

Ti/FTO 复合薄膜的激光辐照处理及其光电性能研究

任乃飞^{1,3}, 祖 伟^{1,3}, 李保家^{2,3*}, 黄立静^{1,3}, 曹海迪^{1,3}

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013;

³江苏大学江苏省光子制造科学与技术重点实验室, 江苏 镇江 212013

摘要 采用 532 nm 波长的纳秒脉冲激光对由直流磁控溅射法制备的 Ti/FTO 复合薄膜表面进行了辐照处理, 研究了激光能量密度对薄膜的表面形貌、晶体结构、光学性能和电学性能的影响。结果表明, 采用适当能量密度的激光对薄膜进行激光辐照处理, 一方面可对薄膜表面起到退火作用, 促进薄膜晶粒生长、消除部分晶体缺陷, 另一方面还可促使 Ti 层氧化成 TiO₂ 层, 最终使薄膜的综合光电性能得到提升。

关键词 激光技术; Ti/FTO; 激光辐照; 光电性能; 品质因子

中图分类号 TG156; TN249; TB34

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0502004

Research on Laser Irradiation Treatment and Photoelectric Property of Ti/FTO Composite Films

Ren Naifei^{1,3}, Zu Wei^{1,3}, Li Baojia^{2,3}, Huang Lijing^{1,3}, Cao Haidi^{1,3}

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

³Jiangsu Provincial Key Laboratory for Science and Technology of Photon Manufacturing, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract The surface of Ti/FTO composite films prepared with the direct current magnetron sputtering method is irradiated by a nanosecond pulsed laser with a wavelength of 532 nm. The effects of laser energy density on surface morphology, crystal structure, optical and electrical properties of the films are studied. The results show that the irradiation of films with appropriate laser energy density has the annealing effect on film surfaces, which on the one hand promotes film grain growth and eliminates partial crystal defects, and on the other hand, gives rise to the transformation of Ti layer to TiO₂ layer via oxidation, and finally improves the overall photoelectric property of the films.

Key words laser technique; Ti/FTO; laser irradiation; photoelectric property; figure-of-merit

OCIS codes 140.3390; 310.4165; 310.6860; 320.7090

1 引 言

氟氧化锡(FTO)薄膜是一种重要的透明导电氧化物(TCO)薄膜^[1],其具有可见光区高透光率以及良好的导电性,被广泛应用于太阳能电池^[2-3]、液晶显示器^[4-5]等领域。目前,为了使传统技术制备的 FTO 薄膜获得更加优异的光电性能,研究者们对单层 FTO 薄膜进行后续的优化处理。后续处理一般包括薄膜表

收稿日期: 2016-12-05; **收到修改稿日期:** 2017-01-17

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013004)、国家自然科学基金(61405078)、江苏省自然科学基金(BK20140567)、江苏省重点研发计划(BE2015037)、江苏省高校自然科学研究项目(11KJA460003, 14KJB430008)、江苏省博士后科研资助计划(1402090B, 1601008B)、江苏省“六大人才高峰”项目(2013-ZBZZ-025)

作者简介: 任乃飞(1964—),男,博士,教授,主要从事激光微加工技术方面的研究。E-mail: rnf_ujs@126.com

* **通信联系人.** E-mail: li_bjia@126.com

面微纳结构的复合处理^[6]、表面的热退火处理^[7]以及表面的织构化处理^[8]三个方面。其中,研究较多的是在薄膜表面复合金属层或半导体层,以获得双层或多层复合薄膜来进一步提高薄膜的光学和电学性能^[9]。Ti作为金属材料,具有低的方块电阻,且在适当厚度条件下具有较高的透光率。因此 Ti/FTO 复合薄膜的制备对新型复合薄膜的开发具有一定的意义。

