

错位叠加曝光法制作楔形斜面微结构研究

董立文, 宋晓欣, 顾仁权, 张锋, 袁广才, 姚琪, 吕志军, 刘文渠, 崔钊

引用本文:

董立文, 宋晓欣, 顾仁权, 等. 错位叠加曝光法制作楔形斜面微结构研究[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(3): 398–404.

DONG Li-wen, SONG Xiao-xin, GU Ren-quan, et al. Wedge-shaped bevel microstructure prepared by dislocation and superposition exposure method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 398–404.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0186>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

TFT制程曝光色差研究

Investigation on exposure Mura in TFT process

液晶与显示. 2021, 36(3): 412–419 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0146>

光配向PI固烤时间与曝光能量对LCD光学及残影的影响

Effects of PI post-bake time and UV dosage on LCD optical performance and image sticking by photo-alignment

液晶与显示. 2017, 32(8): 596–600 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173208.0596>

PS光阻顶部凹陷问题研究

Study on the top concave of PS photoresistor

液晶与显示. 2019, 34(10): 977–981 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193410.0977>

一种应用在增强现实领域的倾斜液晶/聚合物体光栅的制备

Fabrication of slanted liquid crystal/polymer volume grating applied to augmented reality

液晶与显示. 2020, 35(10): 1012–1018 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1012>

聚合物分散型液晶结构紫外光稳定性分析

Ultraviolet light stability of polymer structure based on polymer dispersed liquid crystal

液晶与显示. 2016, 31(2): 125–130 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163102.0125>

文章编号:1007-2780(2021)03-0398-07

错位叠加曝光法制作楔形斜面微结构研究

董立文*, 宋晓欣, 顾仁权, 张 锋, 袁广才, 姚 琪, 吕志军, 刘文渠, 崔 钊

(京东方科技集团股份有限公司, 北京 100176)

摘要:本文研究了基于 T 公司生产的某型号正性光阻, 采用错位叠加紫外曝光工艺, 实现灰阶曝光效果的方法, 最终得到具有特定角度的楔形斜面结构。光阻在进行紫外感光前后, 对紫外光的吸收系数 α 会发生变化, 根据朗伯比尔定律 (Lambert-Beer law), 将楔形斜面结构等效成台阶状结构, 并通过实验计算出使该光阻发生光解反应的临界曝光能量 I 、光阻感光前后的吸收系数 α 和 α' , 并进一步根据等效模型结构得到错位叠加曝光过程中每步曝光所需能量大小。实验结果表明, 使光阻进行分解反应的临界曝光能量 I 约为 8 mJ, 对紫外光的吸收系数 α 约为 1.14。经过紫外感光后, 光阻对紫外光的吸收系数 α' 降为原来 20%, 进一步根据计算得到的曝光能量进行实验, 最终制作出所需的斜角为 32° 的楔形结构。错位叠加曝光的方法可以得到具有特定角度的楔形斜面微结构, 而且该过程所需的曝光条件可以根据楔形角度进行计算。

关键词: 楔形斜面; 朗伯比尔定律; 错位叠加曝光; 吸收系数; 临界曝光能量

中图分类号: O647.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0186

Wedge-shaped bevel microstructure prepared by dislocation and superposition exposure method

DONG Li-wen*, SONG Xiao-xin, GU Ren-quan, ZHANG Feng, YUAN Guang-cai,

YAO Qi, LYU Zhi-jun, LIU Wen-qu, CUI Zhao

(BOE Technology Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: A kind of exposure method of dislocation and superposition was studied, which was based on a type of positive photoresist produced by T company. It can realize the effect of gray scale exposure by the method and finally a wedge-shaped bevel microstructure with specific angle was obtained. The absorption coefficient of a photoresist can be changed after irradiated by ultraviolet light. According to the Lambert-Beer law, the bevel structure can be equivalent into step structure, and then the critical exposure energy for the photoresist to react and the absorption coefficients of the photoresist can be calculated, which was irradiated by UV before and after, as well as the exposure energy for the dislocation and superposition method. Experimental results show that the critical exposure energy for the photoresist to react is 8 mJ, and the absorption coefficient α of the photoresist for ultraviolet light is 1.14, which will reduce for 20% after irradiated by ultraviolet light. With irradiating by the energy calculated, the photoresist can form the wedge bevel structure with taper angle of 32° . A specific

收稿日期: 2020-07-15; 修订日期: 2020-10-22.

