

ITO区黑化法修复亮点理论模型及工艺参数分析

吴国东, 乔律华, 韩海滨, 王彬, 张少芬, 聂竹华, 蔡云牧, 王贺卫

引用本文:

吴国东, 乔律华, 韩海滨, 等. ITO区黑化法修复亮点理论模型及工艺参数分析[J]. 液晶与显示, 2021, 36(2): 246–257.

WU Guo-dong, QIAO Lv-hua, HAN Hai-bin, et al. Theoretical model and process parameter analysis of ITO area blackening method for repairing bright spot[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 246–257.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0213>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黑矩阵扩散法修复亮点理论模型及影响因素分析

Model of BM diffusion method and effect actors analysis in bright dot repair

液晶与显示. 2016, 31(2): 164–172 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163102.0164>

晕开不良修复方法及影响因素的研究

Particle gap repair method and effect actors analysis

液晶与显示. 2017, 32(2): 110–116 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173202.0110>

AMOLED亮点不良修复方法

Method of repairing AMOLED's bright pixel defect

液晶与显示. 2020, 35(3): 198–204 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203503.0198>

Trimmer工艺参数对切割效果的影响

Effect of trimmer process parameters on trimming result

液晶与显示. 2018, 33(8): 661–668 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183308.0661>

ICP设备光刻胶灰化工艺中膜层残留的改善

Preventing method of film residue in PR ashing process based on ICP etcher

液晶与显示. 2020, 35(12): 1264–1269 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1264>

文章编号:1007-2780(2021)02-0246-12

ITO 区黑化法修复亮点理论模型及工艺参数分析

吴国东, 乔律华, 韩海滨, 王 彬, 张少芬, 聂竹华, 蔡云牧, 王贺卫*

(合肥京东方显示技术有限公司, 安徽 合肥 230012)

摘要: 本文基于飞秒激光烧蚀机制建立并通过实验验证了 ITO 区黑化法修复亮点的理论模型, 分析了各个工艺参数对修复效果的影响, 为亮点不良修复成功率的提升奠定基础。首先通过一系列实验点灯检测、显微镜图片和聚焦离子束 (FIB) 图片分析结果验证了所创建的修复理论模型; 然后利用对比试验分别探究了单脉冲激光单位面积的能量密度 e 、扫描速度 v 、激光频率 f 和光斑大小 a 等工艺参数对 ITO 区黑化效果的影响; 最后为了深入分析 ITO 区黑化法的烧蚀机理, 提出并验证了囊括所有工艺参数的变量“ w ”, 成功地亮点不良修复成功率的提升提供了理论依据。实验结果表明, a 在 $4.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$, e 在 $1.0 \text{ mJ}/\text{mm}^2$ 以上, w 在 $4\ 250 \sim 12\ 500 \text{ mJ}/\text{mm}^2$ 时, ITO 烧蚀后的黑化效果均达到了暗点标准 ($\geq 95\%$), 且在点灯条件下未产生其他不良。根据实验结果, 将该理论模型和工艺参数分析应用到量产, 亮点不良修复成功率达到了 95.5% 。

关键词: 黑化; 修复; 工艺参数; 修复成功率

中图分类号: TN141.9; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0213

Theoretical model and process parameter analysis of ITO area blackening method for repairing bright spot

WU Guo-dong, QIAO Lv-hua, HAN Hai-bin, WANG Bin,
ZHANG Shao-fen, NIE Zhu-hua, CAI Yun-mu, WANG He-wei*

(Hefei BOE Display Technology Co., Ltd., Hefei 230012, China)

Abstract: Based on the ablation mechanism of femtosecond laser, the theoretical model of ITO area blackening method for repairing bright spots was established and verified through experiments, and in order to improve the success ratio of repair, the influence of various process parameters were also analyzed on the remediation effect. In this work, the repair mode was firstly established by a series of experiments with light detection test, microscope images and Focused Ion Beam (FIB) images. Then, process parameters that effect success ratio were analyzed by contrast experiments, and these parameters included the energy density per unit area of single-pulse laser, scanning speed, the laser frequency and spot size. Finally, in order to deeply analyze the ablation mechanism of ITO area blackening method, the variable “ w ” containing all process parameters was proposed and verified, and it successfully provides a theoretical basis for improving the success rate. Experimental results indicated that, when the spot size was $4.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$, energy density per unit area of single-pulse laser was $1.0 \text{ mJ}/\text{mm}^2$ or more, and the “ w ” was $4\ 250 \sim 12\ 500 \text{ mJ}/\text{mm}^2$, the blackening effect of ITO after repairing

收稿日期: 2020-08-25; 修订日期: 2020-09-18.

* 通信联系人, E-mail: 401195730@qq.com

was up to the dark point standard and other undesirable phenomenon was not produced. According to the experimental result, the theoretical model and process parameter analysis was applied to mass production, the success rate of bright spot defective repair reached to 95.5%.

