

用PECVD工艺制备功能装饰氧化硅薄膜的性能

张栋¹ 柯培玲¹ 汪爱英¹ 王香勇² 智理²

1 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室
浙江省海洋材料与防护技术重点实验室 宁波 315201
2 宁波中骏森驰汽车零部件股份有限公司 慈溪 315300

摘要 用PECVD技术制备氧化硅薄膜,研究了生成样品的位置对薄膜成分、结构和性能的影响,探讨了制备兼具高透光性和耐刮擦性的功能装饰氧化硅薄膜的方法。结果表明,在阳极位置生成的薄膜具有 $\text{Si}(\text{CH}_3)_n\text{O}$ 有机氧化硅结构,在380~780 nm波长范围内透光率高达90%~98%,但是薄膜的结构疏松,硬度仅为2 GPa。提高制备温度可使薄膜硬度提高至6 GPa,但是透光率略有降低;在阴极位置生成的薄膜具有无机氧化硅复合非晶碳结构,薄膜结构致密,硬度可达15 GPa,但是在380~780 nm波长范围内透光性差;增加 O_2 反应气体可促使碳与氧反应生成二氧化碳,非晶碳结构消失,薄膜透光率提高到99%,但是硬度降低到9 GPa。

关键词 材料表面与界面,氧化硅薄膜,等离子体增强化学气相沉积,功能装饰

中图分类号 TB34

文章编号 1005-3093(2019)06-0467-08

Properties of Functional Decorative Silicon Oxide Films Prepared by PECVD

ZHANG Dong¹, KE Peiling¹, WANG Aiyong¹, WANG Xiangyong², ZHI Li²

1 Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China

2 Ningbo Zhong-Jun Sen-Chi Auto Parts Limited by Share Ltd., Cixi 315300, China

Correspondent: WANG Aiyong, Tel: (0574)86685170, E-mail: aywang@nimte.ac.cn;

KE Peiling, Tel: (0574)86694790, E-mail: kelp@nimte.ac.cn

Supported by Ningbo Municipal Key Technologies R & D Program of China (No. 2017B10042), Cixi Municipal Technologies R & D Program of China (No. 2015A07)

Manuscript received 2018-10-12, in revised form 2019-01-18

ABSTRACT Silicon oxide films were prepared on silicon- and quartz-substrate by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) technique. The dependence of composition, structure and properties of the films were investigated on the location of substrates in the reaction chamber, namely, which were fixed onto either cathode- or anode-electrode plate. Meanwhile, the preparation of functional decorative silicon oxide films with high transparency and scratch resistance was assessed in terms of processing parameters. The results show that the film synthesized on the substrate attached to anode is organosilicon oxide of $\text{Si}(\text{CH}_3)_n\text{O}$ with transmittance of as high as 90%~98% in the wavelength range of 380-780 nm,

资助项目 宁波市工业重点项目(2017B10042),慈溪市工业科技计划(2015A07)

收稿日期 2018-10-12 定稿日期 2019-01-18

作者简介 张栋,女,1983年生,高级工程师

通讯作者 汪爱英,研究员, aywang@nimte.ac.cn,研究方向为碳基涂层及表面改性;柯培玲,研究员, kelp@nimte.ac.cn,研究方向为表面强化薄膜与功能改性

DOI 10.11901/1005.3093.2018.607

unfortunately, the film is loose with hardness of only 2 GPa. However, the hardness of the film can be increased to 6 GPa by increasing the substrate temperature, as a result, the transmittance of the film decreases slightly; The film synthesized on the substrate attached to the cathode composes of inorganic silicon oxide and amorphous carbon. That film is compact with hardness of up to 15 GPa, but poor transmittance in the wavelength range of 380~780 nm. Increasing the O_2 -flux can promote the reaction of carbon and oxygen to produce carbon dioxide, thereby to eliminate the amorphous carbon. Therefore, the transmittance of the film increases to 99%, but the hardness decreases down to 9 GPa.

KEY WORDS surface and interface in the materials, silicon oxide films, PECVD, functional decoration

外观靓丽的消费品最能吸引客户。真空涂层的元素适用范围和多变的工艺特点能赋予基材丰富的色彩,或使聚合物基材产生金属化的表面。因此,真空涂层在装饰领域的应用日益广泛^[1,2]。但是,如果只从色泽方面调控真空装饰涂层的结构和制备工艺,很难兼顾其功能性。因此使涂层不能很好地保护基材且在使用过程中容易划伤,影响产品的外观和使用性能。

