

激光辐照对热退火金属/掺氟二氧化锡透明导电薄膜光电性能的影响

黄立静 任乃飞 李保家 周明

Effects of laser irradiation on the photoelectric properties of thermal-annealed metal/fluorine-doped tin oxide transparent conductive films

Huang Li-Jing Ren Nai-Fei Li Bao-Jia Zhou Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034211 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034211

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

毫秒脉冲激光辐照硅基 PIN 的温度场应力场数值分析

Supercontinuum generation in photonic crystal fiber and tapered single-mode fiber

物理学报.2014, 63(19): 194205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194205>

万瓦级光纤激光焊接过程中小孔内外等离子体研究

Plasma inside and outside keyhole during 10 kW level fiber laser welding

物理学报.2014, 63(10): 104212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104212>

金电极的激光组装制备研究

Study on the fabrication of gold electrode by laser assembling

物理学报.2014, 63(7): 074205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074205>

金纳米棒的飞秒激光组装研究

Assembling of gold nanorods by femtosecond laser fabrication

物理学报.2014, 63(1): 014206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014206>

电解质对浓悬浮液中胶体颗粒扩散特性的影响

Influence of electrolytes on diffusion properties of colloidal particles in dense suspensions

物理学报.2013, 62(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214207>

激光辐照对热退火金属/掺氟二氧化锡透明导电薄膜光电性能的影响*

黄立静¹⁾³⁾ 任乃飞²⁾³⁾† 李保家¹⁾³⁾ 周明³⁾

1)(江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013)

2)(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

3)(江苏大学光子制造科学技术中心江苏省重点实验室, 镇江 212013)

(2014年7月3日收到; 2014年8月13日收到修改稿)

采用 532 nm 纳秒脉冲激光对热退火的铝 (Al)/掺氟二氧化锡 (FTO)、铜 (Cu)/FTO 和银 (Ag)/FTO 三种双层复合薄膜表面分别进行处理, 结果显示薄膜样品的光电性能都得到提高. 其中, 热退火 Ag/FTO 薄膜的平均透光率 (400—800 nm) 增幅最大, 从 72.6% 提高到 80.5%, 主要是由于其表面产生了具有减反增透作用的光栅结构. 激光辐照后热退火 Ag/FTO 薄膜的导电性也略有提高, 其方块电阻从 5.6 Ω/sq 下降到 5.3 Ω/sq , 原因主要是激光辐照的热效应造成的退火作用使薄膜的晶粒尺寸增大, 减少了晶界散射而使载流子迁移率提高. 计算结果显示, 激光辐照后热退火 Ag/FTO 薄膜的品质因子从 $0.73 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$ 增大为 $2.16 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$, 表明其综合光电性能得到显著提高. 激光辐照可同步实现薄膜表面光栅结构的制备和附加退火作用, 这为金属层复合透明导电薄膜光电性能的综合优化提供了新的思路.

关键词: 透明导电薄膜, 激光辐照, 光栅结构, 光电性能

PACS: 42.62.-b, 68.55.-a, 78.20.-e, 73.90.+f

DOI: 10.7498/aps.64.034211

1 引言

透明导电氧化物 (transparent conductive oxide, TCO) 薄膜因其具有良好的导电性, 以及在可见光区具有较高的透光性等优点, 目前在太阳能电池^[1,2]、液晶显示器^[3,4]、热敏传感器^[5]等光电器件领域得到广泛研究和应用. 但随着光电器件领域的发展, 人们对 TCO 薄膜的光电性能要求越来越高. 为了获得具有良好光电性能的 TCO 薄膜, 目前很多研究集中于双层或多层复合薄膜的优化制备^[6-9], 虽然这可以提高薄膜的导电性, 但其透光率会随着其厚度的增加而显著下降. 因此, 人们进一步采用热退火的方法来改善薄膜的导电性

和透光率, 但热退火对薄膜透光率的提高仍然非常有限. 已有的研究表明, 在薄膜表面引入金字塔状^[10]、蜂窝状^[11]和光栅^[12]等绒面结构, 利用其减反增透作用可有效提高薄膜的光学性能. 目前在薄膜表面制备微纳结构的方法主要有溶胶-凝胶法^[13,14]、电子束光刻法^[15]、等离子刻蚀法^[16]和纳米压印技术^[17]等. 其中, 溶胶-凝胶法具有制备过程复杂、可控性差等缺点, 还需要引入有害化学物质; 而电子束光刻法和等离子刻蚀法的工艺复杂, 制备周期长, 且设备造价十分昂贵; 纳米压印技术虽然操作简便, 但制备过程中需要模板, 且模板尺寸决定了微纳结构的分辨率, 而高分辨率模板的制作成本也相当不菲. 相比较而言, 激光辐照法具有系统简单、操作方便、制作周期短、无需有毒化学试