Key words: blackening method; repair; process parameters; success ratio

1 引言

薄膜晶体管液晶显示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)在生产制造过程中,不良种类和现象频繁发生。其中,像素亮点缺陷在行业内发生率约为0.5%,其对显示品质的影响已经成为行业内的共识^[1],如何针对微米级亮点缺陷进行便捷且高效的修复,减少修复带来的负面影响,是本领域技术人员研发的方向之一。

当前,针对成盒后液晶显示面板像素亮点不良的修复方法主要有焊接法、彩膜碳化和黑色矩阵扩散法,其目的均为将像素亮点修复成暗点^[2-4]。

然而,传统的激光焊接法因会产生低亮点和进行性不良而逐步被淘汰。彩膜碳化法由于激光灼烧后的红色、绿色和蓝色子像素灰度值很难达到暗点判定标准而未得到广泛应用。黑色矩阵扩散法在像素亮点修复领域应用广泛,无潜在进行性不良,修复后灰度高,遮盖效果良好,国内外已有相关的专利和研究论文,但是随着面板尺寸不断增大和黑色矩阵的比重逐步降低,其修复成功率也随之下降。

另一方面,随着对脉冲激光的深入研究和在微加工领域的广泛应用,其效率高、速度快、精度高等优势的非接触式加工模式得到了行业内的高度认可,并在工业^[5-6]、农业^[7]、医学^[8-9]等领域展现了巨大的潜力。

其中,飞秒激光以其极高的峰值、较小的损伤阈值、高的聚焦力等特性逐步成为21世纪的研究热点之一^[10]。相关研究^[11-12]成功实现了在厚度为2 mm的不锈钢样件上加工直径330 μm 的微孔,其超窄的脉冲宽度,使其在与材料相互作用时能够有效地降低激光作用点附近的热效应。

截至目前,液晶显示面板行业暂无利用飞秒激光修复亮点的量产实绩,同时没有公开的系统性研究论文和报道。本文研究工作首先成功地利用飞秒激光建立并通过实验验证了ITO区黑化法修复亮点的理论模型,其次对影响各个工艺参数进行详

细、全面地分析,提出了囊括所有工艺参数的变量,最后以此变量为亮点不良修复成功率的提升提供了一定的理论依据。本研究为该方法后续的深入分析奠定基础,同时为飞秒激光在液晶面板相关领域的推广应用提供一定的理论依据。

2 ITO区黑化法修复模型

2.1 修复方法

飞秒激光器加工的相关研究均表明了加工过程所存在的烧蚀机制^[10]。本文ITO区黑化修复法的基本理论模型为:利用特定工艺参数的飞秒激光从阵列基板的一侧,如图1(a)所示,对于像素单元的公共电极、无机绝缘层、像素电极、配向膜层进行灼烧,如图1(b)所示。最终使阵列基板正对亮点子像素部分的ITO滤光区灰度值达到暗点标准,达到遮光目的,修复前后的效果分别如图2(a)、(b)所示。

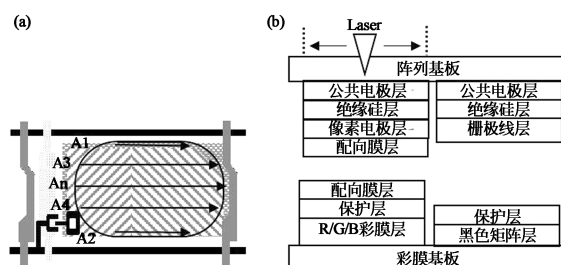


图1 子像素的修复模型示意图。(a)平面图;(b)显示区剖面图。

Fig.1 Plan (a) and display area cross-section (b) of the sub-pixel for repairing mode.

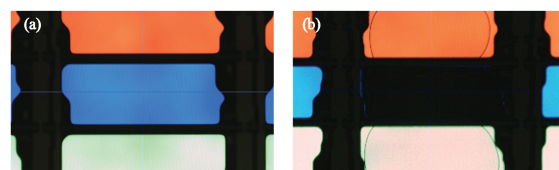


图2 子像素的显示区域。(a)修复前;(b)修复后。

Fig.2 Display area of a sub-pixel before (a) and after (b) repairment.

实验样品为某款 165.1 cm (65 in)ADS 显示模式的液晶显示屏。其中,公共电极、像素电极分别为第一层 ITO、第二层 ITO,是一种 N 型半导体材料($n(\text{In}_2\text{O}_3):n(\text{SnO}_2)=9:1$)。绝缘硅层^[13](SiN_x)介于公共电极和像素电极之间。像素电极上层涂布形成的配向膜^[14]为有机高分子聚合物(聚酰亚胺)。

2.2 修复设备简介

飞秒激光灼烧法所使用的设备^[15]主要由激光器及激光聚焦光路组成的光学系统,显示平板承载基台、控制激光聚焦光路系统移动的机械系统和修复效果软件检测单元组成的检测系统组成,如图 3。

飞秒激光器为脉冲型激光器,工作时以固定频率的单个脉冲进行辐射。首先,激光器按设定

频率进入光路系统,然后经轴向尺寸被加工至所需的光斑大小,聚焦后到达加工端,最后在控制系统下使得激光束按照特定参数对亮点不良进行精确修复。

2.3 修复效果检测

在修复完成后,设备检测单元对修复效果进行第一次检测,检测标准为:(1)像素 ITO 显示区的光线遮挡率 $\geq 95.0\%$ 。其次,点灯器件会对修复效果进行第二次检测,检测标准为:(2)修复后 ITO 区的点灯灰度值达到暗点标准,且未产生其他不良。

3 工艺影响因素分析

3.1 激光器及设备因素

半导体材料在一定脉冲宽度的飞秒激光作用下,当激光能量密度高于某个定值就会发生烧蚀^[10]。本实验中,与飞秒激光相关的工艺参数包括:激光单脉冲能量 E 、激光频率 f 、脉宽 t 、激光焦距 L ,扫描速度 v 、加工端光斑边长 $a \times b$ 等,列于表 1 中。

