

纯相位硅基液晶器件的芯片级封装技术

张紫辰, 尤 政

(清华大学精密仪器系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 微纳制造器件与系统协同创新中心, 北京 100084)

摘 要: 本文讨论了纯相位硅基液晶器件(liquid crystal on silicon device, LCOS)的芯片级封装技术. 包括具体基础工艺介绍、关键工艺分析及封装检测、质量控制方法等. 其中详细介绍了工艺步骤中的玻璃基板和硅基板的光学预先检测、基板清洗、取向层处理、胶水涂覆、组装封装及灌注液晶工艺. 同时在密封胶涂覆、灌注液晶及如何控制器件厚度的原则问题上做出了重点阐述, 最后定义了优质封装质量的纯相位硅基液晶器件应该具备的基本要素.

关键词: 硅基液晶器件; 封装工艺; 光学检测; 液晶灌注; 取向层处理

中图分类号: TN305 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)11-2322-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.027

Fundamentals of Die-Level Assembly Techniques for Phase-Only Liquid Crystal on Silicon Devices

ZHANG Zi-chen, YOU Zheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Collaborative Innovation Center for Micro/Nano Fabrication, Device and System, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper describes fundamentals of die-level assembly techniques for phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices, which have not been in-depth discussed previously. The discussion contains the introduction to the basic assembly process, analysis to key assembly procedures, inspection to the assembled device and overall quality control including pre-assembly inspection and cleaning process for both glass and silicon backplane, alignment layer deposition with baking process, glue line processing, assembly and liquid crystal filling process. In particular, glue line writing, liquid crystal filling and overall quality assessment of assembly process have been substantially investigated. Finally, the excellent quality of assembled phase-only LCOS devices with characteristics have been defined.

Key words: liquid crystal on silicon; assembly technique; optical inspection; liquid crystal filling; alignment layer deposition

1 引言

目前硅基液晶器件^[1] (LCOS)封装技术主要包括是晶圆级封装技术^[2-4]和芯片级封装技术^[5,6]. 通常情况下, 商业化振幅调制 LCOS 器件^[7]主要借鉴了成熟液晶显示器件大规模封装技术. 即晶圆级封装技术. 具有代表性的例子是 JVC 公司利用“垂直排列向列电光特性”(Vertically Aligned Nematic, VAN)的 D-ILA 投影机产品^[8]. 晶圆级封装技术首先将大尺寸的玻璃面板以及相应尺寸的硅晶片封装在一起, 然后将封装后的模块切割成为独立的 LCOS 器件模块. 这个过程中需要涉及大量的生产设备: 包括计算机可控的物理、化学清洗; 对应不同液晶材料的取向层 (alignment) 沉积、摩擦 (rubbing)、烘

烤等; 隔离垫 (spacers) 的涂覆; 密封胶的调配、涂抹与固化; 封装前的器件质量检验、玻璃基板和氧化铟锡 (ITO 透明电极), 硅基板的封装、灌注液晶、密封包装等.

对于目前仍在处在原理样机研究阶段的纯相位液晶器件来说, 采用完整的、大规模、高产量生产线的晶圆级封装技术是不现实的. 主要原因有以下几个方面^[9,10]:

(1) 液晶材料、硅基 CMOS 背板以及玻璃基板是根据应用方向而选择的, 晶圆级封装技术无法及时且灵活的满足各种不同基于纯相位 LCOS 器件的应用产品.

(2) 晶圆级封装技术是固定设备参数的专业定制封装产线, 它无法满足在不同应用领域下, 对纯相位 LCOS 器件封装工艺各个步骤的检测和优化.

(3)对于处在“原理样机”阶段的纯相位 LCOS 器件,使用昂贵的商用设备和成熟的晶圆级封装生产线,显然不是一个经济和实惠的科研方案。

综上所述,芯片级封装技术在封装方式的灵活性、保护硅基板的高效性等方面更加适合纯相位 LCOS 器件的需求.更重要的是,本课题组的芯片级封装技术的质量足以和晶圆级封装技术的质量相媲美.纯相位 LCOS 器件的芯片级封装应当包含下面几个重要因素:密封胶材料是否可以在高温环境中保持性能不变;固化取向层的温度控制必须以保证硅基板中像素层的反射率为底线;器件相位的动态调试范围必须满足 2π 以上,同时保持液晶层厚度即器件厚度的均一性^[11]。

本章总结了自主开发纯相位 LCOS 器件的芯片级封装技术,包括硅基板与玻璃基板的光学预检测、清洗工艺的原则、取向层的处理方法、密封胶路的涂覆、液晶材料的灌注、最后的密封及相应的工艺质量控制.封装后的器件具备以下几个特点:

(1)选择硅基板和玻璃基板的曲率基本一致,以便液晶层厚度均匀性能被控制在要求的范围内 ($< \lambda/4$ 工业基本标准)。

(2)封装过程设计必须满足选择液晶材料灵活性以及利用不同 CMOS 硅基背板的功能性。

(3)封装后的器件质量不仅满足本单位科学研究的需要,而且也能够作为原理样机的核心光学引擎为其他科研机构供货。

2 芯片级封装工艺

最初的相位 LCOS 器件是由纯手工完成封装的^[6],导致器件封装质量是随机的,可靠性是无法得到保证的.为了提高相位 LCOS 器件的封装质量和产品的一致性,必须引入有软件控制的芯片级封装设备或者自行设计与定制有关的封装系统^[9];同时密封胶的调配与涂抹过程必须通过高精度器件进行操作;液晶材料的灌注也必须具备包含质量控制环节。