* 通信联系人, E-mail: dongliwen@boe.com.cn

wedge bevel structure by the dislocation and superposition exposure method can be prepared and the energy can be calculated according to the taper angle of bevel structure.

Key words: wedge bevel; Lambert-Beer law; dislocation and superposition exposure; absorption coefficient; critical exposure energy

1 引言

近年来,随着液晶显示技术的发展日渐成熟,人们对显示体验的需求越来越多样化,促使各种不同应用场景的新型显示器件层出不穷,如裸眼3D显示^[1-2]、指向式显示^[3-4]、透明显示^[5-6]等显示器件。为实现这类显示器件的不同功能,通常在器件结构设计方面提出特殊需求,如光栅结构、斜面反射结构、高PS结构等等,不仅对材料特性提出较高的要求,对制作工艺也带来很大的挑战。

对于裸眼3D显示技术或指向式显示技术,为达到相应显示效果,通常会在器件内部制作斜面反射微结构,形成特定光场,使入射光或出射光按照设定光路沿特定角度进行反射,从而实现裸眼3D或特定角度显示的显示效果。目前,从工艺角度来讲,对于楔形微结构的形成,最佳的制作手段是纳米压印技术^[7],其形成微结构的斜角精度最高、斜面平坦度最好,但该技术对设备和材料要求极高,且压印模版制作成本较高,而且为形成显示器件内部特定光路,对微结构位置精度要求在1 μm以内,但纳米压印技术控制的层间对位精度最高为10 μm,很难将光学微结构精准地压印在特定位置。此外,灰阶曝光技术^[8]也可以实现斜面结构的制作,通过制作具有连续灰阶的光罩,实现UV透过率在一个方向连续变化,使光阻在该方向接收UV剂量也连续变化,最终使显影后的光阻呈现斜面形貌。但具有灰阶的掩膜(Gray Tone Mask, GTM)实现灰阶的方式是形成不同间距的缝隙,每个缝隙的宽度相同,间距沿特定方向逐渐递增或递减,而且为实现灰阶变化的连续性,缝隙需做得很窄(<1 μm),导致这种光罩的加工难度高,制作成本高。

本文基于T公司生产的某型号正性光阻,采用错位叠加曝光的方法,实现灰阶曝光的效果,最终得到具有特定角度的楔形微结构的断面形貌,并通过实验对该型号光阻的UV光吸收系数以及使光阻发生分解反应的临界曝光能量进行

计算。

2 模型建立与计算

2.1 错位叠加曝光

本文提出的错位叠加曝光技术是一种利用常规掩膜版达到灰阶曝光效果的光刻工艺技术,无需使用灰阶曝光掩膜。工艺过程如下:在完成一次曝光后,移动一定距离再次进行曝光,然后按相同方向再次进行移动和曝光,如图1所示。每次移动的距离及曝光次数根据微结构斜面角度而定。

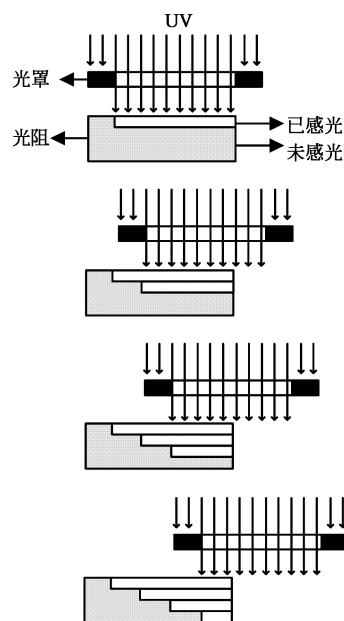


图1 错位叠加曝光方法原理图

Fig.1 Diagram of dislocation and superposition exposure method

2.2 模型计算

光阻的曝光、显影以及固化过程是一个极其复杂的过程。为进行简单计算并表征出最终的光阻形貌,首先将理想斜面结构等效成台阶状结构,分别称之为理想模型和等效模型,根据 Lambert-beer 定律^[9]:

$$I = I_0 E^{-ah}, \quad (1)$$

其中: I_0 为初始 UV 光能量值, I 为使光阻中感光剂 PAC 不能再继续反应的临界曝光能量值, α 为光阻对 UV 的吸收系数。

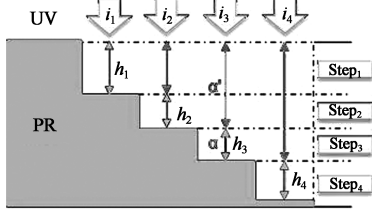


图 2 错位叠加曝光效果示意图

Fig.2 Schematic diagram of exposure effect of dislocation and superposition

由于采用错位叠加曝光方案实现灰阶曝光, 对于光阻的某个区域在纵向上并非只进行一次感光, 而是多次感光, 而且光阻经过 UV 感光的区域与未经感光的区域对 UV 的吸收系数不同, 因此需要对上述关系进行转化。如图 2 所示, 光阻 UV 感光的顺序从 Step₁ 到 Step₄, 假设未感光光阻吸收系数为 α , 感光区域光阻吸收系数为 α' , 可得到如下关系:

$$I = i_1 E^{-\alpha h_1}, \quad (2)$$

$$I = i_2 E^{-(\alpha' h_1 + \alpha h_2)}, \quad (3)$$

$$I = i_3 E^{-[\alpha' (h_1 + h_2) + \alpha h_3]}, \quad (4)$$

$$I = i_4 E^{-[\alpha' (h_1 + h_2 + h_3) + \alpha h_4]}, \quad (5)$$

根据以上关系, 可以对 i 值、 α 以及 α' 进行计算, 然后根据上述方法计算出每个 Step 需要的曝光能量。

3 实验过程

3.1 正性光阻

实验采用 T 公司生产的一款正性紫外感光光阻, 主体成分为聚酰亚胺前体 (Polyimide precursor)、 γ -丁内酯 (GBL)、乳酸乙酯 (EL)、丙二醇单甲醚醋酸酯 (PGMEA) 以及添加剂。

3.2 实验过程

根据上述模型, 可以计算出错位叠加曝光过程中, 每次感光所需的曝光能量值。为得到曝光能量, 首先需要 3 个重要的参数, 即光阻在感光前后对 UV 光的吸收系数 α 、 α' 以及光阻发生光化学反应的临界曝光能量 I 值。为得到上述参数, 设计以下实验。

实验用基板为康宁 (CORNING) 公司生产的 Lotus-TM NTX 系列玻璃, 玻璃尺寸为 370 mm × 470 mm, 厚度为 0.5 mm。在玻璃进行涂胶之前, 需进行清洗处理, 然后将光阻均匀涂覆在玻璃基板表面。本实验采用旋涂方式进行涂胶, 然后用热板进行前烘工艺 (Soft Bake), 前烘温度为 120 °C, 时间为 500 s。曝光工艺过程采用两种方式进行: (1) 错位叠加曝光的每次 UV 照射能量相同; (2) 每次 UV 照射能量不同。曝光过程完成后进行显影工艺, 显影方式为喷淋式显影 (Spray), 显影时间为 3 min, 显影液为浓度 2.38% 的 TMAH, 最后在烘箱中进行固化, 固化温度 230 °C, 时间 60 min。以上实验完成后, 计算并得到吸收系数 α 和 α' , 以及光阻发生光化学反应的临界曝光能量 I 值, 最后计算得到每一次错位叠加曝光的能量值。为证明错位叠加曝光法的准确性, 再次进行涂胶、前烘、曝光、显影以及热固化实验进行验证, 实验参数不变。

