

文章编号:1007-2780(2019)08-0755-09

激光化学气相沉积法在 TFT-LCD 电路缺陷维修中的应用

张 伟^{1*}, 陈小英¹, 马永生², 付婉霞¹, 王 磊¹,
周 贺¹, 徐智俊¹, 王 博¹, 阮毅松¹

(1. 福州京东方光电科技有限公司, 福建 福州 350300;

2. 北京京东方传感技术有限公司, 北京 100176)

摘要: 为了维修 TFT-LCD 电路缺陷, 利用激光化学气相沉积法(LCVD)沉积钨薄膜, 讨论成膜参数对基底损伤、钨薄膜电阻率的影响。在空气氛围下, 波长为 351 nm 的脉冲激光诱导 $W(CO)_6$ 裂解成膜, 通过聚焦离子束-扫描电子显微镜(FIB-SEM)观察薄膜横截面研究成膜参数对基底损伤的影响, 再用高精度的电参数测试仪(EPM)测试不同参数下钨薄膜电阻。控制变量法表明, 激光功率或激光束光斑尺寸越大, 薄膜基底损伤越大, 但电阻率越小, 且不沉积薄膜时高功率激光辐射也不会造成基底损伤; 激光辐射速度越大, 基底损伤越小, 但电阻率越大。通过平衡工艺参数, 得到了电阻率为 $0.96 \Omega/\mu m$ 、对基底无损伤的钨薄膜, 成分分析表明此时 $W(CO)_6$ 已经完全裂解。

关键词: TFT-LCD; 激光化学气相沉积法; 缺陷维修; $W(CO)_6$; 电阻率

中图分类号: TN873.93 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193408.0755

Application of laser chemical vapor deposition in repairing TFT-LCD circuit defects

ZHANG Wei^{1*}, CHEN Xiao-ying¹, MA Yong-sheng², FU Wan-xia¹, WANG Lei¹,
ZHOU He¹, XU Zhi-jun¹, Wang Bo¹, RUAN Yi-song¹

(1. Fuzhou BOE Optoelectronics Technology Co., Ltd., Fuzhou 350300, China;

2. Beijing BOE Sensor Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The deposition of tungsten film through laser chemical vapor deposition (LCVD) was investigated for the repair of circuit defects of TFT-LCD panels, simultaneously the film-forming process parameters influencing the damage of thin film transistor substrate, electrical resistance of tungsten film were discussed. Firstly, the pulsed laser irradiation at 351 nm was used to deposit tungsten from $W(CO)_6$ in air atmosphere, and the damage of thin film transistor substrate at diverse film-forming process parameters were observed through focused ion beam-scanning electron microscope (FIB-SEM). Then, the electrical resistances of tungsten films at various film-forming process parameters

收稿日期: 2019-04-03; 修订日期: 2019-05-09.

* 通信联系人, E-mail: zhangwei0797@sina.com

were tested by high-accuracy Electrical parameter tester (EPM). The control variable method experiments indicate that the larger laser power or bigger size of slit placed in the beam path lead to more serious substrate damage but lower electrical resistivity, and high-power laser radiation without tungsten film deposition can't cause substrate damage; greater laser scan speed result in less substrate damage but higher resistivity by maintaining other effect factors constant. The lower resistivity ($0.96 \Omega/\mu\text{m}$) and good surface morphology tungsten film is obtained without damage of the thin film transistor substrate at balanced condition, and component analysis shows that $\text{W}(\text{CO})_6$ are complete decomposed.

Key words: TFT-LCD; laser chemical vapor deposition; defect repair; $\text{W}(\text{CO})_6$; electrical resistivity

1 引言

未来,随着 5G 网络的到来,基于 TFT-LCD 面板的电子产品(电视机、显示器等)分辨率将逐步朝着 4K、8K 发展,显示尺寸大屏化将成为主流^[1]。TFT-LCD 玻璃基板尺寸已经发展到了 10.5 代线($3\,370\text{ mm}\times 2\,940\text{ mm}$),对于大玻璃基板而言,因为一个小缺陷而放弃整个显示屏幕对生产良率和成本而言是一个巨大的损失,因此缺陷维修极其重要。TFT-LCD 面板主要存在冗余缺陷和开路缺陷,均可以通过激光技术维修。冗余缺陷即原本不应该有电路的位置存在冗余电路,开路缺陷即原本应该连接起来的电路位置却没有电路。通过脉冲激光的辐射烧蚀作用,可以轻易去除大部分冗余缺陷。但对于开路缺陷和部分冗余缺陷,需要在空气氛围中沉积额外的导电薄膜,维修工艺和过程复杂,难度很大。维修开路缺陷时,可以直接沉积导电薄膜将开路连接起来;部分冗余缺陷存在数据信号线和扫描信号线相连情况,若只是切除冗余缺陷会产生新的开路缺陷,因此需要切除冗余缺陷后再沉积导电薄膜将新产生的开路缺陷连接起来。通常而言,TFT-LCD 面板缺陷非常小(常小于 $10\text{ }\mu\text{m}$),且发生在孤立的区域,需要在空气氛围下实现维修,普通的半导体沉积薄膜工艺不能直接用于缺陷维修。

LCVD 是利用反应气体分子对特定波长的激光共振吸收,前驱体受到激光作用后发生解离的成膜方法。LCVD 技术无需掩膜版,通过控制激光束尺寸,就可以直接在特定区域沉积所需宽度的薄膜,是一种成本低廉且能形成特定图形结构的薄膜沉积技术。因此,LCVD 技术常常用于掩膜版、TFT-LCD 面板和印刷电路等的电路维