氧化硅功能薄膜有硬度高、耐磨性好、光透过率高等优点,得到了广泛的应用^[3-5]。将其应用在装饰涂层的表面既不改变原始涂层颜色,又能保护底部装饰涂层和基体。等离子体增强化学气相沉积(PECVD)利用辉光放电使高度交联的聚合物裂解产生活性基团促进等离子体聚合反应,可在低温下沉积薄膜^[6,7]。因此,PECVD是一种清洁、方便、适用范围广泛的制备硅基涂层的方法^[8,9]。调节PECVD工艺参数能制备出具有不同结构的硅基薄膜,进而调节薄膜的光学、机械、耐腐蚀等特性^[10-12]。D. Gamra^[13,14]等制备了有机六甲基二硅氧烷(HMDSO)薄膜,通过改变射频电源功率调节薄膜的折射率改变薄膜的透光性。Hyunju Jeong^[15,16]等采用 SH_4 和 O_2 作为气源在镁合金表面制备出 SiO_x 透明钝化层,没有明显的裂纹或孔洞。Nazir M. Santos^[17]等采用HMDSO和 O_2 、Ar混合气体在304不锈钢表面制备了以Si-O结构为骨架包含 $-CH_3$ 基团的有机硅薄膜,通过提高射频电源功率提高了薄膜的致密性与耐蚀性。Sergei E. Alexandrov^[18]等采用HMDSO及 O_2 、Ar混合气体在 $300^\circ C$ 制备出以Si-O结构为骨架的有机氧化硅薄膜,在 $500^\circ C$ 制备出无机 SiO_x 薄膜。反应介质HMDSO没有可燃性且无毒,具有易挥发性和高真空饱和气压,在真空环境下不加热即可稳定气化,具有比 SH_4 更高的安全性,广泛用于等离子体聚合制备硅基涂层。同时,这样反应生成的薄膜结构多样,包括有机氧化硅和无机氧化硅,薄膜的成分还可能包含碳元素,实现薄膜性能的多样化^[19,20]。本文使用HMDSO为气源,在薄膜沉积过程中将样品置于PECVD不同极板位置制备薄膜,研究其成分、结构、

与性能的差异并分析其生长机制;提高基体温度和引入辅助反应气体 O_2 ,以制备出兼具高透光性和耐刮擦性的氧化硅薄膜。

1 实验方法

1.1 薄膜的制备

使用平板式PECVD设备沉积薄膜,设备示意图如图1所示。在真空腔体中设有不锈钢上下极板,其中上极板与腔体绝缘并连接射频电源输出端。由于在薄膜沉积过程中极板带自负偏压,因此在辉光放电过程中属于阴极,下极板与腔体连接并接地,在辉光放电过程中属于阳极,在下极板底部装有加热用电阻丝。将双面抛光的硅片和石英基材分别固定在阴极板与阳极板上,待腔体本底真空达到 3.0×10^{-3} Pa时向腔体中通入HMDSO气体或HMDSO与 O_2 的混合气体,调节腔体气压为1.0 Pa,射频电源输出功率为150 W,在常温或对基片加热 $250^\circ C$ 下进行薄膜沉积25 min,将阴、阳极板位置生成的薄膜分别简称为阴极薄膜、阳极薄膜。

1.2 薄膜的结构和性能表征

使用Nicolet 6700型傅里叶变换红外光谱仪测量薄膜的红外吸收光谱;使用inVia-reflex型激光共聚焦拉曼光谱仪测量薄膜的拉曼光谱,测试中使用532 nm波长激光源;用AXIS ULTRA DLD型号X射线光电子能谱仪测量薄膜的XPS谱图,测试前对样品刻蚀2 min,减少样品表面污染对测试结果的影响;用S-4800型冷场发射扫描电镜观察薄膜微观形

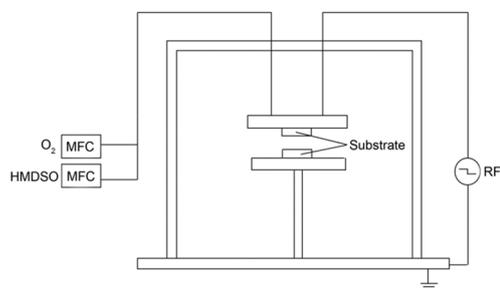


图1 氧化硅薄膜制备设备的示意图

Fig.1 Schematic diagram of silicon oxide films preparation equipment

貌;用 NANO G200 型纳米压痕仪表征薄膜的显微硬度,针对厚度大于 $1\ \mu\text{m}$ 的薄膜,为尽量减小基体对结果造成的影响,在测试过程中压头对涂层的最大压入深度为 $450\sim 500\ \text{nm}$;用 Lambda 950 型紫外/可见/近红外分光光度计测量薄膜的透光率。

2 结果和讨论

2.1 在不同极板位置生成的薄膜的微观形貌

在 PECVD 阴、阳极板位置生成薄膜的截面微观形貌,如图 2 所示,其中(a)、(b)为阴极薄膜样品截面的不同放大倍数形貌照片,(c)、(d)为阳极薄膜样品截面的不同放大倍数形貌照片。两种薄膜厚度接近,表明在阴极板与阳极板位置薄膜的沉积速率相同,两种薄膜均呈现出光滑的断面形貌,表现为典型的非柱状特征,在高放大倍数下阴极薄膜内部结构致密,而阳极薄膜内部结构疏松且存在孔洞。其原因在于,当薄膜的沉积过程中向两个极板间施加 $150\ \text{W}$ 的射频放电功率,射频电源显示的数据表明,在阴极板有高达 $800\ \text{V}$ 的自负偏压。由于反应气体在腔体中放电电离后变为带正电荷的离子,带负电的阴极板对离子的强烈吸引使离子具有更高的能量加速轰击极板,从而使薄膜的内部结构更为致密。