本文中芯片级封装的主要技术指标在于将器件的厚度均一性误差控制在 125nm 之内(工业封装标准,也

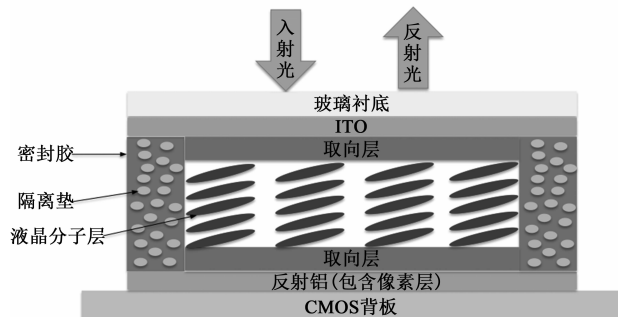


图1 纯相位LCOS器件的基本结构

就是可见光波长的四分之一, $\lambda/4$). 其他指标方面包括:密封胶路的使用、隔离垫的密度、灌注液晶的状态等等。

典型的纯相位 LCOS 器件是“三明治”结构.它由具有氧化铟锡(ITO)透明电极的玻璃基板、集成 CMOS 集成电路工艺的硅基板及液晶层组成(图 1)。

其中硅基板上沉积金属铝反射层从而形成一个有源矩阵基板的像素阵列.液晶材料灌注于 ITO 玻璃基板与硅基板的金属铝反射层之间,通过取向层排列的方式与不同液晶材料产生不同的电光效应对入射光进行相位调试.其中涉及取向层工艺的处理、密封胶的调配与涂抹、液晶材料填充和封口、测试、质量总体评估等等.完成这些步骤之后,纯相位 LCOS 器件将使用粘接的方式连接至外部系统,用于放置在特定的光学应用系统中进行对应用环境的表征与测试。

2.1 纯相位 LCOS 器件的芯片级封装流程

纯相位 LCOS 器件的芯片级封装工艺是一个步骤复杂且繁琐的科研过程.本文总结课题组已经完成的以下几个主要的工艺过程:

(1)纯相位 LCOS 器件模块的封装过程:

- (a)使用干涉仪提前对玻璃基板与硅基板进行光学检测.
- (b)物理、化学方法清洗玻璃基板与硅基板.
- (c)取向层的沉积、烘烤、摩擦等工艺.
- (d)密封胶的调配、点胶及其固化工艺.
- (e)纳米级精度的半自动化组装工艺.

(2)纯相位 LCOS 器件模块灌晶、密封和质量控制

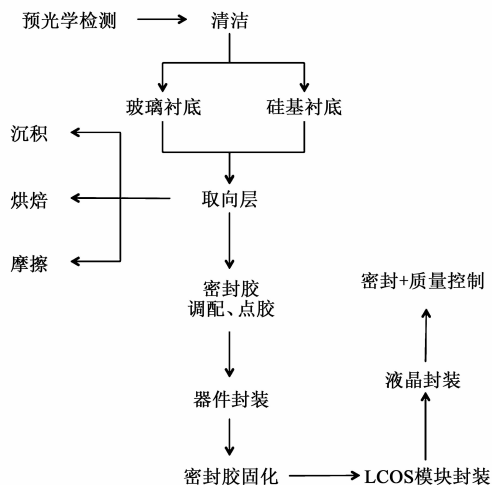


图2 自主研发的芯片级封装工艺

2.2 基板的预先光学检测

由于玻璃基板和硅基板的表面是不可能完全平整的,根据两种基板具有不同的杨氏模量,迫使两基板在封装后保持相对的平整.在晶圆级封装过程中,由于灌

注液晶在先,封装和切割在后,因此通过成熟液晶显示生产线是可以完成的.但这种方法在芯片级封装中无法实现:

(1)单独器件尺寸是毫米级别,因此设备需要更大得力求来保证两基板的相对平整.

(2)纯相位 LCOS 器件的液晶层厚度精确性较振幅 LCOS 器件要求更高,因此寻找到表面相对平整的或具备表面平整度变化相对一致(表面匹配)的基板进行芯片级封装是十分必要的,它是实现高质量芯片级封装的前提条件.

因此芯片级封装的第一步是寻找表面匹配的基板,利用干涉仪进行光谱分析可以实现这个步骤.根据图 3 所示,观察基板表面的最高点到低点(峰谷值)的变化规律,可以预测出封装后液晶层的拓扑结构.

工序.低质量的清洗工艺会导致颗粒物或其他污渍直接污染基板的光学和电学质量.清洗工艺的方法有很多,主要分为物理方法和化学方法.物理方式包括普通刷洗和超声波辅助清洗.纯相位 LCOS 器件一般采用的是 1.1mm 厚的钠钙硅酸盐玻璃基板.该玻璃基板中的一面由极薄的二氧化硅离子阻隔层和 ITO 透明电导层所构成.为了每一步都能够有效地除去残留的污染物,硅基液晶器件玻璃基板的清洗过程通常由适当的化学清洗工艺冲洗开始,包括为使用碱液清洗表面油脂;有机清洁剂、超声波清洗和以及用水喷雾清洗表面残留物;随后采用异丙醇(IPA)蘸洗和蒸馏的方法将基板表面的有机溶剂清洗干净;由于有机污染物和微小粒子是限制高产量的生产的重要原因.因此在漂洗基板的前后,都应当使用高纯的去离子水(电阻率 $18\text{M}\Omega/\text{cm}^3$)去除其表面的粒子.

