

太阳能高反射薄膜制备技术对薄膜性能的影响*

李海兵¹, 徐勇军², 蔡其文², 涂伟萍¹, 廖俊旭²

(1. 华南理工大学 化学与化工学院, 广州 510640; 2. 东莞理工学院 能源与化工系, 广东 东莞 523808)

摘要: 采用磁过滤阴极真空弧沉积(FCVAD)与磁控溅射(MS)两种技术在玻璃上制备厚度分别为75 nm和165 nm的Glass/Al高反射薄膜, 利用Lambda 950分光光度计、扫描电子显微镜、原子力显微镜、附着力测试仪、摩擦试验机和加速老化试验箱分别表征薄膜的反射率、表面形貌、粗糙度、附着力、耐摩擦和耐老化性能, 通过薄膜性能评估分析两种技术制备高反射膜性能的差异。结果表明: 在双方优化工艺下, FCVAD制备的薄膜表面形貌和附着力优于MS薄膜; FCVAD制备的75 nm和165 nm薄膜反射率比同厚度MS薄膜高出3.3%~4.2%; 75 nm厚的薄膜方均根粗糙度明显小于同厚度的MS薄膜; FCVAD制备的75 nm薄膜老化后反射率仅下降1.2%, 而MS同厚度薄膜反射率下降了3.3%~4%。说明FCVAD在制备高反射膜方面比磁控溅射更有优势。

关键词: 光学薄膜; 物理气相沉积; 磁过滤阴极真空弧沉积; 磁控溅射; 高反射膜

中图分类号: TG174.444

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2016)03-0034-07

Influences of Preparation Technologies on Properties of Solar High Reflection Thin Films

LI Hai-bing¹, XU Yong-jun², CAI Qi-wen², TU Wei-ping¹, LIAO Jun-xu²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640; 2. Energy and Chemical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong)

Abstract: Glass/Al high reflective films with the thickness of 75 nm and 165 nm were prepared on glass substrates by using filter cathode vacuum arc deposition(FCVAD) and magnetron sputtering(MS). The reflectivity of thin films, surface morphologies and roughness, adhesion, wear resistance and aging resistance were analyzed by Lambda 950 UV/Vis/NIR spectrophotometer, SEM, AFM, adhesion tester, friction testing machine and aging test box, respectively. The differences of the two techniques in the preparation of high reflective films were analyzed by thin film properties. Under the optimized conditions, the results indicate that the adhesion and density of Al films prepared by FCVAD are better than that by MS. The reflectivity of 75 nm and 165 nm films by FCVAD is higher than the films with the same thickness of 3.3%-4.2%. The root mean square roughness of 75 nm film by FCVAD is significantly less than that film with the same thickness by MS. The reflectivity after aging of 75 nm film only decreases by 1.2%, while the reflectivity of the film by MS decreases by 3.3%-4%. FCVAD is much better than MS in the preparation of high reflective films.

Keywords: optical thin film; physical vapor deposition(PVD); magnetic filter cathode vacuum arc deposition(FCVAD); magnetron sputtering(MS); high-reflecting film

收稿日期: 2015-12-03; 修回日期: 2016-03-10; 基金项目: *广东省教育部产学研结合项目(2012B091100296); 广东省高等学校科技创新重点项目(cxzd1148)

通讯作者: 蔡其文(1982—), 男(汉), 工程师, 硕士; 研究方向: 太阳能反射材料的研究和实际应用; Tel: (0769) 2286 1808; E-mail: caiqiwen208@163.com

网络出版日期: 2016-06-20 09:33; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160620.0933.016.html>

引文格式: 李海兵, 徐勇军, 蔡其文, 等. 太阳能高反射薄膜制备技术对薄膜性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 34-40. LI H B, XU Y J, CAI Q W, et al. Influences of preparation technologies on properties of solar high reflection thin films[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 34-40.