2.2 不同极板位置生成薄膜的结构

对在双面抛光硅基片表面沉积的薄膜进行红外吸收光谱测试,测试结果中硅基片背底峰已被剔除,

样品分别位于阴极板与阳极板位置时生成的薄膜,其红外吸收光谱如图 3 所示。可以看出,阳极薄膜样品的吸收谱中出现 5 个吸收峰,峰位在 $457\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰对应 Si-O-Si 的摇摆振动, $800\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰对应 Si-O-Si 的弯曲振动,位于 $1070\ \text{cm}^{-1}$ 处的最强峰对应 Si-O-Si 的拉伸振动。上述 Si-O-Si 对应的三种典型振动模式证明,薄膜的结构以氧化硅结构为主^[21-23]。此外,在谱线中还出现了分别对应 Si-CH₃ 与 C-H 的吸收峰,表明氧化硅骨架表面连接有 -CH₃ 基团。与阳极薄膜相比,阴极薄膜样品的吸收谱中对应 -CH₃ 与 C-H 的吸收峰消失,而 Si-O-Si 在 $800\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰向高波数略微偏移,使 $800\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰与 $1070\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰连为一体,峰形不够清晰。使用分峰软件进行拟合发现,连体峰可能由三个峰组成,除了代表 Si-O-Si 的两个峰外,还有一个 C-C 峰。对比上述两种薄膜的红外吸收光谱发现,采用 HMDSO 为气源,在 PECVD 腔体中的阴极板与阳极板位置均能生成以 Si-O-Si 为骨架的薄膜。同时,气源中含有的碳在薄膜中引入了碳元素,其中阳极生成的薄膜中碳元素以 -CH₃ 基团存在,而位于阴极的薄膜中碳元素以单质碳形式存在。

图 4 给出了阴、阳极薄膜样品的 Raman 光谱。由图 4 可知,在阳极薄膜样品中未检测到拉曼信号,阴极薄膜样品在 $800\sim 2000\ \text{cm}^{-1}$ 波数范围之间出现典型的非晶碳特征峰。结合红外吸收光谱分析结果

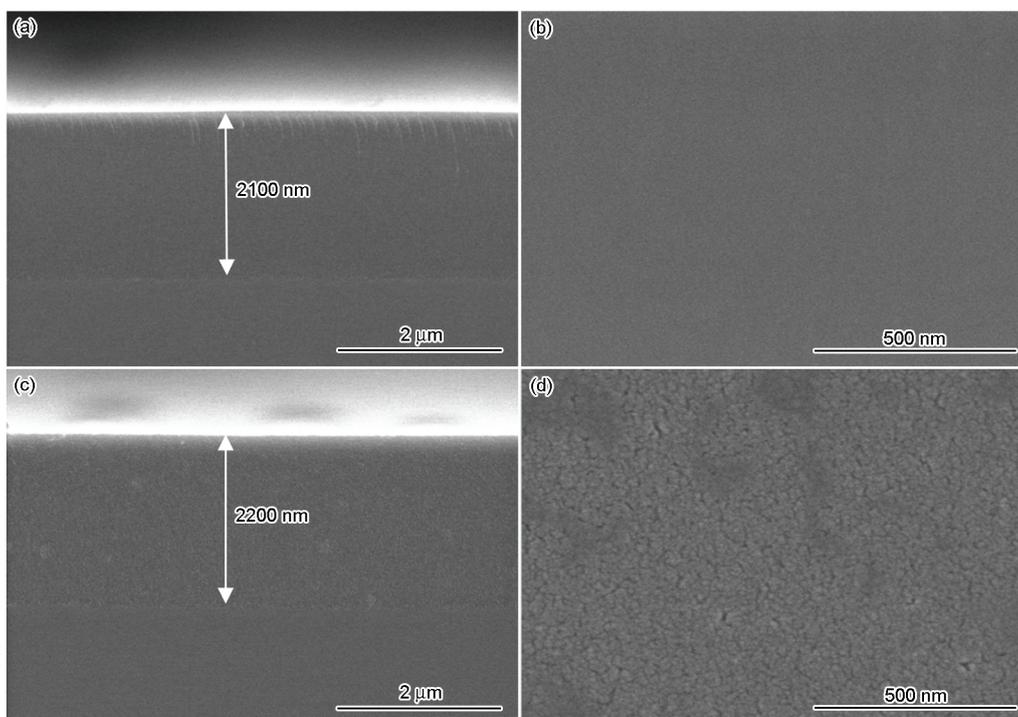


图 2 阴极薄膜和阳极薄膜的截面微观形貌

Fig.2 Cross-sectional micro-morphology of cathode films (a, b) and anode films (c, d)

进一步证明,阴、阳极薄膜样品中碳元素的存在形式不同。由于阳极薄膜样品中碳元素存在于 $-\text{CH}_3$ 基团中,因此未检测到拉曼特征峰,而阴极薄膜样品的拉曼光谱中发现了非晶碳特征峰,说明阴极薄膜样品中碳元素以非晶碳结构存在。图5给出了两种薄膜样品XPS的Si2p峰图谱。对比结果表明,两种薄膜的峰位没有明显的不同,均形成了 SiO_x 结构,与红外吸收光谱表征结果吻合。对阴、阳极薄膜的微结构分析结果表明,在两极板间施加电场能使HMD-SO气体电离并反应重组,在阴极板和阳极板位置均生成氧化硅薄膜。其中在阴极制备的薄膜具有无机氧化硅复合非晶碳结构,在阳极制备的薄膜具有 $\text{Si}(\text{CH}_3)_n$ 有机氧化硅结构。