据已有文献报道,炉内热退火可显著提升单层薄膜和复合薄膜的光学和电学性能。2014 年本课题组研究了氩气条件下炉内退火对 Ti/FTO 复合薄膜结构形貌的影响^[10],结果表明,当退火温度为 400 °C、氩气流量为 15 sccm(标准状态下 15 mL/min)、退火温度时间为 10 min 时,Ti/FTO 薄膜表面颗粒外形圆整,分布均匀密集,此时得到的双层复合薄膜的综合光电性能最佳,相对单层 FTO 薄膜的品质因子提升了 29.21%。但炉内退火方法往往周期长、可控性差。而激光辐照退火操作简单、时间短、无污染且区域控制性强,不仅可以减少薄膜晶体缺陷、释放薄膜内残余应力,还可以促使薄膜表面颗粒变得圆整、分布均匀,从而使薄膜的光电性能得到提升^[11-12]。此外,激光辐照时间很短,可避免基底材料内杂质向内扩散或掺杂元素向外逸出现象,有利于薄膜光电性能的稳定^[13]。Tseng 等^[14]采用紫外激光对以玻璃为基底的 FTO 薄膜进行退火处理,结果发现,随着激光能量和激光扫描速度的增大,FTO 薄膜在可见光区波段的平均透光率相比原始 FTO 薄膜的略有增加,而激光退火后 FTO 薄膜的方块电阻却明显减小。这也表明激光退火对 FTO 薄膜的光学和电学性能优化能起到一定的促进作用。目前,利用激光辐照优化光电性能的 FTO 基薄膜主要有 FTO^[14-15]、Ag/FTO^[16]和 Al/FTO^[17],而关于 Ti/FTO 复合薄膜激光辐照处理的研究较少。本文先采用直流磁控溅射在 FTO 玻璃表面沉积金属 Ti 膜,再利用纳秒脉冲激光对制得的 Ti/FTO 复合薄膜表面进行辐照处理,以同步实现薄膜表面退火和 Ti 层氧化,着重研究激光能量密度对复合薄膜光电性能的影响。研究结论为单层或多层复合薄膜光电性能的优化提供了新的思路。

2 实 验

2.1 Ti/FTO 复合薄膜的制备

首先将 FTO 薄膜切割成 15 mm×15 mm 的小方块作为样品,依次将切好的薄膜样品放入盛有去离子水、丙酮和无水乙醇溶液的玻璃皿中超声清洗 10 min,再用高纯 N₂ 气吹干,随后放入温度为 45 °C 的干燥箱中保持 2 h 备用。

将预处理后的 FTO 薄膜放入直流磁控溅射仪(JS3X-100B,北京创威纳科技有限公司,中国)的真空腔室中,以纯度为 99.99%(质量分数)的 Ti 金属圆片为靶材,进行 Ti/FTO 复合薄膜的制备。在直流磁控溅射过程中,溅射室本底真空度达到 1×10^{-3} Pa 后充入氩气,控制工作压力为 1 Pa,溅射功率为 60 W,基底温度为 250~280 °C。膜层的厚度由在线测控仪控制,保持 Ti 层厚度约为 10 nm。

2.2 Ti/FTO 复合薄膜的激光辐照处理

实验中采用二极管抽运 Nd:YVO₄ 纳秒脉冲激光器(Wedge 532, Bright Solution 公司,意大利)对 Ti/FTO 复合薄膜进行激光辐照处理。激光器输出的激光中心波长为 532 nm,重复频率为 1 kHz。设置激光扫描方式为 X 方向单向往返逐线扫描,扫描区域面积为 12 mm×12 mm,离焦量为焦后 3 mm,作用于复合薄膜表面的光斑直径为 0.09 mm,线间距为 0.02 mm。在扫描速度为 10 mm/s 的条件下,调节激光能量密度分别为 0.1,0.4,0.8,1.3,1.8 J/cm²。激光辐照处理结束后,取出样品并用洗耳球轻吹薄膜表面,以去除表面的飞沫。

2.3 表征与测试

采用扫描电子显微镜(SEM,S-3400N,Hitachi 公司,日本)观察薄膜的表面形貌,利用 Cu-K α 辐射(波长为 0.1541 nm)的 X 射线衍射仪(XRD,D8 Advance,Bruker 公司,德国)检测薄膜的晶体结构,采用紫外-可见分光光度计(UV-8000,上海元析仪器有限公司,中国)测试薄膜的透射光谱,四探针测试仪(RTS-9,广州四探针科技有限公司,中国)测试薄膜的方块电阻。