0 引言

太阳能作为新型清洁能源, 具有绿色环保、能量高、范围广等优点, 在当前世界各国面临能源日益紧缺的情况下, 研究者已把太阳能的开发利用作为重要研究课题^[1-3]。太阳能的充分开发和利用, 离不开太阳能薄膜材料和技术的发展。高反射薄膜在太阳能发电系统, 太阳能热水器、太阳灶等太阳能中高温系统中具有广泛的应用^[4-5], 特别是对太阳能光热发电系统来说, 高反射薄膜的好坏直接决定了光热发电的成本^[6-7]。

徐勇军^[8]等采用磁控溅射法制备纳米Ag反射薄膜, 利用SiO₂膜做保护膜, 制得银高反射膜的太阳光区反射率和可见光区反射率分别达到了96.66%和98.84%, 而且抗老化和腐蚀性能较好; 张宗权^[9]利用真空蒸镀法镀制用于聚焦型太阳能集热器的铝高反射膜, 其反射率达到90%以上; Li Denian^[10]等利用真空蒸镀法在聚氯乙烯(PVC)上制得了在可见光区高反射和强附着力的铝膜和银膜, 其中铝膜在可见光部分区域反射率达到100%。高反射薄膜的制备技术和方法很多, 目前主要集中在用不同方法制备优异性能的高反射薄膜, 其中较重要的两种制备技术——磁过滤阴极真空弧沉积(Filtered cathode vapor arc deposition, FCVAD)和磁控溅射(Magnetron sputtering, MS), 在薄膜制备工艺和高反射薄膜制备优劣对比方面报道较少。

磁过滤阴极真空弧沉积是通过阴极电弧真空放电产生离子, 采用弯曲偏转的磁场把等离子体引导到视线外的真空室的同时, 过滤掉真空弧发生过程中产生的大颗粒和液滴从而形成等离子体进行沉积的技术^[11-12]。该技术放电稳定, 产生的金属等离子体密度高, 可制备高质量的、致密性好的、光滑平整的各种金属薄膜^[13-15]。磁控溅射是在真空系统内充入惰性气体, 在阴阳极间加上几千伏电压, 两极间辉光放电产生的正离子在指向靶材的高压电场的作用下轰击靶材, 受撞击靶原子从靶面逸出沉积在基材上的镀膜技术^[16-17]。具有成膜速率高、基片温度低、操作控制方便, 使用范围广, 适合大面积镀膜等特性^[18-20]。

薄膜制备工艺的优劣主要通过薄膜产品的性能来体现^[21], 文中重点探讨两种方法制备的薄膜反射率、表面形貌与表面粗糙度、附着力、耐摩擦和耐老化等性能差异, 以期获得制备高反射膜

方面的更优方法。忽略厚度对薄膜性能的影响, 随机取厚度为75 nm和165 nm的薄膜作为研究对象。

1 试验与方法

1.1 试验设备

磁过滤阴极真空弧沉积(FCVAD)试验是用北京师范大学低能核物理研究所研制的金属蒸汽真空弧(Metal vapor vacuum arc, MEVVA)离子源注入与沉积复合一体机完成。在沉积之前, 预沉积5 min, 以除去阴极铝靶表面氧化物和杂质, 经试验优化, 偏压为-400 V, 占空比为10%, 弧流为100 A时, 沉积效果最佳。

磁控溅射(MS)采用中科院沈阳科学仪器研制中心有限公司研制的JGP-450A型溅射仪。同理以保证铝膜镀制的质量和试验一致性, 溅射前预溅射5 min, 溅射方式为直流溅射, 工作气压0.7 Pa, 溅射功率60 W, 偏压为-200 V, 靶基距为75 mm, 氩气流量22 mL/min。薄膜的两种制备过程都是在室温条件下完成的, 具体试验参数见表1。

表 1 FCVAD和MS两种方法制备铝膜的参数		
Table 1 Parameters of the Al films prepared by FCVAD and MS		
Methods	FCVAD	MS
Size of Al / mm	Φ 100×40	Φ 60×3
Material purity(Al)	99.99%	99.99%
Vacuum degree / Pa	3.0×10 ⁻³	6.1×10 ⁻⁴
Deposition rate / (nm·s ⁻¹)	1.5~2.5	0.2
Work gas	N ₂ (99.999%)	Ar(99.999%)

1.2 试样制备

玻璃基片为普通玻璃, 尺寸为32 mm×25.4 mm×1.2 mm。在沉积和溅射前, 玻璃基片先用去污剂清洗, 再用纯水冲洗; 然后用丙酮超声10 min, 纯水冲净; 再将玻璃基片放入清洗液(氨水、双氧水、去离子水质量比为1 : 2 : 5)中浸泡加热50 ℃超声10 min, 取出用纯水反复冲净, 迅速用高压氮气吹干, 真空干燥箱保存待用。