以上参数中,脉宽为固定参数,由激光器自身工作物质、构造决定,焦距也为设备固定参数。

单个脉冲激光能量、激光频率、扫描速度、加工端光斑大小等 4 个变量均存在影响激光能量密度的可能性^[16-18]。

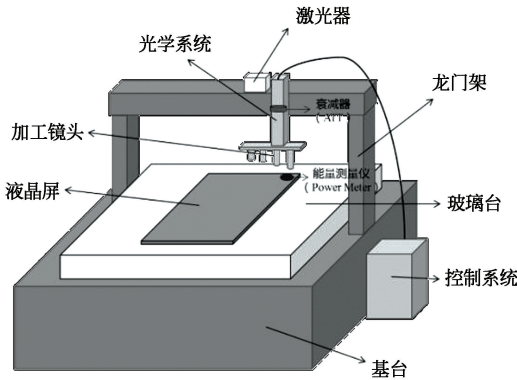


图 3 修复设备结构示意图

Fig.3 Structure scheme of repair equipment

表 1 飞秒激光相关的工艺参数

Tab.1 Relevant process parameters of the femtosecond laser

参数类型		说明	备注
激光器 相关参数	单脉冲激光能量(E)	单个脉冲的激光能量	可调范围 $0 \sim 2.4 \mu\text{J}$
	单脉冲激光单位面积能量(e)	单个脉冲的激光在加工光斑单位面积的能量	可调范围 $0 \sim 2.4 \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$
	激光频率(f)	每秒发射激光脉冲数量	可调范围 $125 \sim 800 \text{ kHz}$
	脉宽(t)半高宽	半个脉冲持续时间	固定值(500 fs)
	激光焦距(L)	—	固定值
设备 相关参数	扫描速度(v)	激光扫描时光束的移动速度	$0 \sim 300 \mu\text{m/s}$
	加工光斑尺寸($a \times b$)	激光光束的横截面大小	可调范围 $1 \sim 40 \mu\text{m}$
		a :光斑沿扫描方向的边长	
		b :光斑垂直于扫描方向的边长	
	最大加工光斑尺寸($a_{\max} \times a_{\max}$)	激光束无遮挡时在焦点位置的横截面尺寸 (正方形)	固定值

3.2 常见的修复失败模式

常见的失败模式主要有两种,第一种为黑化后像素显示区的光线遮挡率低于95.0%,第二种为在点灯条件产生其他不良,如图4、图5所示。

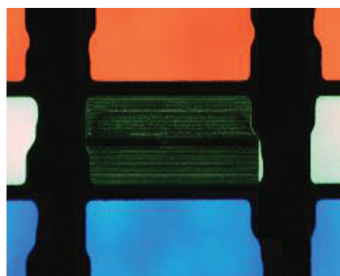


图4 第一种修复失败模式

Fig.4 First mode of repairing failure

第一种失败模式是由于加工端激光功率密度较低,未能将ITO区烧蚀后完全黑化。

第二种失败模式是由于激光能量密度过大,导致激光透过液晶作用于彩膜侧的能量过大,见图5(a),使其中色阻材质中的过渡金属离子(铁、铜等)发生化学反应后浸出,进而影响点灯时周边显示效果(如周边发黑等),如图5(b)所示。

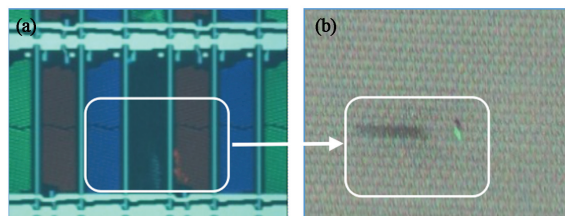


图5 第二种修复失败模式的子像素显示区(a)和点灯现象(b)

Fig.5 Sub-pixel display area (a) and lighting phenomenon (b) of the second repairing failure mode

4 实验

为验证本文建立的修复模型,制作某型号产品在修复成功前、后的样品,分析显微镜、点灯画面下的图片和现象,同时进行聚焦离子束(FIB)图片表征。

另一方面,为验证常见的两种修复失败模式,对修复失败的样品进行FIB图片分析。

为分析激光及设备工艺参数对黑化效果和修

复成功率的影响,我们通过分别对与其相关的单脉冲激光单位面积的能量、激光频率、扫描速度、加工端光斑边长等4个变量进行控制变量分析实验。

实验中,单脉冲激光能量 E 无法直接设定或测量,本文利用加工端激光能量测量仪(Power Meter)可测得加工端时的总功率 P 。进行后续工艺参数换算,如图6所示。



图6 激光能量测量仪

Fig.6 Laser energy measuring instrument(Power Meter)

5 结果与讨论

5.1 修复模型验证

图7(a)、(b)分别为修复前后ITO区的FIB图片。图7(a)各断面位置按从上到下的顺序分别为配向膜层,厚度为65 nm;第二层ITO,厚度均为40 nm;绝缘硅层,厚度为600 nm;第一层ITO,厚度为40 nm。各断面层紧贴在一起。综上,ITO区总厚度为 $0.745 \mu\text{m}$,实际测量值和标准一致。图7(b)为修复后的ITO区的FIB图片,可看出,烧蚀后各断面的层次性已经消失,并凝结为块状,测出ITO区域总厚度约为 $0.73 \mu\text{m}$,与修复前几乎相同。

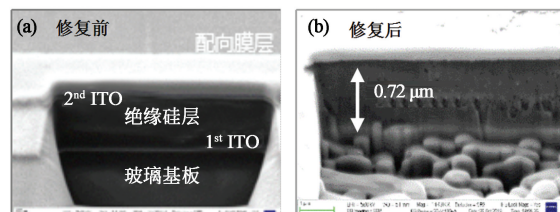


图7 修复前(a)和修复后(b)子像素ITO区域的FIB图
Fig.7 FIB images of a sub-pixel's ITO area before (a) and after (b) repairment