4 结果与讨论

在进行错位叠加曝光的过程中, 当每次 UV 照射能量相同时, 根据 Lambert-beer 定律, 等效模型中每个台阶的感光情况如下:

$$\text{Step}_1: I = i_1 E^{-\alpha h_1}, \quad (6)$$

$$\text{Step}_2: I = i_2 E^{-(\alpha' h_1 + \alpha h_2)}, \quad (7)$$

$$\text{Step}_3: I = i_3 E^{-[\alpha' (h_1 + h_2) + \alpha h_3]}, \quad (8)$$

因为 $i_1 = i_2 = i_3$, 可得:

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = 1 - \frac{h_2}{h_1} = 1 - \frac{h_3}{h_2}. \quad (9)$$

图 3 为 SEM 的测试结果, Step₀ 区域的光阻未进行感光处理, 光阻厚度约 5.2 μm , 说明涂胶实际厚度约为 5.2 μm 。当 UV 的照射能量值超过 90 mJ 时, 第三次进行错位叠加曝光后, Step₃ 区域的光阻基本无残余厚度, 说明能量为 270 mJ 的 UV 光已经使 5.2 μm 厚的光阻完全感光并完全显影。根据 h_1 和 h_2 测试数据 (表 1) 可计算得到如下关系:

$$\frac{h_2}{h_1} \approx 0.8, \quad (10)$$

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = 1 - \frac{h_2}{h_1} \approx 0.2. \quad (11)$$

但由于每次进行错位叠加曝光的 i 值相同,

通过上述实验数据无法计算出具体的 α 值以及 I 值,因此需要进一步实验,对每个 Step 采用不同的曝光能量进行曝光,目的是为了引入 i 变量,求得 α 值以及 I 值。

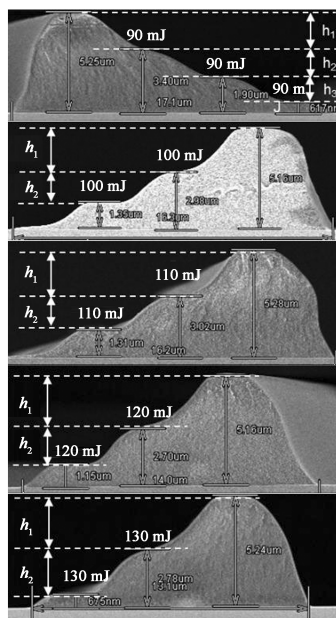


图3 错位叠加曝光能量相同情况得到的光阻形貌
Fig.3 Photoresist profile obtained by the same exposure energy of each dislocation

表1 错位叠加曝光能量相同情况的 h 值

Tab.1 h value at the same exposure energy of etch dislocation

能量/mJ	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$h_3/\mu\text{m}$	h_1/h_2	h_3/h_2
90	1.85	1.50	1.28	0.811	0.853
100	2.18	1.63	0	0.748	—
110	2.26	1.71	0	0.757	—
120	2.34	1.83	0	0.782	—
130	2.46	2.11	0	0.858	—

当错位叠加曝光每次的 UV 照射能量不同时,即 i 值不同,根据 Lambert-beer 定律。等效模型中每个台阶的感光情况如下:

$$\text{Step}_1: I = i_1 E^{-ah_1}, \quad (12)$$

$$\text{Step}_2: I = i_2 E^{-a'h_1} E^{-ah_2}, \quad (13)$$

$$\text{Step}_3: I = i_3 E^{-a'(h_1+h_2)} E^{-ah_3}. \quad (14)$$

可以根据 Step₁ 和 Step₂ 感光情况得到如下关系:

$$I = i_1 E^{-ah_1} = i_2 E^{-a'h_1} E^{-ah_2}, \quad (15)$$

且 $\alpha' \approx 0.2\alpha$, 最终可得如下关系:

$$\alpha = \frac{\ln(i_1/i_2)}{h_2 - 0.8h_1}. \quad (16)$$

将图4及表2中测试数据 i 的能量值和 h 段差值代入上述公式,计算 α 约为 1.14; 再将 α 值代入 Step₁ 公式,可计算出 I 值,计算结果 I 约为 8 mJ, 也就是说使光阻不在进行进一步反应的 UV 能量约为 8 mJ。最终根据以上实验及测试数据的计算结果,求得 α 约为 1.14, α' 约为 0.22, I 值为 8 mJ。

