

基于200 mm硅基GaN的单色Micro LED微显示芯片制备及量产难点分析

彭劲松¹, 杨建兵¹, 殷 照¹, 汪曾峰¹, 宋 琦¹, 吴 焱²

(1. 南京国兆光电科技有限公司, 南京 210016; 2. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

摘 要: 应用200 mm硅基GaN外延片, 研究晶圆级键合、薄膜转移和微小尺寸像素制备等技术, 实现了Micro LED微显示阵列的点亮与显示功能。相对于传统蓝宝石基GaN外延晶圆, 200 mm硅基GaN外延晶圆与硅基驱动晶圆尺寸更匹配, 有利于通过晶圆键合工艺实现低成本量产。同时对工艺量产的难点和解决思路进行了分析, 指出显示缺陷是目前亟待解决的问题。

关键词: 发光二极管微显示芯片; 硅基氮化镓外延片; 显示缺陷

中图分类号: TN405 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)02-0129-04

Preparation of Monochrome Micro LED Microdisplay Chip Based on 200 mm Silicon-based GaN and Analysis of its Batch Production Difficulties

PENG Jinsong, YANG Jianbing, YIN Zhao, WANG Zengfeng, SONG Qi, WU Yan

(1. Nanjing Guozhao Optoelectronic Technology Co., LTD., Nanjing 210016, CHN; 2. The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

Abstract: Using 200 mm silicon-based GaN epitaxial wafers, wafer-level bonding, thin film transferring and micro-size pixel preparation were studied, and the lighting and display functions of Micro LED microdisplay array were realized. Compared with traditional sapphire-based GaN epitaxial wafers, 200 mm silicon-based GaN epitaxial wafers were more compatible with silicon-based drive wafer sizes, which was conducive to low-cost batch production through wafer bonding process. At the same time, the difficulties and ideas of batch production were analyzed, and it was pointed out that the defect was a problem that needed to be solved urgently.

Key words: Micro LED micro-display chip; silicon-based LED epitaxial wafer; display defect

引 言

以AR/VR设备为代表的近眼显示终端有望在智能手机之后, 实现信息显示技术的又一次革命,

人类的双手可以从手机的抓握状态中释放出来, 人类可以在步行、工作、驾驶等动态操作中同步获取信息, 提升四肢与大脑的密切合作能力, 提升信息交流和生产生活的效率。微显示芯片是AR/VR设

收稿日期: 2023-03-01

作者简介: 彭劲松(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事硅基微显示器件与工艺技术的研究; (E-mail: s4d@163.com)

杨建兵(1984—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事硅基微显示器件与工艺技术的研究;

殷 照(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事硅基微显示器模组电路与显示技术的研究。

备的核心芯片, Micro LED 微型显示技术在性能、寿命和可靠性等方面相比 OLED、LCOS 等具备明显的优势, 被认为是最佳的解决方案^[1-2]。

Micro LED 微型显示技术结合了新型显示、三代半导体和大规模集成电路等产业热点技术, 国内外都在竞相开展研究, 但尚未突破到大规模应用水平。其中 GaN 发光二极管的效率与功耗、CMOS 驱动芯片的高集成度、全彩化显示问题、良率与成本等是阻碍 Micro LED 微显示芯片实现批产应用的难点。因此, Micro LED 微型显示技术的研发必将促进三代半导体技术突破, 助力集成电路产业升级, 实现显示技术革命, 进而推动人工智能、元宇宙等高端信息产业发展^[3-5]。