3 结果与分析

3.1 表面形貌分析

图 1 所示为 FTO 薄膜和 Ti/FTO 复合薄膜的 SEM 图。由图 1(a) 可以看到, 单层 FTO 薄膜表面分布着较为稀疏的金字塔状 SnO_2 颗粒, 且薄膜表面不平整。由图 1(b) 可以发现, 在金属 Ti 的覆盖下, Ti/FTO 复合薄膜表面的颗粒变得致密圆滑, 颗粒尺寸略微变大。

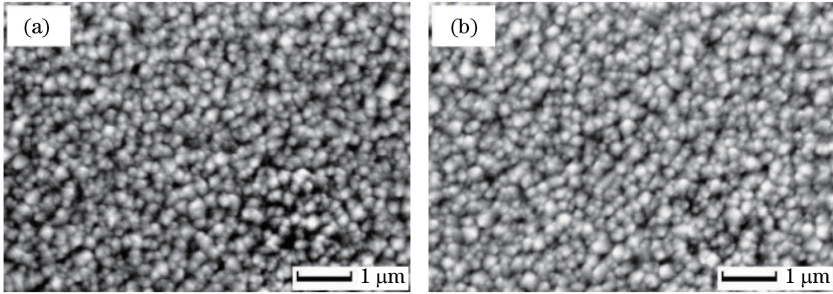


图 1 (a) FTO 薄膜和(b) Ti/FTO 复合薄膜的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of (a) FTO film and (b) Ti/FTO composite film

图 2 所示为不同能量密度激光处理后 Ti/FTO 复合薄膜的表面形貌。当激光能量密度为 0.1 J/cm^2 时, 如图 2(a) 所示, 复合薄膜表面颗粒尺寸变化不明显, 这可能是由于较小的激光能量密度对薄膜表面辐照所产生的热作用太小, 没有起到明显退火效果^[18]。当激光能量密度为 0.4 J/cm^2 时, 如图 2(b) 所示, 部分颗粒明显增大, 表明薄膜表面受到了一定程度的激光退火作用。当激光能量密度增大至 0.8 J/cm^2 时, 如图 2(c) 所示, 薄膜表面达到最佳退火效果, 表面颗粒变得圆润、分布均匀致密。这主要与激光退火作用促进薄膜晶粒生长有关^[19]。而当激光能量密度增加至 1.3 J/cm^2 时, 如图 2(d) 所示, 薄膜表面有略微起伏状, 出现了较为轻微的烧蚀现象[图 2(d) 中椭圆标示区域], 使得颗粒变得较为稀疏, 且部分颗粒尺寸明显增大。当激光能量密度为 1.8 J/cm^2 时, 如图 2(e) 所示, 薄膜表面出现了严重的烧蚀现象, 薄膜层遭到破坏并穿透到玻璃上, 出现孔洞, 这主要是单位面积上激光积聚的能量过大, 大大超出了 FTO 薄膜层的烧蚀阈值, 导致膜层出现脱落现象, 从而严重降低了薄膜的质量^[20]。

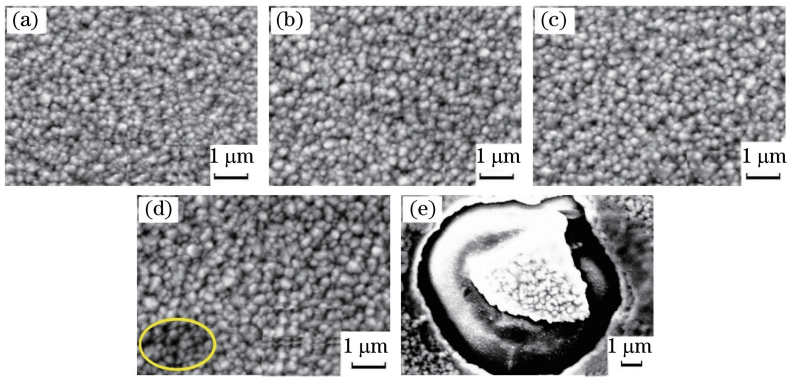


图 2 不同能量密度激光处理后复合薄膜的 SEM 图。(a) 0.1 J/cm^2 ; (b) 0.4 J/cm^2 ; (c) 0.8 J/cm^2 ; (d) 1.3 J/cm^2 ; (e) 1.8 J/cm^2

Fig. 2 SEM images of composite films treated by laser with different energy densities.