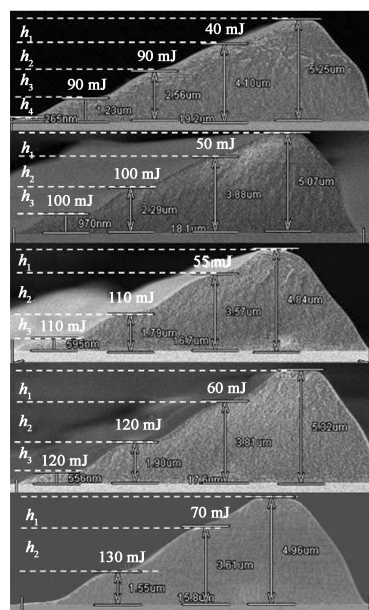


图4 错位叠加曝光能量不同情况得到的光阻形貌
Fig.4 Photoresist profile obtained by the different exposure energy of each dislocation

表2 错位叠加曝光能量不同情况的 h 值

Tab.2 h value at the different exposure energy of etch dislocation

能量/mJ	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$h_3/\mu\text{m}$	α	I/mJ
40~90~90	1.15	1.54	1.33	1.129	10.922
50~100~100	1.28	1.59	1.32	1.237	8.330
55~110~110	1.30	1.78	1.19	0.946	8.365
60~120~120	1.51	1.91	1.35	0.997	8.330
65~130~130	1.55	1.94	1.51	1.138	7.870

基于以上数据,分别制作两种不同高度的斜面结构对上述理论进一步进行验证实验,判断 I 值和 α 值的准确性。首先需要计算出每次错位曝

光需要的能量 i , 设定斜面目标高度分别为 $3.7\ \mu\text{m}$ 以及 $7.5\ \mu\text{m}$, 斜角 θ 目标值为 32° , 根据以上数据, 按照 Lambert-beer 定律, 分别计算出错位叠加曝光过程中每次感光能量大小, 如表 3 所示。

表 3 基于 I 值和 α 值计算错位叠加曝光的能量值
Tab.3 Each dislocation exposure energy calculated based on the I and α value

理想模型参数			n	等效模型参数		
$H/\mu\text{m}$	$\theta/(^{\circ})$	$\text{Step}_0/\mu\text{m}$		$\text{Step}_n/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	i_n/mJ
3.7	32	3	1	3	1.88	68
			2	3	1.88	103
7.5	32	5	1	4	2.50	138
			2	4	2.50	216
			3	4	2.50	432

对于第一种高度的结构, 楔形斜面反射结构高度 H 为 $3.7\ \mu\text{m}$, 斜面角度 θ 为 32° 时, 从图 5 的 SEM 数据中可以看出 Step_1 的曝光能量 $60\ \text{mJ}$ 不变时, Step_2 曝光能量从 $110\ \text{mJ}$ 增加至 $140\ \text{mJ}$, 所得到的楔形斜面的底角 θ 在 $31^\circ\sim 33^\circ$ 之间变化, 结构高度 H 在 $3.69\sim 3.74\ \mu\text{m}$ 之间变化, 该结构基本符合目标值。如图 5(d) 所示, 当 Step_2 的曝光能量增加至 $140\ \text{mJ}$ 时, 该区域的光阻残留厚度降低, 最终导致斜面底角 θ 增大至 40° , 与目标值偏差较大。