修,也常用于晶体管、电阻器和电容器等的制作^[2]。LCVD 反应类型通常有热解反应和光解反应两种。热解反应中,基底被激光加热到高温,毗邻高温基底的前驱体分子发生热分解,在基底形成薄膜;而光解反应是前驱体分子直接吸收激光发生光解反应,在基底形成薄膜^[3-4]。为了生产安全,LCVD 前驱体需要确保无毒性、安全性。由于反应腔室中的 H_2O 和 O_2 会对沉积的薄膜纯净度产生影响,大部分的 LCVD 过程需要在真空环境下进行,为了实现空气氛围下的生产需求,LCVD 设备设计至关重要。

大部分羰基化合物具有室温下的平衡蒸气压,在室温下具有稳定的固相,不会产生毒性;同时羰基化合物在紫光波长范围内表现出对光的强吸收性,在空气氛围下的反应过程安全;更重要的是,羰基化合物中的金属在化合物中表现为 0 价,无需额外还原剂即可反应成单质金属,也无需额外的能量裂解,避免了激光对局部区域的加热造成对基底的额外损伤,因此常用作空气氛围下 LCVD 的反应前驱体^[5-8]。目前,很多羰基化合物比如 $\text{Ni}(\text{CO})_4$ 、 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 、 $\text{Cr}(\text{CO})_6$ 、 $\text{Mo}(\text{CO})_6$ 和 $\text{W}(\text{CO})_6$ 等被用于沉积微米结构薄膜的前驱体,羰基化合物在激光作用下,直接在特定区域裂解后形成金属薄膜^[9]。但羰基化合物裂解时,羰基配体裂解产生的 C、O 在高温下极易形成 CO 气体,空气氛围中含有的 H_2O 和 O_2 ,这些对沉积薄膜的纯净度都会造成影响,因此,羰基化合物用作 LCVD 的前驱体时,反应区域的组分控制非常关键,反应氛围中的气体和前驱体反应过程产生的气体也需要采用额外措施去除。为了解决空气氛围中的 LCVD 产生的问题,在反应区域周围设置环形 Ar 气帘,用以避免反应区域外的空气进入,并用真空泵抽去尾气和未反应完全的残余物,这

种方法已经成为电路缺陷维修技术的通用方法^[1,10]。

LCVD 用于实际生产维修过程中,常常会发生基底薄膜损伤和电路电阻大的问题。基底薄膜发生损伤时,常导致基底薄膜非金属膜层产生裂缝,从而使沉积的薄膜与基底薄膜中的金属薄膜相连,造成维修电路电学性短路;而沉积薄膜电阻大,则导致维修电路信号传输延迟,这些都会导致维修失败。目前,研究人员都是直接在玻璃基底上采用不同条件沉积金属薄膜,测试沉积薄膜电阻、膜宽和膜厚等参数,观察沉积薄膜的表面损伤。华中科技大学和深圳清溢光电股份有限公司研究者将 $\text{Cr}(\text{CO})_6$ 用于 LCVD 的前驱体,在掩膜版的玻璃基底上沉积 Cr 薄膜,研究发现,激光功率大小、激光均匀性、激光辐射时间和气态 $\text{Cr}(\text{CO})_6$ 浓度对于沉积 Cr 薄膜的均匀性、厚度会产生显著的影响^[11]。Park 等人将 $\text{W}(\text{CO})_6$ 用于 LCVD 的前驱体,直接在 TFT-LCD 玻璃基底上沉积钨薄膜,讨论了激光功率大小、激光辐射速度、激光束光斑尺寸对钨薄膜厚度的影响,还发现激光功率越大,沉积钨薄膜的电阻率越小,同时认为 $\text{W}(\text{CO})_6$ 的裂解过程包含了光解反应和热解反应^[12]。Jeong 等人也是直接将钨薄膜沉积在 TFT-LCD 玻璃基底,对 $\text{W}(\text{CO})_6$ 裂解反应进行进一步研究,除了研究激光功率和激光辐射时间对沉积薄膜厚度和薄膜颗粒尺寸的影响外,还对沉积 W 薄膜进行成分和尺寸分析,发现沉积钨薄膜主要为 W、 WO_2 和 WO_3 构成,激光功率越大, WO_2 和 WO_3 组分所占百分比越大,而电阻率越小^[13]。然而,在实际电路缺陷维修中,金属薄膜沉积在基底薄膜而非玻璃基底上,基底薄膜由多种成分薄膜组成,且在不同区域薄膜组分和膜厚不一致,因此直接在玻璃基底沉积薄膜会忽略各种因素对基底薄膜的影响。因此,仅讨论玻璃基底的损伤而忽略基底薄膜的损伤对于研究钨薄膜维修缺乏指导意义。同时,研究人员大多直接在钨薄膜两端使用电阻测试仪或万用表探针测试钨薄膜的电阻,用光学仪器测试膜厚、宽度和长度后,再计算电阻率,手动操作和光学测量造成的误差不可避免。因此,更科学的观察成膜参数对基底薄膜损伤影响的实验和更精确的统计、测量沉积薄膜电学特性的方法对于电路缺陷维修研究有着重要的意义。