1.3 性能测试与表征

采用美国Veeco公司D-150型台阶仪测量薄膜厚度。铝膜反射率测试采用美国Perkin Elmer公司Lambda 950紫外-可见-近红外分光光度计, 扫描波长范围为250~2 500 nm, 入射角8°, 分辨率5 nm。薄膜附着力采用美国狄夫斯高AT型拉脱法附着力测试仪测试, 拉脱强度: 0~20 MPa (0~3 000 psi)。

薄膜的表面形貌采用荷兰FEI公司Nova NanoSEM430超高分辨率场发射扫描电子显微镜进行观察,扫描面积 $1\text{ }\mu\text{m}^2$ 。表面粗糙度采用德国布鲁克公司生产的Dimision Edge原子力显微镜测试,工作模式为轻敲模式。用华谊创鸿公司XD-6304C型摩擦试验机测试薄膜耐磨性,运动方式为往复运动,往返速率50次/min,负荷200 g,测试次数500次,摩擦距离30 mm。

老化试验是在老化试验箱(Q-Sun Xe-3-HS)中进行,每次3 h,温度30~100 ℃,绝对湿度20~250 g/m²,采用金属卤灯(280~3 000 nm)进行照射,共500次。

2 结果与分析

2.1 薄膜的反射率对比

两种方法制备的铝膜在太阳光区(Light reflectance, LR)和可见光区(Solar reflectance, SR)的加权反射率参照ISO 9050-2003国际标准^[22]计算。图1为两种技术制备厚度分别为75和165 nm的铝膜在300~

2 500 nm区间的反射率曲线图。根据样品的全波段反射率测试曲线可知:FCVAD制备厚度为75 nm和165 nm的铝膜反射率在可见光区都明显高于磁控溅射同厚度的铝膜反射率,在近红外波段两者的反射率曲线虽然相差不大,但FCVAD铝膜的反射率始终高于MS样品。图1(a)中厚度为75 nm的铝膜在短波长300 nm和波长1 500~2 000 nm处反射率都超过了94%,大于模拟软件Essential Macleod模拟的相同厚度的薄膜反射率,这是因为Lambda 950 分光光度计所测的反射率是相对白板的反射率,会高于其实际的反射率。

表2为两种方法制备厚度分别为75 nm和165 nm的薄膜在可见光区(LR)和太阳光区(SR)加权反射率数据表。由表2清楚看到,铝膜厚度为75 nm或165 nm时,FCVAD制备的铝膜在可见光区和太阳光区加权反射率都明显高于MS样品在同区间的加权反射率,可见光区和太阳光区的加权反射率值平均要高出3.3%~4.2%,说明FCVAD在制备太阳能高反射率薄膜方面比MS更有优势。

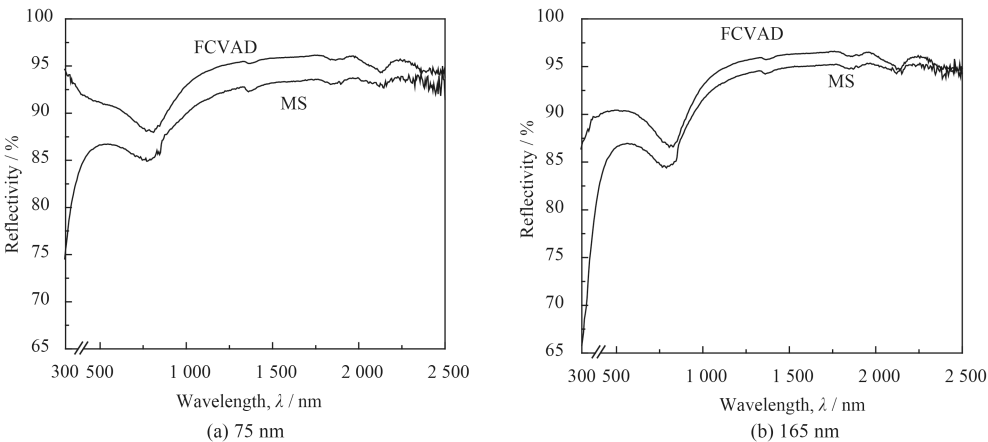


图1 FCVAD和MS两种方法制备的75 nm和165 nm铝膜在300~2 500 nm的反射率曲线
Fig. 1 Reflectivity curves of the 75 nm and 165 nm Al films prepared by FCVAD and MS at 300~2 500 nm