对于第二种高度的结构, 楔形斜面反射结构高度 H 为 $7.5\ \mu\text{m}$, 斜面角度 θ 为 32° , 从图 6 的 SEM 数据中可以看出, 图 6(a~d) 中 Step_1 和 Step_2 的曝光能量分别为 $100\ \text{mJ}$ 和 $200\ \text{mJ}$ 不变, 而图 6(a) Step_3 曝光能量为 $200\ \text{mJ}$ 时, 斜面的底角 θ 约为 27° , 主要原因是 Step_3 区域光阻接受到总的曝光能量为 $500\ \text{mJ}$, 能量过低, 导致 Step_3 区域残留光阻厚度过大, 最终使斜面的底角 θ 偏小。如图 6(b)、6(c) 中样品 SEM 数据所示, 当提高 Step_3 总的曝光能量至 $600\sim 700\ \text{mJ}$ 时, 即 i_3 的能量为 $300\sim 400\ \text{mJ}$ 时, 所得到的楔形斜面的底角 θ 约为 33° , 结构高度 H 在 $7.10\sim 7.34\ \mu\text{m}$ 之间变化, 该结构基本符合目标值。但图 6(a~c) 中样品的斜面底角 θ 为 36° , 主要原因为 Step_4 区域接收到的总曝光能量过高, 约为 $1\ 100\ \text{mJ}$, 而图 6(a~c) 中样品 Step_4 区域接收到的总曝光能量

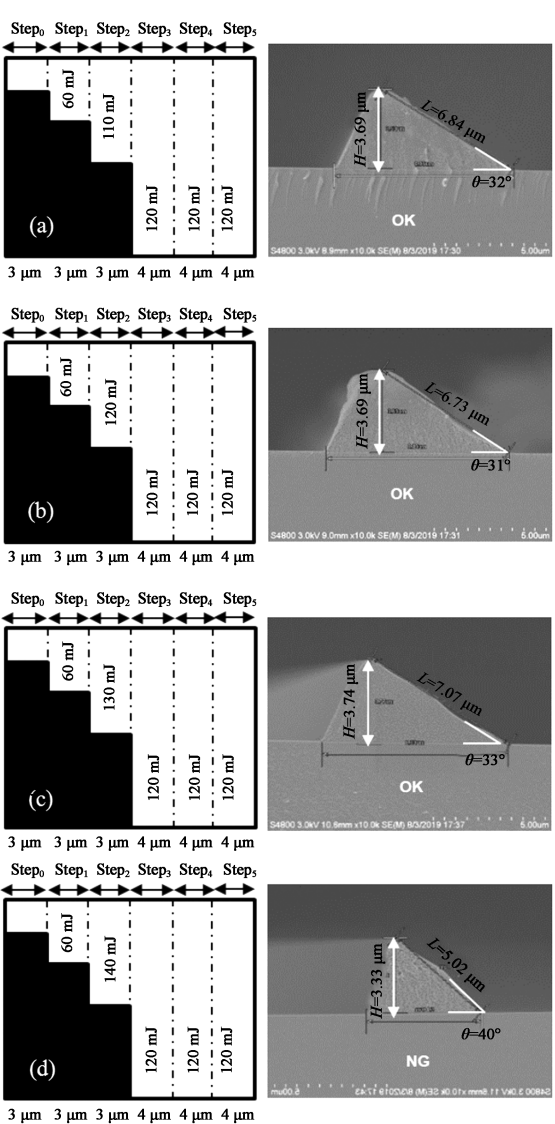


图 5 不同曝光条件(左)得到的相应楔形光阻形貌(右)($H=3.7\ \mu\text{m}$)。(a) $\text{Step}_2=110\ \text{mJ}$; (b) $\text{Step}_2=120\ \text{mJ}$; (c) $\text{Step}_2=130\ \text{mJ}$; (d) $\text{Step}_2=140\ \text{mJ}$ 。

Fig.5 Wedge-shaped photoresist profile obtained under different exposure conditions ($H=3.7\ \mu\text{m}$). The images on the left represent the exposure condition. (a) $\text{Step}_2=110\ \text{mJ}$; (b) $\text{Step}_2=120\ \text{mJ}$; (c) $\text{Step}_2=130\ \text{mJ}$; (d) $\text{Step}_2=140\ \text{mJ}$.