2.3 在不同极板位置生成的薄膜的硬度和光学性能

氧化硅薄膜用于装饰涂层表面防护,不能引起涂层颜色变化,还需要提高涂层表面耐刮擦能力。因此首先需要具备光学透明性,还需要具备较高的硬度。对阴、阳极薄膜样品的微观形貌和微结构分

析可知,采用PECVD沉积氧化硅薄膜时,阴极板与阳极板位置生成的薄膜具有不同的微结构,因此进一步考察微结构差异对薄膜硬度与透光性产生的影响。

石英基片样品表面阴、阳极薄膜在可见光范围内的透过率,如图6所示,测试结果中石英背底已被扣除。由于两个薄膜样品的厚度基本相同,可排除厚度的影响,薄膜透过率之间的差异主要是薄膜本身光学性能的不同引起的。由图6可知,阳极薄膜在380~780 nm可见光波长范围内光学透过率高达90%~98%,具有高透光性,用肉眼观察石英基片经镀膜后仍然表现为透明外观。而阴极薄膜在650~780 nm波长范围内透过率大于80%,但在380~650 nm波长范围内透过滤随波长减小急剧降低,其中最小透过率仅为10%,相对应的阴极石英基片经镀膜后用肉眼观察呈现黄褐色。根据以上透光率测试结果,在阳极制备的氧化硅薄膜具有高光学透明性,如将其沉积于装饰涂层表面不会改变原始涂层颜色,而阴

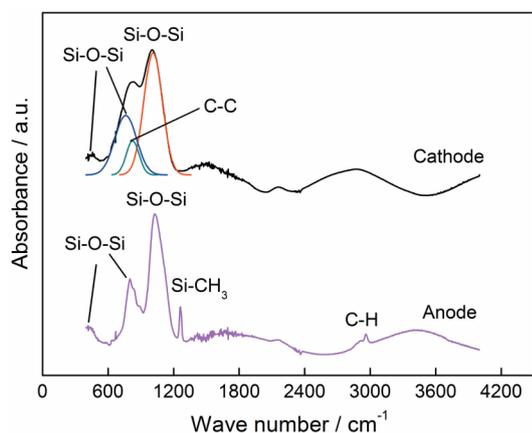


图3 阴极和阳极薄膜的红外吸收光谱
Fig.3 Infrared absorption spectra of anode films and cathode films

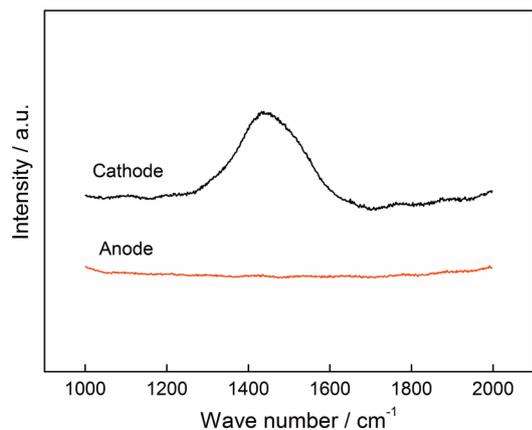


图4 阴极和阳极薄膜的拉曼光谱
Fig.4 Raman spectra of anode films and cathode films

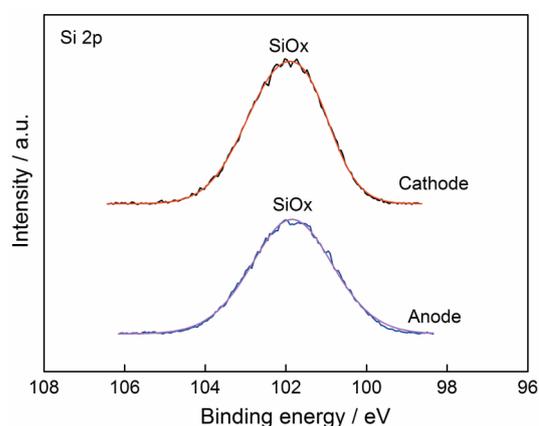


图5 阴极和阳极薄膜的XPS图谱中的Si2p峰
Fig.5 Si2p peak in XPS spectrum of anode films and cathode films

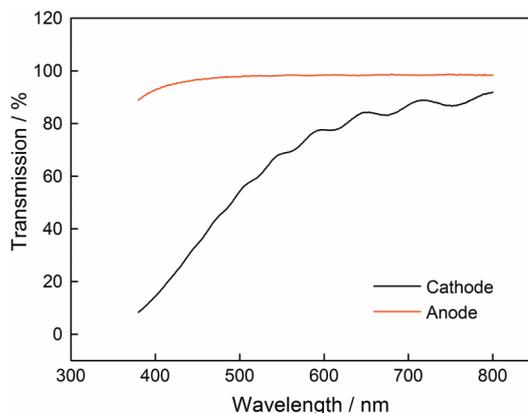


图6 阴极和阳极薄膜在可见光范围内的透过率
Fig.6 Transmittance of anode films and cathode films in visible light range

极所获得的氧化硅薄膜光学透过性差,使薄膜底层的原始颜色发生变化。

用纳米压痕仪测试两种薄膜的显微硬度,薄膜硬度与压入深度的关系如图7所示。由图7可见,阴、阳极薄膜样品的硬度显著不同。阴极薄膜样品的硬度约为15 GPa,而阳极薄膜样品的硬度仅为2 GPa。材料的硬度直接决定其耐刮擦性能,薄膜硬度越高,其表面的耐刮擦性能越好。根据上述对阴、阳极薄膜样品的硬度对比,阴极位置比阳极位置更有利于提高薄膜的硬度,增强薄膜的耐刮擦性。