表2 FCVAD和MS两种方法制备的75 nm和165 nm铝膜的LR和SR
Table 2 LR and SR of the 75 nm and 165 nm Al films deposited by FCVAD and MS

Method	Thickness / nm	LR / %	SR / %
FCVAD	75	90.82	86.62
	165	91.80	87.79
MS	75	90.68	86.77
	165	91.20	87.82

2.2 薄膜的附着力对比

图2是两种技术制备的厚度为75 nm薄膜在拉

脱法附着力测试后的失效样品图。由图2可知:测试后,FCVAD技术制备的75 nm薄膜样品已被扯碎,而铝膜并未与玻璃基材分离,可知薄膜与基材的附着力要大于测试仪器的数显数据7.42 MPa;而用MS方法制备的同厚度铝膜在附着力为6.18 MPa时,铝膜就与玻璃基材完全分离,可以看到薄膜被拉离后在玻璃上留下锭子大小的空白,则75 nm的FCVAD制备的薄膜与基材的附着力强于MS制备的同厚度的薄膜附着力。

表3是FCVAD和MS技术制备的厚度为75 nm

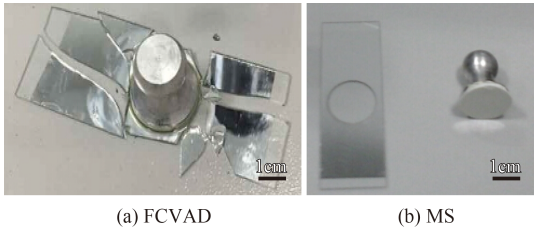


图2 拉脱法附着力测试后75 nm薄膜的状态

Fig. 2 Status of the 75 nm films after pull-off adhesion testing

表3 FCVAD和MS两种方法制备的75 nm和165 nm铝膜的附着力

Table 3 Adhesion of the 75 nm and 165 nm Al films deposited by FCVAD and MS (MPa)			
Method	75 nm	165 nm	
FCVAD	>7.42	>7.42	
MS	6.18	6.80	

和165 nm铝膜的附着力数据表,从表中可以看出:铝膜为75 nm或165 nm时,FCVAD制备的铝膜附着力都明显强于MS制备同厚度的铝膜附着力,75 nm和165 nm铝膜的附着力值分别要比MS样品的大1.24 MPa和0.62 MPa以上。两种方法

制备的铝膜附着力的差异主要在于FCVAD制备铝膜过程中粒子受电场力强加速作用沉积能量高,表面迁移率大,粒子与基材结合紧密,沉积的薄膜致密性高、质量好。

2.3 薄膜的表面形貌

FCVAD与MS两种技术制备的厚度为75 nm和165 nm薄膜的表面形貌如图3所示。由图3(a)(b)可以清晰地看到,FCVAD技术制备的铝膜表面非常平整致密,缺陷和孔洞较少,成膜粒子细小、排列均匀,而图3(c)(d)中MS方法制备的铝膜表面相对比较疏松,表面出现很多缺陷和孔洞,大颗粒明显,成膜粒子较大,有少量样品表面出现了比较明显的划痕,表面划痕并非在制备过程中产生的,而是基片本身的原有缺陷在镀膜过程中的放大和显现效应^[23]。对比图3(a)(c)和图3(b)(d)可知:FCVAD技术制备的两种厚度薄膜样品表面致密性和平整度明显优于MS制备的同厚度样品。由光学薄膜理论^[24-25]可知:薄膜表面的平整性和均匀性会直接影响薄膜表面光散射的大小,表面缺陷和孔洞的多少会影响薄膜表面光透过和光吸收的大