(a) 0.1 J/cm^2 ; (b) 0.4 J/cm^2 ; (c) 0.8 J/cm^2 ; (d) 1.3 J/cm^2 ; (e) 1.8 J/cm^2

3.2 XRD 分析

图 3(a) 所示为单层 FTO 薄膜以及不同复合薄膜的 XRD 图谱, 可以发现, 所有薄膜图谱均显示出对应于 SnO_2 四方结构(110)、(101)、(200)、(211)、(220)、(310)、(301)的特征峰, 且均具有沿(200)面择优生长的特征。在 FTO 薄膜表面镀 Ti 层以后, XRD 图谱中显示出对应于 Ti 六角相结构的(101)特征峰。随着激光能量密度由 0.1 J/cm^2 增大到 0.8 J/cm^2 , SnO_2 (200) 峰的半峰全宽(FWHM)逐渐变窄、强度逐渐增强, 表明复合薄膜在激光退火作用下出现晶粒生长现象, 晶粒尺寸变大, 有效地减少了晶体缺陷, 薄膜的结晶度得

到提高^[21]。图 3(b)所示为各复合薄膜 XRD 图谱的局部放大图,可以看到,对 Ti/FTO 薄膜进行激光辐照处理时,随着激光能量密度由 0.1 J/cm² 增大到 0.8 J/cm²,Ti(101)衍射峰强度逐渐减小直至消失,但逐渐出现了对应于 TiO₂(110)、(101)、(211)的衍射峰,证明激光辐照过程中有四方金红石相 TiO₂ 生成。其中,当激光能量密度为 0.8 J/cm² 时,Ti(101)衍射峰完全消失,TiO₂(110)、(101)、(211)衍射峰强度最大,说明 Ti 层被完全氧化成 TiO₂。而当激光能量密度为 1.3 J/cm² 时,TiO₂(110)、(101)、(211)衍射峰强度均明显减小,这可能与表面膜层的轻微烧蚀有关。当激光能量密度为 1.8 J/cm² 时,薄膜各个晶面所对应的衍射峰强度均减小,结合图 2(e)的分析结果可知,这主要是较高的激光能量密度使得薄膜表面发生严重烧蚀和脱落所致。

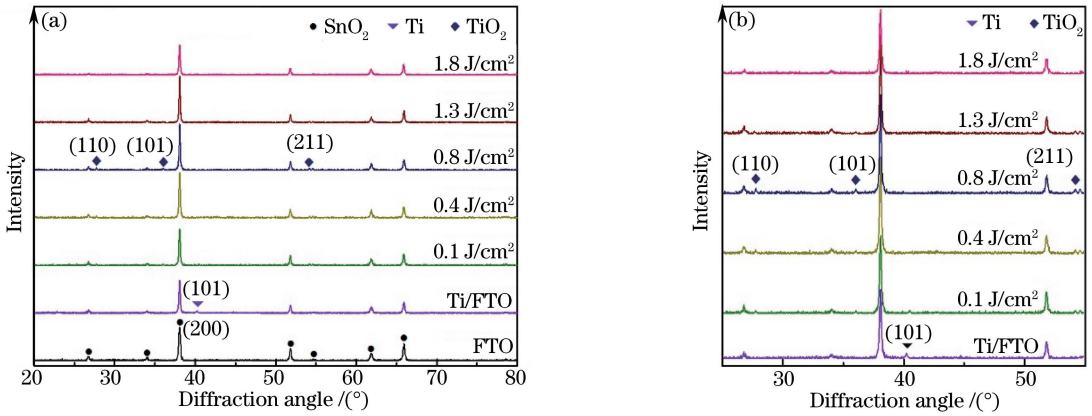


图 3 (a)不同薄膜的 XRD 图谱;(b)图 3(a)的局部放大图

Fig. 3 (a) XRD patterns of different films; (b) partial enlargement of Fig.3 (a)

