(c)周期为 910 nm 的 AZO 光栅制备过程中各阶段的透射光谱进行了测试。编号依次为:玻璃基底上厚度为 650 nm 的 AZO 薄膜记为 1[#]样品(as-deposited);在其上旋涂 700 nm PR 为 2[#];对 PR 曝光、显影,得到高度为 700 nm 的 PR 光栅记为 3[#];置于 HCl 中刻蚀 20 s,丙酮去胶后得到高度为 243 nm 的 AZO 光栅记为 4[#]。透射率曲线如图 4(a)所示,

入射角为 10°、曝光 70 s、显影 16 s 的条件下得到周期为 910 nm 的光栅;图 2(b)是在入射角为 8°、曝光 70 s、显影 12 s 时得到的周期为 1280 nm 的光栅。

3.2 AZO 光栅的 AFM 形貌

周期分别为 780 nm 和 910 nm 的两个 AZO 光栅的 AFM 形貌如图 3 所示。图 3(a)和(c)的扫描范围均为 10 μm×10 μm,图 3(b)和(d)是与之对应的横截面扫描曲线。根据扫描曲线得到两个样品的平均高度分别为(86±3) nm 和(243±16) nm,变异系数(标准偏差除以平均高度)分别为 3%和 7%。两个样品在 HCl 中的刻蚀时间分别为 8 s 和 20 s,平均刻蚀速率分别为 11 nm/s 和 12 nm/s。由此可见,不同栅脊的高度相对平均高度有不同程度的偏离,且刻蚀时间越长偏离程度越大,平均刻蚀速率也越大。这是由湿法刻蚀的特点所造成的,即 HCl 对 AZO 薄膜刻蚀易形成一定的起伏或弹坑状结构,且刻蚀速率随刻蚀进程而变化^[14]。

由图可得 1~4[#]样品在 400~900 nm 波段平均透射率依次为 82%,78%,26%和 46%。对于 2[#]样品即 PR 薄膜,虽然在该波段的平均透射率较 AZO 薄膜只下降了 4 个百分点,但在小于 600 nm 波段的透射率却较 AZO 薄膜有明显降低,而大于 600 nm 波段的透射率基本不变。这是因为正胶的感光波段一般位于紫外波段,PR 对该波段光子存在一定的吸收。另外,3[#]样品(PR 光栅)的透射率较 AZO 薄膜大幅下降,且在 790 nm 处透射率出现了极低值。4[#]样

品(AZO 光栅)在480 nm处也出现了透射率极低值。根据波动光学理论,当光通过光栅介质(AZO 或 PR)和光栅空隙的光程差等于半波长的奇数倍,即满足公式

$$(2k - 1) \frac{\lambda}{2} = h(n - n_{\text{air}}) \quad (2)$$

时,引起干涉相消^[9]。(2)式中 h 和 n 分别为光栅高度和介质折射率, n_{air} 为空气折射率, k 为等于或大于 1 的整数。根据(2)式分别计算 3[#] 和 4[#] 样品干涉

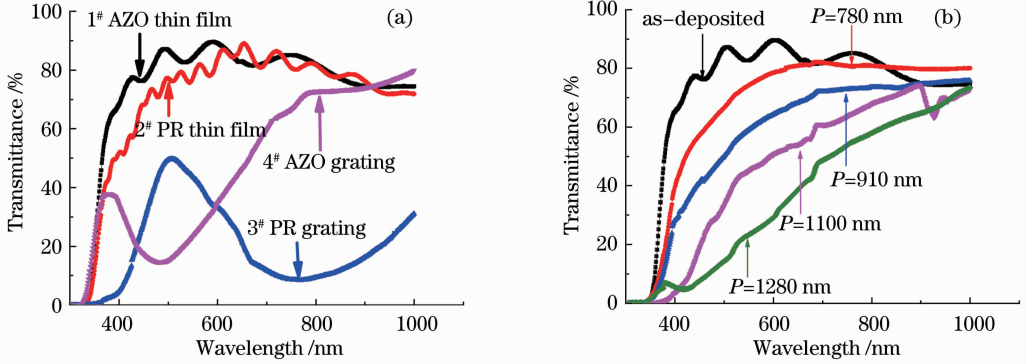


图 4 (a) AZO 光栅制备过程各样品透射率曲线和(b)不同周期 AZO 光栅透射率曲线
Fig. 4 (a) Transmittance curves of different samples during fabrication process and (b) AZO gratings with different periods