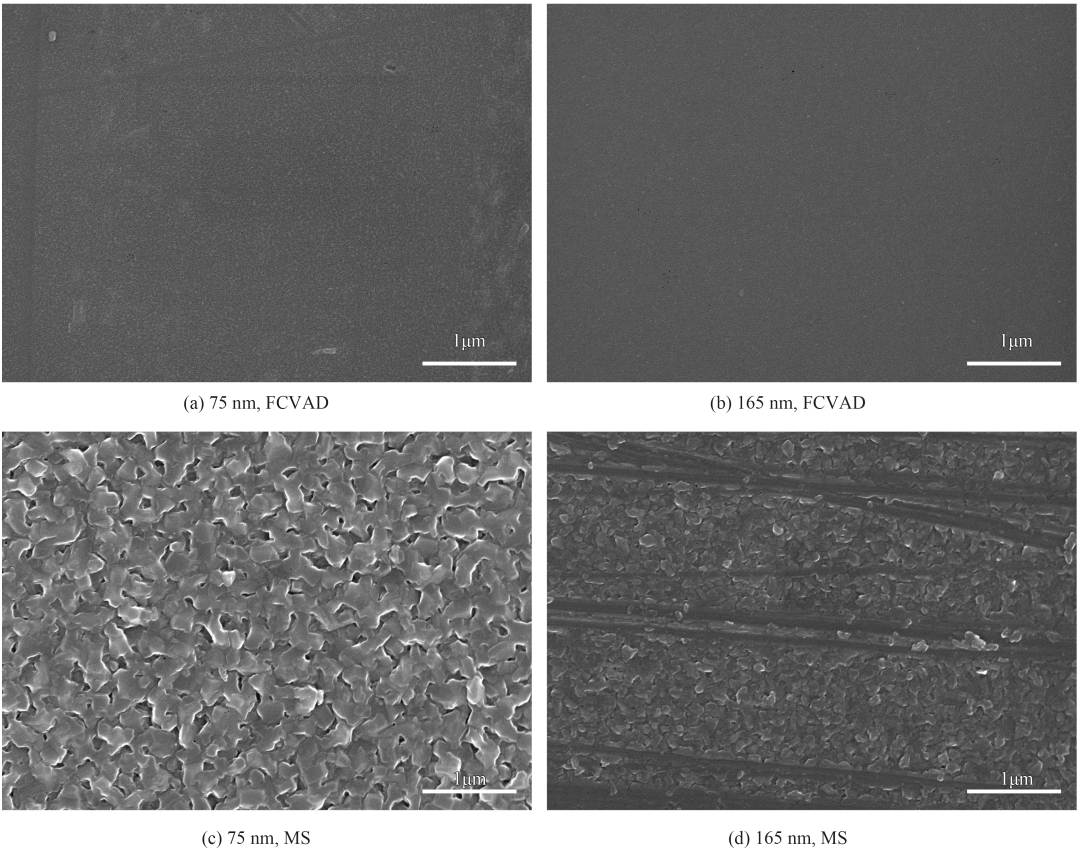


图3 FCVAD和MS两种方法制备的铝膜表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of the Al films prepared by FCVAD and MS

小^[23]。总体而言，薄膜表面的平整性和均匀性越差则光散射越强，薄膜表面缺陷和孔洞越多则光透过和光吸收越大，整体就会使得光损失越大，最终导致薄膜反射性能下降。

图4为两种技术制备的75 nm铝膜的AFM形貌，由图4(a)(b)可以看到FCVAD技术制备的75 nm铝膜的表面颗粒的高度差要明显小于MS方法制备的同厚度铝膜高度差，由NanoScope Analysis软件

算出FCVAD技术制备厚度为75 nm铝膜的表面均方根粗糙度(R_q)为1.09 nm，而MS方法制备厚度为75 nm铝膜的表面均方根粗糙度(R_q)为4.84 nm。由表面粗糙度对薄膜的影响可知：样品表面越粗糙，配合表面间的有效接触面积越小，压强越大，摩擦阻力越大，磨损就越快；且粗糙的样品表面，易使腐蚀性气体或液体通过表面的微观凹谷渗入到金属内层，造成表面腐蚀。