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2011CB013000)、江苏省普通高校博士研究生科研创新计划资助项目 (批准号: CXZZ13_0663)、江苏大学高级专业人才科研启动基金 (批准号: 13JGD045) 和江苏省光子制造科学技术中心重点实验室开放基金 (批准号: GZ201307) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: rnf_ujs@126.com

剂和特殊气体、可控性好等优点, 近些年一直备受研究者们关注. 由此可以设想, 利用激光对已通过双层复合结合热退火方法优化的金属/TCO 双层薄膜进行辐照处理, 实现薄膜表面绒面结构制备, 可望进一步提高其综合光电性能.

本实验通过磁控溅射法结合热退火处理制备了具有较好光电性能的三种不同金属/掺氟二氧化锡 (fluorine-doped tin oxide, FTO) 双层复合薄膜 (记为 M/FTO), 其中金属层材料分别为铝 (Al)、铜 (Cu) 和银 (Ag). 对不同的热退火 M/FTO 薄膜分别进行激光辐照处理, 对比研究了激光辐照前后不同热退火 M/FTO 薄膜样品的表面形貌、结构及光学、电学性能.

2 实验部分

2.1 热退火 M/FTO 薄膜的制备

实验中采用的基底材料为商售 FTO 玻璃, 是在 3 mm 厚的平板玻璃上沉积约 750 nm 厚的 FTO 层制成的. 先将 FTO 玻璃切割成 15 mm × 15 mm 的小片, 并依次浸在去离子水、丙酮和无水乙醇中超声清洗 10 min, 采用高纯 (99.99%) 氮气将 FTO 玻璃表面吹干, 再置于 50 °C 的烘箱中保持 1 h 取出备用. 以尺寸均为 $\phi 60$ mm × 2 mm、纯度均为 99.99% 的 Al, Cu 和 Ag 圆片为靶材, 利用磁控溅射镀膜仪 (英国 Emitech 公司, K575X) 在清洗干净的 FTO 玻璃表面沉积 Al, Cu 和 Ag 金属层, 通过膜厚测控仪控制金属层厚度为 5 nm. 沉积过程中, 溅射室本底真空度达到 1×10^{-3} Pa 后开始充入氩气, 控制工作压力和溅射电流分别为 0.035 MPa 和 60 mA. 随后将沉积好的 M/FTO 薄膜置于中温管式炉中进行热退火. 退火过程中, 以 10 sccm 的流量通入高纯氮气, 控制温度为 400 °C 并保持 20 min. 退火结束后, 等待样品冷却至室温时取出备用. 热退火的 Al/FTO, Cu/FTO 和 Ag/FTO 薄膜样品分别编号为 A1, B1 和 C1.

2.2 热退火 M/FTO 薄膜的激光辐照处理

实验中激光辐照采用的是 532 nm 波长的二极管抽运 Nd:YVO₄ 纳秒脉冲激光器 (意大利 Bright Solution 公司, Wedge 532), 其重复频率为 1 kHz. 实验中, 使薄膜表面位于激光束焦后 2.5 mm 处. 若薄膜表面位于激光束焦点处, 则因薄膜太薄激光束有可能聚焦于玻璃表面, 若薄膜表面位于激

光束焦前, 则因玻璃透明激光束会聚焦于玻璃内部, 两种情况下薄膜表面均难以得到理想的处理效果^[18]. 采用的激光能量密度为 1.05 J/cm², 此时辐照到薄膜表面的平均光斑直径约为 90 μ m. 设置激光扫描方式为单一方向往返扫描, 扫描间距为 36 μ m, 扫描面积为 20 mm × 20 mm, 扫描速度为 10 mm/s. 激光辐照处理后的热退火 Al/FTO, Cu/FTO 和 Ag/FTO 薄膜样品分别编号为 A2, B2 和 C2.