样品的性能与其微观形貌、微观结构密切相关。结合上文对阴、阳极薄膜成分及微结构的表征,分析其性能不同的原因。虽然阴、阳极薄膜中元素成分相同,但形成的薄膜微结构存在显著差异,主要表现为碳元素的存在形式不同,阴极薄膜中碳元素以非晶碳结构存在,阳极薄膜中碳元素以-CH₃基团形式存在。非晶碳由sp³相和sp²相组成,其中sp³金刚石相具有光学透明性,而sp²石墨相不具备透光性,由此可推测非晶碳结构的存在是造成阴极薄膜透光性低的主要原因。另一方面,阴极薄膜内部结构致密,而阳极薄膜内部结构疏松并存在孔洞,阳极薄膜样品硬度较低是其内部结构疏松引起的。

2.4 提高沉积温度的影响

为了提高阳极薄膜的致密性和硬度,在沉积过程中将基片加热到250℃,在相同工艺参数下沉积薄膜,与在常温沉积的薄膜的结构性能比较。图8给出了将基片加热到250℃制备的薄膜的截面微观形貌照片。由照片观察到,与在常温制备的样品相比,在高温下沉积相同时间的薄膜其厚度大幅度减小,薄膜的沉积速率下降,致密度提高。其原因可能

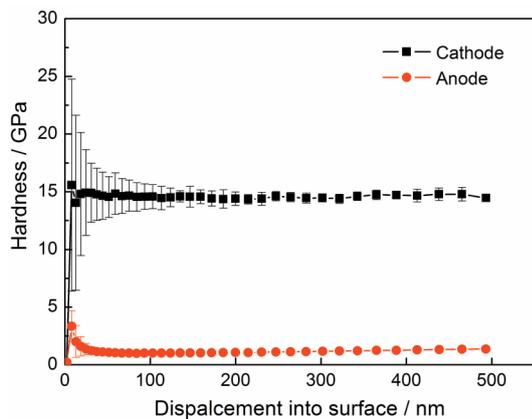


图7 阴极和阳极薄膜的纳米压痕测试结果
Fig.7 Nanoindentation test results of anode films and cathode films

是,在较高的温度下离子有更高的活性,有利于形成更致密的结构,从而使薄膜的沉积速率降低。

在不同温度制备阳极薄膜的红外吸收光谱曲线,如图9所示。对比图中的曲线可发现,在加热条件下制备的薄膜的Si-CH₃峰和C-H峰比在常温下制备的薄膜的强度大大降低,表明高温使薄膜结构中的-CH₃大幅度减少。对薄膜进行XPS测试得到的Si2p峰图谱,如图10所示。图中的曲线表明,在不同温度下制备的薄膜其SiO_x结构没有明显的不同。在高温下制备的薄膜其SiO_x峰位向高结合能方向略有偏移,表明氧化硅薄膜中氧原子与硅原子的成分比略有增加。

图11给出了在不同温度制备的阳极薄膜的硬度与压入深度的关系。由图11可见,在常温下制备的阳极薄膜其硬度仅为2GPa,在高温下制备的阳极薄膜的硬度增加至6 GPa。结合对薄膜的微结构分析,其原因是薄膜微结构致密化引起的。图12给出了在不同温度下制备的阳极薄膜在可见光范围内的透过率。由图12中的曲线表明,提高制备温度使阳极薄膜的光学透明性略有下降。

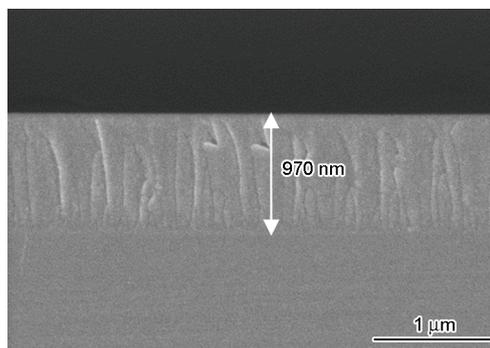


图8 在250℃制备的阳极薄膜的截面微观形貌
Fig.8 Cross-sectional micro-morphology of anode film formed at 250℃

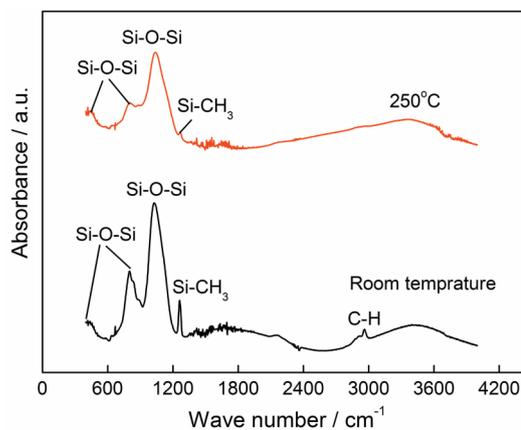


图9 在不同温度制备的阳极薄膜的红外吸收光谱
Fig.9 Infrared absorption spectra of anode films prepared at different temperatures