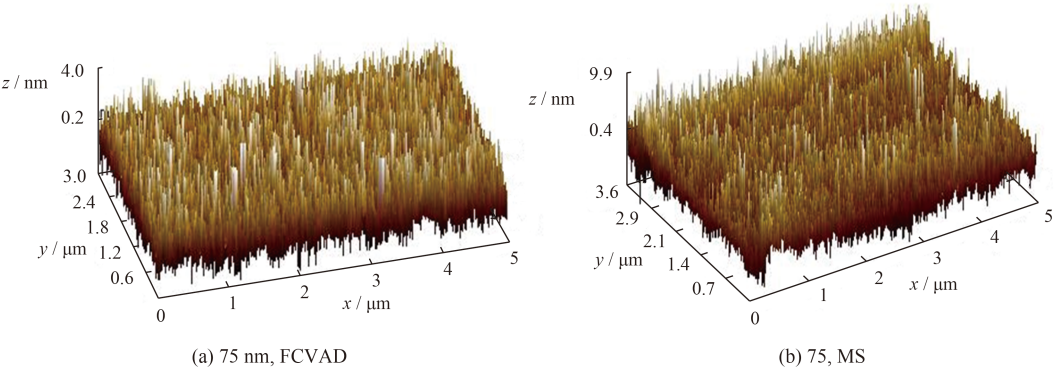


图4 FCVAD和MS两种方法制备的75 nm铝膜的AFM形貌

Fig. 4 AFM morphologies of the 75 nm Al films prepared by FCVAD and MS

2.4 薄膜的耐老化和耐摩性对比

反射薄膜在户外使用很容易被氧化和污染，导致反射率降低、薄膜脱落，所以好的反射薄膜应该有较强的耐老化性和耐摩擦性^[26]。为防止薄膜从四周遭受破坏，在性能测试之前对薄膜材料进行了封边，即采用高粘性的中性硅酮密封胶对薄膜四周进行密封处理。图5为两种方法制备的厚度为75 nm铝膜在耐老化测试前后反射率曲线，图中两组反射率曲线在老化测试前后走势相同，反射率稍有降低但变化趋势不大，说明FCVAD与MS两种技术制备的金属铝膜性能都比较优异，具

有较强的耐老化性能，主要原因是薄膜与玻璃基材具有较强的附着力，表面自然形成的氧化铝保护层具有较强的抗老化能力。

表4是老化性能测试前后厚度为75 nm薄膜在可见光区(LR)和太阳光区(SR)加权反射率数据表。从表中可以看出：FCVAD制备的75 nm薄膜老化测试前后在可见光区和太阳光区加权反射率下降百分比明显小于MS制备的相同厚度的薄膜，LR和SR分别减小1.04%和1.25%，而MS相同厚度铝膜分别减小4.52%和3.3%，说明FCVAD制备的铝膜耐老化性能优于MS制备的相同厚度的铝

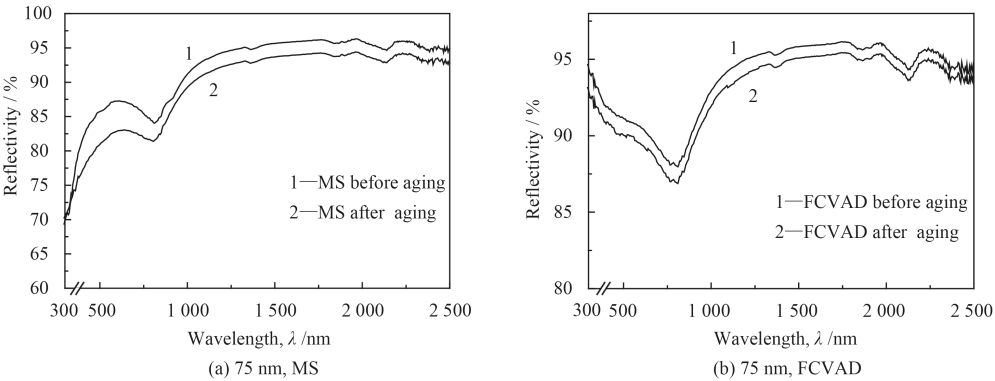


图5 FCVAD和MS两种方法制备的75 nm铝膜老化前后反射率曲线

Fig. 5 Reflectivity curves of the 75 nm Al films before and after aging prepared by FCVAD and MS

表 4 FCVAD和MS两种方法制备的75 nm薄膜老化前后的LR和SR

Table 4 LR and SR of the 75 nm Al films before and after aging deposited by FCVAD and MS (%)

Status	FCVAD		MS	
	LR	SR	LR	SR
Before aging	90.82	91.80	86.62	87.79
After aging	89.78	90.55	82.10	84.49