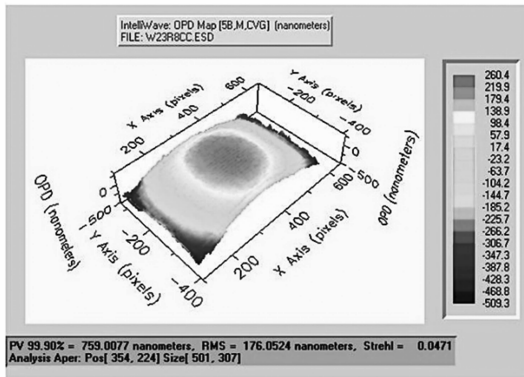
硅基液晶器件的硅基板的清洗过程较玻璃基板则稍有不同.主要因为硅基板的表面是像素层,使用物理刷洗方法会破坏像素层的表面光反射效率.因此基本清洗过程为化学清洗方式:首先,将硅基板浸入丙酮溶液中,并用超声波环境去除光刻胶层;随后将其浸入在异丙醇溶液中,并继续使用超声波去除其他残留物;最后使用氮气枪来清理硅基板表面的残留颗粒物等.

2.4 取向层工艺

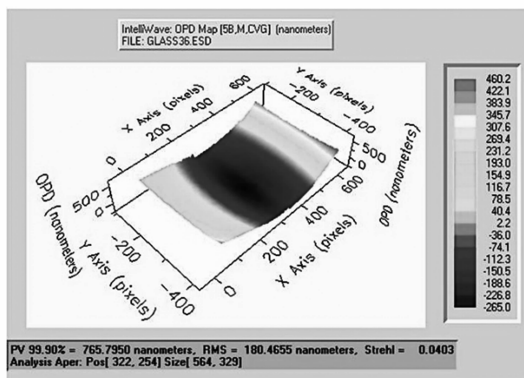
取向层的工艺处理对液晶器件的影响是巨大的^[12~14].纯相位 LCOS 器件的芯片级封装中要求取向层具备稳定且明确的电学性能(例如电阻率的大小);同时纯相位 LCOS 器件的具体应用方向决定了液晶材料的选择及其取向层的特定处理工艺.目前液晶分子矢向平行(包括具有初始夹角)或者垂直于基板的取向层大多是聚酰亚胺材料组成的.它们对于纯相位 LCOS 器件而言非常有意义,因为取向层与基板之间可以保持极小的初始角度,从而保证驱动液晶材料时,液晶分子的取向在空间的变化连续(即“避免向错产生, disclination^[15,16]”).

通常情况下,取向层处理工艺过程涉及的步骤包括聚酰亚胺的涂覆、烘烤、摩擦以及清洗基板等.此工艺处理的关键在于控制核心工艺参数,例如摩擦取向层的力度(包括滑轮的高度、转速及前进速度)、取向层材料的烘烤温度和时间的设置等.

在纯相位硅基液晶器件的封装过程中,保持取向层材料一定的敏感性对于克服各种生产环境和条件是十分重要的.即保持取向层初始角度的稳定性.目前有两种主流方法可以保证取向层的质量,一种是传统的丝网印刷,另一种是高速旋转涂覆.在液晶平板显示产业中,丝网印刷取向层的技术占据统治地位,这不仅是由于印刷技术可以将需要的图案直接涂在基板上,更



(a)



(b)

图3 (a)是硅基板的表面轮廓信息;(b)是玻璃基板的表面轮廓信息

图 3 所示,硅基板和玻璃基板相应的峰谷值为 759nm 和 765nm.两者曲率和峰谷值相当匹配以及两者的相对弯曲变化程度类似.在这种情况下,两基板的曲率变化小于 $\lambda/4$,因此封装后的液晶层的厚度小于 $\lambda/4$ 的可能性最大,这个过程我们称之为“基板匹配”.

2.3 清洗工艺

寻找到表面形貌相匹配的基板后,下一步工艺就是清洗工艺.它是半导体封装工艺中一道必不可少的

重要的是这种方法具备高精度的准确性和高质量的可重复性,这大大降低了生产成本同时提高了产品的质量.但是对于处在原理样机(或定制样机)阶段的纯相位 LCOS 器件而言,高速旋转涂覆的方法更加适合于沉积聚酰亚胺,主要因为:

- (1)玻璃基板和硅基板表面积比较小.
- (2)器件需求量不高.
- (3)传统的玻璃基板表面处理技术可以应用于纯相位 LCOS 器件的基板表面之上.

2.4.1 烘烤工艺

取向层的烘烤工艺通常包括预烘烤与后续烘烤工艺两部分.预烘烤工艺用于蒸发涂覆聚酰亚胺后残留在基板表面的溶剂,这个工艺过程通常需要持续几分钟,响应的烘烤温度与取向层和溶剂本身相关.后续烘烤工艺在预烘烤之后,将此时的温度提升至预烘烤温度 2~3 倍持续进行数小时,本工艺目的在于将聚酰胺酸彻底蒸发,从而进一步优化取向层薄膜的稳定性.这里需要考虑关于后续烘烤工艺温度的一个边界条件:即温度过高会导致像素层的光反射率大大降低,这对于纯相位 LCOS 器件是不可取的.