却为 $1\ 000\ \text{mJ}$, 过高的曝光能量会提高衍射影响程度, 导致 Step_3 区域光阻残余厚度降低, 最终使斜面的底角 θ 偏大。另外, 对于图 5 中样品 $\text{Step}_3\sim\text{Step}_5$ 的能量选择以及图 6 中样品 Step_4 的能量选择, 因该区域不需要残留光阻, 只要该区域光阻所接收的 UV 能量足以使光阻完全发

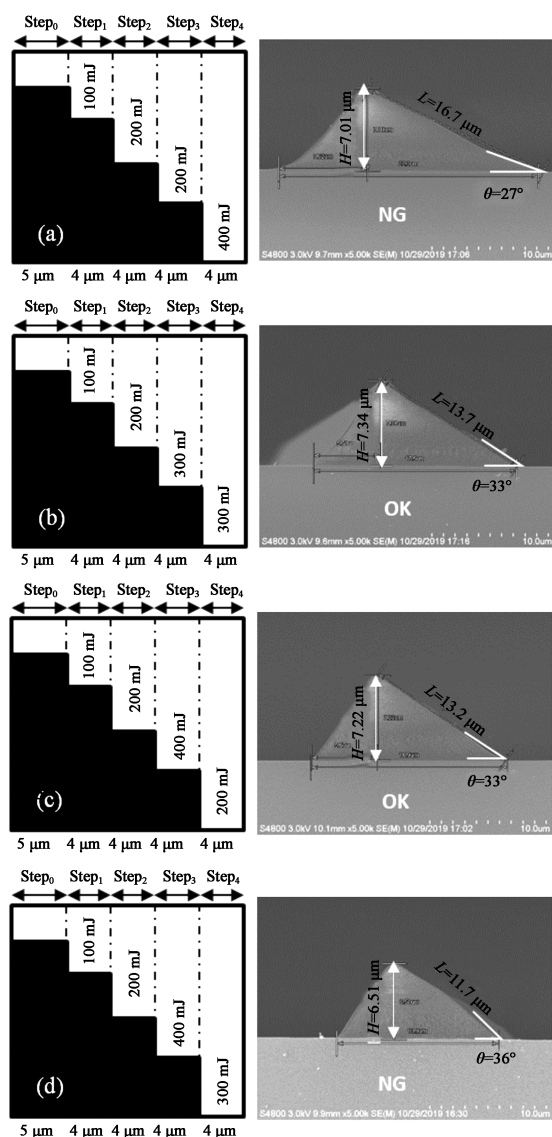


图6 不同曝光条件(左)得到的相应楔形光阻形貌(右)($H=7.5 \mu\text{m}$)。(a) $\text{Step}_3=200 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=400 \text{ mJ}$; (b) $\text{Step}_3=300 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=300 \text{ mJ}$; (c) $\text{Step}_3=400 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=200 \text{ mJ}$; (d) $\text{Step}_3=400 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=300 \text{ mJ}$ 。

Fig.6 Wedge-shaped photoresist profile obtained under different exposure conditions ($H=7.5 \mu\text{m}$). Images on the left represent the exposure condition. (a) $\text{Step}_3=200 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=400 \text{ mJ}$; (b) $\text{Step}_3=300 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=300 \text{ mJ}$; (c) $\text{Step}_3=400 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=200 \text{ mJ}$; (d) $\text{Step}_3=400 \text{ mJ}$, $\text{Step}_4=300 \text{ mJ}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 王琼华,梁栋,宋呈群.助视 3D 显示技术概述[J].真空电子技术,2011(5):7-10,27.