膜, 也说明FCVAD在制备高反射薄膜方面比MS更有优势。

图6为75 nm铝膜耐摩擦测试后在灯光下的照片。从图6可以看出: MS制备的样品在耐摩擦测试后表面明显破坏, 部分铝膜已被擦去, 样品透光, 在灯光照射下更加明显; FCVAD技术制备的样品在耐摩擦测试后表面虽受损, 但铝膜与基材仍然结合牢固样品并未透光。由此可知: FCVAD铝膜耐老化性能和耐摩擦性能都明显优于MS样品, 其主要原因在于FCVAD在制备过程中具有对粒子不断加速和过滤的作用, 所制备的铝膜附着力强, 膜层连续、光滑、结构致密, 表面缺陷少。



图 6 耐摩擦测试后的75 nm铝膜
Fig. 6 75 nm Al films after wear testing

3 讨 论

FCVAD与MS两种技术制备的表面形貌和性能差异主要原因在于: 相比MS, FCVAD制备技术具有对等离子体的磁过滤作用以及电场对铝离子的强加速作用的独特优势。在FCVAD和MS制备铝膜的过程中, 在强大的电场作用下离子对靶材表面的轰击会不可避免在镀膜过程中形成大颗

粒, 这些大颗粒的存在会对薄膜的反射率和表面形貌等表面性能产生巨大的影响, FCVAD技术采用弯曲磁场过滤技术去除了等离子体中的大颗粒提高了铝膜各方面性能。

此外, FCVAD技术制备铝膜时反射率随负偏压先增大后减小, 反射率在偏压为-400 V左右达到最大值, 此时铝膜的结构非常致密, 与块状材料类似。当负偏压较小时铝膜颗粒很大且排列疏松, 铝膜表面光散射和光漫射降低了其反射率; 而当负偏压超过最优值时, 铝膜的表面溅射系数大于1, 随负偏压增大铝膜表面有效厚度越来越小, 不利于沉积。在最负偏压下等离子体中的铝离子以高能量、快速地沉积在玻璃基材上成膜, 相比MS方法中目标铝原子低能溅射在基材上, FCVAD镀膜具有高能量改善表面性能的作用。

4 结 论

(1) FCVAD和MS两种光学薄膜制备技术制备的铝膜反射率都达到86%以上, 附着力超过6.18 MPa, 可以满足一般实际应用要求。

(2) FCVAD技术由于对粒子的磁过滤作用和电场不断加速作用, 沉积能量大、表面迁移率高, 比MS制备同厚度的铝膜表面平整光滑, 致密性好, 缺陷和孔洞少, 质量高。

(3) FCVAD和MS技术制备的75 nm铝膜表面均方根粗糙度分别为1.09 nm和4.84 nm, 说明同厚度下FCVAD技术制备的铝膜比MS方法制备的铝膜平整性好、高度差小, 凸起少。

(4) FCVAD制备的厚度为75 nm和165 nm铝膜比MS制备相同厚度的铝膜在可见光区和太阳光区加权反射率值平均要高出3.3%~4.2%, 膜基附着力分别大1.24 MPa和0.62 MPa以上; 其中75 nm铝膜在耐老化后反射率下降比率要比MS制备的75 nm铝膜下降比率平均小2.5%, 且耐摩擦性更强。

参考文献

[1] BEHAR O, KHELLAF A, MOHAMMEDI K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 23(4): 12-39.

[2] ZHANG H L, BAEYENS J, DEGREVE J, et al. Concentrated solar power plants: Review and design methodology[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 22: 466-481.

[3] HERNANDEZ R R, EASTER S B, MURPHY-MARISCAL M L, et al. Environmental impacts of utility-scale solar en-