2.4.2 摩擦工艺

对于玻璃基板的摩擦工艺而言,需要使用定制布料按照特定的方向摩擦聚酰亚胺薄膜,当完成摩擦工艺结束后,基板表面的取向层将会形成沟槽结构,这样可以使得液晶分子在具有沟槽表面结构的薄膜上定向排列.一般来说摩擦取向层的方法是使用带纹理的粗布摩擦取向层的表面.而对于纯相位 LCOS 器件而言,则通常使用绒布来摩擦表面,这是由于绒布的表面毛刺十分密集并且柔软,在摩擦基板的时候可以产生整齐的沟槽并且不会破坏取向层表面的均匀性.

这里需要注意的是,在使用绒布执行摩擦工艺之前需要清洗绒布,否则摩擦过程之中产生的纤维组织对器件的使用具有重大的影响.

使用摩擦机对取向层的表面进行定向的摩擦是需要一定经验积累的,因为影响摩擦工艺的参数很多, Mahajan 曾经报导过摩擦角度,摩擦轮压力,摩擦轮转速,摩擦方向,摩擦次数以及取向层薄膜和绒布接触的长度等等对沟槽的形貌都产生着巨大影响^[17].因此,摩擦材料的选择和摩擦工艺参数的设定决定着液晶分子初始排列的质量及纯相位 LCOS 器件的工作性能.这里需要注意的是摩擦硅基板时产生的静电有可能击穿 CMOS VLSI 芯片上脆弱的氧化层,同时也有可能损害像素层.

目前可以采用蒸发的 SiO_x 取向层的工艺代替传统的摩擦工艺使得取向层排列^[18].然而这对于纯相位 LCOS 器件却并不合适,主要因为取向层初始角度过高

($> 10^\circ$),这会使得有效双折射的最大利用率大为降低,最终导致相位调试范围在的液晶层厚度的要求下变小.在这种情况下,本课题则选择近似天鹅绒的材料作为摩擦材料进行取向层排列,解决了摩擦产生的静电问题,同时采用传统聚合物材料(聚酰亚胺)保证了初始夹角的数值.

2.4.3 取向层的排列

根据分子排列方向与玻璃基板的夹角,取向层排列的方式有三种:沿面排列,带有倾斜角度的沿面排列,以及垂直排列三种方式.沿面排列是指分子的长轴是平行于玻璃基板;而垂直排列是指分子长轴和玻璃基板垂直;同样带有倾斜角度的沿面排列顾名思义则是液晶分子的初始方向与基板之间呈一个固定的锐角.对于纯相位 LCOS 来说,采用“平行取向层结构”并带有倾斜角度的沿面排列的器件(即 P1 结构器件^[19])对硅基背板的电压要求很高,目前暂时不适宜作为纯相位 LCOS 的器件结构;而采用“逆平行取向层结构”并带有倾斜角度的同向排列的器件则可以避免这个问题(图 4(b)).这里需要注意的室:在进行取向层的摩擦过程中,需要利用干燥的氮气手枪清洗基板上可能残留的部分纤维组织,否则会其会弱化取向层排列的强度,从而导致液晶分子的初始排列不均匀,导致器件的光学性能得到下降.图 5 作为上述论述的佐证,将残留在基板表面的纤维组织展现在读者面前,其直径达到几十微米长,可以覆盖至少 2×3 的像素矩阵.

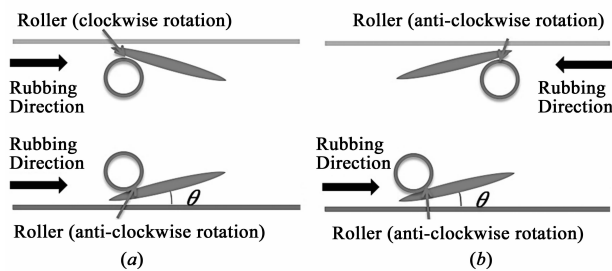


图4

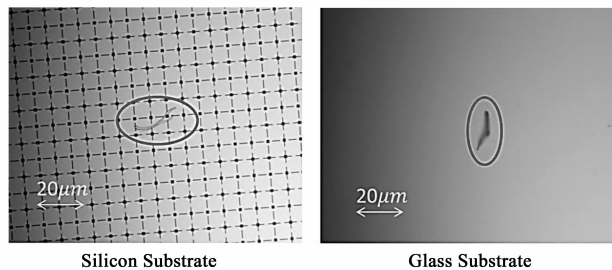


图5 基板上杂质的图片(左图为硅基板,右图为玻璃基板)

2.5 胶水涂覆与封装

密封胶必须具备两个主要作用:即同时保证

LCOS 盒封装的密封性以及液晶层厚度的相对均匀性。对于小体积器件而言,同时满足上述两个方面是十分困难的,主要原因在于芯片级封装的设备最初是由手工完成的,这包括胶水的涂覆和两个基板的对准和封装。目前使用半自动化的机械设备代替传统工艺完成同时完成这两个步骤。

首先介绍胶水涂覆的基本原则:

(1) 胶水涂覆避免和像素阵列接触以防污染。

(2) 填充孔需要预留一定尺寸以保证液晶材料的顺利灌注。

(3) 避免焊接区接触胶水。

由于以上这些原则,密封胶的涂覆可以说是 LCOS 器件芯片级封装过程中最困难的步骤。

图 6 是纯相位 LCOS 器件的涂覆示意图。目前使用的点胶机是一个专门为纯相位 LCOS 器件改装的半自动化仪器(图 7)。点胶机的空气输出端连接至一个注射器,注射器上连接有点胶所使用的针头。通过电脑编程,密封胶水可以准确的涂抹在硅基板的边缘。随后通过数字化机械封装设备(图 8)将两基板精确的封装在一起。