图8(a)、(b)分别为修复前后ITO区的SEM图片,对比图1(a)和图8(a),在单独背光检测条件下,烧蚀后ITO表面出现黑化的现象,这表明ITO

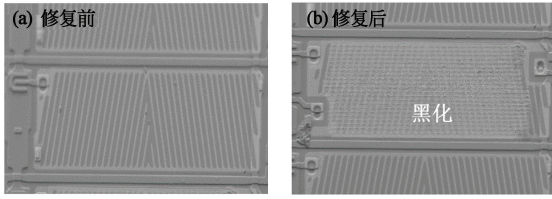


图 8 修复前(a)和修复后(b)子像素 ITO 区域的 SEM 图
Fig.8 SEM images of a sub-pixel's ITO area before (a) and after (b) repairment

区被飞秒激光烧蚀后黑化,达到遮光的目的。

图 9(a)、(b)分别为子像素修复前、后的彩膜侧基板侧的 FIB 图片,各断面位置按从上到下的顺序分别为配向膜层、OC 保护层、彩膜色阻层和玻璃基板。由图片可知,修复前后各断面均未发生变化,同时未产生热裂纹,表明其未受烧蚀影响。

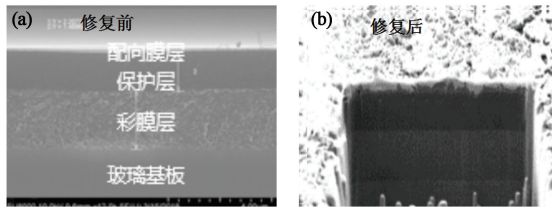


图 9 修复前(a)和修复后(b)子像素彩膜基板侧显示区域的 FIB 图

Fig.9 FIB images of a sub-pixel's color film substrate side before (a) and after (b) repairment

值得注意的是,为排除配向膜聚酰亚胺中碳元素对验证修复模型的影响,选择一组未进行配向膜工序的阵列基板开展 ITO 区激光烧蚀实验,实验结果表明,ITO 区仍被烧蚀并凝结为黑色块状化合物。

结合相关 ITO 靶材黑化物的研究^[19],当 ITO 区主要成分 In_2O_3 、 SnO_2 被部分还原并转变成黑色亚氧态 InO 、 SnO 时,ITO 表面会呈现黑色。

综上,本文所建立的修复模型为阵列基板中第一层 ITO、第二层 ITO 和绝缘硅层在激光烧蚀后凝结为黑色混合物,同时配向膜被碳化,最终使得阵列基板 ITO 区被黑化并形成暗点的目的。

5.2 修复失败模式验证

为验证前文所述的两种常见失败模式,对修复失败的样品进行 FIB 图片分析。

第一种失败模式为 ITO 区烧蚀后未黑化完全,导致像素显示区的光线遮挡率低于 95.0%。

其 FIB 图片如图(10)所示。由图可知,修复后的 ITO 区仅第一层 ITO 和部分绝缘硅层被激光烧蚀凝结,部分区域的层次性依然存在,这表明激光能量未能使子像素的 ITO 区完全凝结并黑化,导致黑化效果较差。

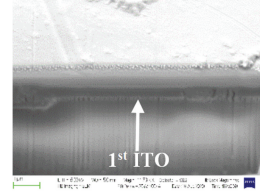


图 10 修复后子像素 ITO 区域的 FIB 图片
Fig.10 FIB image of a sub-pixel's ITO area after repairment

第二种修复模式为激光透过液晶作用于彩膜侧的能量过大,使其中色阻材质中的过渡金属离子发生化学反应后浸出,影响周边显示效果。其 FIB 图片如图(11)所示。对比图 9(a)可知,彩膜基板中配向膜和保护层均被透过液晶的高能量激光碳化,同时彩膜层上方凹凸不齐,这表明激光已经作用于彩膜层。这就是第二种修复失败模式。

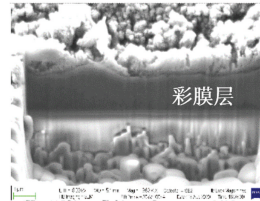


图 11 修复后子像素彩膜基板侧显示区域的 FIB 图片
Fig.11 FIB image of a sub-pixel's color film substrate side after repairment

5.3 激光器及设备因素影响

当飞秒激光以单脉冲能量 E_0 ,激光频率 f_0 ,扫描速度 v_0 ,加工光斑大小 $a \times b$ 加工时,测得加工端时的总功率 P_0 ,计算单位面积上接受到的激光总能量 w 如下。

首先,单个激光脉冲到达工作面后的能量为

$$E_0 = \frac{P_0}{f_0}, \quad (1)$$

那么,单个激光脉冲到达工作面后对单位面积上施加的能量 e :

$$e = \frac{P_0}{f_0 \times ab}, \quad (2)$$

其次,以速度 v_0 进行扫描时,相邻两个光斑的距

离 d 为

$$d = \frac{v_0}{f_0}, \quad (3)$$

再次,激光对单个加工光斑尺寸面积上施加了 n 次脉冲:

$$n = \frac{a}{d} = \frac{a}{v_0/f_0} = \frac{af_0}{v_0}, \quad (4)$$

最后得到 w :

$$w = n \times e = \frac{af_0 P_0}{f_0 \times ab \times v_0} = \frac{P_0}{b \times v_0}. \quad (5)$$

相关研究^[17]对 e 计算时,默认是在最大光斑面积下的单脉冲能量:

$$e' = \frac{E'_0}{S'_{\max}}. \quad (6)$$

本实验中,为探究光斑大小($a \times b$)下 e 的均匀性,设置 $f = 125$ kHz, $a = b$, 固定衰减器 ATT, 在不同光斑 $a \in (1 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m})$ 条件下得到实时测量的 P 值,最后根据公式(1)计算 e , 实验结果见表 2 和图 12。