本文用波长为 351 nm 的紫外光诱导在空气氛围中的 $\text{W}(\text{CO})_6$ 前驱体裂解,在 TFT-LCD 薄膜电路上沉积钨薄膜金属线。首先,利用 FIB-SEM 代替传统 SEM 观察钨薄膜和基底薄膜横截面形貌,研究不同成膜工艺参数对基底薄膜损伤的影响;然后,再在玻璃基底上固定间距的金属膜间沉积钨薄膜,利用高精度、自动化的 EPM 测量各工艺参数下的钨薄膜电阻,采用电阻率衡量、统计钨薄膜电学特性。通过控制变量法实验,详细讨论了激光功率、激光束光斑尺寸和激光辐射速度对基底薄膜损伤、沉积钨薄膜电阻率的影响。通过平衡各工艺参数,我们得到了较低电阻率、表面形貌良好、对基底薄膜无损伤的钨薄膜。科学、新颖的实验视角对电路维修的实际应用具有很强的指导意义。

2 维修系统的设计构成及实验表征

2.1 维修系统的设计构成

图 1 为本文 LCVD 实验装置的示意图,主要包括激光光路单元、恒温 & 恒流气路系统以及可移动腔室 & 玻璃载台单元。激光光路单元集成在通过伺服马达控制实现 x 、 y 、 z 方向精准移动的移动单元,一束三次谐波固相脉冲激光($\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光源,美国 Photonics 公司, $\lambda = 351 \text{ nm}$, 4 kHz, 脉冲宽度 45 ns)经由控制光斑尺寸的镜片(Slit)(控制激光束尺寸,形状为正方形,可控范围为 $2 \sim 50 \mu\text{m}$)和目镜($\times 50 \text{ NUV}$,用以观察维修状况)等单元直达玻璃基底,同时利用电荷耦合器件摄像机拍摄监控基底表面,从而实现特定区域的激光辐射。在玻璃载台上固定一个检测激光功率的硅基光电二极管传感器,将激光光路单元移动到该位置后,通过调节光单元中的衰减器(Beam attenuator,控制激光功率大小)可获得所需功率大小的激光。利用 Ar 气(纯度为 99.999%)作为载体,将装在恒温不锈钢罐子的 $\text{W}(\text{CO})_6$ 前驱体(纯度 99.999%,韩国 UP 公司)经由恒温 & 恒流的气路系统运输到开放式腔室,其中罐子保持恒温(50°C),该温度确保罐内保持 35.8 Pa 蒸气压,从而使罐子内的 $\text{W}(\text{CO})_6$ 在进入管道时转变为气态,在激光辐射作用下气态 $\text{W}(\text{CO})_6$ 在选定区域发生裂解反应沉积成钨薄膜。腔室底部设置有环形孔,环形孔在沉积钨薄膜时向下吹 Ar 气,形成环

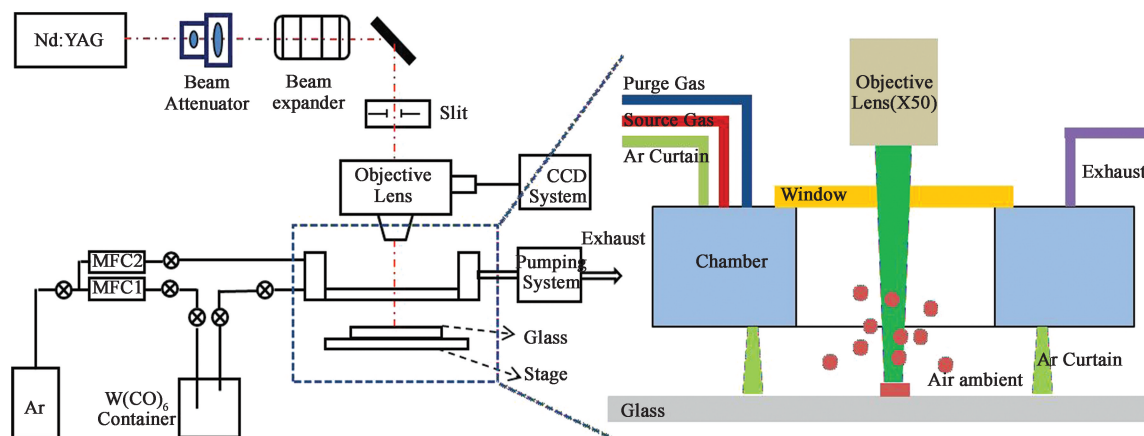


图 1 LCVD 维修系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of LCVD repair system

形持续吹气的 Ar 气帘,从而防止外面空气进入反应区域。未反应完全的残余物和反应产生的尾气(主要为 CO)也会污染钨薄膜,利用真空泵将未反应完全的残余物、裂解产生的 CO 气体送入尾气处理系统进行处理。腔室处还设有净化 Ar 管道,防止气态 $W(CO)_6$ 在石英制的窗口处冷凝。另外,气路系统的管道也保持恒温($55\text{ }^{\circ}\text{C}$),防止管道中的 $W(CO)_6$ 冷凝,从而导致沉积的钨薄膜太薄甚至管道堵塞。通过流量控制器 MFC1 确保承载 $W(CO)_6$ 进入气路系统的 Ar 气流量恒定为 200 mL/min ,通过 MFC2 控制的净化 Ar 和环形气帘流量 Ar 恒定为 350 mL/min 。