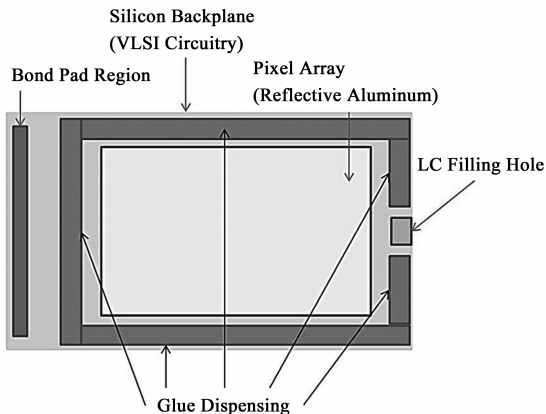


图6 纯相位LCOS器件胶水涂覆示意图

密封胶涂覆和装配工艺是影响 LCOS 器件产量和质量的最关键步骤。目前,通过百级超净间中的半自动化设备的组合,已经可以将纯相位 LCOS 器件的密封胶涂覆工作与封装工艺统一为一个完整的步骤,中间无需人工操作。这样可以大大的提高封装后 LCOS 盒厚度的均一性。

这里需要注意的是密封胶路选择,首选它是一种光敏聚合物,方便后续采用紫外光等方法加速固化效率;其次固化的过程尽量避免预混合、加热或干燥等步骤,以便简化整体封装的工艺步骤;胶水在室温下地粘稠度不能太低,防止胶水在硅基板上得自由扩散,污染像素层;某些特殊应用环境下还需要考虑密封胶水在全温区范围内的稳定性和一致性,以及同时保证胶水

承受温度的上限满足液晶填充工艺中液晶材料的清亮点 (clearing point)。

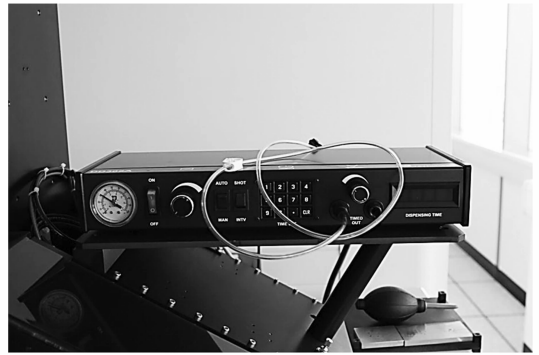


图7 半自动数控胶水涂覆机

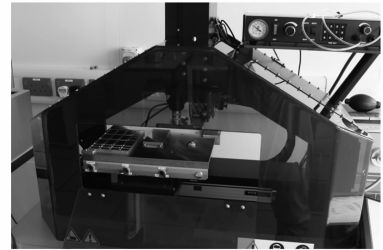


图8 具备纳米级校准精度的数字化机械装配设备

2.6 封装检查、液晶灌注、密封

封装后使用高倍率偏光显微镜系统检查器件的封装质量,其中包括:液晶层的厚度、密封胶路涂覆的均一性、支撑料的分布情况、取向层排列以及基板的划痕等等以便总体评估封装的质量,进行后续的液晶材料灌注工艺。我们使用的液晶灌注仪器是自制的真空填充机(图 9)。其工作原理是通过加热液晶材料,使材料达到清亮点,通过操作杆将液晶材料放置灌注口,随后液晶材料通过毛细效应自动灌注。此时如果适当的提高器件下方加热平台的温度,不仅可以使得灌注速

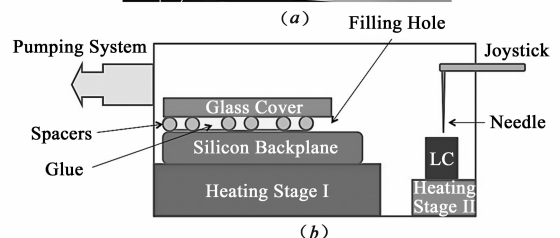
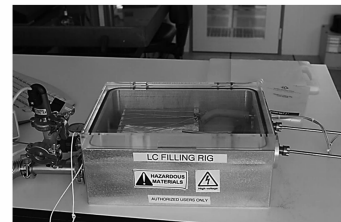


图9 (a)自制液晶材料填充仪器 (b) 示意图

率加快同时减少液晶材料中存在的气泡。

在实验过程中,液晶材料的加热温度必须控制在其清亮点对应的温度以内,否则在长时间的液晶灌注过程中其材料的化学成分将发生变化;从另一方面来说,如果液晶材料的加热温度远远低于其清亮点所对应的温度,那么灌注过程中液晶材料可能无法按照取向层摩擦的方向排列,这无疑会影响到液晶材料在断开与闭合状态之间的光学特性。总而言之,液晶灌注的过程是需要一定经验积累的,对于不同的液晶材料,其灌注工艺也不尽相同,在纯相位 LCOS 器件中,我们使用上述的自制仪器,以最快速的、最接近清亮点的温度,将灌注液晶的工艺完成。纯相位 LCOS 器件的最后一步是使用少量的感光胶水将液晶灌注口密封。需要注意一点:由于液晶材料对短波长光线的吸收会导致液晶材料分子的降解^[20],因此使用反射紫外光线的铝箔材料遮挡住玻璃基板。