表 2 激光总功率 P 、单脉冲激光单位面积能量 e 分别和加工光斑大小 a 的关系

Tab.2 Relationship between spot size and the total laser power, and the relationship between spot size and the unit area energy of mono-pulse laser respectively

No.	$a/\mu\text{m}$	f/kHz	P/mW	$e/(\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2})$
1	1	125	0.2	1.9
2	2	125	0.9	1.7
3	3	125	2.5	2.2
4	4	125	5.1	2.6
5	6	125	12.4	2.7
6	8	125	22.1	2.8
7	10	125	33.5	2.7
8	12	125	45.8	2.5
9	14	125	60.8	2.5
10	16	125	75.6	2.4
11	18	125	90.2	2.2
12	20	125	104.3	2.1
13	22	125	118.1	2.0
14	24	125	130.5	1.8
15	26	125	142.6	1.7
16	28	125	153.7	1.6
17	30	125	163.7	1.5

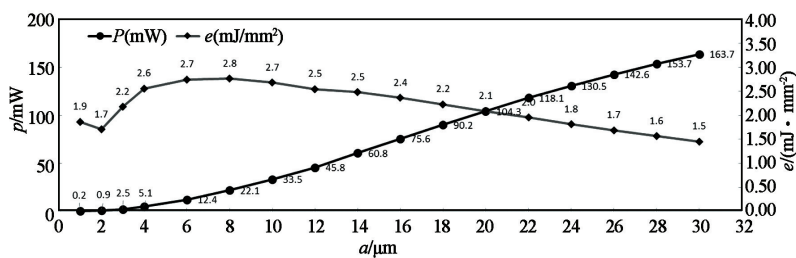


图 12 激光总功率 P 、单脉冲激光单位面积能量 e 分别与加工光斑大小 a 的关系。

Fig.12 Relationship between spot size and the total laser power, and the relationship between spot size and the unit area energy of mono-pulse laser, respectively.

结果表明,随着加工光斑持续增大,激光总功率 P 也逐渐增大,但是单脉冲激光单位面积能量 e 呈曲线对应关系,这表明在聚焦系统下不同光斑下的能量密度 e 均匀性较差,不适用于公式(6)。值得注意的是,在 $a \in (4.0, 10.0) \mu\text{m}$ 时,能量密度 e 分布均匀性较好,为 $(2.7 \pm 0.1) \text{mJ}/\text{mm}^2$ 。

实验中,由于 E 无法直接设定和测量,我们根据公式(1)、(2)将单脉冲能量 E 通过衰减器调节 P 转换为 e 进行换算。

首先,通过 4 轮实验,每轮实验只改变 1 个参数,另外 3 个参数固定,每轮 8~10 组,对每组参数进行 5 次烧蚀测试,然后利用图像检测软件对 5 次黑化效果进行检测,得出每张照片光线遮挡率的值,最后算得平均值。同时,为避免光斑长边过长或短边过短对光斑内能量密度 e 分布均匀性的影响,设置 $a = b \in (4.0, 10.0) \mu\text{m}$ 。综上,可分别探究 e 、 f 、 v 、 a 四个参数对黑化效果影响,并根据公式计算 e 、 w ,实验条件见表 3。

表 3 第 1~4 轮实验条件以实验结果
Tab.3 Experimental conditions and results of 1st~4th rounds

No.	$P_0 /$ mW	$f /$ kHz	$v /$ ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$a /$ μm	$e /$ ($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$w /$ ($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2}$)	遮光率/ %	是否产 生不良
第一轮								
1	1.8	125	200	4	0.9	2 238.8	4.0	无
2	2.8	125	200	4	1.4	3 437.5	63.3	无
3	3.8	125	200	4	1.9	4 737.5	96.1	无
4	5.1	125	200	4	2.6	6 400.0	98.9	无
5	6.3	125	200	4	3.2	7900	99.1	无
6	7.7	125	200	4	3.8	9575	98.8	无
7	9.1	125	200	4	4.6	11 425	98.9	无
8	11.3	125	200	4	5.7	14 137.5	98.5	有
第二轮								
1	2.8	125	200	4	1.4	3 437.5	63.9	无
2	4.0	180	200	4	1.4	4 968	96.5	无
3	5.2	235	200	4	1.4	6 486	97.8	无
4	6.4	290	200	4	1.4	8 004	98.4	无
5	7.6	345	200	4	1.4	9 522	98.8	无
6	8.8	400	200	4	1.4	11 040	98.7	无
7	10.0	455	200	4	1.4	12 558	98.6	无
8	11.3	510	200	4	1.4	14 076	98.4	有
9	12.5	565	200	4	1.4	15 594	98.1	有
10	13.7	620	200	4	1.4	17 112	97.3	有
第三轮								
1	2.8	125	300	4	1.4	2 333.3	5.5	无
2	2.8	125	250	4	1.4	2 800	46.6	无
3	2.8	125	200	4	1.4	3 500	68.9	无

