

文章编号 1004-924X(2024)09-1384-11

界面钻蚀主导的准各向异性湿法刻蚀法制备 玻璃微棱镜阵列

李菲尔^{1,2}, 余佳珈^{1,2}, 杜立群^{1,2}, 吴梦希^{1,2*}, 刘军山^{1,2*}

(1. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 玻璃微棱镜具有耐腐蚀、耐高温、寿命长等优点,但在玻璃上加工微棱镜阵列目前仍是一个难题。因此,提出了界面钻蚀主导的玻璃准各向异性湿法刻蚀方法,制备了高质量的微棱镜阵列器件。在元胞自动机中引入界面性质调控,模拟了界面钻蚀与各向同性侧蚀的竞争行为,探究了刻蚀横截面形貌的变化规律,构建了准各向异性湿法刻蚀模型。在此指导下,加工了横截面为梯形的微结构,设计并制备了间距、形状、尺寸均可调控的微棱镜阵列,重复性达到98%。验证了微棱镜阵列对LED灯扩散效果,光亮度提升了4.6倍。本文改变了传统玻璃湿法刻蚀各向同性的固有认识,创新性地开发了准各向异性刻蚀工艺,为玻璃微棱镜阵列等相关器件提供了高效低成本的制备方法。

关键词: 微棱镜;湿法刻蚀;硼硅玻璃;界面钻蚀;准各向异性刻蚀

中图分类号: TN215; TN03 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1384

Fabrication of glass microprism *via* interfacial erosion induced quasi-anisotropic wet etching

LI Feier^{1,2}, YU Jiajia^{1,2}, DU Liqun^{1,2}, WU Mengxi^{1,2*}, LIU Junshan^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: liujunshan@dlut.edu.cn

Abstract: Microprism arrays are extensively utilized across various industries. Glass-based microprisms, in comparison to polymers, offer superior corrosion resistance, thermal stability, and durability. However, the isotropic nature of glass makes micromachining into prism-like structures challenging. In this paper, we introduce a novel interfacial erosion-induced quasi-anisotropic wet etching technique to manufacture glass microprism arrays efficiently and cost-effectively. For the first time, interfacial erosion is analyzed within a metacellular automaton to study the wet etching process, uncovering the dynamics between side etching and interfacial erosion and their impact on the side wall profiles. This approach yields varied microstruc-

收稿日期: 2024-01-11; 修订日期: 2024-02-20.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB3204600); 大连理工大学医工交叉联合基金资助项目 (No. DUT23YG215)

tures with tilted morphologies. Leveraging quasi-anisotropic etching characteristics, we successfully produce micropism arrays with adjustable spacing, shape, and size, achieving 98% repeatability between arrays. Our method significantly enhances LED lamp diffusion, increasing average brightness by 4.6 times. This research not only pioneers a new direction in glass wet etching but also incorporates quasi-anisotropic properties into the traditional isotropic framework, presenting a straightforward, economical technique for fabricating glass micropism arrays and similar devices.

Key words: micro prism arrays; wet etching; borosilicate glass; interfacial erosion; quasi-anisotropic etching

1 引言

近年来,微棱镜阵列器件广泛应用于生物医学^[1]、太阳能电池^[2]、光学传感器^[3]和LED照明^[4]等技术领域。根据材质的不同,微棱镜阵列器件可分为聚合物和玻璃两大类。其中,基于聚合物材质的微棱镜阵列通常采用热压成型工艺,加工方法相对成熟^[5-6]。然而,光学性能较好的聚合物(如聚甲基丙烯酸甲酯)具有易磨损、易老化、强度低、使用期限短等缺点,无法应用于高温、高压、强腐蚀等极端工况。相较于聚合物,玻璃具有耐腐蚀、耐高温、硬度高且不易老化等特点,适合应用在聚合物材料无法满足的极端工况^[7]。但是由于玻璃的玻璃化转变温度高,易发生脆性断裂,在热压成型工艺过程中存在较多的问题,难以采用热压工艺精确加工和批量生产^[8-9]。玻璃微棱镜加工的其他方法主要包括离子蚀刻^[10]和微铣削技术^[11]等。Luo等^[12]研究了一种超快激光辅助化学刻蚀玻璃微棱镜的方法,在飞秒激光工艺制备光栅的基础上,通过控制玻璃材料与刻蚀剂浓度得到了V型沟槽。这些方法虽然能够在玻璃上制备微棱镜结构,但加工效率低、设备成本高,昂贵且耗时。因此,开发一套高效低成本的玻璃微棱镜制造方法是当前亟待解决的问题,对提升微棱镜阵列器件的性能、延长使用时间以及拓展适用范围等方面均具有重要的意义。

湿法刻蚀技术常用于玻璃表面微结构的制造,具有加工效率高,可批量化生产,以及生产成本低等优点^[13]。传统的玻璃湿法刻蚀具有各向同性特征,刻蚀的横截面形状为碗状,难以形成梯形或V形横截面^[14],难以制备棱镜器件。少量报道提及利用玻璃湿法刻蚀工艺制备横截面为

非碗状的微结构。Ciprian等^[15]将硅与玻璃静电键合,之后刻蚀硅作为掩膜层,在49%的HF溶液中湿法蚀刻玻璃,得到了倾角为38°的斜面结构,但采用该方法制备掩膜层的成本极高,加工效率低。Nikola等^[16]介绍了基于牺牲层的玻璃湿法刻蚀方法,在掩膜层的下方引入钛作为牺牲层,由于钛在HF溶液中的腐蚀速率高,在侧蚀过程中被快速去除,相当于引入新的玻璃-腐蚀液接触面,从而制作出具有梯形横截面的微通道。然而,该方法制备出的结构单一。目前,尚未有关于采用湿法刻蚀工艺制备玻璃微棱镜阵列器件的报道。为实现玻璃微棱镜阵列器件的湿法刻蚀,亟需阐明不同玻璃横截面形状的形成机理及调控手段,突破湿法刻蚀各向同性的限制,并在制作方法、工艺参数和器件设计等方面开展系统性研究。