2.3 表征与测试

薄膜的表面形貌由扫描电子显微镜 (SEM) (德国 Carl Zeiss 公司, EVO MA10) 观测. 薄膜的晶体结构采用 Cu-K α 辐射 ($\lambda = 0.1541$ nm) 的 X 射线衍射仪 (XRD) (德国 BRUKER, D8 ADVANCE) 进行检测. 薄膜的光学性能采用紫外可见分光光度计 (日本 SHIMADZU 公司, UV-2550) 测试. 薄膜的方块电阻采用数字式四探针测试仪 (苏州市百神科技有限公司, SX1944) 测试.

3 结果与讨论

3.1 表面形貌

图 1 为热退火 M/FTO 薄膜在激光辐照前后的 SEM 图. 由图可以看出, 激光辐照前, 热退火 M/FTO 薄膜表面呈现不太连续的岛状颗粒分布 (图 1 (a), (b) 和 (c)). 经激光辐照处理后, 由于激光的诱导作用, 样品 B2 和 C2 表面均产生了光栅结构 (波纹结构). 与样品 B2 (图 1 (e)) 相比, 样品 C2 表面的光栅结构更具完整性和规则性, 光栅之间凹槽的轮廓更为清晰 (图 1 (f)). 对于样品 A2 (图 1 (d)), 其表面未观测到光栅结构, 但激光辐照使得其表面的颗粒变得连续而致密, 颗粒尺寸略微增大. 金属材料表面产生的激光诱导光栅结构通常认为是由金属颗粒表面产生的等离子体激元沿表面传播时与入射激光发生干涉而形成的^[19], 而已有的研究也指出金属层氧化对于激光激发金属表面等离子体波的传播是不利的^[20], 基于此, 我们分析样品 A2 表面未形成光栅结构的原因可能是 Al 金属层在空气中容易氧化, 阻碍了等离子体波与入射激光之间的干涉. 而样品 A2 表面颗粒分布及尺寸变化可能与激光辐照时的热效应有关, Chen 等^[21] 的研究结果也表明激光辐照可使得薄膜表面颗粒由于重结晶而变大, 这将在 XRD 分析中进一步讨论.