2.2 实验表征

对基底薄膜的损伤采用 FIB-SEM(德国 Zeiss 公司, Cross Beam540)进行观察,首先利用聚焦离子束 FIB(15 kV , 1.5 nA)沿一定角度在钨薄膜 & 基底选定区域做横截面剥除,由于聚焦离子束不会对选定区域外的膜层或基底造成损伤,利用 SEM(5 kV , 400 pA)可以观察钨薄膜 & 基底的横截面形貌和结构。在完整 8.5 代 TFT-LCD 玻璃($2\text{ }500\text{ mm}\times 2\text{ }200\text{ mm}$)上固定位置沉积有固定间距($220\text{ }\mu\text{m}$)的两个金属膜(由 TFT-LCD 中的铜薄膜和氧化铜锡薄膜组成),在金属膜间沉积钨薄膜,将玻璃送入 EPM 设备, EPM(韩国阳电子公司,电阻测试精度达 $10^{-3}\text{ }\Omega$)探针自动、精准搭接在金属膜上,实现钨薄膜电阻的精准测量,从而计算出各工艺参数下的电阻率($\rho = R/L$)。通过光学三维分析仪(3D Profiler, 美国 Bruker 公司)可以得到沉积钨薄膜的整体形貌,

采用 FIB-SEM 配置的 EDS 对钨薄膜进行成分分析。

3 实验结果和讨论

3.1 不同工艺参数成膜对薄膜基底的损伤讨论

本节采用控制变量法,针对激光功率、激光束 Slit 尺寸和激光辐射速度对薄膜基底损伤的影响做了详细的讨论。如图 2(a)标注所示,最上面一层为钨薄膜,中间为 TFT 基底薄膜,最底层为玻璃基底,并且 TFT 基底薄膜不同区域膜层数量和构成不一,基底薄膜膜层从上至下依次为 PVX 层、有源层、FGI 层、栅电极层,依次为 SiN_x 、 $a\text{-Si}$ 、 SiN_x 、Cu 薄膜。由于基底薄膜不同区域厚度不一致,薄膜台阶处易出现应力变化,出现钨薄膜或基底薄膜的开裂损伤,因此我们主要对薄膜台阶处进行 FIB-SEM 检测。若基底薄膜中的 PVX 层、有源层和 FGI 层受损,膜层完全裂开, TFT-LCD 电路通电后,钨薄膜很有可能会与栅电极层形成电学性相连而导致该区域电路短路,从而产生电学性不良。另外,在实际生产中,经过阵列基板涂布液晶、阵列基板与彩膜基板对盒、贴偏振膜等一系列工艺后,在按压应力作用下,膜层裂缝还可能进一步扩大。

在激光辐射速度均为 $4\text{ }\mu\text{m/s}$ 和光斑尺寸均为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 条件下,不同功率($0.8\sim 1.2\text{ mW}$)激光辐射气态 $W(CO)_6$ 后在基底薄膜上形成钨薄膜,钨薄膜 & 基底横截面如图 2 所示。激光功率为 0.8 mW 时,任何区域从上至下的膜层均未发现基底

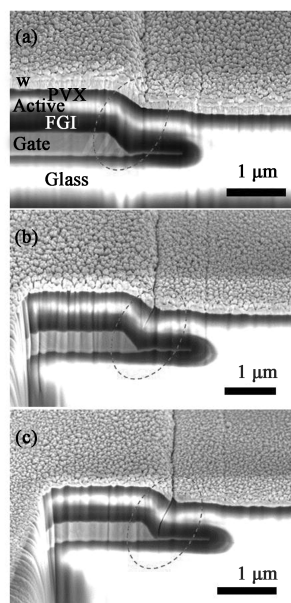


图2 0.8 mW(a), 1.0 mW (b), 1.2 mW(c) 激光功率作用下基底薄膜横截面的 SEM 图片(激光辐射速度 $4 \mu\text{m/s}$, 光斑尺寸 $7 \mu\text{m}$)。

Fig.2 SEM images of the cross section of thin film substrate at various laser power of 0.8 mW (a), 1.0 mW(b), 1.2 mW(c), respectively. Scan speed is $4 \mu\text{m/s}$, slit is $7 \mu\text{m}$.

薄膜或玻璃基底损伤;当激光功率增加到 1.0 mW 时,台阶处的 PVX 层和有源层出现明显的裂缝;激光功率继续增加到 1.2 mW 时,PVX 层、有源层和 FGI 层已经裂开。可以发现,当激光辐射速度、激光束光斑不变时,随着激光功率的增加,基底薄膜损伤越来越严重。 $\text{W}(\text{CO})_6$ 裂解反应包含光解和热解反应,激光功率越大,裂解反应越彻底,产生的温度也越高,造成基底损伤可能性更大。有研究者也发现,当激光功率大于 0.5 mW 时, $\text{W}(\text{CO})_6$ 的裂解时基底表面能够产生很高的温度($\sim 300^\circ\text{C}$),且功率越大,基底表面温度越高。为了得到导电性好、纯度高的钨薄膜,基底表面温度常常需要大于 450°C ,局部温度过高易导致基底薄膜损伤^[13]。

保证激光功率为 0.8 mW、辐射速度为 $4 \mu\text{m/s}$,在不同激光束光斑尺寸($6 \sim 10 \mu\text{m}$)条件下沉积钨薄膜,横截面如图 3 所示。激光束光斑为 $6 \mu\text{m}$ 时,未发现基底薄膜或玻璃基底有损伤;当激光束光斑增大到 $8 \mu\text{m}$ 时,PVX 层有明显裂缝;激光束光斑继续增大到 $10 \mu\text{m}$ 时,PVX 层、有源层和