由于制备过程中光栅周期保持不变,因而该实验结果初步反映了光栅高度对透射率的影响,即随着高度的增加 400~900 nm 波段的透射率显著下降。由于分光光度计不带积分球装置,因而探讨的是正入射时的镜面透射率分布情况。

3.4 周期对 AZO 光栅透射光谱的影响

为了考察高度相同时光栅周期对透射光谱的影响,制备了周期分别为 780、910、1100、1280 nm,高度均为 120 nm 的 AZO 光栅。分光光度计测试得到的透射率曲线如图 4(b)所示,镜面透射率随着周期的增大而降低,在 400~900 nm 波段平均镜面透射率分别为 74%、65%、50%、37%,较 AZO 薄膜(as-deposited)的 82%依次下降了 8、17、33、45 个百分点。对于玻璃/AZO 光栅系统,当光从玻璃面正入射时,衍射角 Φ_m 与波长之间满足公式^[9]

$$\sin \Phi_m = m\lambda / Pn, \quad (3)$$

式中 P 为光栅周期, m 为衍射级次, λ 为真空中的波长, n 为传播衍射光的介质折射率(对于空气介质 n 为 1)。衍射级次 $m = P \sin \Phi_m / \lambda < P / \lambda$,即对于相同波长的光,AZO 光栅周期越大,大于 0 的高衍射级次也将越多。为检验分光光度计的测试结果以及进一步阐明光栅周期增大与镜面透射率变化的关系,采用散射仪测试了图 4(b)样品的正入射 BTDF 数

相消位置。3[#] PR 光栅的 $h=700$ nm、 $n=1.58$ 。当 $k=1$ 时, $\lambda=812$ nm,略大于透射曲线中极低值峰位 790 nm。其原因为 PR 光栅制备过程中留膜率略小于 1,导致 PR 光栅的高度略小于 700 nm;当 $k=2$ 时 $\lambda=271$ nm,已经超出测试波长范围。4[#] AZO 光栅 $h=243$ nm、 $n=1.95$ 。当 $k=1$ 时 $\lambda=462$ nm,与透射曲线极低值峰位 480 nm 基本吻合;当 $k=2$ 时 $\lambda=150$ nm,也超出了测试波长范围。

据,以分析高级次衍射的级次数与衍射强度与光栅周期的关系。BTDF 的概念最早起源于光辐射的角度分布定义,它能够反映不同入射条件下材料表面任意观测角的透射特性,是分析宽光谱、大角度散射特性较为理想的手段。BTDF 表征表面散射在指定方向(θ_T, ϕ_T)上的亮度与从某一方向(θ_i, ϕ_i)入射到该表面的辐照度比值,用 f_T 表示为^[15]

$$f_T(\theta_i, \phi_i, \theta_T, \phi_T, E_i) = \frac{dL_T(\theta_i, \phi_i, \theta_T, \phi_T, E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)}, \quad (4)$$

式中 $L_T(\theta_i, \phi_i, \theta_T, \phi_T, E_i)$ 是(θ_T, ϕ_T)方向的透射亮度,单位是 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$; $E_i(\theta_i, \phi_i)$ 是(θ_i, ϕ_i)方向的入射辐照度,单位是 W/m^2 ,BTDF 单位是球面度倒数(sr^{-1})。

为更加接近太阳光谱辐照情况,本实验采用入射光谱为 400~900 nm 连续非偏振光的卤钨灯光源,0°正入射,探测器的旋转角度为-90°~90°,采集间隔为 0.1°。在透射平面内测得的 BTDF 数据如图 5 所示。结果显示,镜面透射集中分布在-2°~2°的探测角内,峰值出现在 0°探测角。AZO 光栅周期越大,BTDF 镜面透射就越低[见图 5(a)],与采用分光光度计得到的结果相一致。定量分析表明,周期分别为 780、1100、1280 nm 的 AZO 光栅 BTDF 镜面透射峰值分别为 164、98、66 sr^{-1} ,比 AZO 薄膜 BTDF 镜面透射峰值