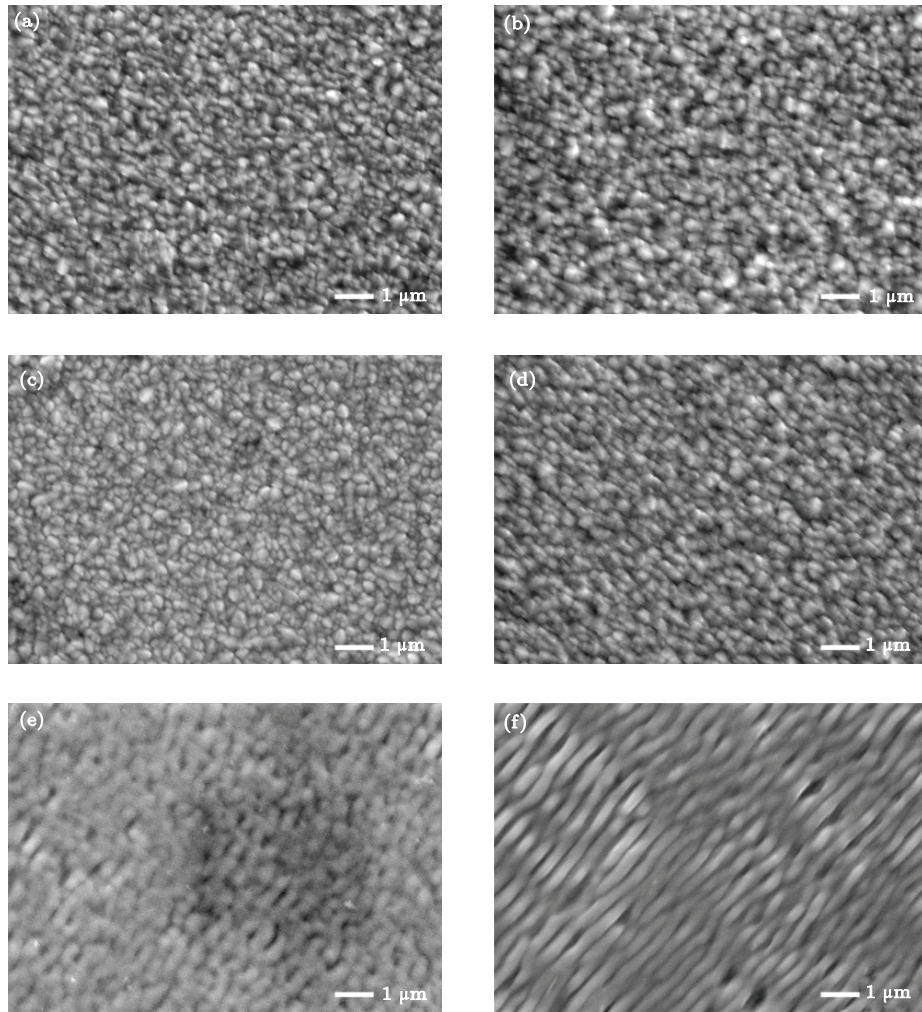


图1 不同热退火M/FTO薄膜表面的SEM图像 (a) A1; (b) B1; (c) C1; (d) A2; (e) B2; (f) C2

3.2 结构特性

图2给出了激光辐照前后热退火M/FTO薄膜的X射线衍射图谱. 由图看到, 所有薄膜都显示出对应于四方相SnO₂的衍射峰(JCPDS no. 41-1445), 并且具有(200)面择优生长特征. 其中C1和C2样品显示出较弱的Ag(200)峰, 证实了Ag面心立方结构的存在(JCPDS no. 65-2871). 图谱中未检测到Al, Cu单质或其氧化物的特征峰, 可能归因于金属层太薄[22]. 热退火M/FTO薄膜经激光辐照后, SnO₂(200)衍射峰强度均增强, 衍射峰的半峰宽(FWHM)均减小, 表明薄膜的晶化程度均有所提高. 薄膜的晶粒尺寸(D)可由如下Scherrer公式[23]计算:

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

其中 β 为衍射峰的FWHM, θ 为衍射角, λ 为X射线的波长($\lambda = 0.1541 \text{ nm}$). 激光辐照前后M/FTO

薄膜的SnO₂(200)衍射峰对应的FWHM和晶粒尺寸计算结果列于表1. 结果显示激光辐照后SnO₂(200)衍射峰的FWHM均明显变小, 晶粒尺寸得到显著增加, 表明薄膜中晶粒发生了再结晶生长, 其内部缺陷减少[21,24]. 已有的文献报道显示, 采用适当能量密度的激光对TCO基薄膜进行辐照处理时, 因激光辐照产生热效应, 可为薄膜中晶粒的生长和缺陷的修复提供热能, 最终对薄膜产生退火作用, 使薄膜结晶度得到一定程度的提高[25,26]. 类似地, 激光辐照时由热效应带来的退火作用应该是A2, B2和C2薄膜样品SnO₂(200)衍射峰和晶粒尺寸变化的根本原因.

表1 不同热退火M/FTO薄膜中SnO₂(200)衍射峰的FWHM和晶粒尺寸

样品	A1	B1	C1	A2	B2	C2
FWHM/(°)	0.330	0.311	0.319	0.288	0.284	0.279
晶粒尺寸/nm	30.78	32.49	31.78	35.11	35.65	36.30