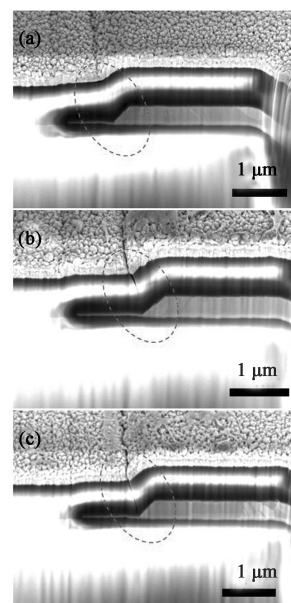


图3 $6 \mu\text{m}$ (a), $8 \mu\text{m}$ (b), $10 \mu\text{m}$ (c) 激光束光斑作用下基底薄膜横截面的 SEM 图片(激光功率 0.8 mW, 辐射速度 $4 \mu\text{m/s}$)

Fig.3 SEM images of the cross section of thin film substrate at different laser slit of $6 \mu\text{m}$ (a), $8 \mu\text{m}$ (b), $10 \mu\text{m}$ (c), respectively. Laser power is 0.8 mW, scan speed is $4 \mu\text{m/s}$.

FGI 层已经裂开。简而言之,其他条件不变时,激光束光斑尺寸越大,基底薄膜开裂程度越大。激光束光斑尺寸决定沉积的钨薄膜的宽度,光斑越大,沉积薄膜面积也越大,基底表面受光辐射和 $\text{W}(\text{CO})_6$ 热裂解影响的区域面积就更大,从而可能导致基底薄膜膜层更容易受损出现裂缝。

保持激光功率为 0.8 mW、激光束光斑为 $7 \mu\text{m}$,研究激光辐射速度变更($2 \sim 4 \mu\text{m/s}$)对基底薄膜损伤的影响,如图 4 所示。激光辐射速度为 $2 \mu\text{m/s}$ 时,PVX 层、有源层和 FGI 层已经裂成一条裂缝;激光辐射速度加大到 $3 \mu\text{m/s}$ 时,只有 PVX 层开裂,其余膜层并无损伤;当激光辐射速度加大到 $4 \mu\text{m/s}$ 时,所有膜层和玻璃基底均未发现任何损伤。也就是说,当其他条件不变时,激光辐射速度越大,对基底薄膜的损伤越小。激光辐射速度越小,即光辐射时间和裂解反应时间更长,基底薄膜也就更容易出现受损。

为了进一步揭示薄膜基底损伤是何原因导致的,我们将盛放 $\text{W}(\text{CO})_6$ 的罐子关闭,维修系统结构维持不变,保证激光能够直接辐射薄膜基底但

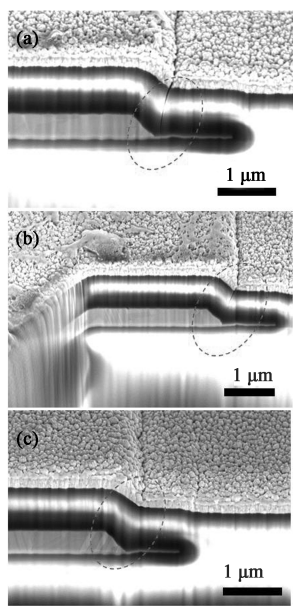


图 4 2 $\mu\text{m/s}$ (a), 3 $\mu\text{m/s}$ (b), 4 $\mu\text{m/s}$ (c) 激光辐射速度下基底薄膜横截面的 SEM 图片(激光功率 0.8 mW, 光斑 7 μm)。

Fig.4 SEM images of the cross section of thin film substrate at diverse scan speed of 2 $\mu\text{m/s}$ (a), 3 $\mu\text{m/s}$ (b), 4 $\mu\text{m/s}$ (c), respectively. Laser power is 0.8 mW, slit is 7 μm .

又不会沉积钨薄膜。保持低激光辐射速度和大光斑尺寸,改变激光功率,激光辐射的薄膜基底横截面如图 5 所示。由上面实验结果可知,当采用低激光辐射速度(2 $\mu\text{m/s}$)、大激光束光斑尺寸(10 μm)时,只要激光功率大于 0.8 mW,钨薄膜就会对基底薄膜造成损伤。但可以清晰地看到,当沉积钨薄膜激光功率为 0.4, 1.0, 1.6 mW 时,均不会导致基底薄膜或玻璃基底出现任何裂缝或损伤。有理由相信在使用 LCVD 维修 TFT-LCD 电路缺陷时,基底薄膜的损伤由 $\text{W}(\text{CO})_6$ 热解反应产生的高温所致,而不是光辐射导致基底薄膜导致裂解。

3.2 不同工艺参数对沉积钨膜电阻的影响

LCVD 用于维修 TFT-LCD 电路缺陷时,所沉积的金属薄膜电阻越大,维修电路电阻也越大,维修电路信号传输比无缺陷电路延迟更大,导致维修电路更容易发生电学性不良。迄今为止,研究者在研究 LCVD 用于维修电路缺陷时,都会测量金属薄膜的电阻,一般都是手动将万用表或电阻测试仪探针搭接在沉积薄膜两端,测量出电

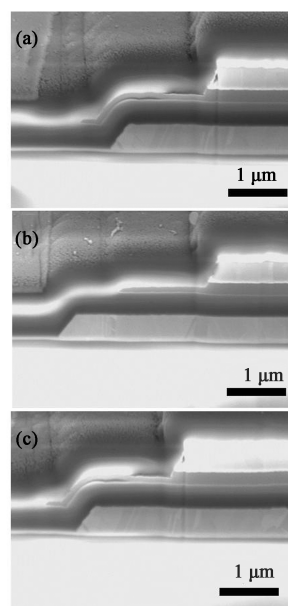


图 5 0.4 mW(a), 1.0 mW (b), 1.6 mW (c) 激光功率作用下基底薄膜横截面的 SEM 图片(激光辐射速度 2 $\mu\text{m/s}$, 光斑 10 μm)。

Fig.5 SEM images of the cross section of thin film substrate at various laser power of 0.4 mW (a), 1.0 mW(b), 1.6 mW(c), respectively. Scan speed is 2 $\mu\text{m/s}$, slit is 10 μm .