3.3 光学性能分析

图 4 所示为单层 FTO 薄膜和不同复合薄膜在 300~900 nm 波段的透射光谱,图中透射光谱在可见-红外波段出现振荡,这主要是玻璃/FTO、FTO/Ti(或 TiO₂)和 Ti(或 TiO₂)/空气界面处的反射光产生的相长相消干涉引起的^[22]。为了更好地评估透明导电薄膜的透光性,一般取某个波段范围的平均透光率来进行比较。平均透光率(T_{av})计算公式一般为^[23]

$$T_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (1)$$

式中 T_i 为波段区域内给定波长处的透光率, n 为透光率值的个数。图 5 给出了由图 4 中透射光谱数据计算得到的薄膜在 400~800 nm 波段的平均透光率。通常在单层薄膜上复合金属层后,复合薄膜的平均透光率会降低;而本实验发现,沉积 10 nm 厚的 Ti 膜层后,Ti/FTO 复合薄膜较单层 FTO 薄膜的平均透光率反而略微增大,由 80.4%增大为 80.7%。这主要是在制备 Ti/FTO 复合薄膜的过程中,基底加热装置提供的热

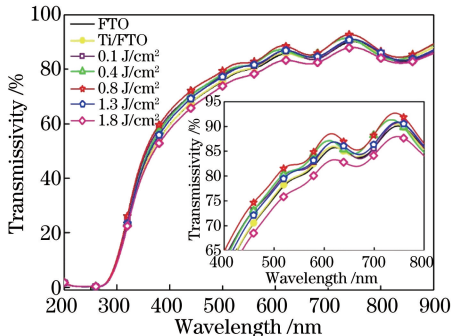


图 4 不同薄膜的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of different films

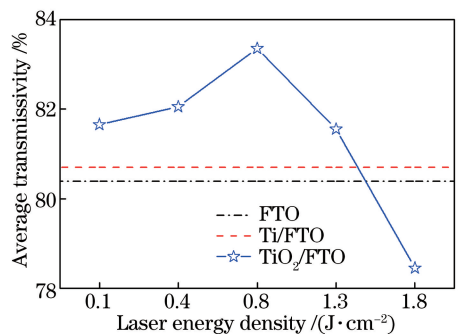


图 5 不同薄膜的平均透光率(400~800 nm)

Fig. 5 Average transmissivities (400-800 nm) of different films

能对 FTO 层和 Ti 层均起到了一定的退火作用,促进了薄膜中晶粒的生长,从而提高了复合薄膜的透光率^[24]。此外,也有可能是真空腔室中的电子在电场的作用下,在飞向基底的过程中与氩气原子碰撞,使氩气原子电离产生氩离子,而带有较高能量的氩离子在电场作用下不断高速轰击 Ti 靶,使高能量的 Ti 原子溅射到基底上;同时由辉光放电产生的巨大能量通过辐射和对流转移到基底上面,提供了额外的热能,可促进 FTO 层薄膜晶粒的生长,减少了光的晶界散射,从而对薄膜透光率的提高也起到了一定的作用^[25-26]。

从图 5 还可以看到,随着激光能量密度的增加,复合薄膜的透光率呈先增大后减小的趋势。当激光能量密度由 0.1 J/cm^2 增加至 0.8 J/cm^2 时,复合薄膜在 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 波段的平均透光率逐渐增大。结合上述 XRD 分析可知,激光能量密度的增加使得复合薄膜中的 Ti 层逐渐被氧化成 TiO_2 层,而 TiO_2 薄膜在可见光区具有较高的透光率^[27-28];此外,薄膜表面的退火效果越来越好,促使薄膜中晶粒尺寸增大,有效地减少了晶体缺陷,提高了薄膜结晶度,导致光的晶界散射大大减少,从而使得薄膜平均透光率得到提高^[29-30]。其中,当激光能量密度为 0.8 J/cm^2 时,Ti 层完全被氧化成 TiO_2 层,同时复合薄膜表面达到了最佳退火效果,得到的 TiO_2/FTO 复合薄膜平均透光率最大,为 83.4% 。当激光能量密度为 1.3 J/cm^2 时,复合薄膜的平均透光率有所下降,这可能是因为 TiO_2 膜层在激光的作用下发生轻微烧蚀,薄膜表面不平整,造成了较强的光散射^[31]。而随着激光能量密度由 1.3 J/cm^2 增加至 1.8 J/cm^2 时,复合薄膜的平均透光率进一步降低,这是激光辐照时单位面积上积聚的激光能量过大,破坏了膜层甚至玻璃基底,使得入射光难以透过薄膜,从而导致薄膜的透光率大大下降^[20]。