为解决玻璃微棱镜批量化制造的难题,本文独创性地提出了界面钻蚀主导的玻璃准各向异性刻蚀方法。在元胞自动机模型中填补了界面性质定义的缺失,率先模拟了界面钻蚀与各向同性刻蚀的竞争行为,探究了界面钻蚀速率对刻蚀横截面形状的调控机制,构建了界面钻蚀主导的刻蚀模型,揭示了玻璃准各向异性刻蚀机理。利用该模型,预测并指导了硼硅玻璃的准各向异性湿法刻蚀结果,得到了具有固定倾角斜面特征的倒梯形微结构。基于该方法制作了尺寸、形状、间距均可调控的玻璃微棱镜阵列。面向光扩散板的应用,设计并制备了多款微棱镜阵列器件,棱镜形状包括三棱锥、四棱锥及六棱锥。测试了微棱镜阵列器件对LED灯光强分布的扩散效果,其中四棱锥扩散效果最均匀,相较于无微结构的玻璃,整体扩散光亮度提升了4.6倍。本文构建了独创的玻璃准各向异性湿法刻蚀工艺,实

现了利用湿法刻蚀工艺制备斜面微结构的目标,颠覆了玻璃湿法刻蚀横截面为碗状的固有认识。该工艺方法降低了玻璃微棱镜阵列器件的制造成本,提高了加工效率和精度,为制备具有类似结构的玻璃器件如光栅、光波导等提供了有益的借鉴。

2 实验及结果分析

2.1 界面钻蚀主导的准各向异性刻蚀机理

在湿法刻蚀工艺中,刻蚀液(主要成分为氢氟酸 HF)在玻璃各个方向上的刻蚀速率一致,表现为各向同性刻蚀。玻璃与掩膜的界面亦会受到刻蚀液的破坏,产生界面钻蚀现象。然而,现有研究往往忽视界面钻蚀的作用,或将界面钻蚀认为是缺陷,从而极力避免其发生。本文将界面钻蚀作为主要研究对象,分析模拟界面钻蚀对刻蚀横截面形状的影响。如图 1 所示,玻璃自身在各个方向的刻蚀速率相同,不具有方向选择性;然而,界面钻蚀仅发生在界面处,具有方向选择性。当界面钻蚀速率(V_2)小于玻璃材料本身的刻蚀速率(V_1)时,界面钻蚀作用被湮没,各向同性占主导作用,刻蚀横截面呈现为碗状结构。当界面钻蚀速率超出玻璃自身刻蚀速率(即 $V_2 > V_1$)时,界面钻蚀导致沿横向靠近界面处的刻蚀速率快于其他方向,湿法刻蚀过程呈现为准各向异性,这种情况下界面钻蚀对刻蚀横截面形状的影响不能忽视。

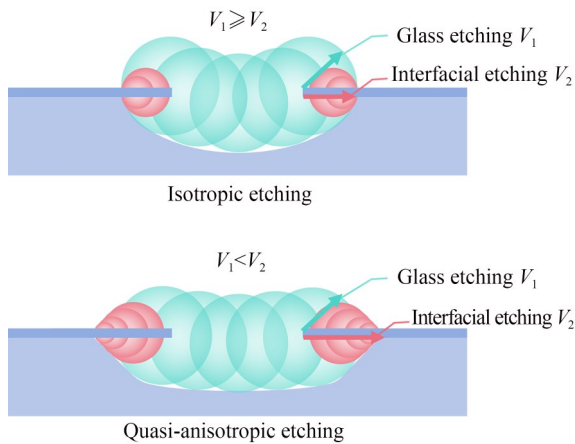


图 1 界面钻蚀对刻蚀形貌的影响分析示意图
Fig. 1 Schematic analysis of effect of interfacial erosion on etching topography

针对上述问题,本文在元胞自动机模拟湿法刻蚀过程的基础上引入界面性质调控,探究玻璃湿法刻蚀中的各向同性刻蚀与界面钻蚀的竞争性关系,全面分析刻蚀过程中横截面形貌的演化规律。元胞自动机(cellular automata, CA)是一个在具有离散性、有限状态性的元胞空间上,按照一定的元胞局部规则,在离散的时间维度上演化的动力学系统^[17]。元胞自动机主要由元胞、元胞空间和元胞演化规则、分析步时长等四部分组成。玻璃湿法刻蚀元胞自动机模型对元胞空间、元胞演化规则、分析步时长(t)分别定义。其中元胞空间的定义基于湿法刻蚀实验原理进行确定。元胞演化规则根据玻璃化学刻蚀原理和界面钻蚀机制进行定义。最后,基于元胞空间特征和演化规则,定义模型单位分析步表征的实际时长。

图 2(a)为湿法刻蚀模型,选用 HF 刻蚀液,掩膜为金属 Cr 膜以及 AZ-1500 光刻胶,基底为玻璃。将不同区域划分成边长为 a 的小正方形,每个区域的小正方形为该区域类型的一个元胞,采用二维矩阵模拟湿法刻蚀过程,根据模拟范围空间,选取元胞边长。建立了元胞空间为长方形 $4\ 000 \times 2\ 000$ 的二维初始模型,模拟 $800\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ 的实际空间,确定元胞边长 a 为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。在掩膜与玻璃接触面处设置厚度为 h 的界面层。湿法刻蚀模型中用元胞步长 T 来表征分析步时长,因元胞会在元胞步长的非整数倍的时间内被

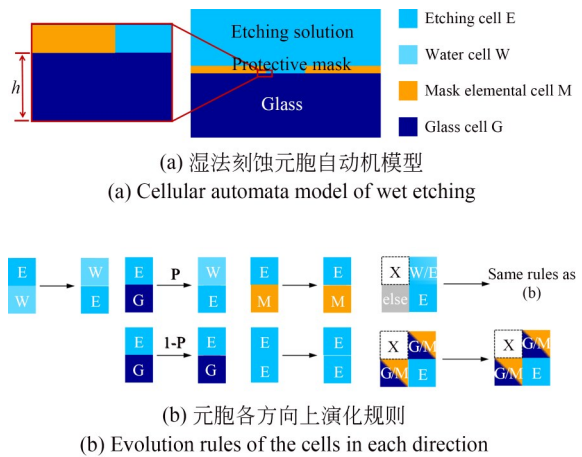


图 2 包含界面钻蚀的元胞自动机模型及演化规则
Fig. 2 Schematic of cellular automata model and evolution rules with interfacial erosion included