2.5 增加 O₂ 反应气体的影响

为了提高阴极薄膜的透光性,在沉积过程中向腔体中增加 O₂ 反应气体, O₂ 流量与 HMDSO 流量比

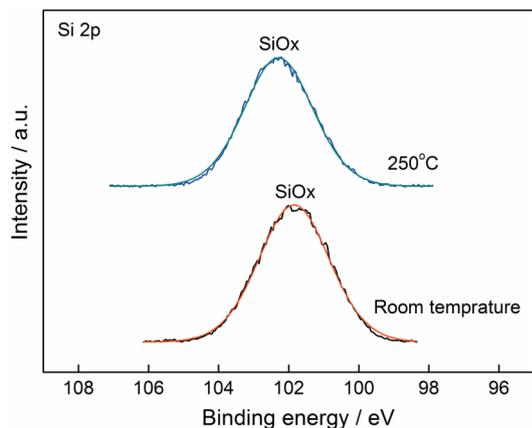


图 10 在不同温度制备的阳极薄膜的 XPS 图谱 Si2p 峰

Fig.10 Si2p peak in XPS spectrum of anode films prepared at different temperatures

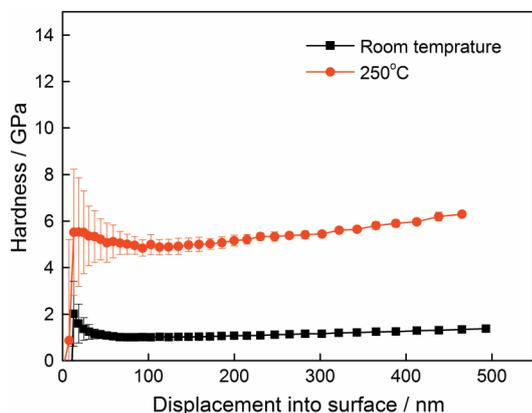


图 11 在不同温度制备的阳极薄膜的纳米压痕测试结果

Fig.11 Nanoindentation test results of anode films prepared at different temperatures

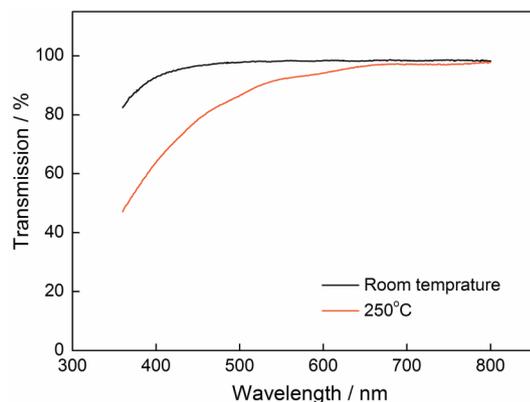


图 12 在不同温度制备的阳极薄膜在可见光范围内的透过率

Fig.12 Transmittance of anode films in visible light range prepared at different temperatures

为 3:1。图 13 给出了增加 O₂ 反应气体后阴极薄膜的截面微观形貌。由图 13 可见,在相同时间沉积的薄膜厚度减小至 1050 nm,与纯 HMDSO 气体相比膜厚减小一倍。

图 14 给出了分别在 HMDSO 与 HMDSO 复合 O₂ 气体源中阴极薄膜的红外吸收光谱。可以看出,增加 O₂ 后 C-C 键对应的吸收峰消失, Si-O-Si 在 1070 cm⁻¹ 处的拉伸振动峰出现一肩峰,具体对应于 Si-O-C 键,同时在 667 cm⁻¹ 与 2349 cm⁻¹ 处出现了 CO₂ 的对应吸收峰。上述结果说明,在反应气体中增加 O₂ 促进了碳元素与氧元素反应生成 CO₂,从而使薄膜中的非晶碳结构消失,也给出了增加 O₂ 后薄膜沉积速率减小的原因。薄膜的拉曼测试光谱也表明,增加 O₂ 反应气体后薄膜结构中对非晶碳的拉曼特征峰消失,与红外吸收光谱所得到的结果一致。

图 15 给出了两种气源制备的阴极薄膜的 XPS 测试结果。可以看出,在气源中增加 O₂ 气后, SiOx 峰位向高结合能偏移,说明薄膜 SiOx 结构中氧元素与硅元素的成分比显著增加,增加 O₂ 气补充了薄膜

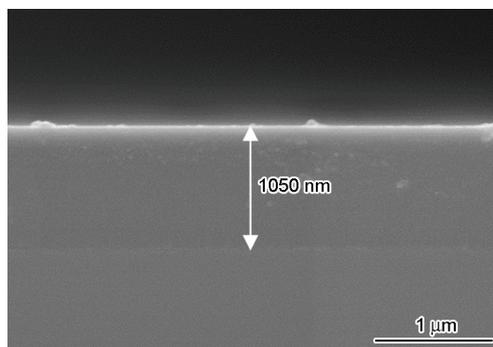


图 13 增加 O₂ 反应气体后阴极薄膜的截面微观形貌

Fig.13 Cross-sectional micro-morphology of cathode film after increasing oxygen reaction gas