3.4 电学性能分析

图 6 所示为单层 FTO 薄膜和不同复合薄膜的方块电阻。结果显示,金属 Ti 层的引入有效地改善了 FTO 薄膜的导电性,方块电阻由原来的 $9.2 \text{ }\Omega$ 下降至 $8.8 \text{ }\Omega$ 。结合前述 SEM 和 XRD 分析可知,当激光能量密度为 0.1 J/cm^2 时,薄膜表面的退火效果不明显,但薄膜表面开始有 TiO_2 层生成,而 TiO_2 层的导电性相对较差^[32],从而导致薄膜的方块电阻增至 $9.0 \text{ }\Omega$ 。随着激光能量密度由 0.1 J/cm^2 增大到 0.8 J/cm^2 ,薄膜表面退火效果越来越好,退火作用逐渐占主导,超过了 Ti 层氧化对导电性的负面影响,使得复合薄膜的方块电阻由 $9.0 \text{ }\Omega$ 下降至 $8.7 \text{ }\Omega$ 。当激光能量密度为 0.8 J/cm^2 时,Ti 层完全氧化成 TiO_2 层,此时复合薄膜表面达到了最佳退火效果,而退火作用能够使薄膜中晶粒的尺寸增大,从而载流子的晶界散射减少、晶界势垒降低,有效地提高了载流子的迁移率^[33]。此外,激光辐照还使得薄膜中部分晶体缺陷得以消除,也大大提高了载流子迁移率,从而使得薄膜的导电性得到提高^[27]。而当激光能量密度大于 0.8 J/cm^2 时,复合薄膜的方块电阻呈上升趋势。这可能是随着激光能量密度的增加,单位面积积聚的激光能量过大,导致复合薄膜层被烧蚀或局部膜层脱落,影响了薄膜的整体质量,致使薄膜的导电性变差^[20]。可见,在激光辐照处理透明导电薄膜的过程中,对激光能量密度的控制是非常关键的。

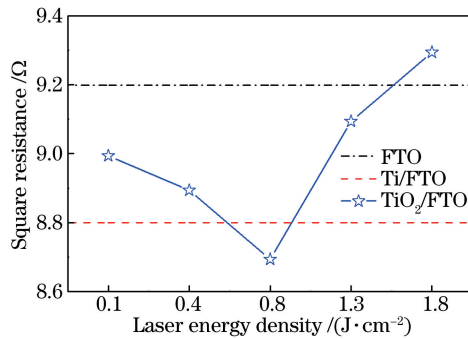


图 6 不同薄膜的方块电阻

Fig. 6 Square resistances of different films

3.5 品质因子

在透明导电薄膜研究过程中,通常引入品质因子 F_{TC} 来综合评估薄膜的光电性能。品质因子 F_{TC} 最早是由 Haacke 定义的,其表达式为^[34]

$$F_{TC} = \frac{T_{av}^{10}}{R_{sh}}, \quad (2)$$

式中 T_{av} 为薄膜在 400~800 nm 波段的平均透光率, R_{sh} 为薄膜的方块电阻。 F_{TC} 值越大说明薄膜的综合光电性能越好^[35]。图 7 所示为不同薄膜的品质因子, 可以发现, 单层 FTO 薄膜的品质因子为 $1.2 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$; 随着激光能量密度的增加, 复合薄膜的品质因子呈先增大后减小的趋势。其中, 当激光能量密度为 0.8 J/cm^2 时, 得到的 TiO_2/FTO 复合薄膜的品质因子最大, 为 $1.9 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$, 相对单层 FTO 薄膜的品质因子提升了 58.3%, 表明其综合光电性能最佳。