阻 R 后,再利用光学测量仪测量钨薄膜厚度、宽度和长度,通过 $\rho = RS/L$ (ρ 为薄膜电阻率, R 为电阻, S 为厚度与宽度之积, L 为长度)公式计算出金属薄膜电阻率。但是,钨薄膜金属线不同位置厚度、宽度值不尽相同,手动操作测量仪器也容易产生误差。另外,实际生产应用时,测量出电阻后,再测量薄膜厚度、宽度计算电阻率,对于实际应用没有指导意义,还增加了工作量。因此,我们采用精密度更高的仪器 EPM,通过自动化测试方法来测试钨薄膜电阻,再根据电阻率($\rho = R/L$)统计、衡量实验所得钨薄膜电学特性。

电阻测试方法如图 6 附图,在两个金属膜之间沉积钨薄膜,EPM 探针自动移动并搭接在金属膜中央位置后测量电阻。其中,金属膜在玻璃基底上的位置和间距均固定(金属膜间为玻璃基底而未沉积任何薄膜,间距 220 μm),面积为 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。另外,金属膜由 TFT-LCD 基底薄膜中的铜薄膜(位于上层)和氧化铟锡薄膜组成,铜薄膜厚度为 0.5 μm ,常温下铜电阻率低至 0.017 $\Omega \cdot \mu\text{m}$,则金属膜电阻仅为 0.034 Ω 。

EPM 探针在测试时可以自动精确搭接在金属膜正中央(误差小于 $10\text{ }\mu\text{m}$),本文中,不同条件下钨薄膜与金属膜电阻之和均大于 $100\text{ }\Omega$,远大于金属膜电阻。因此,不同实验条件搭接在金属膜上方的钨薄膜电阻可忽略不计,可以直接按金属膜间距统计钨薄膜长度,钨薄膜电阻率即为测量电阻除以金属膜间距。

在激光辐射速度为 $4\text{ }\mu\text{m/s}$ 和光斑为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同激光功率($0.6\sim 1.2\text{ mW}$)沉积所得薄膜的电阻率如图 6 所示。激光功率为 0.6 mW 时,电阻率为 $3.84\text{ }\Omega/\mu\text{m}$ 。随着激光功率的增大,电阻率变小,激光功率为 1.2 mW 时,电阻率仅为 $0.51\text{ }\Omega/\mu\text{m}$ 。这可能是因为 $\text{W}(\text{CO})_6$ 本身不导电,其他条件一定时,激光功率越大, $\text{W}(\text{CO})_6$ 裂解反应越完全,得到导电性更高的 W 、 WO_2 和 WO_3 ^[8,12-13]。

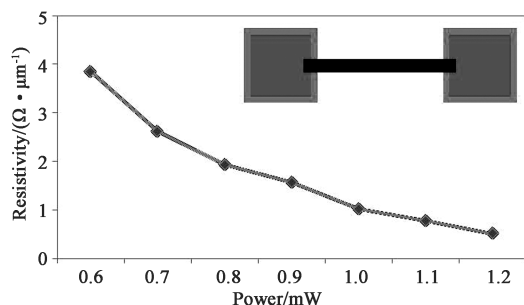


图 6 不同激光功率($0.6\sim 1.2\text{ mW}$)下沉积薄膜的电阻(激光辐射速度 $4\text{ }\mu\text{m/s}$,光斑 $7\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.6 Variation of the electrical resistivity of tungsten film deposited at various laser power ($0.6\sim 1.2\text{ mW}$). Scan speed is $4\text{ }\mu\text{m/s}$, slit is $7\text{ }\mu\text{m}$.

在激光功率为 0.8 mW 、激光束光斑为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同激光辐射速度($3\sim 8\text{ }\mu\text{m/s}$)沉积所得薄膜的电阻率如图 7 所示。激光辐射速度为 $3\text{ }\mu\text{m/s}$ 时,电阻率为 $0.79\text{ }\Omega/\mu\text{m}$,随着激光辐射速度逐渐加快,电阻率越大,激光辐射速度为 $8\text{ }\mu\text{m/s}$ 时,电阻率为 $2.52\text{ }\Omega/\mu\text{m}$ 。这可能是因为随着激光功率和激光束光斑恒定时,激光辐射速度越大,激光辐射时间越短,导致 $\text{W}(\text{CO})_6$ 裂解程度更低或沉积的薄膜更薄,电阻也就越小^[13]。

在激光功率为 0.8 mW 、激光辐射速度为 $4\text{ }\mu\text{m/s}$ 时,不同激光光斑尺寸($2\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)沉积所得薄膜的电阻率如图 8 所示。在光斑为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,电阻率为 $3.82\text{ }\Omega$,光斑尺寸越大,电阻率越小。当光斑为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 时,电阻率为 $0.69\text{ }\Omega$ 。这是

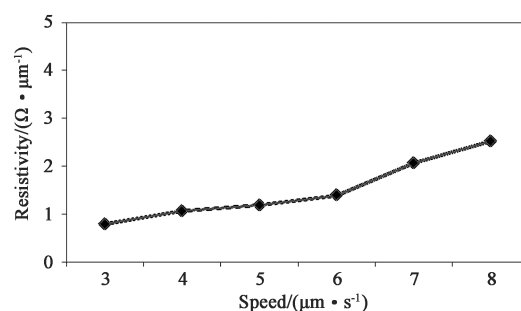


图 7 不同激光辐射速度($3\sim 8\text{ }\mu\text{m/s}$)下沉积薄膜的电阻(激光功率 0.8 mW ,光斑 $7\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 7 Variation of the electrical resistivity of tungsten film deposited at different scan speed ($3\sim 8\text{ }\mu\text{m/s}$). Laser power is 0.8 mW , Slit is $7\text{ }\mu\text{m}$.