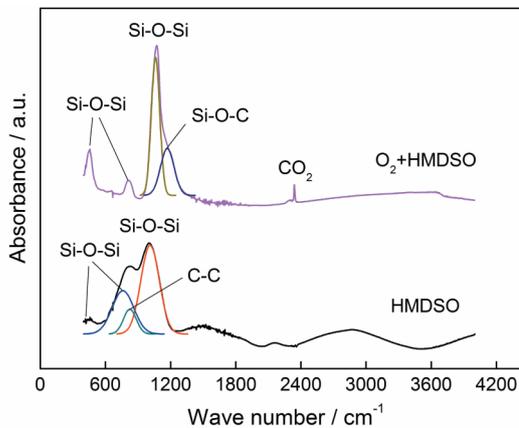


图 14 使用不同气源制备的阴极薄膜的红外吸收光谱

Fig.14 Infrared absorption spectra of cathode films at different gas sources

中的氧元素。

图16给出了增加O₂前后阴极薄膜的光学透光率曲线。由图16可见,增加O₂气能大幅度提高阴极薄膜的光学透明性,使得在380~780 nm整个可见光

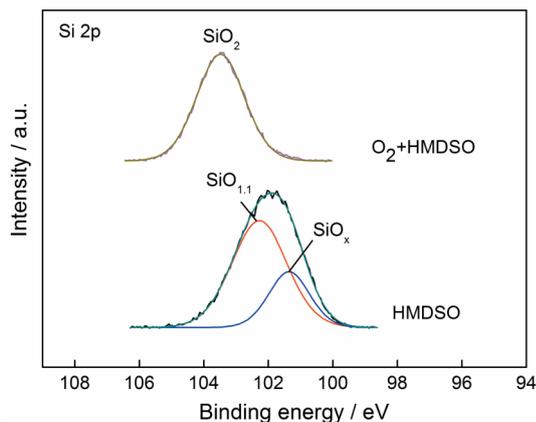


图15 使用不同气源制备的阴极薄膜的XPS图谱 Si2p峰

Fig.15 Si2p peak in XPS spectrum of cathode films at different gas sources

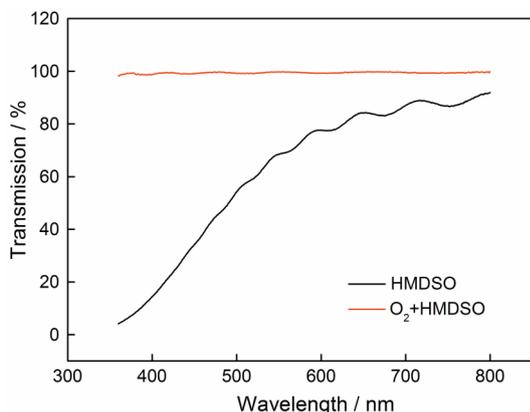


图16 使用不同气源制备的阴极薄膜在可见光范围内的透过率

Fig.16 Transmittance of cathode films in visible light range at different gas sources

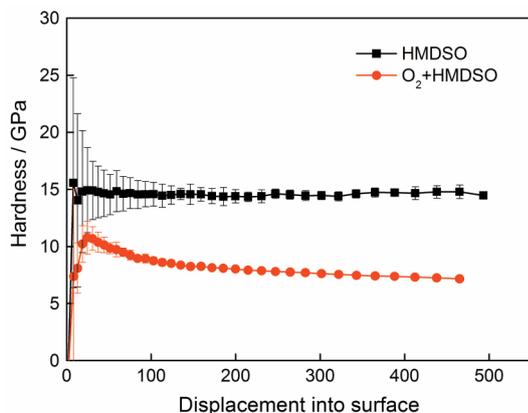


图17 使用不同气源制备的阴极薄膜的硬度

Fig.17 Nanoindentation test results of cathode films at different gas sources

波长范围内薄膜的透过率均大于99%。由于增加O₂使阴极薄膜结构中的非晶碳结构消失,因此薄膜的透光性大幅度改善。图17给出了增加O₂前后阴极薄膜硬度随压入深度的变化曲线。图17表明,增加O₂后薄膜的硬度由15 GPa,减小至9 GPa,可能是非晶碳结构消失引起。

3 结论

(1) 以HMDSO为气源采用PECVD技术在阴极板和阳极板位置都能制备出以氧化硅为骨架的薄膜。在阴极制备的薄膜具有无机氧化硅复合非晶碳结构,在阳极制备的薄膜具有Si(CH₃)_nO有机氧化硅结构。

(2) 阳极氧化硅薄膜在380~780 nm可见光波长范围内光学透过率高达90%~98%,具有高透光性,但是薄膜结构疏松,硬度仅为2 GPa,对样品加热可提高薄膜硬度至6 GPa,但是薄膜透过率略有降低。

(3) 阴极氧化硅薄膜的结构致密,硬度达到15 GPa,薄膜中的非晶碳结构使其在380~780 nm波长范围内透光性差,最低透光率仅为10%。在反应气体中引入O₂气使非晶碳结构消失,薄膜透光率大幅度上升,在380~780 nm可见光全波段范围内透光率高达99%,薄膜的硬度降低至9 GPa。