- ergy[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(7): 766-779.
- [4] XU Y J, LIAO J X, CAI Q W, et al. Preparation of a highly-reflective $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Ag}$ thin film with self-cleaning properties by magnetron sputtering for solar front reflectors[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2013, 113(2): 7-12.
- [5] KENNEDY C E, TERWILLIGER K J. Optical durability of candidate solar reflectors[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(2): 597-606.
- [6] REN L, WEI X, LU Z, et al. A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar thermal power system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32(5): 76-83.
- [7] REDDY V S, KAUSHIK S C, RANJAN K R, et al. State-of-the-art of solar thermal power plants-A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27(6): 258-273.
- [8] XU Y J, CAI Q W, YANG X X, et al. Preparation of novel SiO_2 protected Ag thin films with high reflectivity by magnetron sputtering for solar front reflectors[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, 107(2): 316-321.
- [9] 张宗权. 聚焦型太阳能集热器真空蒸镀Al反射膜工艺研究[J]. *西北轻工业学院院报*, 2000, 18(1): 55-59.
- ZHONG Z Q. Study on vacuum evaporation technology of Al-reflective in solar energy heat-collector[J]. *Journal of Northwest Institute of Light Industry*, 2000, 18(1): 55-59 (in Chinese).
- [10] LI D, TAI Q, FENG Q, et al. Highly reflective and adhesive surface of aluminized polyvinyl chloride film by vacuum evaporation[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 311(9): 541-548.
- [11] 谭俊, 杜军. 离子束表面工程技术的进展[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(5): 6-14.
- TAN J, DU J. Progress of ion beam surface engineering technology[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(5): 6-14 (in Chinese).
- [12] JILEK SR M, JILEK M, CODDET O. Filtered cathodic arc deposition apparatus and method: US20140332370[P]. 2014-11-13.
- [13] 吴先映, 廖斌, 张旭, 等. MEVVA离子束技术的发展及应用[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014(2): 132-138.
- WU X Y, LIAO B, ZHANG X, et al. Development and applications of MEVVA technique at but: a review[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2014, 50(2): 132-138 (in Chinese).
- [14] BOOTKUL D, INTARASIRI S, ARAMWIT C, et al. Formation of thin DLC films on SiO_2/Si substrate using FCVAD technique[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B*, 2013, 307(7): 147-153.
- [15] ARAMWIT C, INTARASIRI S, BOOTKUL D, et al. Effects of filtered cathodic vacuum arc deposition (FCVAD) conditions on photovoltaic TiO_2 films[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 310(8): 266-271.
- [16] 张勤, 张俊凯, 厉英. 磁控溅射金基金靶材的制备、应用及发展趋势[J]. *材料导报*, 2014, 28(5): 16-19.
- ZHANG Q, ZHANG J K, LI Y. Manufacture, application and trends of gold-base sputtering target alloys[J]. *Materials Review*, 2014, 28(5): 16-19 (in Chinese).
- [17] ASANITHI P, CHAIYAKUN S, LIMSUWAN P. Growth of silver nanoparticles by DC magnetron sputtering[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 2012(8): 4873-4881.
- [18] BRAEUER G, SZYSZKA B, VERGOEHL M, et al. ChemInform abstract: magnetron sputtering-milestones of 30 years[J]. *Cheminform*, 2011, 42(10): 134-136.
- [19] 郝晓亮. 磁控溅射镀膜的原理与故障分析[J]. *电子工业专用设备*, 2013 (6): 57-60.
- HAO X L. The principle and fault diagnosis of magnetron sputtering deposition[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2013(6): 57-60 (in Chinese).
- [20] 尚伦霖, 王立平, 张广安, 等. 磁控溅射沉积 BC_x 薄膜的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(5): 16-23.
- SHANG L L, WANG L P, ZHANG G A, et al. Tribological properties of BC_x films prepared by magnetron sputtering[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(5): 16-23 (in Chinese).
- [21] BRIGHT C. Transparent conductive thin films-optical thin films and coatings-21[J]. *Optical Thin Films & Coatings*, 2013, 9(4): 741-788.
- [22] ISO 9050-2003. Glass in building-determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors[S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2003.
- [23] 叶源. 利用磁过滤阴极真空弧沉积技术制备太阳能高反射率薄膜材料[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- YE Y. Application of filtered cathode vapor arc deposition technique in preparation of solar reflective film materials with high reflectance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [24] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- TANG J F, GU P F, LIU X, et al. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006 (in Chinese).
- [25] HSIAO C N, CHEN H P, CHIU P K, et al. Space-qualified optical thin films by ion-beam-assisted deposition[J]. *Thin Solid Films*, 2013, 529(1): 226-229.
- [26] MA X F, SU W Y, LI D, et al. The research for the aging performance of reflective sheeting by artificial accelerated method[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 361-363: 2326-2329.