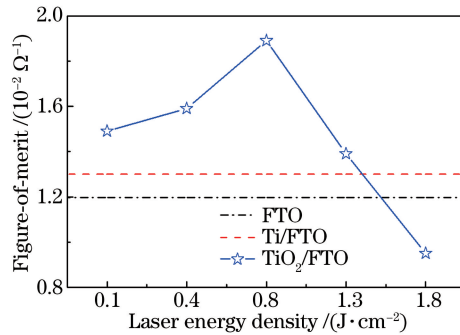


图 7 不同薄膜的品质因子

Fig. 7 Figure-of-merits of different films

4 结 论

采用 532 nm 波长的纳秒脉冲激光对由直流磁控溅射法制备的 Ti/FTO 复合薄膜表面进行了辐照处理, 研究了激光能量密度对薄膜表面形貌、结构性能以及光电性能的影响。结果表明, 适当能量密度的激光辐照对 Ti/FTO 复合薄膜可同时起到退火和氧化双重作用。激光退火作用可促进薄膜中晶粒的生长, 有效地减少晶体缺陷, 提高薄膜结晶度, 从而使得复合薄膜的光学和电学性能得到一定程度的改善, 而激光作用下 Ti 层的氧化有利于薄膜透光性的提升。研究结论可为 TCO 薄膜光电性能的优化提供有效途径。

参 考 文 献

- [1] Liu Xiaofei, Wang Xiaoping, Wang Lijun, *et al.* Research progress in transparent conducting films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100003.
刘晓菲, 王小平, 王丽军, 等. 透明导电薄膜的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100003.
- [2] Noh S I, Ahn H J, Riu D H. Photovoltaic property dependence of dye-sensitized solar cells on sheet resistance of FTO substrate deposited via spray pyrolysis [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(5): 3739-3739.
- [3] Ito S, Murakami T N, Liska P, *et al.* Fabrication of thin film dye sensitized solar cells with solar to electric power conversion efficiency over 10% [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(14): 4613-4619.
- [4] Liu H, Avrutin V, Izyumskaya N. Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2010, 48(5): 458-484.
- [5] Chen M, Pei Z L, Sun C, *et al.* ZAO: An attractive potential substitute for ITO in flat display panels [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2001, 85(2-3): 212-217.
- [6] He Xiaoxiao, Wang Wenjun, Li Shuhong, *et al.* Design and properties analogy of ZnO-based multilayer transparent conducting film [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0607001.
和晓晓, 王文军, 李淑红, 等. ZnO 基透明导电薄膜的制备与特性研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0607001.
- [7] Hou Shunbao, Hu Ming, Lü Zhijun, *et al.* Influence of rapid thermal process conditions on electrical and optical properties of VO₂ thin film [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0107002.
后顺保, 胡明, 吕志军, 等. 快速热处理对磁控溅射 VO₂ 薄膜光电特性的影响 [J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0107002.
- [8] Huang Xiangjun, Zhang Yaoju, An Hongchang. Reduction of reflection in amorphous silicon thin film solar cell with double grating structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 073101.