(4) 以HMDSO和O₂作为反应气体制备的阴极薄膜,具有优异的综合性能。

参考文献

- [1] Bai X Q, Li J, Yan X P, et al. Application of vacuum coating technology to metallization of plastics [J]. Journal Of Wuhan University Of Technology, 2005, 29(6): 948
(白秀琴, 李 健, 严新平等. 真空镀膜技术在塑料表面金属化上的应用 [J]. 武汉理工大学学报, 2005, 29(6): 948)
- [2] Zhang D, Sun L L, Zheng H, et al. Study of magnetron reactive sputtering CrN_x decoration films with functional protection [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 38
(张 栋, 孙丽丽, 郑 贺等. 直流反应磁控溅射CrN_x功能装饰涂层的研究 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 38)
- [3] Wang L S, Jiang Y G, Jiang C H, et al. Effect of oxygen flow rate on microstructure properties of SiO₂ thin films prepared by ion beam sputtering [J]. Journal Of Non-Crystalline Solids, 2018, 482: 203
- [4] Liu H S, Jiang Y G, Liu D D, et al. Thermal effect on microstructure vibration of SiO₂ thin films [J]. Vibrational Spectroscopy, 2018, 96: 101
- [5] Seung-Jae J., Byoung-June K., Myunghun S.. Low-refractive-index and high-transmittance silicon oxide with a mixed phase of n-type microcrystalline silicon as intermediate reflector layers for tandem solar cells [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 121: 1

- [6] Barranco A., Yubero F., Cotrino J., et al. Low temperature synthesis of dense SiO₂ thin films by ion beam induced chemical vapor deposition [J]. *Thin Solid Films*, 2001, 396: 9
- [7] Barranco A., Yubero F., Espinós J. P., et al. Room temperature synthesis of SiO thin films by ion beam induced and plasma enhanced CVD [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 142-144: 856
- [8] Amri R., Sahel S., Manaa C., et al. Experimental evidence of the photonic band gap in hybrid one-dimensional photonic crystal based on a mixture of (HMDSO, O₂) [J]. *Superlattices And Microstructures*, 2016, 96: 273
- [9] Barranco A., Cotrino J., Yubero F., et al. A structural study of organo-silicon polymeric thin films deposited by remote microwave plasma enhanced chemical vapour deposition [J]. *Surface And Coatings Technology*, 2004, 180-181: 244
- [10] Zakirov A. S., Khabibullaev P. K., ChiKyChoi. Structural characterization and electro-physical properties for SiOC(-H) low-k dielectric films [J]. *Physica B*, 2009, 404: 5218
- [11] ArupSamanta, DebajyotiDas. Studies on the structural properties of SiO:H films prepared from (SiH₄+CO₂+He) plasma in RF-PECVD [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93: 588
- [12] Barranco A., Cotrino J., Yubero F., et al. Synthesis of SiO₂ and SiOxCyHz thin films by microwave plasma CVD [J]. *Thin Solid Films*, 2001, 401: 150
- [13] Amri R., Sahel S., Gamra D., et al. Photonic band gap and defects modes in inorganic/organic photonic crystal based on Si and HMDSO layers deposited by sputtering and PECVD [J]. *Optical Materials*, 2018, 76: 222
- [14] R. Amri, S. Sahel, D. Gamra, et al. Photonic band gap and defect mode of one-dimensional photonic crystal coated from a mixture of (HMDSO, N₂) layers deposited by PECVD [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2017, 104: 298 (2017)
- [15] Hyunju J., Jeadong C. Fabrication and evaluation of protective SiO_x layers using plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 330: 71
- [16] Hyunju J., Jeadong C.. Characterization of interfacial layers grown between magnesium substrates and SiO_x films deposited by plasma-enhanced CVD [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 332: 105
- [17] Nazir M. Santos, Thais M. Gonçalves, Jayr de Amorim, et al. Effect of the plasma excitation power on the properties of SiOxCyHz films deposited on AISI 304 steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 311: 127
- [18] Sergei E. Alexandrov, Neil McSparran, Michael L. Hitchman, Remote AP-PECVD of Silicon Dioxide Films from Hexamethyldisiloxane(HMDSO) [J]. *Chemical Vapor Deposition*, 11, 481(2005)
- [19] Cho S. -H., Park Z. -T., Kim J. -G., et al. Physical and optical properties of plasma polymerized thin films deposited by PECVD method [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 174-175: 1111
- [20] RinoMorent, Nathalie D G, Sandra V V, et al. Organic-inorganic behaviour of HMDSO films plasma-polymerized at atmospheric pressure [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203: 1366
- [21] Mei Y, Jia X, An C H, et al. Microstructure adjustment and optical absorption properties of silicon oxide films containing silicon nanocrystals [J]. *Journal Of Materials Science & Engineering*, 2016, 34(5): 776
(梅 艳, 贾 曦, 安彩虹等. 镶嵌纳米晶硅的氧化硅薄膜微观结构调整及其光吸收特性 [J]. *材料科学与工程学报*, 2016, 34(5): 776)
- [22] Yu W, Wang J T, Li Y, et al. Low-temperature deposition and bonding performance of silicon nanocrystals in silicon oxide films [J]. *Journal Of Synthetic Crystals*, 2013, 42(6): 1035
(于 威, 王建涛, 李 云等. 氧化硅中纳米晶硅薄膜的低温沉积及其键合特性研究 [J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(6): 1035)
- [23] Qi F Y, Chen Q, Liu F P. Oxygen concentration and properties of SiO_x coating deposited in roll-to-roll process [J]. *Chinese Journal Of Vacuum Science And Technology*, 2012, 32(9): 841
(齐凤阳, 陈 强, 刘福平. Roll-to-roll MPECVD 中氧气浓度对氧化硅薄膜性能的影响 [J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(9): 841)

(责任编辑:黄 青)