续 表

No.	P_0 / mW	f / kHz	v / ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	a / μm	e / ($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2}$)	w / ($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2}$)	遮光率/ %	是否产生不良
4	2.8	125	150	4	1.4	4 666.7	96.2	无
5	2.8	125	100	4	1.4	7 000	97.6	无
6	2.8	125	50	4	1.4	14 000	98.9	有
7	2.8	125	20	4	1.4	35 000	98.9	有
8	2.8	125	10	4	1.4	70 000	96.3	有
第四轮								
1	2.8	125	200	4	1.4	3 437.5	59.5	无
2	4.3	125	200	5	1.4	4 312.5	95.7	无
3	5.2	125	200	5.5	1.4	4 743.8	96.5	无
4	6.2	125	200	6	1.4	5 175	97.6	无
5	8.5	125	200	7	1.4	6 037.5	98.9	无
6	11.0	125	200	8	1.4	6 900	98.8	无
7	14.0	125	200	9	1.4	7 762.5	99.1	无
8	17.3	125	200	10	1.4	8 625	98.1	无

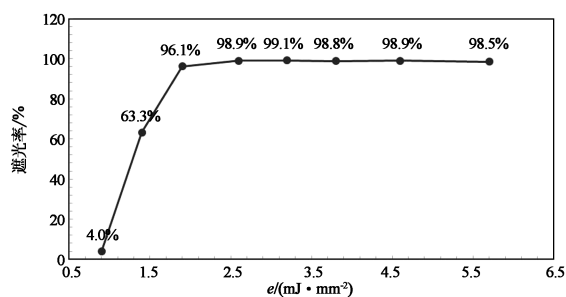


图 13 遮光率与单脉冲激光单位面积能量的关系
Fig.13 Relationship between shading rate and the unit area energy of single pulse laser

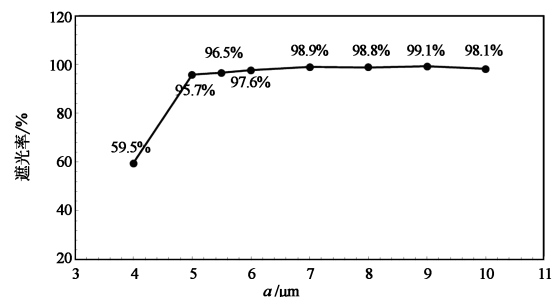


图 15 遮光率与光斑大小的关系
Fig.15 Relationship between shading rate and the spot size

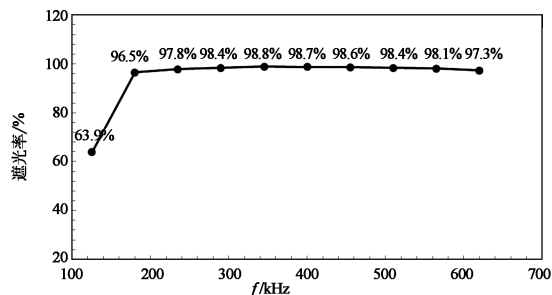


图 14 遮光率与激光频率的关系
Fig.14 Relationship between shading rate and laser frequency

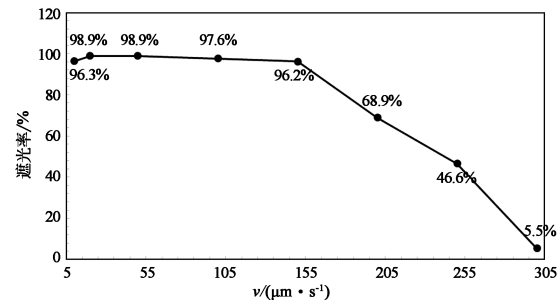


图 16 遮光率与扫描速度的关系
Fig.16 Relationship between shading rate and scanning speed

第 1 ~ 4 轮结果如图 13~16 所示,4 个参数在烧蚀中均存在一个最优区间,即在满足遮光效果的前提下未产生其他不良,在固定其他参数时,其最优区间分别为 $e \in (1.9, 4.6) \text{ mJ/mm}^2$, $f \in (180, 455) \text{ kHz}$, $v \in (100, 150) \text{ }\mu\text{m/s}$ 和 $a \in (5.00, 10.0) \text{ }\mu\text{m}$ 。

此外,结合公式(5)和第 1~4 轮实验结果发现, w 在 4 轮实验中的最优区间存在一个交集,这表明黑化效果可能与 w 存在某种关系。

为研究该推测,开展下列实验。将 w 设定为

交集区间内、外的某些定值,然后采用不同的 e 、 f 、 v 、 a 组合,其中 $a = b \in (4.0, 10.0) \text{ }\mu\text{m}$,以验证相同 w 值条件下,黑化效果的一致性,如表 4 所示。

需要说明的是,当 e 低于 1.0 mJ/mm^2 时,调节其他参数时,黑化效果都相对较差^[10,17]。这可能是由于低能量脉冲激光的简单叠加不能满足于 ITO 区半导体瞬间烧蚀机制的需求^[20]。基于此,下列实验中, e 都设置在 1.0 mJ/mm^2 以上。

表 4 第 5~10 轮实验条件以及实验结果

Tab.4 Experimental conditions and results of 5st ~10th rounds

No.	P_0/mW	f/kHz	$v/(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$a/\mu\text{m}$	$e/(\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2})$	$w/(\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2})$	遮光率/ %	是否产生不良
第五轮								
1	2.4	125	200	4	1.2	3 000	63.8	无
2	3.8	125	250	5	1.2	3 000	59.8	无
3	5.4	150	300	6	1.0	3 000	60.5	无
4	6.1	129	300	7	1.0	3 000	63.5	无
5	3.3	160	277.3	4	1.3	3 000	60.7	无
6	2.8	160	234.7	4	1.1	3 000	62.8	无
第六轮								
1	2.8	125	164.7	4	1.4	4 250	95.6	无
2	4.4	125	205.9	5	1.4	4 250	95.8	无
3	7.6	150	296.5	6	1.4	4 250	96.1	无
4	8.8	150	296.5	7	1.2	4 250	95.3	无
5	5.1	200	301.2	4	1.6	4 250	95.8	无
6	4.9	180	288.0	4	1.7	4250	95.1	无
第七轮								
1	2.4	125	100	4	1.2	6 000	98.6	无
2	3.8	125	125	5	1.2	6 000	98.8	无
3	6.8	125	187.5	6	1.5	6 000	98.7	无
4	12.5	161	300	7	1.6	6 000	97.8	无
5	4.5	200	186.7	4	1.4	6 000	97.5	无
6	6.5	225	300	4	2.0	6 000	98.3	无
第八轮								
1	3.0	125	75	4	1.5	10 000	97.8	无
2	4.7	125	93.8	5	1.5	10 000	98.8	无