- 黄祥军, 张耀举, 安鸿昌. 双层光栅结构减小非晶硅薄膜太阳电池的反射[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 073101.
- [9] Park H K, Kang J W, Na S I, *et al.* Characteristics of indium-free GZO/Ag/GZO and AZO/Ag/AZO multilayer electrode grown by dual target DC sputtering at room temperature for low-cost organic photovoltaics[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(11): 1994-2002.
- [10] Li B J, Huang L J, Ren N F, *et al.* Titanium dioxide-coated fluorine-doped tin oxide thin films for improving overall photoelectric property[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 290(2): 80-85.
- [11] Xu Q, Hong R D, Huang H L, *et al.* Laser annealing effect on optical and electrical properties of Al doped ZnO films [J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 45(1): 513-517.
- [12] Zhu B, Sun X, Zhao X, *et al.* The effects of substrate temperature on the structure and properties of ZnO films prepared by pulsed laser deposition[J]. *Vacuum*, 2008, 82(5): 495-500.
- [13] Oane M, Scarlat F, Tsao S L, *et al.* Thermal fields in laser-multi-layer structures interaction[J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, 39(4): 796-799.
- [14] Tseng S F, Hsiao W T, Chiang D, *et al.* Mechanical and optoelectric properties of post-annealed fluorine-doped tin oxide films by ultraviolet laser irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(16): 7204-7209.
- [15] Chen M F, Lin K M, Ho Y S. Effects of laser-induced recovery process on conductive property of $\text{SnO}_2\cdot\text{F}$ thin films [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2011, 176(2): 127-131.
- [16] Huang L J, Ren N F, Li B J, *et al.* Improvement in overall photoelectric properties of Ag/FTO bilayer thin films using furnace/laser dual annealing[J]. *Materials Letters*, 2014, 116(2): 405-407.
- [17] Huang L J, Ren N F, Li B J, *et al.* A comparative study of different M (M = Al, Ag, Cu)/FTO bilayer composite films irradiated with nanosecond pulsed laser[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 617: 915-920.
- [18] Li B J, Huang L J, Ren N F, *et al.* Improving the performance of nickel-coated fluorine-doped tin oxide thin films by magnetic-field-assisted laser annealing[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 351: 113-118.
- [19] Li B J, Zhou M, Ma M, *et al.* Effects of nanosecond laser irradiation on photoelectric properties of AZO/FTO composite films[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 265(1): 637-641.
- [20] Ren N F, Huang L J, Li B J, *et al.* Laser-assisted preparation and photoelectric properties of grating-structured Pt/FTO thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 314(24): 208-214.
- [21] Kim M S, Kim D Y, Cho M Y, *et al.* Effects of buffer thickness on properties of ZnO thin films grown on porous silicon by plasma-assisted molecular beam epitaxy[J]. *Vacuum*, 2012, 86(9): 1373-1379.
- [22] Nanto H, Minami T, Shooji S, *et al.* Electrical and optical properties of zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering for transparent electrode applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 1984, 55(4): 1029-1034.
- [23] Li B J, Huang L J, Ren N F, *et al.* Two-step preparation of laser-textured Ni/FTO bilayer composite films with high photoelectric properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 640: 376-382.
- [24] Lee C J, Lin H K, Li C H, *et al.* A study on electric properties for pulse laser annealing of ITO film after wet etching [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 522(522): 330-335.
- [25] Lee J W, Hui K N, Hui K S, *et al.* Low resistivity of Ni-Al co-doped ZnO thin films deposited by DC magnetron sputtering at low sputtering power[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 293: 55-61.
- [26] Chaoumead A, Joo B H, Kwak D J, *et al.* Structural and electrical properties of sputtering power and gas pressure on Ti-dope In_2O_3 transparent conductive films by RF magnetron sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 275: 227-232.
- [27] Nezar S, Saoula N, Sali S, *et al.* Properties of TiO_2 thin films deposited by RF reactive magnetron sputtering on biased substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 395: 172-179.
- [28] Song S M, Yang T L, Li Y H, *et al.* Structural, electrical, and optical properties of ITO films with a thin TiO_2 seed layer prepared by RF magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2009, 83(8): 1091-1094.
- [29] Kumar B R, Rao T S. Microstructural, electrical and optical properties of DC reactive magnetron sputtered zinc aluminum oxide thin films for optoelectronic devices[J]. *Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials*, 2012, 4(2): 35-42.
- [30] Hezam M, Tabet N, Mekki A. Synthesis and characterization of DC magnetron sputtered ZnO thin films under high working pressures[J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(24): 161-164.
- [31] Winfield R J, Koh L H K, Brien S O, *et al.* Excimer laser processing of ZnO thin films prepared by the sol-gel process [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 855-858.

- [32] Park S H, Jang S, Lee D J, *et al.* Two-step flash light sintering process for crack-free inkjet-printed Ag films[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 23(1): 15013-15021.
- [33] Shanthi E, Dutta V, Banerjee A, *et al.* Electrical and optical properties of undoped and antimony-doped tin oxide films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(12): 6243-6251.
- [34] Haacke G. New figure of merit for transparent conductors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(9): 4086-4089.
- [35] Jun M C, Koh J H. Effects of NIR annealing on the characteristics of Al-doped ZnO thin films prepared by RF sputtering[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7(1): 294-300.