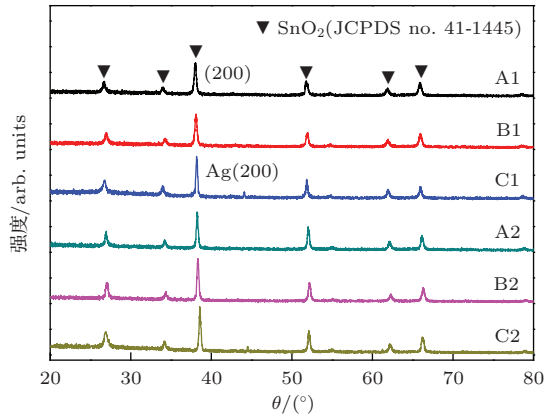


图2 (网刊彩色) 不同热退火 M/FTO 薄膜的 XRD 图谱

3.3 光学性能

图3显示了激光辐照前后热退火 M/FTO 薄膜的透光率图谱. 从图中看出, 激光辐照后薄膜的透光率均显著上升. 如 XRD 分析所述, 因激光辐照时的热效应对薄膜产生退火作用, 使得薄膜中的晶粒尺寸增大, 减少了薄膜对入射光的散射作用, 因此薄膜的透光率增大 [27]. 表2给出了激光辐照前后热退火 M/FTO 薄膜在 400—800 nm 波段的平均透光率. 可以看到, A1, B1 和 C1 薄膜的平均透光率分别为 76.8%, 75.5% 和 72.6%, 而 A2, B2 和 C2 薄膜的平均透光率分别为 79.4%, 80.2% 和 80.5%, 表明激光辐照后薄膜的平均透光率均有不同程度的提高. 相比较而言, 激光辐照后热退火 Ag/FTO 薄膜平均透光率提高的程度更大, 可能是由于其表面产生了相对完整和规则的激光诱导光栅结构 (图1(f)), 其具有相对较好的减反增透作用 [28]. 为了更好地分析激光辐照后薄膜透光率提高的原因, 根据 AFM 三维形貌图, 对 A2, B2 和 C2 样品的侧面轮廓分别进行简化, 并考察其对入射光的抗反射作用, 如图4所示. 由于 A2 样品表面为连续致密的颗粒, 表面轮廓相对平直, 入射光在薄膜/空气界面会产生较大的反射损失 (图4(a)). B2 样品表面产生了轮廓不甚清晰的光栅结构, 说明光栅之间的凹槽较浅, 据此将其侧面轮廓简化为起伏程度较小的凸锥状阵列, 入射光在此种表面上将以较小的反射角直接反射回薄膜内部, 同样会造成一定的反射损失 (图4(b)). 而 C2 样品表面为轮廓清晰的光栅结构, 光栅之间的凹槽较深, 可简化为起伏程度较大的凸锥状阵列, 入射光在该表面处以较大的反射角发生多次反射, 改变入射光方向的同时增加了入射

光的光程, 使入射光从薄膜/空气界面择优散射出去, 因而大大提高了透光率 (图4(c)).

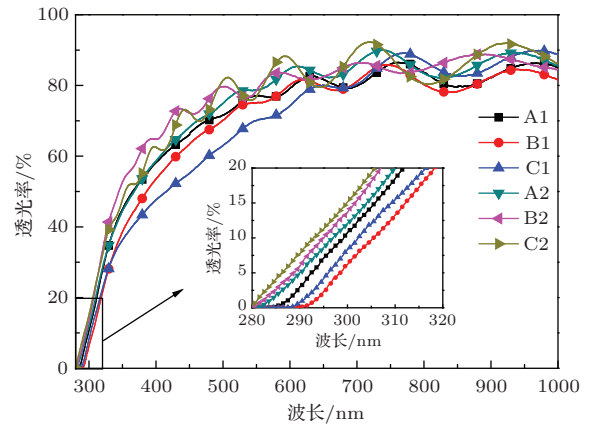


图3 (网刊彩色) 不同热退火 M/FTO 薄膜的透光率图谱

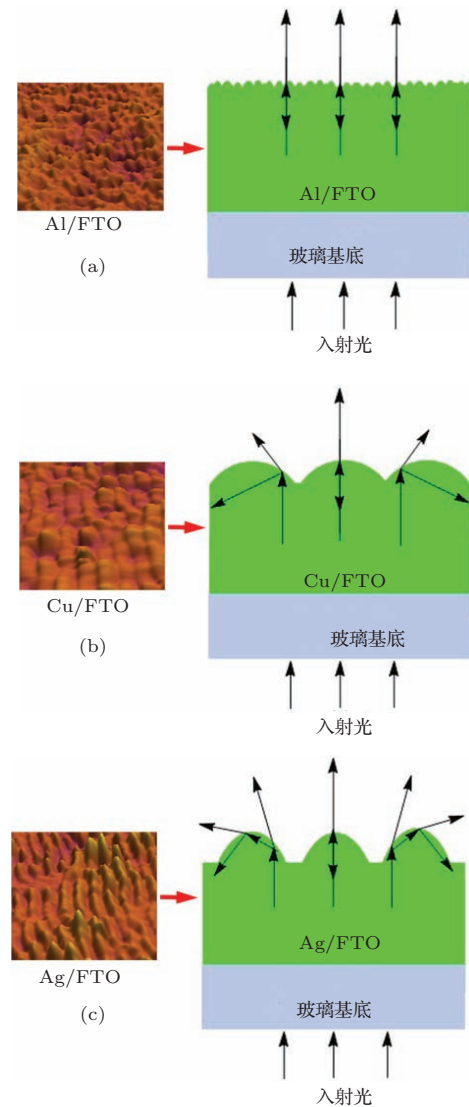


图4 (网刊彩色) 不同热退火 M/FTO 薄膜表面抗反射示意图 (a) A2; (b) B2; (c) C2

图3中的插图显示激光辐照后M/FTO薄膜的UV吸收边均向短波方向偏移,表明激光辐照后样品的光学带隙变宽^[29].为了进一步分析激光辐照对薄膜光学性能的影响,引入吸收边计算公式^[30,31]