因为激光束光斑尺寸越大,沉积的薄膜宽度越宽,沉积薄膜量也越大,电阻也就越小^[12]。

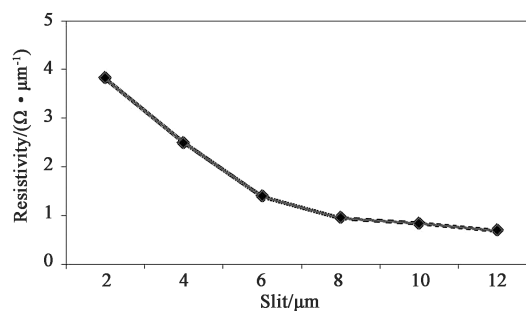


图 8 不同激光光斑($2\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)下沉积薄膜的电阻(激光功率 0.8 mW ,辐射速度 $4\text{ }\mu\text{m/s}$)

Fig. 8 Variation of the electrical resistivity of tungsten film deposited at diverse slit ($2\sim 12\text{ }\mu\text{m}$). Laser power is 0.8 mW , scan speed is $4\text{ }\mu\text{m/s}$.

3.3 沉积薄膜形貌表征和成分分析

控制变量法实验表明,激光功率或激光束光斑越大,基底损伤越大,但电阻率越小;激光辐射速度越大,基底损伤越小,但电阻率越大。经过平衡各工艺参数,在激光功率为 1.0 mW 、激光光路光斑尺寸为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 和激光辐射速度为 $5\text{ }\mu\text{m/s}$ 条件下,得到了电阻率低、对基底薄膜无损伤的钨薄膜,可以应用于 TFT-LCD 电路缺陷的维修。该条件直接沉积薄膜在玻璃基底上时,钨薄膜电阻率仅为 $0.96\text{ }\Omega/\mu\text{m}$,薄膜光学图如图 9(a)所示,3D 轮廓图像如图 9(b)所示,形貌良好。该条件直接沉积薄膜在 TFT-LCD 基底薄膜上(图 9(c))

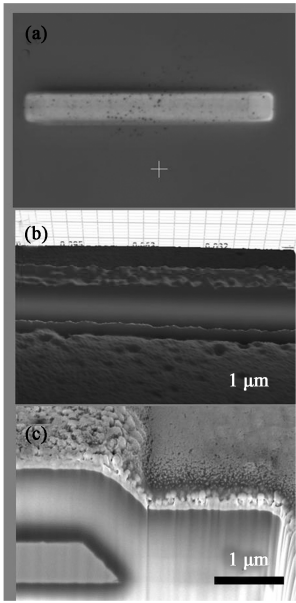


图 9 激光功率为 1.0 mW、光斑为 6 μm 和辐射速度为 5 $\mu\text{m}/\text{s}$ 条件下沉积薄膜的光学图(a)、3D 轮廓图(b)和横截面 SEM 图。

Fig.9 Optics image (a), 3D profiler image (b), cross section SEM image (c) of the tungsten film deposited at scan speed of 5 $\mu\text{m}/\text{s}$, Slit of 6 μm and laser power of 0.8 mW.

时,可以发现薄膜基底无任何开裂、损伤现象。

为了进一步揭示该条件下电阻率较低原因,保持激光光路光斑尺寸为 6 μm 和激光辐射速度为 5 $\mu\text{m}/\text{s}$ 条件不变,直接在玻璃基底上用不同激光功率(0.6,0.8,1.0 mW)沉积薄膜,薄膜成分如图 10 所示。在进行 EDS 分析前,测试样品镀有 Pt 以增强样品导电性,因此各条件下所沉积薄膜均检出 Pt。另外,玻璃基底中含有 N、O、Al、Si,在 15 kV 高电压下,各条件下所沉积薄膜均检测出以上元素,表明测试时特征 X 射线已到达玻璃基底。从图 10 中还可以发现,Si 和 W 元素在 X 射线能量为 1.7 keV 左右时的峰很接近,很难对这两个元素进行定量分析。但从元素的重量和原子比例可以知道图 10(c)中 EDS 图无 C 元素的峰,而图 10(a)、(b)均检测出 C 元素,即在激光功率为 1.0 mW 时, $\text{W}(\text{CO})_6$ 的羰基配体已经完全分解成 W、 WO_2 和 WO_3 ,这可能是该条件电阻率较低的根本原因。