3 封装工艺的检验

这部分主要讨论纯相位 LCOS 器件封装后的质量分析,其中包括胶水涂覆质量以及关于液晶灌注工艺和器件厚度控制分析等。

3.1 胶水涂覆与支撑料的分析

图 10 是在 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 范围内胶水涂覆质量观察的放大图以及 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 区域内支撑料的分布情况。如前文所述,胶水涂覆应避免与像素阵列的接触;液晶填充孔应当大小适中。途中胶水的涂覆宽度在 1mm 左右,分布在硅基板边缘。

为了控制液晶层的厚度,支撑料在密封交路中的密度分布对于控制液晶层厚度而言十分重要。最佳的支撑料分布如图 10 所示,即每 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 区域内 5 个左右;在 LCOS 器件的一个短边上,存在一个孔径为 $2 \sim 3\text{mm}$ 的液晶填充孔。如果填充孔比该空大,液晶层的厚度将发生改变;如果填充孔比该孔小,液晶填充速率

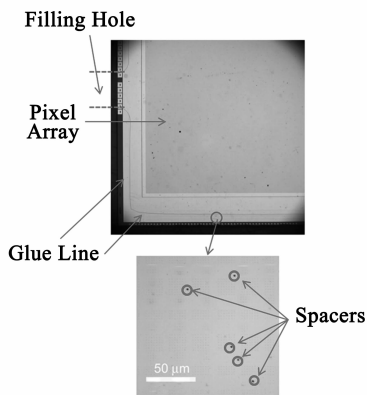


图10 硅基板边缘涂抹混有支撑料的胶水,图中黑点为支撑料

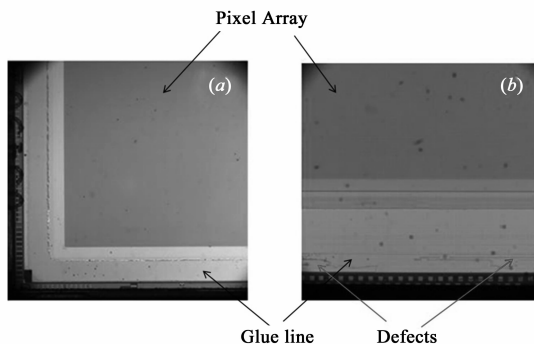


图11 两个不同公司生产的LCOS器件

将受到影响。

对比 LCOS 器件的晶圆级封装过程,目前实验室的芯片级封装可以与之相媲美。

图 11 是商业化的 LCOS 器件的晶圆级封装过程。总体上讲,图 11(a)图均具备整齐地胶水涂覆和均一的器件厚度,像素层也未受到胶水的污染,与芯片级封装水平近似。但在图 11(b)的胶水涂覆质量上则存在明显的缺点,由于胶水的密封过程未达到要求,使得液晶材料逐渐渗出器件外部,其中混合在胶路中的蓝色部分就是液晶材料。在此图中,黑色箭头表示像素阵列以及粘接线,图 11(b)中的 Defects 箭头表示粘接线上的缺陷。图 11(a)与(b)的干涉图像通过 Olympus BX51 电子显微镜观察,利用了 $365 \sim 436$ 纳米波段的水银光源,通过两篇交叉摆放的偏振片,利用微分干涉差得到的图像。

3.2 封装且灌注液晶后的器件质量分析与优化

封装且灌注液晶后的器件质量分析可以体现封装过程中出现的各种问题,例如基板上的刮痕、灌注液晶时形成的破坏取向层的问题、胶水涂覆等方面。这一步工艺监测和优化是提升 LCOS 器件芯片级封装技术的基本步骤之一,因此在器件最后检验过程中是必不可少的。

图 12 展示了灌注液晶前/后的在器件相同位置的比较,左侧是未经过液晶灌注的器件,右侧是经过液晶灌注的器件。在左侧图中胶水涂覆排布整齐且未于像素阵列接触。图中可以看到的污点是玻璃基板的外侧表面。通过偏振光观察右侧经过灌注工艺的器件,可以揭示出取向层结构已被部分破坏,例如白色部分表示出玻璃基板内部存在划痕;扩散的纹路表示液晶灌注的过程未达到其清亮点对应的温度,从而导致液晶分子初始排列不均匀,同时可以推断出,液晶材料灌注过程速度较快,原因有:

(1)真空填充仪器的中气压释放过于迅速,巨大的气压差会使得细管效应破坏了液晶分子的初始分布。

(2)灌注孔的尺寸过大。

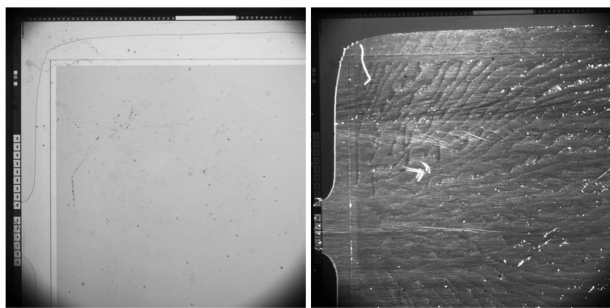


图12 灌注液晶前/后的在器件相同位置的比较
(干涉图像得到的方法与图11一致)

综上所述,液晶灌注过程需要严格控制的方面如下:精确的温度控制、适当速度的气压释放以及避免液晶成分在过长灌注时间中发生变化.按照上述基本要求和规则,图13展示了两个较好的封装并灌注液晶的器件质量.它的厚度为 $2\mu\text{m}$,取向层摩擦均匀,没有遭到灌注过程的破坏.就目前液晶材料选材角度来看,向列型液晶材料是使用频率比较高的,因为它可以实现连续相位调试,而不像铁电液晶材料只具备0/1调试.一般灌注向列型液晶材料需要温度范围在 100°C 左右,时间最好控制在 5min 以内完成灌注,否则液晶材料的成本会在加热过程中产生变化,导致器件光学特性的降低.