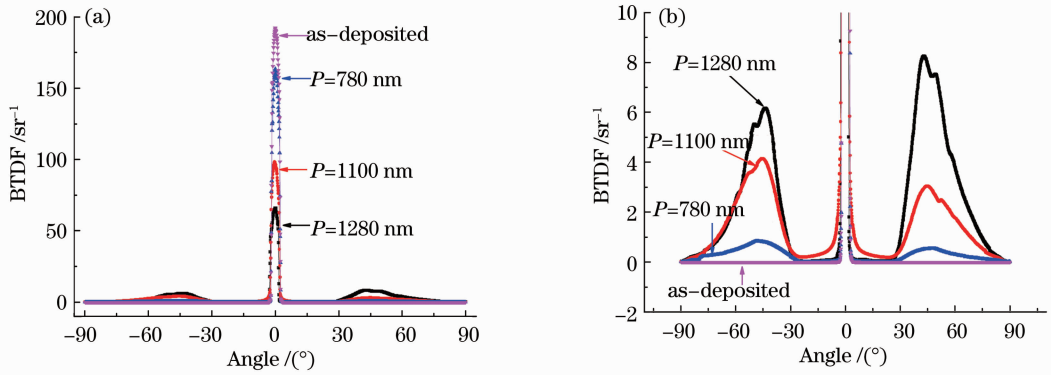


图 5 纵坐标分别取(a) 0~200 和(b) -2~10 的 AZO 光栅正入射 BTDF 数据

Fig. 5 BTDF data of AZO gratings with vertical axis of (a) 0~200 and (b) -2~10 for incidence angle of 0°

192 sr⁻¹分别下降 28、94、126 sr⁻¹。

由于漫透射峰值较镜面透射峰值小很多,因而漫透射分布在图 5(a)中不易观察。纵坐标取(-2,10)得到图 5(b),显示出漫透射主要分布在-80°~-30°和 30°~80°范围。随着周期增大漫透射峰值呈上升趋势。周期为 780 nm 时,漫透射峰值(峰位角)分别为 0.84 sr⁻¹(-48.3°)和 0.54 sr⁻¹(48.4°);周期为 1100 nm 时,漫透射峰值(峰位角)分别为 4.1 sr⁻¹(-45.2°)和 3.0 sr⁻¹(45.0°);周期为 1280 nm 时,漫透射峰值(峰位角)分别为 6.2 sr⁻¹(-43.6°)和 8.3 sr⁻¹(43.0°)。对于同一周期,光栅漫透射两侧的峰位几乎对称;但是随着周期增大(780、1100、1280 nm),漫透射峰位角呈下降趋势(48.4°、45.0°、43.0°)。由光栅方程 $\sin \Phi_m = m\lambda/P$ 可得,对于同一

波长和衍射级次,衍射角随光栅周期增大而减小。由于漫透射主要为被衍射到高级次($m > 0$)的部分,因而漫透射峰位角随周期增大而降低,主要是由衍射角随周期增大而减小所导致。对于同一周期的光栅,漫透射左右两侧的峰值略有差异,可能是 0.5% 稀盐酸刻蚀过程中造成光栅高度有一定起伏所导致的(见图 2)。

对图 5(a)中 BTDF 包围的总面积以及漫透射所包围的面积分别积分,所得结果如表 1 所示。随着周期增大,漫透射的比重逐渐上升,镜面透射比重逐渐下降。即随着光栅周期的增大,更多的能量被衍射到偏离正透射的非零高衍射级次了,这印证了分光光度计测试得到的 AZO 光栅镜面透射率随光栅周期增大而减小的实验结果。

表 1 不同周期光栅漫透射占总透射的百分比

Table 1 Ratio of diffuse transmittance to total transmittance of different period gratings