生反应并对相邻 Step 区域光阻因衍射不至于产生过大影响即可。

图7为制作的单色指向式显示器件不同视角的效果图,目标视角为 30° 。从显示效果可以看出,视角小于或大于 30° 时,屏幕的亮度均有所降低,说明采用错位叠加曝光方法制作的斜面微结构可以有效地实现背光的特定角度反射。

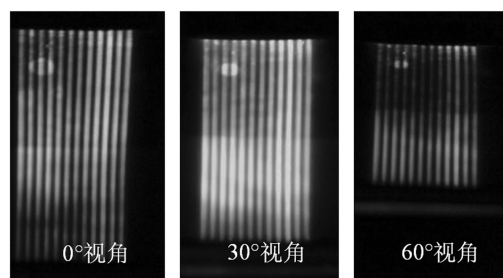


图7 指向式显示器件不同视角的显示效果

Fig.7 Display effects from different perspectives

5 结 论

本文基于 UV 感光的 T 公司生产的某正性光阻,采用错位叠加曝光的方法,实现了同灰阶曝光技术相同的效果,建立了获得特性角度的楔形斜面结构的理想模型以及等效模型,并通过实验在 Lambert-beer 定律的基础上计算出该型号正性光阻感光前后的不同吸收系数 α 与 α' ,以及使该光阻发生光化学反应的临界能量,最后通过实验制作出与理论设计匹配的楔形斜面结构的光阻结构。

实验结果证明:该型光阻在感光前与感光后对 UV 的吸收系数不同,感光前的吸收系数 α 约为 1.14,而感光后的吸收系数 α' 约为感光前的 20%。使该型光阻发生光化学反应的临界 UV 能量约为 8 mJ,低于该能量值时光阻几乎不发生反应。基于错位叠加曝光的方法,将具有特定角度及高度的楔形斜面结构等效为台阶状结构后,并根据 Lambert-beer 定律计算得到的错位曝光能量,可以得到与理论设计相同的楔形斜面结构。

- WANG Q H, LIANG D, SONG C Q. Overview on glasses-based 3D display technologies [J]. *Vacuum Electronics*, 2011(5): 7-10, 27. (in Chinese)
- [2] 王嘉辉, 邓玉桃, 苏剑邦, 等. 全高清裸眼 3D 显示效果的评价与测量[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5): 805-809.
- WANG J H, DENG Y T, SU J B, *et al.* Evaluation and measurement of display effect in full high resolution autostereoscopic display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(5): 805-809. (in Chinese)
- [3] 尹慧娟. 液晶显示特定指向视角技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- YIN H J. Study on specific viewing angle technology for liquid crystal display [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] CHOIG J, GWAG J S. Optical design for reflective liquid crystal displays [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, 613(1): 103-109.
- [5] 王海宏, 焦峰, 马群刚. 高透过率透明液晶显示器研究与开发[J]. 液晶与显示, 2014, 29(6): 901-905.
- WANG H H, JIAO F, MA Q G. Research and development of high transmittance transparent liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 901-905. (in Chinese)
- [6] 王海宏, 焦峰, 马群刚. 透明液晶显示器色度特性研究[J]. 现代显示, 2013(1): 13-16.
- WANG H H, JIAO F, MA Q G. Research on chromaticity characteristic of transparent liquid crystal display [J]. *Advanced Display*, 2013(1): 13-16. (in Chinese)
- [7] 崔铮. 微纳米加工技术及其应用综述[J]. 物理, 2006, 35(1): 34-39.
- CUI Z. Overview of micro/nanofabrication technologies and applications [J]. *Physics*, 2006, 35(1): 34-39. (in Chinese)
- [8] 彭钦军, 郭永康, 曾阳素, 等. 实时灰阶掩膜技术制作微透镜阵列[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 893-896.
- PENG Q J, GUO Y K, ZENG Y S, *et al.* Real-time grey-tone mask technique for fabrication of microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(10): 893-896. (in Chinese)
- [9] DILL F H, HORNBERGER W P, HAUGE P S, *et al.* Characterization of positive photoresist [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(7): 445-452.

作者简介:



董立文(1988—),男,河北唐山人,硕士,2014 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事半导体领域光刻工艺的相关研究以及新材料、新工艺的开发工作。E-mail: dongliwen@boe.com.cn