完全刻蚀,采用时间补偿的动态元胞自动机算法^[18]可解决该问题。根据动态补偿计算元胞步长,即:

$$T = \frac{a}{4R}, \quad (1)$$

其中 R 为玻璃刻蚀速率。

定义以下4种元胞类型:玻璃元胞 G ,不可转移,只与刻蚀元胞发生反应;刻蚀元胞 E ,可转移,以特定的比例在刻蚀液区域内部随机分布,只与玻璃元胞 G 发生反应;水元胞 W ,可转移,不与其他元胞发生反应;掩膜元胞 M ,不可转移,不与其他任何元胞发生反应。为了模拟湿法刻蚀过程,定义元胞演化规则,如图2(b)所示。元胞可以进行上、下、左、右、左上、左下、右上、右下8个方向的移动。以刻蚀元胞 E 为中心进行移动,其局部演化规则包括以下内容。元胞以一定的迭代速度向上、下、左、右移动,根据移动位置元胞的类型进行不同的操作。如果移动位置为水元胞 W ,则两元胞进行位置交换。如果移动位置为玻璃元胞 G ,则玻璃元胞 G 以一定概率(概率为 P)被刻蚀,刻蚀元胞 E 变为水元胞 W ,玻璃元胞 G 变为刻蚀元胞 E ;若不发生刻蚀(概率为 $1-P$),刻蚀元胞 E 和玻璃元胞 G 保持不变。如果移动位置为刻蚀元胞 E 或掩膜元胞 M ,则元胞位置和类型保持不变。此外,元胞同时也会向左上、左下、右上、右下移动,需要先判断中心相邻两个元胞的类型。如果两个邻居元胞都是玻璃元胞 G 或掩膜元胞 M ,则两元胞位置不变。其他情况下的变化规则与向上、下、左、右移动相同。

为模拟材料本身刻蚀以及界面钻蚀的竞争性作用,定义界面元胞钻蚀概率为 P_i ,玻璃内部的刻蚀概率为 P_g ,定义 P_i 与 P_g 的比值为 β 。数值模拟过程中,不同 β 下刻蚀玻璃产生的横截面形状变化规律如图3所示。当 $\beta \leq 1$,即界面钻蚀速率小于等于玻璃自身刻蚀速率时,玻璃刻蚀符合各向同性刻蚀的特征,横截面形状为碗状,且不受 β 的影响(如图3(a))。当 $\beta > 1$ 时,界面钻蚀占主导作用,刻蚀产生的横截面形状发生变化。图3(b)为 $\beta = 2$ 的情况下刻蚀产生的横截面形状。此时,界面钻蚀速率是材料本身刻蚀速率的两倍,湿法刻蚀具有准各向异性的特征。对 $\beta \leq 1$ 和 $\beta = 2$ 两种情况下不同时刻的刻蚀形貌进行计算并提取数值,得到了刻蚀产生的形貌轮廓随着时



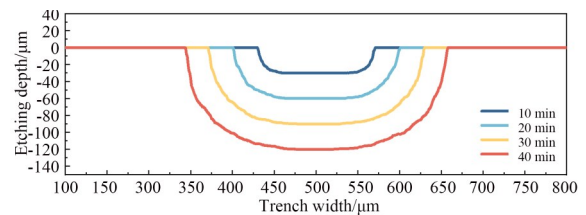
(a) 玻璃各向同性刻蚀主导的刻蚀横截面形貌

(a) Glass isotropic etching dominated etching topography



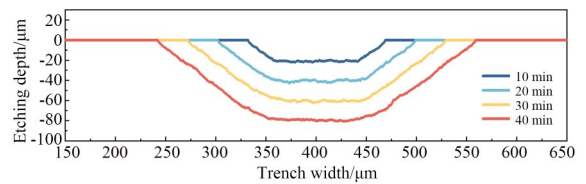
(b) 界面钻蚀主导的刻蚀横截面形貌

(b) Interfacial erosion dominated etching topography



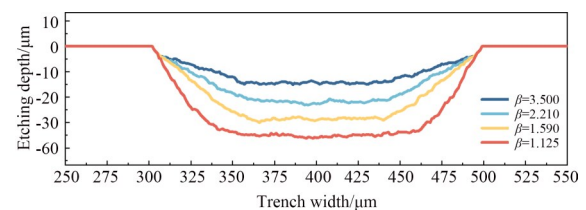
(c) 玻璃刻蚀主导刻蚀不同时刻的数值模拟轮廓

(c) Numerical simulation of contours at different moments of glass isotropic etching



(d) 界面钻蚀主导刻蚀不同时刻的数值模拟轮廓

(d) Numerical simulation of contours at different moments of interfacial erosion dominated etching



(e) 界面钻蚀主导刻蚀不同比值的数值模拟轮廓

(e) Numerical simulation of contours of interfacial erosion dominated etching with different etching ratios

图3 玻璃湿法刻蚀数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of glass wet etching

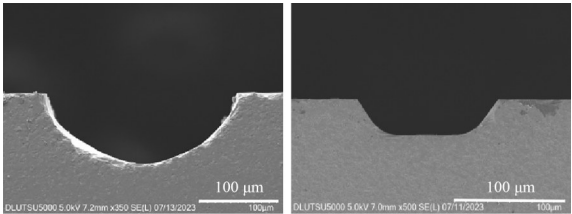
间的变化,如图 3(c)和 3(d)所示。在不同时刻,各向同性刻蚀形貌均为碗状,而界面钻蚀主导的准各向异性刻蚀具有明显的倾角形貌,且倾角保持不变。当 β 从 1.125 增大至 3.500,产生的准各向异性刻蚀横截面形状如图 3(e)所示,斜面倾角随着界面钻蚀速率与玻璃刻蚀速率比值而变化。