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g), \quad (2)$$

其中, A 是常数, E_g 是禁带宽度, α 是光吸收系数, hv 是光子能量. $(\alpha hv)^2$ 与 hv 的关系如图5所示.由图看出,激光辐照后样品的禁带宽度均有所提高,分别从激光辐照前(A1, B1和C1)的4.17, 4.10和4.14 eV提高到激光辐照后(A2, B2和C2)的4.20, 4.22和4.25 eV.激光辐照后样品禁带宽度变宽可能与薄膜的结晶度提高和薄膜中载流子浓度增大有关(Burstein-Moss效应)^[29,32].

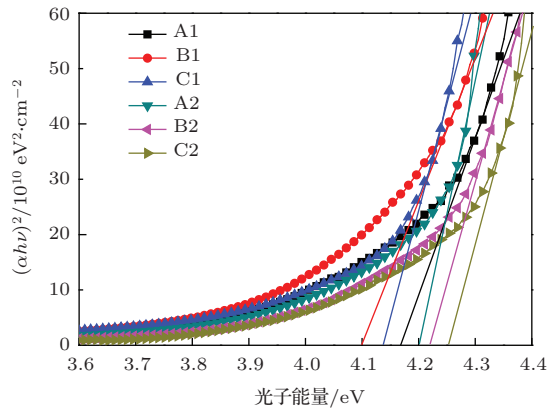


图5 (网刊彩色)不同热退火M/FTO薄膜的 $(\alpha hv)^2$ 与光子能量的关系图

3.4 综合光电性能

测试得到各热退火M/FTO薄膜样品的方块电阻如表2所示.结果显示,激光辐照后热退火Al/FTO, Cu/FTO和Ag/FTO薄膜样品的方块电阻分别从5.7, 7.2和5.6 Ω/sq 下降到5.1, 7.0和5.3 Ω/sq ,表明激光辐照也有利于各薄膜样品导电性的提高.如前所述,激光辐照时由热效应带来的退火作用使薄膜的晶粒尺寸增大,薄膜对载流子的散射减少,晶界势垒降低,有效提高了载流子的迁移率^[33,34],另外激光退火作用还会使薄膜中的内应力得到释放,部分晶体缺陷得以消除^[35],这些可能是各薄膜样品导电性得到提高的原因.值得注意的是,虽然激光辐照的热退火Ag/FTO薄膜样品具有相对高的透光率,但其导电性略低于激光辐照的热退火Al/FTO薄膜样品.众所周知,透明导电薄膜的实际应用要求其不仅具有良好的透光性,还要具

有优异的导电性.为了对热退火M/FTO薄膜的光电性能进行综合评价,引入品质因子(F_{TC})作为评价指标,其可表示为^[36,37]

$$F_{TC} = \frac{T^{10}}{R_S}, \quad (3)$$

式中, T 为薄膜样品在400—800 nm波段的平均透光率, R_S 为薄膜样品的方块电阻.品质因子越大,说明样品的综合光电性能越好.利用(3)式计算得到各热退火M/FTO薄膜样品的品质因子列于表2.表中结果显示,激光辐照后各薄膜样品的品质因子均得到较大程度的提高.其中激光辐照的热退火Ag/FTO薄膜的品质因子最大,为 $2.16 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$,比激光辐照前提高了近3倍,表明利用激光辐照诱导光栅结构并同步实现激光退火的策略确实能有效改善金属层复合透明导电薄膜的综合光电性能.

表2 不同热退火M/FTO薄膜的平均透光率、方块电阻及品质因子

样品	$T(400-800 \text{ nm})/\%$	$R_S/(\Omega/\text{sq})$	$F_{TC}/10^{-2} \Omega^{-1}$
A1	76.8	5.7	1.25
B1	75.5	7.2	0.84
C1	72.6	5.6	0.73
A2	79.4	5.1	1.95
B2	80.2	7.0	1.57
C2	80.5	5.3	2.16