续 表								
No.	P_0/mW	f/kHz	$v/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$a/\mu\text{m}$	$e/(\text{mJ}\cdot\text{mm}^{-2})$	$w/(\text{mJ}\cdot\text{mm}^{-2})$	遮光率/ %	是否产 生不良
第八轮								
3	8.1	150	135	6	1.5	10 000	98.1	无
4	9.6	150	136.5	7	1.3	10 000	98.8	无
5	4.8	200	120	4	1.5	10 000	97.5	无
6	5.8	200	144	4	1.8	10 000	97.9	无
第九轮								
1	4.0	125	80.0	4	2	12 500	98.3	无
2	6.3	125	100.0	5	2	12 500	98.5	无
3	10.8	150	144.0	6	2	12 500	98.1	无
4	17.6	150	201.6	7	2.4	12 500	98.8	无
5	9.9	200	198.4	4	3.1	12 500	97.5	无
6	8.6	180	172.8	4	3	12 500	97.3	无
第十轮								
1	6.0	125	107.1	4	3.0	14 000	98.8	有
2	9.4	125	133.9	5	3.0	14 000	99.1	有
3	16.2	150	192.9	6	3.0	14 000	98.8	有
4	19.1	150	195.0	7	2.6	14 000	98.1	有
5	10.2	200	182.9	4	3.2	14 000	97.3	有
6	5.8	200	102.9	4	1.8	14 000	96.8	有

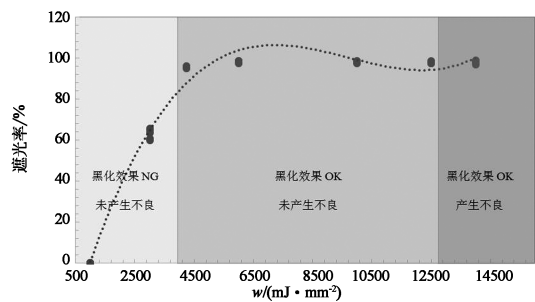


图 17 遮光率与 w 之间的关系
Fig.17 Relationship between shading rate and w

从第 5~8 轮实验可以看出,在固定 w 值的条件下,除去测量误差及设备状态稳定性对实验的影响,表征黑化效果的遮光率值波动较小。这样, w 数值大小能够与黑化效果相对应,可以表征黑化效果。

对图 17 中数据进行简单拟合,得出 w 值与

遮光率 y 的关系大致如下:
$$y = 2 \times 10^{-12} w^3 - 6 \times 10^{-8} w^2 + 5 \times 10^{-4} w - 0.47 \quad (7)$$

当 $w \leq 3\,000$ 时,黑化效果未达暗点标准;当 $4\,250 \leq w \leq 12\,500$ 时,黑化效果达到暗点标准,此时遮光率均大于 95%,且未产生其他不良;当 $w \geq 14\,000$ 时,遮光率虽然都大于 95%,但会产生其他不良。即对于某款 165.1 cm (65 in) 的 ADS 显示模式的产品,当 $4\,250 \leq w \leq 12\,500$ 时,飞秒激光可以很好地实现 ITO 区黑化。

值得注意的是,在 $w \leq 2\,000$ 时,ITO 区黑化效果几乎忽略不计,遮光率 $< 3.0\%$ 。对于飞秒激光 ITO 区黑化烧蚀机制和工艺参数深层次影响的原理分析,目前实验条件下还无法进行探究。现阶段本研究工作的意义在于,通过文中建立的理论模型,结合工艺参数的拟合分析,得到 w 与黑化后遮光率的关系,为量产中飞秒激光的工艺

参数设置和优化提供参考。

6 结 论

本文基于飞秒激光烧蚀机制开展了 ITO 区黑化法修复亮点理论模型和工艺参数的相关研究,结合实验结果,得出以下结论:

(1)成功建立并通过实验验证了 ITO 区黑化法修复理论模型在液晶显示面板修复亮点领域的可行性,满足量产信赖性。

(2)飞秒激光工艺参数中,单脉冲激光单位面积能量 e 、激光频率 f 、扫描速度 v 和加工端光斑大小 a 等 4 个参数都会影响黑化效果,本文提出的整合型 w 值能很好地对应飞秒激光烧蚀后的黑化效果,在实际量产中可以指导工艺参数的设置。

(3)对于某款 165.1 cm(65 in) ADS 显示模式的产品,当单脉冲激光单位面积上的能量 e 为 1.0 mJ/mm^2 , $a = b \in (4, 10) \mu\text{m}$, $w \in (4\ 250, 12\ 500)$ 时,黑化后遮光率均大于 95% 且未产生其他不良,量产修复成功率高达 95.5%。

参 考 文 献:

- [1] 马群刚. TFT-LCD 原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
MA Q G. *TFT-LCD Principle and Design* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [2] 魏平玉, 李涛, 徐敏, 等. 黑矩阵扩散法修复亮点理论模型及影响因素分析[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2): 164-172.
WEI P Y, LI T, XU M, *et al.* Model of BM diffusion method and effect actors analysis in bright dot repair [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 164-172. (in Chinese)
- [3] 马宝平, 陈再良. LCD 常见点缺陷的修复[J]. 苏州大学学报(工科版), 2009, 29(4): 70-72.
MA B P, CHEN Z L. LCD point defect repair [J]. *Journal of Suzhou University (Engineering Science Edition)*, 2009, 29(4): 70-72. (in Chinese)
- [4] 黄雅纹, 陈再良. TFT LCD 常见点缺陷的检测与修复[J]. 现代电子技术, 2012, 35(23): 189-191.
HUANG Y W, CHEN Z L. Detection and repair of point defects in TFT LCD [J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(23): 189-191. (in Chinese)
- [5] 付国柱. 玻璃的激光切割技术[J]. 光机电信息, 2008, 25(3): 5-11.
FU G Z. Technology of cutting glass by laser [J]. *OME Information*, 2008, 25(3): 5-11. (in Chinese)
- [6] 张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203003.
ZHANG W, LI G Z, WANG C M, *et al.* Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0203003. (in Chinese)
- [7] 刘继展, 徐秀琼, 李萍萍. 果实采摘中果梗激光切割分析与实验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 59-64.
LIU J Z, XU X Q, LI P P. Analysis and experiment on laser cutting of fruit peduncles [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 59-64. (in Chinese)
- [8] 秦苗苗, 陈威, 吴坚, 等. 飞秒激光辅助白内障超声乳化术中激光相关并发症的发生率及其原因[J]. 眼科新进展, 2020, 40(8): 747-750, 768.
QIN M M, CHEN W, WU J, *et al.* Incidence of laser-related complications during femtosecond laser-assisted cataract surgery and its factors [J]. *Recent Advances in Ophthalmology*, 2020, 40(8): 747-750, 768. (in Chinese)
- [9] 刘钊臣, 李锐, 岳章显. 激光光凝治疗糖尿病视网膜病变疗效观察[J]. 临床眼科杂志, 2010, 18(3): 244-245.
LIU Z C, LI R, YUE Z X. Therapeutic efficacy of retinal photocoagulation for diabetic retinopathy [J]. *Journal of Clinical Ophthalmology*, 2010, 18(3): 244-245. (in Chinese)
- [10] 辛建婷, 刘国栋. 飞秒激光对半导体材料及器件烧蚀效应研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(10): 64-70.
XIN J T, LIU G D. Research progress of semiconductor and electrophotonic detector ablation by femtosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(10): 64-70. (in Chinese)
- [11] 宋昶, 杨小君, 赵卫, 等. 基于空间光调制器的飞秒激光深微孔加工方法[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0814001.
SONG C, YANG X J, ZHAO W, *et al.* Depth-micro laser drilling methods based on spatial light modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0814001. (in Chinese)

- [12] 胡晓冬,李元龙,白少状,等.激光在材料去除加工中应用的研究进展[J].激光与光电子学进展,2020,58(5):050001.
HU X D, LI Y L, BAI S Z, *et al.* Research progress of laser application in material removal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 58(5): 050001. (in Chinese)
- [13] 金星,孔剑,王敬强,等.晶体硅金刚线切割废料制备高纯氮化硅[J].应用化学,2018,35(11):1364-1371.
JIN X, KONG J, WANG J Q, *et al.* Preparation of high-purity silicon nitride from diamond-wire cutting waste [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2018, 35(11): 1364-1371. (in Chinese)
- [14] 刘丹枫,丁明明,张丽丽,等.热场效应下聚酰亚胺纤维力学性质有限元分析[J].应用化学,2020,37(2):190-197.
LIU D F, DING M M, ZHANG L L, *et al.* Finite element analysis of mechanical properties of polyimide fiber under thermal field [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(2): 190-197. (in Chinese)
- [15] 魏平玉,韩磊,郭栋,等.金属线的修复设备:中国,CN204215119U[P].2015-03-18.
WEI P Y, HAN L, GUO D, *et al.* Metal wire repair equipment: CN, CN204215119U [P]. 2015-03-18. (in Chinese)
- [16] 朱世楠,李楠.AMOLED亮点不良修复方法[J].液晶与显示,2020,35(3):198-204.
ZHU S N, LI N. Method of repairing AMOLEDs bright pixel defect [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(3): 198-204. (in Chinese)
- [17] 乔律华,刘涛,李俊峰,等.Trimmer工艺参数对切割效果的影响[J].液晶与显示,2018,33(8):661-668.
QIAO L H, LIU T, LI J F, *et al.* Effect of trimmer process parameters on trimming result [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(8): 661-668. (in Chinese)
- [18] 韩磊,魏平玉,周春霖,等.晕开不良修复方法及影响因素的研究[J].液晶与显示,2017,32(2):110-116.
HAN L, WEI P Y, ZHOU C L, *et al.* Particle gap repair method and effect actors analysis [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(2): 110-116. (in Chinese)
- [19] 刘黎明,杨培志,莫镜辉.ITO靶材黑化物的X射线光电子能谱研究[J].光学与光电技术,2009,7(5):84-86.
LIU L M, YANG P Z, MO J H. Investigation on the blackened matter on ITO target using XPS [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(5): 84-86. (in Chinese)
- [20] 邓素辉.激光与物质相互作用的热效应研究[D].南昌:江西师范大学,2006.
DENG S H. Study on the thermal effect in the interaction of the laser radiation with matter [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2006. (in Chinese)

作者简介:



吴国东(1991—),男,安徽安庆人,硕士,高级工程师,2017年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事液晶面板不良修复工作。E-mail:401195730@qq.com