上述结果表明,本文建立的包含界面钻蚀作用新型元胞自动机模型,更为全面地模拟了玻璃湿法刻蚀过程,揭示了界面钻蚀主导情况下,玻璃湿法刻蚀会产生斜面形貌,突破了传统湿法刻蚀横截面为碗状的固有认识,提出了调控刻蚀横截面形状的有效方法。

2.2 准各向异性刻蚀结果验证

前述模型揭示了通过调控界面钻蚀速率与玻璃自身刻蚀速率,可获得不同的横截面形貌。本文选取钠钙玻璃和硼硅玻璃,采用相同掩膜和刻蚀条件表征实验结果,对模型开展验证研究。在钠钙玻璃以及硼硅玻璃表面制作 Cr 掩膜,并通过光刻工艺进行图形化,腐蚀 Cr 掩膜后保留剩余的光刻胶,光刻胶可以填补 Cr 掩膜中的缺陷,改善 Cr 掩膜的亲水性,有效减少 Cr 掩膜的钻蚀现象^[19]。将处理好的玻璃放入湿法刻蚀装置中,在刻蚀剂为 HF(40%):NH₄F:HCl(36%)=3:0.5:1,搅拌为 50 r/s,温度为 25 ℃的条件下进行刻蚀实验。湿法刻蚀后沟道横截面的形貌通过扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)进行拍摄表征。实验获得的刻蚀结果及对比如图 4 所示,钠钙玻璃与硼硅玻璃产生的横截面形貌大不相同,钠钙玻璃的形貌符合各向同性特征,横截

面形状为碗状;而硼硅玻璃得到的形貌带有明显的斜面,表明其刻蚀具有准各向异性特征。



(a) 钠钙玻璃刻蚀 (b) 硼硅玻璃刻蚀
(a) Etching of soda glass (b) Etching of Borosilicate glass

图 4 玻璃湿法刻实验横截面形貌 SEM 图

Fig. 4 SEM images of cross-section morphology of glass- etches after wet etching

实验结果表明,硼硅玻璃在湿法刻蚀过程中界面钻蚀占主导地位,导致其产生斜面倾角形貌。这是由于硼硅玻璃与钠钙玻璃相比,硼硅玻璃网络中的碱原子数量明显减少,网络修饰剂数量减少,使得玻璃具有更高的耐水解性,且玻璃结构具有更强的结合力,所以硼硅玻璃的自身刻蚀速率较慢^[20-21]。而二者的界面钻蚀速率相似,导致硼硅玻璃的与钠钙玻璃的 β 不同。根据实验结果对仿真模型中的 3 个参数进行拟合,从而建立硼硅玻璃湿法刻蚀模型,为后续其他结构尺寸的湿法刻蚀工艺提供理论基础,节省时间成本与实验成本。假设刻蚀温度为室温条件不变,界面刻蚀厚度 $h=5\text{ }\mu\text{m}$,通过实验结果拟合,分别得到循环次数 n 与刻蚀时间 t 的关系、玻璃刻蚀概率 P_G 与刻蚀液浓度 c 的关系、界面钻蚀概率 P_I 与玻璃刻蚀概率 P_G 的关系,如表 1 所示。

表 1 实验与仿真参数拟合关系式

Tab. 1 Fitting equation between simulation parameters and experimental settings

Counterpart relationship	Fitted relational equation
Number of cycles n and etching time t	$n=6t$
Etching probability P_G and etchant concentration c	$P_G=-0.643e^{-c/0.198}+0.737$
Interfacial erosion probability P_I and P_G	$P_I=1.338P_G$

为验证硼硅玻璃湿法刻蚀模型的准确性及对实验结果预测的可行性,对硼硅玻璃湿法刻蚀得到的沟道进行表征,利用台阶仪对其深度及侧蚀量进行测量,得到不同时间下侧蚀量及刻蚀深

度。将实验结果与数值模拟结果进行分析对比,如图 5(a)和 5(b)所示,数值模拟结果与实验结果几乎一致,误差率在 5% 以内。该结果表明,本文建立的元胞自动机模型对界面钻蚀主导下的玻

璃湿法刻蚀结果预测准确,为指导后续玻璃微棱

镜的设计与制作提供了理论基础。

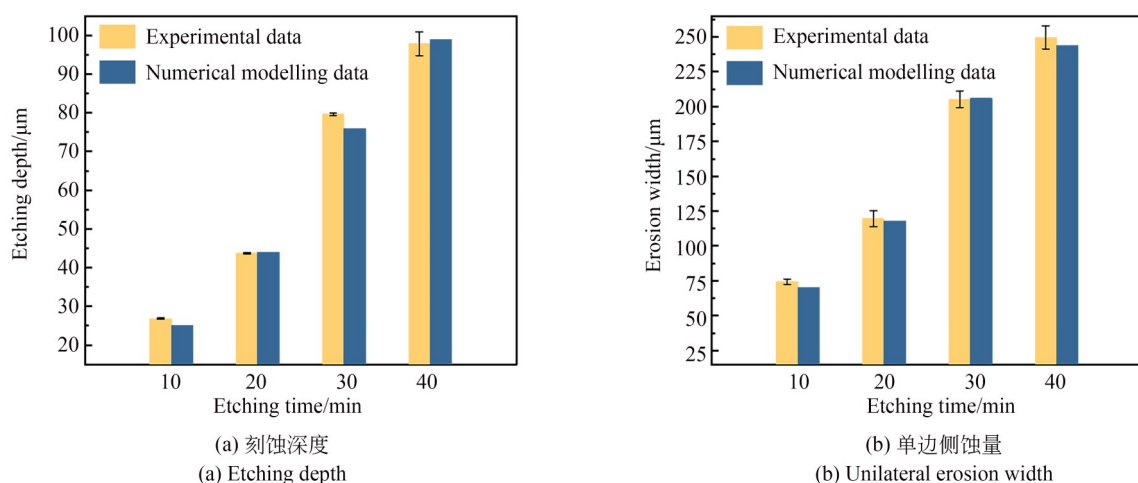


图5 玻璃湿法刻实验与仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental data and numerical simulation in terms