4 结论

本文对三种热退火Al/FTO, Cu/FTO和Ag/FTO双层复合薄膜进行激光辐照处理,考察激光辐照对薄膜的表面形貌、结构及其光电性能的影响.结果表明:激光辐照后热退火Cu/FTO和Ag/FTO薄膜表面均产生了光栅结构,而热退火Al/FTO薄膜表面没有观测到光栅结构,其原因可能是Al金属层在空气中容易氧化,阻碍了等离子体波与入射激光之间的干涉.光栅结构具有减反增透作用,使得热退火Cu/FTO和Ag/FTO薄膜的透光率得到较大提高.激光辐照后,三种薄膜的导电性均得到一定程度的改善,其方块电阻分别从5.7, 7.2和5.6 Ω/sq 下降到5.1, 7.0和5.3 Ω/sq ,这是由于激光辐照的热效应引起的退火作用改善了薄膜的结晶度,薄膜的晶粒尺寸增大,晶界散射减少,同时薄膜中内应力得到释放,且缺陷减少,从而载流子迁移率得到提高.最后引入品质因子对

薄膜进行综合评价, 结果表明激光辐照后的热退火 Ag/FTO 薄膜品质因子为 $2.16 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$, 具有最佳综合光电性能。

参考文献

- [1] Wang L, Zhang X D, Yang X, Wei C C, Zhang D K, Wang G C, Sun J, Zhao Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 028801 (in Chinese) [王利, 张晓丹, 杨旭, 魏长春, 张德坤, 王广才, 孙建, 赵颖 2014 物理学报 **63** 028801]
- [2] Lü M S, Pang Z Y, Xiu X W, Dai Y, Han S H 2007 *Chin. Phys.* **16** 0548
- [3] Daniel P P, Michael G H, Paul G O, Wang Z B, Navid S, Nazir K, Lu Z H 2011 *Nano Lett.* **11** 1457
- [4] Xie J S, Chen Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 097703
- [5] Miyata T, Hikosaka T, Minami T 2000 *Sens. Actuators B* **69** 16
- [6] Berne 'de J C, Cattin L, Morsli M, Berredjem Y 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1508
- [7] Sutthana S, Hongsith N, Choopun S 2010 *Curr. Appl. Phys.* **10** 813
- [8] Li Z P, Men C L, Wang W, Cao J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 057205
- [9] Park H K, Kang J W, Na S I, Kim D Y, Kim H K 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **93** 1994
- [10] Wu C T, Ko F H, Lin C H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 171911
- [11] Chen H L, Chuang S Y, Lin C H, Lin Y H 2007 *Opt. Express* **15** 14793
- [12] Grann E B, Moharam M G, Varga M, Pommet D A 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 333
- [13] Li Y P, Li J X, Hao Y Z, Chen T H 2011 *J. Funct. Mater.* **10** 1378 (in Chinese) [李英品, 李俊新, 郝彦忠, 陈铁红 2011 功能材料 **10** 1378]
- [14] Li X, Guo W H, Lü Z J, Xing J H, Wang M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 024205 (in Chinese) [李侠, 郭文华, 吕志娟, 邢进华, 王鸣 2014 物理学报 **63** 024205]
- [15] Mendes P M, Jacke S, Critchley K, Plaza J, Chen Y, Nikitin K, Palmer R E, Preece J A, Evans S D, Fitzmaurice D 2004 *Langmuir* **20** 3766
- [16] D'Agostino R, Flamm D L 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 162
- [17] Lee H, Hong S, Yang K, Choi K 2006 *Microelectron. Eng.* **83** 323
- [18] Li B J, Huang L J, Zhou M, Ren N F, Wu B 2014 *Cream. Int.* **40** 1627
- [19] Sakabe S, Hashida M, Tokita S, Namba S, Okamuro K 2009 *Phys. Rev. B* **79** 033409
- [20] Chan G H, Zhao J, Schatz G C, Van Duyne R P 2008 *J. Phys. Chem. C* **112** 13958
- [21] Chen M F, Lin K, Ho Y S 2011 *Mater. Sci. Eng. B* **176** 127
- [22] Dimopoulos T, Radnoczi G Z, Horváth Z E, Brückl H 2012 *Thin Solid Films* **520** 5222
- [23] Song D, Aberle A G, Xia J 2002 *Appl. Surf. Sci.* **195** 291
- [24] Wang Y F, Zhang X D, Huang Q, Yang F, Meng X D, Song Q G, Zhao Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 247802 (in Chinese) [王延峰, 张晓丹, 黄茜, 杨富, 孟旭东, 宋庆功, 赵颖 2013 物理学报 **62** 247802]
- [25] Tseng M F, Hsiao W T, Chiang D, Huang K C, Chou C P 2011 *Appl. Surf. Sci.* **257** 7204
- [26] Liu C M, Fang L M, Zu X T, Zhou W L 2007 *Chin. Phys.* **16** 0095
- [27] Wang L W, Meng L J, Teixeira V, Song S G, Xu Z, Xu X R 2009 *Thin Solid Films* **517** 3721
- [28] Vaissié L, Smolski O V, Mehta A, Johnson E G 2005 *IEEE Photonic. Technol. Lett.* **17** 732
- [29] Lu H, Tu Y, Lin X, Fang B, Luo D, Laaksonen A 2010 *Mater. Lett.* **64** 2072
- [30] Pankove J I 1971 *Optical Processes in Semiconductors* (New Jersey: Prentice Hall Inc.) p34
- [31] Zhang G H, Deng X Y, Xue H, Xiang G 2013 *Chin. Phys. B* **22** 047803
- [32] Kim H, Horwitz J S, Qadri S B, Chrisey D B 2002 *Thin Solid Films* **420–421** 107
- [33] Lee S, Seong J, Kim D Y 2010 *J. Korean Phys. Soc.* **56** 782
- [34] Shanthi E, Dutta V, Banerjee A, Chopra K L 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 6243
- [35] Chen M F, Lin K, Ho Y S 2011 *Mater. Sci. Eng. B* **176** 127
- [36] Jiang X, Sun C, Hong R J, Dai D H 2008 *Transparent Conductive Oxide Films* (Beijing: Higher Education Press) p291 (in Chinese) [姜辛, 孙超, 洪瑞江, 戴达煌 2008 透明导电氧化物薄膜 (北京: 高等教育出版社) 第 291 页]
- [37] Haacke G 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 4086