图13 在各向同性态时刻灌注液晶材料的两个成功的例子.
观测方法:交叉偏光系统镜在黑暗状态下完成拍摄.
(干涉图像得到的方法与图11一致)

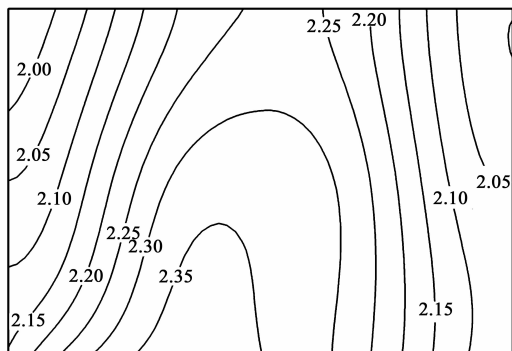


图14 器件液晶层厚度等高线

3.3 器件厚度均一性的控制

根据本文2.2指出,为了保证液晶层相对厚度的一致性,分别对玻璃基板和硅基板的表面形貌进行光学预监测.

由图3信息所示,可预估得到两基板封装后的中间部分较厚,四周区域较薄,液晶层厚度差别可以控制在 20nm 左右.

图14的封装结果厚度等高线图,它准确的验证了的预测结果.表1是该器件厚度变化的统计结果,该器件的平均厚度为 $2.18\mu\text{m}$,厚度标准偏差控制在 $0.12\mu\text{m}$ (120nm ,小于 $\lambda/4$).“N”表示像素区域的厚度被分成了 5×7 部分.其中数字35表示测量次数.通过测量证明芯片级封装工艺能够满足纯相位 LCOS 器件在空间均匀性上的要求.

表1 图14中器件厚度的统计分析结果

| N total | Mean | Standard Deviation |
|---------|-------------------|--------------------|
| 35 | $2.18\mu\text{m}$ | $0.12\mu\text{m}$ |

4 总结

对比大规模商业化生产纯相位 LCOS 器件,芯片级封装在目前小试、中试阶段的优势依然十分明显:首先,纯相位 LCOS 器件目前主要用于大学、科研院所、大型企业的前瞻性科学研究,因此器件需求量不大,但应用领域比较广阔,对于动辄上亿美元投入的大型液晶器件生产线来说,显然浪费了巨大的产能;其次目前参与研究的单位较多,各自持有相关专利,大规模生产之前不厘清知识产权的问题是商业化的壁垒之一;综合上述两条,显然芯片级封装对于多种液晶材料的选择、硅基基板的设计、封装工艺的控制、以及应用方向的改进与优化都是经济实用的好方法.

本文介绍了使用数字化半自动机械系统完成高质量纯相位 LCOS 器件芯片级封装基本原则、工艺流程以及相关的核心关键问题.最终总结出一个高质量的纯相位硅基液晶器件必须具备以下几个重要的特点和性能指标:

- (1)液晶层厚度的均一性,即器件厚度的均一性小于 $1/4$ 波长范围.
- (2)完整的胶水涂覆工艺,牢固的密封以及高效的紫外固化工艺,防止器件在高温时弱化甚至开口.
- (3)液晶材料灌注均匀,液晶分子整齐的按照取向层的设置排列,且取向层完整.
- (4)根据 VLSI 线路布局保证胶路的涂覆宽度,从而达到密封和保持器件厚度均一性的目的.
- (5)工艺过程具备分布式控制和质量检测.

图 15 展示了高质量芯片级封装纯相位 LCOS 器件的例子.图 16 和表 2 则给出的结果表明了纯相位 LCOS 器件的厚度变化可以优于 $\lambda/4$. 器件平均厚度为 $1.816\mu\text{m}$, 标准差为 90nm (小于 $\lambda/6$).

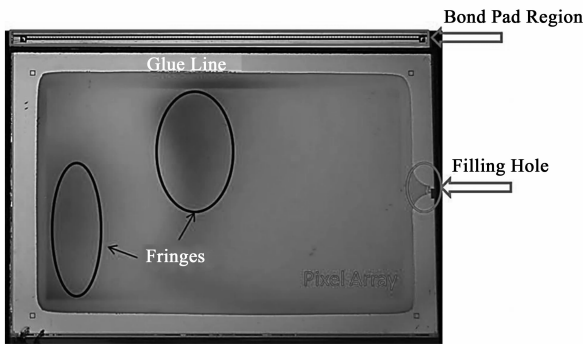


图 15 高质量纯相位 LCOS 器件的封装
(干涉图像得到的方法与图 11 一致)

综上所述,本文介绍了一种可以实现小量产的芯片级纯相位硅基液晶器件封装技术.通过计算机控制的半自动化机械设备,升级封装与控制工艺,实现可以媲美商业化生产线的高质量器件封装工艺水平.