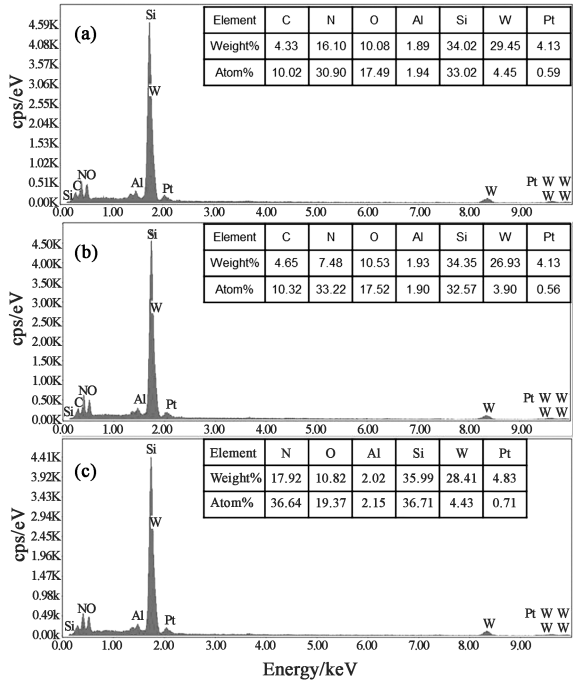


图 10 激光功率分别在 0.6 mW (a),0.8 mW (b), 1.0 mW (c)时所沉积薄膜的 EDS 图(激光辐射速度 5 $\mu\text{m}/\text{s}$,光斑 6 μm)。

Fig.10 EDS images of the deposited tungsten film at laser power of 0.6 mW (a), 0.8 mW (b) and 1.0 mW (c). Scan speed is 4 $\mu\text{m}/\text{s}$, slit is 6 μm .

4 结 论

本文在空气氛围下采用 LCVD 技术在 TFT-LCD 玻璃上沉积钨薄膜用以维修电路缺陷。采用 FIB-SEM 替代传统 SEM 观察钨薄膜横截面形貌,同时为了减小误差,首次采用高精度、自动化的 EPM 设备测试钨薄膜线阻率。通过控制变量法,详细讨论了激光功率、辐射幅度、光斑尺寸对 TFT-LCD 基底薄膜损伤和钨薄膜电阻率的影响。控制单一变量时,激光功率或激光束光斑越大,基底损伤越大,但电阻率越小;激光辐射速度越大,基底损伤越小,但电阻率越大。通过平衡工艺参数,在激光功率为 1.0 mW、激光光路光斑尺寸为 6 μm 和激光辐射速度为 5 $\mu\text{m}/\text{s}$ 条件下,得到了电阻率仅为 0.96 $\Omega/\mu\text{m}$ 、同时对基底薄膜无任何损伤的钨薄膜,能够很好地应用于 TFT-LCD 电路缺陷的维修。

参 考 文 献:

- [1] 刘莎,王丹,杨照坤,等.TFT-LCD 技术发展趋势浅析[J].液晶与显示,2018,33(6):457-463.
LIU S, WANG D, YANG Z K, *et al.* Key technology trends analysis of TFT-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(6): 457-463. (in Chinese)
- [2] 刘丽,韦建军,吴卫东,等.激光诱导化学气相沉积(LCVD)制膜技术[C]//2011 中国功能材料科技与产业高层论坛论文集(第三卷).重庆:重庆大学,2011.
LIU L, WEI J J, WU W D, *et al.* Technology of thin films by LCVD [C]//*Proceedings of 2011 China Functional Materials Technology and Industry Forum (Volume III)*. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [3] 宋登元.光诱导化学汽相淀积(LCVD)技术的研究进展[J].半导体技术,1989(2):1-6.
SONG D Y. Research progress of laser chemical deposition (LCVD) technology [J]. *Semiconductor Technology*, 1989(2): 1-6. (in Chinese)
- [4] 强游.激光化学气相沉积[J].真空与低温,1987(1):44-49.
QIANG Y. Laser chemical deposition (LCVD) [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 1987(1): 44-49. (in Chinese)
- [5] JACKSON R L, TYNDALL G W. Kinetics and mechanism of laser-induced photochemical deposition from the group 6 hexacarbonyls [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(4): 2092-2102.
- [6] LUNDQUIST R T, CAIS M. Ultraviolet spectra of organometallic compounds [J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 1962, 27(4): 1167-1172.
- [7] KAPLAN L H, D'HEURLE F M. The deposition of molybdenum and tungsten films from vapor decomposition of carbonyls [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1970, 117(5): 693-700.
- [8] NAMBU Y, MORISHIGE Y, KISHIDA S. High-speed laser direct writing of tungsten conductors from $W(CO)_6$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(25): 2581-2583.
- [9] 彭英才,王英民,李星文.激光用于半导体工艺的研究进展[J].稀有金属,1988,12(2):136-145.
PENG Y C, WANG Y M, LI X W. Research progress of laser used in semiconductor process [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1988, 12(2): 136-145. (in Chinese)
- [10] JEONG K, LEE J, BYUN I, *et al.* Synthesis of highly conductive cobalt thin films by LCVD at atmospheric pressure [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 68: 245-251.
- [11] 黄河,朱晓,朱长虹,等.激光化学气相沉积技术在掩模版修复中的应用[J].激光技术,2007,31(3):330-332.
HUANG H, ZHU X, ZHU C H, *et al.* Laser chemical vapor deposition used in photomask repair [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 330-332. (in Chinese)
- [12] PARK J B, KIM C J, SHIN P E, *et al.* Hybrid LCVD of micro-metallic lines for TFT-LCD circuit repair [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(2): 1029-1035.
- [13] JEONG K, LEE J, BYUN I, *et al.* Pulsed laser chemical vapor deposition of a mixture of W, WO_2 , and WO_3 from $W(CO)_6$ at atmospheric pressure [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 626: 145-153.

作者简介:



张伟(1991—),男,江西赣州人,工程师,2016 年于武汉理工大学获得硕士学位,主要从事 TFT-LCD 工艺技术的研究。