2.3 基于准各向异性刻蚀工艺的微结构制作与表征

本文从理论上预测在界面钻蚀占主导的情况下,湿法刻蚀由各向同性向准各向异性转变。从实验结果上验证了使用硼硅玻璃可以得到准

各向异性刻蚀的横截面形貌。基于上述结果,进一步开展基于准各向异性刻蚀工艺的微结构制作与表征研究。

首先调节硼硅玻璃的湿法刻蚀时间,对在不同时间产生的横截面形貌进行表征,如图6所示。

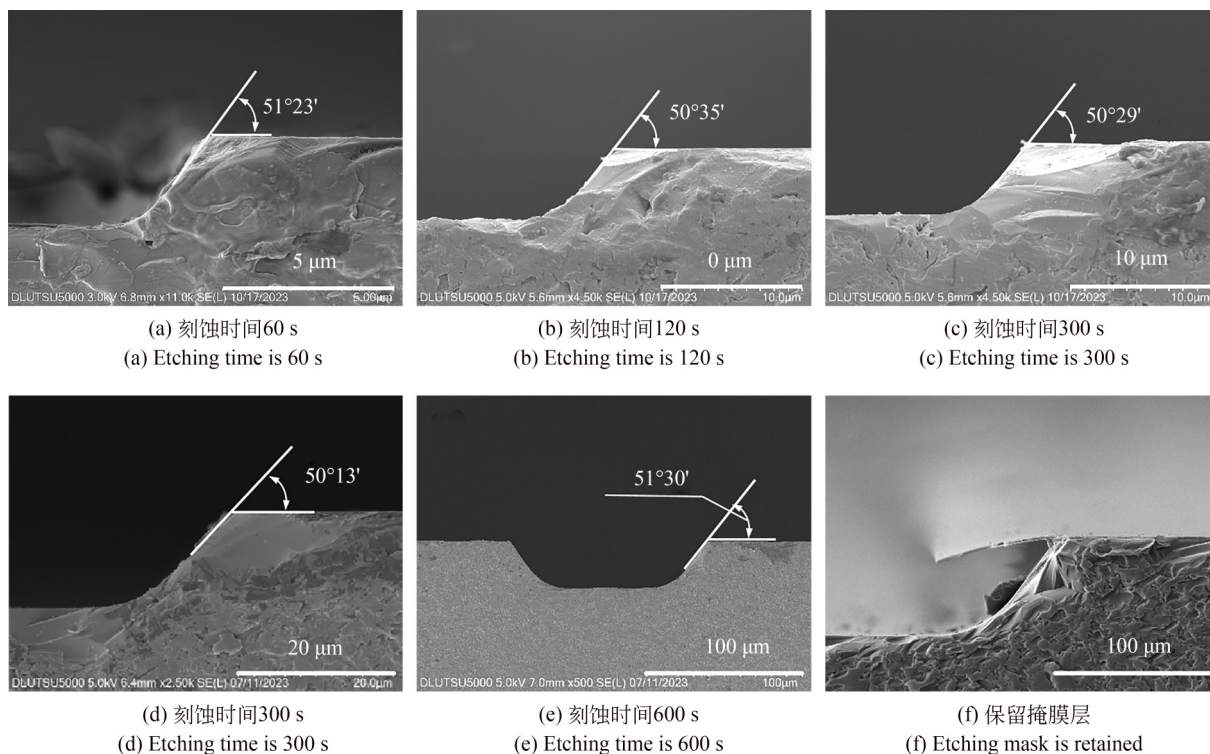


图6 硼硅玻璃倾角形貌表征 SEM 图

Fig. 6 Cross-section SEM images of borosilicate glass after wet etching

图 6(a)~6(e)为刻蚀不同时间的硼硅玻璃横截面形貌的 SEM 照片,结果表明,随着刻蚀时间的增加,刻蚀产生的斜面倾角基本不变,角度在 51° 左右浮动,该实验结果与图 3(d)所示的仿真结果保持一致。角度的细微差异可能是由于刻蚀液传质不均匀等因素的影响导致。图 6(f)为保留刻蚀掩膜层的玻璃横截面 SEM 图片。图中悬空部分为掩膜层,在重力及应力的作用下向下弯曲。该结果表明,掩膜层在刻蚀过程中仍保持完整未被破坏,产生准各向异性刻蚀的原因是掩膜与玻璃的界面层被钻蚀。

根据硼硅玻璃湿法刻蚀实验的角度表征结果,设计掩模版,改变掩模版线宽、图案的尺寸及形状,通过光刻、刻蚀等工艺得到了带有显著的棱及斜面特征的不同微结构,如图 7 所示。图 7(a)展示了不同尺寸的四棱台阵列,初始的掩膜

图形为不同尺寸的方形。玻璃准各向异性刻蚀产生凸台,凸台边缘处具有明显的棱结构。图 7(b)为四棱台的放大图,棱台侧面平整清晰,棱台最底部有一段弧面过渡区,符合图 3 所示的仿真结果。图 7(c)和 7(d)展示了刻蚀得到的六棱台结构,棱台的尺寸和间距可通过初始掩膜设计调控。六棱台的各个面形貌一致,表明该方法可以在各个均方向形成斜面结构。图 7(e)和 7(f)展示了刻蚀得到的间距不同的脊状结构。这是由于随着刻蚀时间的变长,棱台上表面的宽度逐渐减小,最终台面消失,两侧斜面相交,形成了顶部尖锐的线性凸起结构。