表 2 器件厚度的统计值

| N total | Mean | Standard Deviation |
|---------|-------------------|--------------------|
| 15 | $1.82\mu\text{m}$ | 90nm |

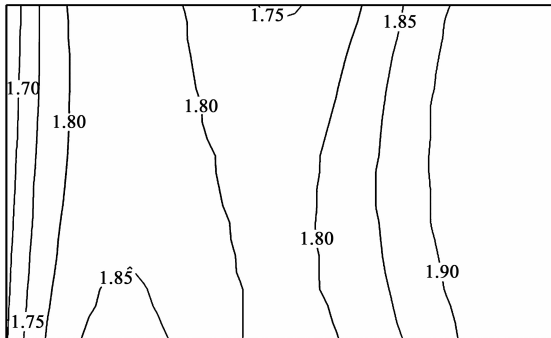


图 16 器件液晶层厚度等高线示意图

附录:器件厚度的测量与计算方法

器件厚度测量的方法是干涉法,通过入射光的直接反射信息和部分透射光的信息,计算光束的相位差.

$$\delta = \frac{2d \cdot n}{\lambda}$$

其中 n 是衍射常数, d 是器件的厚度.假设在玻璃衬底下基板的再次反射光线可以忽略不计.根据干涉原理,当光的相位差是 π 的奇数倍时,反射光和透射光的干涉相互抵消.对于两束入射光产生相消干涉,则必须满足:

$$\delta_{i+1} - \delta_i = 2\pi = 2d \left(\frac{1.00}{\lambda_{i+1}} - \frac{1.00}{\lambda_i} \right)$$

δ 是相位, λ 是入射波长, i 是自然数,根据上述公式,通过连续最小波长反推当 2π 相位差产生时候,器件的厚度.

参考文献

- [1] Vettese D. MICRODISPLAYS Liquid crystal on silicon[J]. Nat Photonics 2010, Nov;4(11):752-754.
- [2] J F Magana, L A Dass. Wafer level electro-optical sort testing and wafer level assembly of micro liquid crystal-on silicon (LCOS) devices[P]. US Patents, 10/205,469,2005.
- [3] H De Smet, J Van den Steen, P Colson. Use of stitching in microdisplay fabrication[J]. Proc. SPIE2002,4657:23.
- [4] M Lu. Nematic liquid crystal technology for Si wafer-based reflective spatial light modulators[J]. J SID, 2002, 10(1):37-47.
- [5] Z C Zhang, A M Jeziorska-Chapman, N Collings, M Pivnenko, J Moore, B Crossland, D P Chu, B Milne. High quality assembly of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices[J]. J Disp Technol, 2011, 7:120-126.
- [6] A Choubey, F Andros, B G Sammakia. Study of assembly processes for liquid crystal on silicon (LCOS) microdisplays[J]. IEEE T Compon Pack T, 2005, 28:303-310.
- [7] J L D delaTocnaye, L Dupont. Complex amplitude modulation by use of liquid-crystal spatial light modulators[J]. Appl Optics, 1997, 36:1730-1741.
- [8] JVC D-ILA. [OL]http://dila.jvc.com/
- [9] Z Zhang, A M. Jeziorska-Chapman, N Collings, M Pivnenko, J Moore, W I Milne, W A Crossland, D P Chu. High quality assembly of liquid crystal on silicon (LCOS) devices for phase-only holography[J]. Proc SPIE, 2010, 7618:76815.
- [10] P T Kazlas, K M Johnson, D J McKnight. Miniature liquid-crystal-on-silicon display assembly[J]. Opt. Lett. 1998, 23:972.
- [11] Zhang ZC, Yang HN, Robertson B, Redmond M, Pivnenko M, Collings N, et al. Diffraction based phase compensation method for phase-only liquid crystal on silicon devices in operation[J]. Appl Optics 2012 Jun 10;51(17):3837-3846.
- [12] DeGennes, P G & Prost, J. The Physics of Liquid Crystals 161 [M]. Clarendon, Oxford, 1993.
- [13] Stöhr J, et al. Microscopic origin of liquid crystal alignment on buffed polymer surfaces[J]. Macromolecules, 1998, 31:1942-1946.
- [14] Stöhr, J & Samant, M G Liquid crystal alignment by rubbed polymer surfaces: A microscopic bond orientation model. J. Electron Spectrosc [J]. Rel. Phenom. 1999, 98-99:189-207.

- [15] Robert B. Meyer. Point disclinations at a nematic-isotropic liquid interface [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1972, 16(4):355 – 369.
- [16] Robert B. Meyer. On the existence of even indexed disclinations in nematic liquid crystals [J]. *Philosophical Magazine*. 1973, 27(2):405 – 424.
- [17] M P Mahajan, C Rosenblatt. Correlation between rub-induced grooves in a polyimide-treated substrate and microstructure of rubbing fiber: An atomic force microscopy study [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83:7649 – 7652.
- [18] M Schadt, K Schmitt, V Kozinkov, V Chigrinov. Surface-induced parallel alignment of liquid-crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 1992, 31: 2155 – 2164.
- [19] P J Bos and K R Koehler-Beran. The pi-cell: a fast liquid-crystal optical-switching device [J]. *Mol Cryst Liq Cryst*, 1984, 113:329.
- [20] Donald Davis, Scott Worthington. Offset printing of gasket seals for wafer scale processing of microdisplays [P]. *US Patents 09/738,575*, 2002.

作者简介



张紫辰 男, 1983 年 10 月出生, 北京市人, 获得剑桥大学电气工程系博士学位, 清华大学精密仪器系助理教授, 主要从事 MEMS 微集成技术及液晶器件技术等工作的研究, 已发表学术论文 20 余篇。

E-mail: zz241@tsinghua.edu.cn



尤 政 男, 1963 年 12 月出生, 江苏扬州人. 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 长江学者. 现为清华大学机械工程学院院长、清华大学精密仪器系系主任, 主要研究领域为微米/纳米技术、微光机电系统集成、微纳卫星技术。

E-mail: yz-dpi@tsinghua.edu.cn