Period	Area of total transmittance	Area of diffuse transmittance		Ratio of diffuse transmittance to total transmittance /%
		-80°~-30°	30°~80°	
As-deposited	689	0	0	0
780 nm	640	26	16	7
1100 nm	585	111	85	34
1280 nm	597	142	208	59

4 结 论

结合激光干涉法和化学湿法刻蚀制备了面积约 1 cm² 且分布均匀的一维亚微米 AZO 光栅。采用散射仪测试了正入射时的 BTDF,该数据清楚地反映了随着光栅周期增大,漫透射占总透射的比重也在增加。周期为 1280 nm、高度为 120 nm 的一维 AZO 光栅,分布在 30°~80°及 -80°~-30°范围内的漫透射占总透射的比重达到 59%,这也证实了分光光度计测得的平均镜面透射率由 AZO 薄膜的

82%下降到 37%,下降的部分主要是被衍射到了高衍射级次,漫透射峰值对应的角度为 43°。通过研究发现,BTDF 数据在反映 AZO 光栅的宽光谱、大角度透射分布方面较为直观和全面,是判断具有高效陷光结构的薄膜太阳能电池透明电极的重要依据。另外,将制备的 AZO 光栅结构用于薄膜太阳能电池的前电极,对增加光子在薄膜电池中的有效光程和增强电池的陷光效果将起到积极的作用。

参 考 文 献

- 1 J. F. Chang, H. L. Wang, M. H. Hon. Studying of transparent conductive thin films by RF reactive magnetron sputtering [J]. *J. Cryst. Growth*, 2000, **211**(1): 93~97
- 2 Michael Berginski, Jürgen Hüpkes, Melanie Schulte *et al.*. The effect of front ZnO:Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(7): 074903
- 3 Jinsu Yoo, S. K. Dhungel, M. Gowtham *et al.*. Properties of textured ZnO:Al films prepared by RF magnetron sputtering for thin film solar cells [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2005, **47**(suppl. 3): s576~s580
- 4 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on reflection characteristics of sub-wavelength gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3272~3276
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东等. 亚波长光栅反射特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3272~3276
- 5 Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3133~3139
樊叔维, 周庆华, 李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3133~3139
- 6 C. Haase, H. Stiebig. Optical properties of thin-film silicon solar cells with grating couplers [J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2006, **14**(7): 629~641
- 7 Andrej Campa, Janez Krc, Marko Topic. Analysis and optimization of microcrystalline silicon solar cells with periodic sinusoidal textured interfaces by two-dimensional optical simulations [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**(8): 083107
- 8 R. Dewan, M. Marinkovic, R. Noriega *et al.*. Light trapping in thin-film silicon solar cells with submicron surface texture [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 23058~23065
- 9 H. Stiebig, N. Senoussaoui, C. Zahren *et al.*. Silicon thin-film solar cells with rectangular-shaped grating couplers [J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2006, **14**(1): 13~24
- 10 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin *et al.*. Micro- and nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900128
谢常青, 朱效立, 牛洁斌等. 微纳金属光学结构制备技术及应用 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900128
- 11 Zhang Jin, Feng Boru, Guo Yongkang *et al.*. Laser interference photolithography for fabricating periodic patterns in large area [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **21**(6): 20~23
张锦, 冯伯儒, 郭永康等. 用于大面积周期性图形制造的激光干涉光刻 [J]. *光电工程*, 2001, **21**(6): 20~23
- 12 Yang Changhu, Ma Zhongquan, Yuan Jianhui. Influence of substrate temperature on properties of aluminum doped zinc oxide films prepared by DC magnetron sputtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0531001
杨昌虎, 马忠权, 袁剑辉. 基底温度对直流磁控溅射制备掺铝氧化锌薄膜性能的影响 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0531001
- 13 G. Haacke. New figure of merit for transparent conductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**(9): 4086~4089
- 14 O. Kluth, B. Rech, L. Houben *et al.*. Texture etched ZnO:Al coated glass substrates for silicon based thin film solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 1999, **351**(1-2): 247~253
- 15 E. L. Dereniak, L. G. Brod, J. E. Hubbs. Bidirectional transmittance distribution function measurements on ZnSe [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(24): 4421~4425

栏目编辑: 韩峰