上述结果表明,本文提出的准各向异性刻蚀方法突破了玻璃湿法刻蚀横截面为碗状的局限,制作得到了种类丰富的微结构,极大地拓宽了玻璃表面的微加工能力。

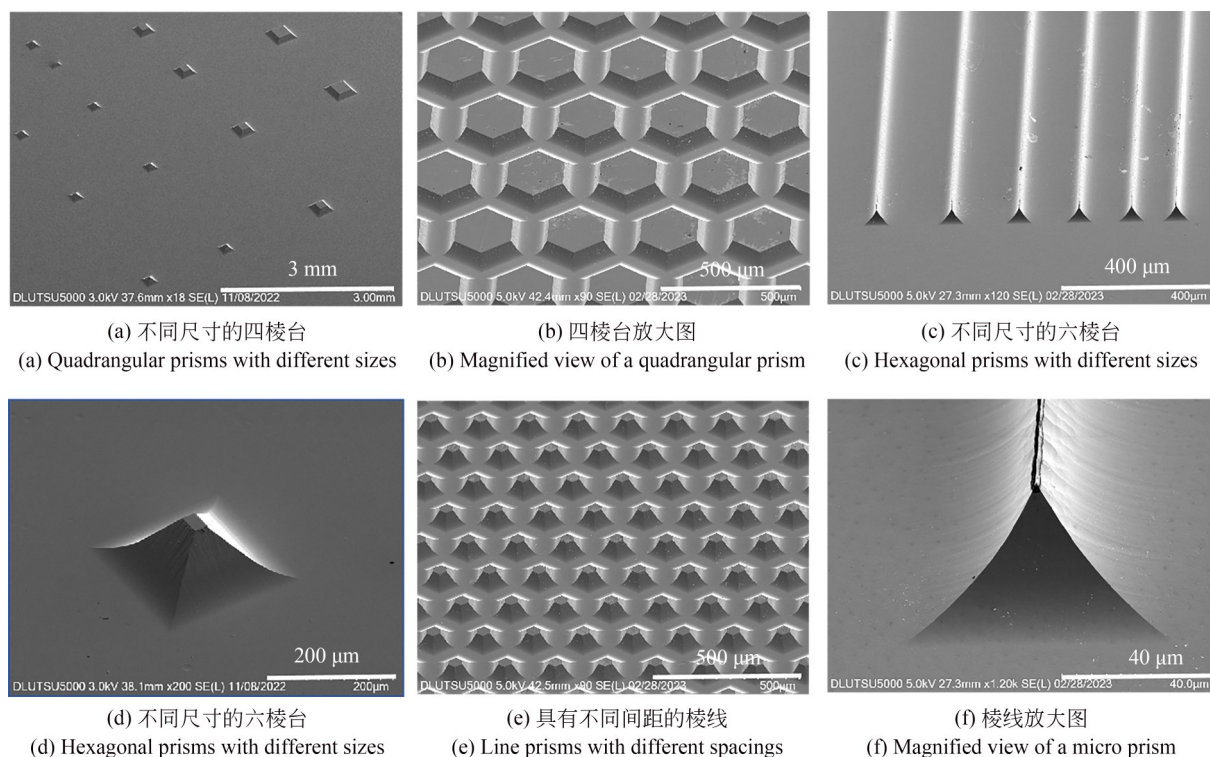


图 7 利用硼硅玻璃准各向异性湿法刻蚀法制作的微结构 SEM 图

Fig. 7 SEM images of microstructure produced using quasi-anisotropic wet etching on borosilicate glass

2.4 玻璃微棱镜阵列的设计、制作与性能测试

在上述数值模拟及实验结果的基础上开展了玻璃微棱镜阵列的设计、制作及性能研究。首先磁控溅射 Cr 膜,将清洗干净的硼硅玻璃通过磁

控溅射机,镀上厚度为 145 nm 的铬膜。随后进行 AZ-1500 胶膜制作,在带有金属掩膜的玻璃基底上依次进行匀胶、烘胶、曝光、显影等工艺,对胶膜进行图形化处理,Cr 膜图形化是用铬腐蚀液

去除未被光刻胶保护的铬。随后进行湿法刻蚀,将经过前序工艺的玻璃放入配制好的刻蚀剂中,开启叶片搅拌机,搅拌速度为 50 r/min 且在常温下刻蚀。最后,将刻蚀完成后的玻璃先放入丙酮中晃动浸泡去除胶膜,再放入去铬液中去去除 Cr 掩膜,并对刻蚀完成后的玻璃进行整体清洗。

经过上述工艺步骤,制作得到符合设计要求的微棱镜阵列,其微观形貌 SEM 如图 8 所示。阵

列有 3 种不同形状,分别为三棱锥(图 8(a))、四棱锥(图 8(b))及六棱锥(图 8(c))。对单个微棱镜尺寸进行表征分析,测量制作得到不同形状微棱锥的结构尺寸,并计算结构尺寸与设计尺寸之间的偏差,结果如表 2 所示。从表中可以看到,不同微棱锥的尺寸偏差较小,利用准各向异性湿法刻蚀工艺可以确保产品质量的一致性和可靠性。不同形状阵列中的微棱锥高度一致,阵列间单个棱锥的尺寸重复性达到 98%。