Effects of laser irradiation on the photoelectric properties of thermal-annealed metal/fluorine-doped tin oxide transparent conductive films*

Huang Li-Jing¹⁾³⁾ Ren Nai-Fei²⁾³⁾† Li Bao-Jia¹⁾³⁾ Zhou Ming³⁾

1) (School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

2) (School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

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

(Received 3 July 2014; revised manuscript received 13 August 2014)

Abstract

Three kinds of bilayer films, i.e. aluminum (Al)/fluorine-doped tin oxide (FTO), copper (Cu)/FTO and silver (Ag)/FTO, are prepared by coating a commercial FTO glass with sputtered metal layers, and subsequently thermally annealed. Then all the as-annealed bilayer films are irradiated using a 532 nm nanosecond pulsed laser. X-ray diffraction (XRD) analysis confirms that all the laser-irradiated films have underwent laser annealing, resulting in an improvement in their photoelectric properties. More significantly, after laser irradiation, the as-annealed Ag/FTO film exhibits the highest increment in average transmittance (400–800 nm) that is increased from 72.6% to 80.5%. This should be attributed mainly to the formation of laser-induced grating structures that have anti-reflection effect on their surfaces. It is also found that the laser irradiation decreases the sheet resistance of the as-annealed Ag/FTO film from 5.6 to 5.3 Ω/sq . The annealing caused by thermal effect of laser irradiation gives rise to an increase in grain size, thereafter reduces carrier scattering at grain boundaries and enhances carrier mobility, which should be responsible for the improvement in conductivity. The calculated results show that after laser irradiation the figure of merit of the as-annealed Ag/FTO film is greatly increased from 0.73×10^{-2} to $2.16 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$, indicating a significant enhancement in the overall photoelectric property of the film. Laser irradiation can simultaneously achieve fabrication of grating structures and laser annealing, providing a new idea for performance optimization of metal-layer-composited transparent conductive films.

Keywords: transparent conductive film, laser irradiation, grating structure, photoelectric property

PACS: 42.62.-b, 68.55.-a, 78.20.-e, 73.90.+f

DOI: [10.7498/aps.64.034211](https://doi.org/10.7498/aps.64.034211)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB013000), the Jiangsu Province Research Innovation Program of College Graduate, China (Grant No. CXZZ13_0663), the Senior Talent Research Foundation of Jiangsu University, China (Grant No. 13JDG045), and the Open Research Fund Program of Jiangsu Provincial Key Laboratory of Center for Photon Manufacturing Science and Technology, China (Grant No. GZ201307).

† Corresponding author. E-mail: rmf_ujs@126.com