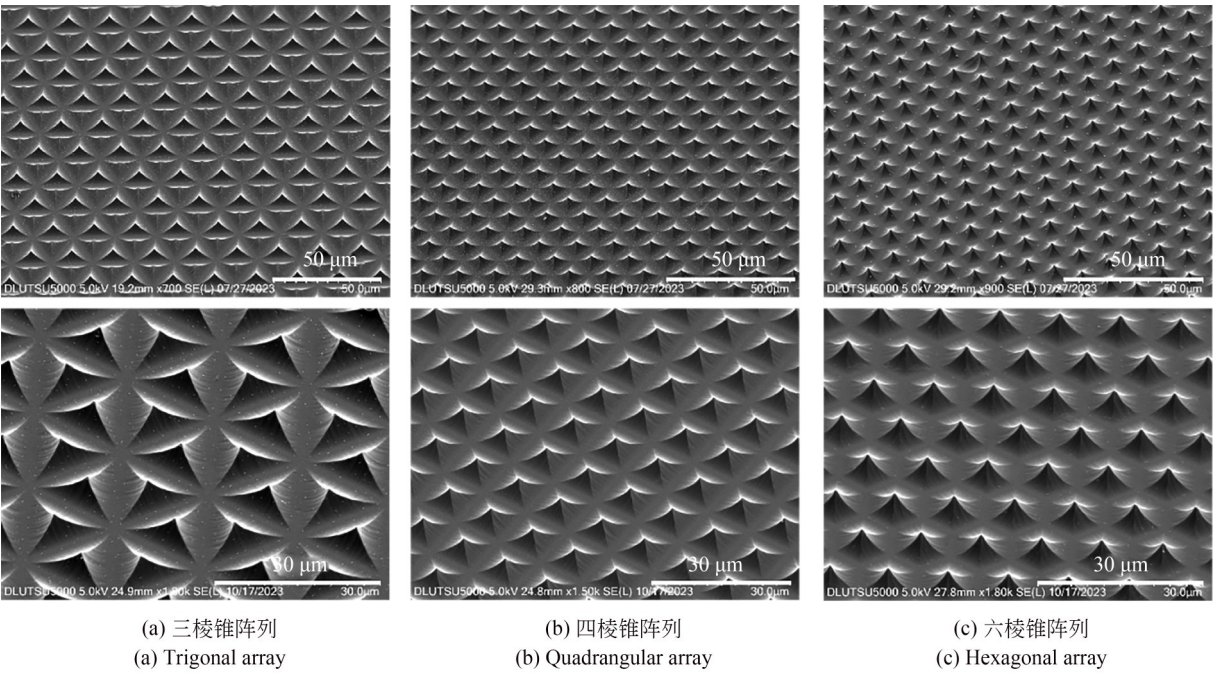


图 8 不同几何形状玻璃微棱镜阵列结构的 SEM 图
Fig. 8 SEM images of glass micropillar arrays with different geometries

表 2 棱锥实际尺寸与设计尺寸的偏差						
Tab. 2 Dimensional deviations between experimental and design data						
Micropillar array	L	H	L'	H'	δ_L	δ_H
Triangular pyramid	17.32	2.3	16.63 ± 0.188	2.29 ± 0.030	-0.877	-0.040
Quadrangular pyramid	10	2.3	9.37 ± 0.255	2.29 ± 0.033	-0.855	-0.043
Hexagonal pyramid	5.77	2.3	5.14 ± 0.188	2.29 ± 0.035	-0.818	-0.045

注: L,H,L' 和 H' 分别代表长度和高度的设计值和实测值, δ_L 和 δ_H 分别代表长度和高度的偏差

制作得到的玻璃微棱镜阵列器件可用于灯具照明、汽车大灯、电视背光板等场合,对分布式 LED 光源产生的光线实现扩散和均匀化的功能。LED 灯具在照明领域直接使用时会使人产生眩

目的感觉,对人眼有一定的危害作用,人们使用具有棱镜结构的光扩散片来消除眩光现象。当 LED 光垂直于棱镜背面射入,光通过玻璃棱镜发生折射后变分散,光线不再集中于特定点,实现

点光源向面光源的转换。本文将制作的不同形状玻璃微棱镜阵列器件置于 LED 光源前,测试其光扩散效果。

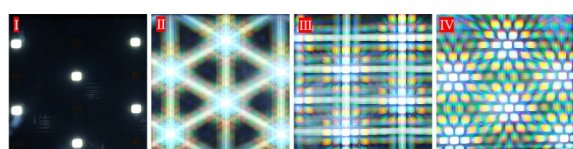
将尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的玻璃片分成 4 部分,4 个区域分别为无结构区、三棱锥阵列区、四棱锥阵列区及六棱锥阵列区。如图 9(a) 所示,没有微结构的区域所呈现出的光为 6 个点光源,光强集中,对人眼产生严重刺激危害。相比之下,通过棱镜区域的光变柔和,有明显的扩散效果。将不同区域的图片进行灰度处理,划分为 5×5 的小区域(见图 9(b))。对每个小区域的灰度值进行均值计算,得到的灰度平均值直方图如图 9(c) 所示。灰度值为 $0 \sim 256$,灰度值为 0 代表全黑,256 为全白。其中,无结构区、

三棱锥阵列区、四棱锥阵列区及六棱锥阵列区的灰度值为 27.39 ± 18.70 , 153.60 ± 34.72 , 154.11 ± 17.72 , 167.38 ± 21.63 。为反映扩散光的均匀度,定义灰度相对偏差为灰度标准差与灰度均值的比值。各区域的灰度相对偏差分别为 68.3%, 22.6%, 11.5%, 12.9%。该结果表明,棱镜区的平均灰度值得到提升,验证了棱镜阵列具有光扩散的效果,图片的整体亮度提升,通过棱镜后的光更为均匀。六棱锥区域的光强度最高,相较于无棱镜区域,扩散光亮度增加了 6.11 倍;四棱锥区域的标准差最小,光线最均匀且强度较高,相较于无棱镜区域,扩散光亮度增加了 4.6 倍。

3 结 论

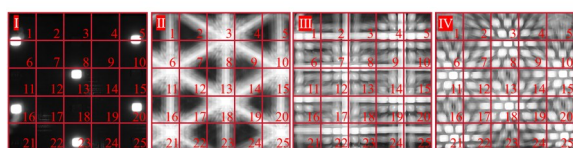
本文以界面效应为主要研究对象,提出了包含界面钻蚀作用的湿法刻蚀新模型,揭示了界面钻蚀与各向同性刻蚀的不同效果,预测了界面钻蚀主导情况下的刻蚀横截面形状。基于该模型提出了界面钻蚀主导的准各向异性刻蚀方法,实验结果验证了理论模型的准确性。建立了硼硅玻璃湿法刻蚀模型,预测准各向异性湿法刻蚀的深度及刻蚀产生单边侧蚀量与实验结果误差在 5% 以内。对硼硅玻璃的准各向异性形貌产生的倾角进行表征,倾角角度约为 51° 。利用准各向异性刻蚀方法制作了不同形状、尺寸、间距的微结构。基于仿真和实验结果,利用湿法刻蚀法制作玻璃微棱镜阵列,阵列间重复性高,得到的棱镜阵列具有扩散光的效果,四棱锥的散光均匀程度最好,其扩散光亮度相较于无结构区域提升了 4.6 倍。

本文提出的玻璃准各向异性湿法刻蚀工艺,改变了传统的玻璃湿法刻蚀横截面为碗状的固有认识,极大地拓展了湿法刻蚀的应用场合。与传统制作工艺相比,该工艺提高了加工效率,大幅缩短了制作时间和成本,为玻璃微棱镜的大规模制造奠定了基础。此外,玻璃准各向异性湿法刻蚀工艺也为具有斜面结构的玻璃器件,如光栅、光波导等的制作提供了新的思路与方法。



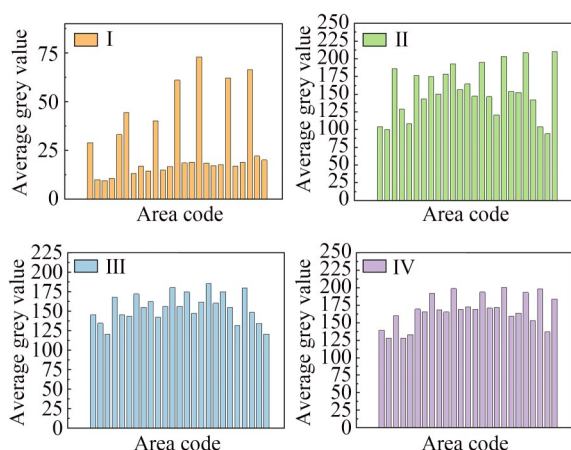
(a) 扩散LED光效果对比

(a) Comparison of LED light diffusion effect



(b) 区域灰度值计算示意图

(b) Analysis of grey scale values in different regions



(c) 不同区域平均灰度直方图

(c) Histogram of average grey scale levels in different regions

图 9 微棱镜阵列器件测试结果

Fig. 9 Characterization of light diffusion using micro-prism arrays

参考文献:

- [1] HUANG S H, TSENG F G. Development of a monolithic total internal reflection-based biochip utilizing a micropism array for fluorescence sensing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(12): 2235-2242.
- [2] LEE S K, JEONG H J, KIM Y C, *et al.* Improvement in CIGS solar cell efficiency using a micropism array integrated with sub-wavelength structures [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 186: 254-258.
- [3] WU C H, LU C H. Fabrication of an LCD light guide plate using closed-die hot embossing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(3): 035006.
- [4] HU M F, XIE J, LI W Z, *et al.* Study on non-isothermal hot-embossing of polymer micro-prism array with efficiency and accuracy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 675-686.
- [5] FORFANG W B D, CONNER T G, YOU B H, *et al.* Fabrication and characterization of polymer micropisms [J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(10): 2071-2077.
- [6] HUNG K Y, TSAI Y W, LEE C F, *et al.* Integration the back-side inclined exposure technology to fabricate the 45° k-type prism with nanometer roughness [C]. 2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). March 5-8, 2012. Kyoto, Japan. IEEE, 2012: 120-124.
- [7] YUSUFU A, YAXIAER Y, SATOSHI A, *et al.* Thin glass micro-dome structure based microlens fabricated by accurate thermal expansion of micro-cavities [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(26): 263501.
- [8] HU M F, XIE J, LI W, *et al.* Theoretical and experimental study on hot-embossing of glass-micropism array without online cooling process [J]. *Micromachines*, 2020, 11(11): 984.
- [9] HU M F, XIE J, SU H H, *et al.* Study on laser-assisted dry micro-ground surface of difficult-to-cut materials [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 2919-2928.
- [10] AKASHI T, YOSHIMURA Y. Deep reactive ion etching of borosilicate glass using an anodically bonded silicon wafer as an etching mask [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(5): 1051-1056.
- [11] KU X Y, ZHANG Z W, LIU X L, *et al.* Low-cost rapid prototyping of glass microfluidic devices using a micromilling technique [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2018, 22(8): 82.
- [12] LUO S W, CHANG T L, TSAI H Y. Fabrication of glass micro-prisms using ultra-fast laser pulses with chemical etching process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 220-225.
- [13] SHUBHAVA, JAYARAMA A, KANNARPADY GANESH K, *et al.* Chemical etching of glasses in hydrofluoric Acid: a brief review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 55(P1): 46-51.
- [14] VAN TOAN N, TODA M, ONO T. An investigation of processes for glass micromachining [J]. *Micromachines*, 2016, 7(3): 51.
- [15] ILIESCU C, CHEN B T, MIAO J M. On the wet etching of Pyrex glass [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 143(1): 154-161.
- [16] PEKAS N, ZHANG Q, NANNINI M, *et al.* Wet-etching of structures with straight facets and adjustable taper into glass substrates [J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(4): 494-498.
- [17] 郭东旭, 任克亮, 王燕昌, 等. 金属局部腐蚀的三维元胞自动机模型 [J]. 力学与实践, 2014, 36(4): 447-452.
- GUO D X, REN K L, WANG Y CH, *et al.* Three-dimensional cellular automata model for predicting local corrosion [J]. *Mechanics in Engineering*, 2014, 36(4): 447-452. (in Chinese)
- [18] ZHOU Z F, HUANG Q A, LI W H, *et al.* A novel 2D dynamic cellular automata model for photoresist etching process simulation [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(3): 652-662.
- [19] 许晓昕, 高翔, 徐静, 等. Pyrex玻璃的湿法深刻蚀及表面布线工艺 [J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 566-571.
- XU X X, GAO X, XU J, *et al.* Pyrex glass wet deep etching and surface wiring [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2007, 13(6): 566-571. (in Chinese)
- [20] MANASA A M, DEEPU B R, SAVITHA P. Composition tailored isotropic and anisotropic wet

etching of glass [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 42: 1270-1273.

[21] SPIERINGS G A C M. Wet chemical etching of

silicate glasses in hydrofluoric acid based solutions [J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(23): 6261-6273.

作者简介:



李菲尔(1999—),女,河北邯郸人,硕士研究生,2021年于南京农业大学获得学士学位,主要从事微纳制造技术中玻璃湿法刻蚀工艺的研究。E-mail:lifeier533@163.com

通讯作者:



刘军山(1975—),男,辽宁大连人,博士,研究员,1998年于西安理工大学获得学士学位,2001年、2005年于大连理工大学分别获得硕士及博士学位,主要从事微纳制造技术、微流控技术和柔性电子的研究。E-mail:liujs@dlut.edu.cn