目前应用于 AR/VR 等设备的硅基 Micro LED 微显示芯片, 像素尺寸小于 10 μm 量级, 难以通过巨量转移路线进行制备, 晶圆级键合路线更具批产性。硅基微型显示技术基于 200 mm 以上硅基 CMOS 驱动, 传统的蓝宝石基、GaAs 基 LED 晶圆最大做到 150 mm, 物理尺寸的失配不利于通过晶圆级键合工艺实现低成本的批产, 而 200 mm 硅基 LED 圆片在近年已实现红、绿、蓝三色点亮, 为高效率低成本 Micro LED 微显示芯片的制备提供了可能^[6]。项目组通过 200 mm 硅基 CMOS 驱动圆片与 200 mm 硅基 GaN 外延片的晶圆级键合、衬底转移和微小尺寸像素制备等技术的研究, 实现了单色 Micro LED 微显示阵列的点亮与显示功能。

1 总体工艺方案

以 AR/VR 为代表的近眼显示系统要求微显示芯片具备小型化、高分辨率、高亮度等特征, Micro LED 微显示阵列的像素尺寸需要达到 10 μm 以下, 芯片级巨量转移技术在该尺寸上无法做到高效率和高良率, 晶圆级键合技术成为优选方案。本工艺将 200 mm 硅基 CMOS 驱动圆片与 200 mm 硅基 GaN 外延圆片进行晶圆级键合, 因 Micro LED 阳极与驱动电路的电学连接要求, 采用金属键合技术, 再通过背硅衬底去除技术, 完成 GaN 外延层向驱动晶圆的整体转移; 在 Micro LED 阵列化制备方面, 采用微细光刻工艺, 准确定义阵列的位置与尺寸, 并将像素之间进行物理隔断, 实现单个像素的独立驱动; 在阴极制备方面, 采用透明导电材料进行大面积连通, 实现 Micro LED 的电学通路并保持较高的光学透过率; 在显示模组制备方面, 采用半导体先进封装工艺, 实现显示阵列与外围 PCB 电路连接。

在 200 mm 晶圆级键合工艺方面, 因图形化对准都在后续的像素工艺中完成, 所以键合时无需精确对准, 通过材料选择和工艺参数优化可以实现低应力、低翘曲度和较高的结合强度, 满足键合后晶圆的工艺加工要求。

主要工艺流程如图 1。

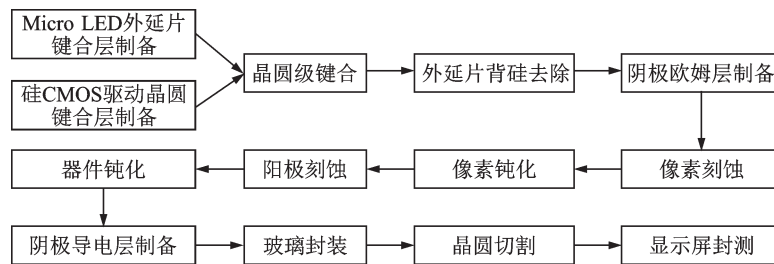


图 1 Micro LED 微显示芯片工艺流程简图

Fig.1 Process flow diagram of Micro LED microdisplay chip

2 结果与讨论

2.1 Micro LED 微显示阵列

通过上述工艺路径, 突破了 200 mm 硅基 Micro LED 外延片与 200 mm 硅基 CMOS 驱动晶圆的键合工艺技术, 攻克了微小尺寸像素垂直型 Micro LED 器件制备工艺技术, 完成了单色 Micro LED 微显示阵列制备, 如图 2、3 所示。该器件最小像素间距达到 5 μm , 阵列分辨率高达 1 280 \times 1

024, 获得了较好的正反向电学特性, 实现了阵列点亮和显示功能。

2.2 Micro LED 微显示阵列性能

在电学特性方面, Micro LED 阵列是在一定区域内由高达百万级的独立二极管组合而成, 总电学特性是所有二极管电学特性的总和, 部分二极管电学特性的差异将导致阵列总电学特性的漂移, 尤其在反向漏电方面, 部分二极管漏电会造成该阵列无法正常加载电压而导致点亮失败。本项目组通过阴

阳极欧姆接触、器件清洗与钝化等工艺研究,提升阵列电学一致性,获得了较好的电学特性,如图4所示。

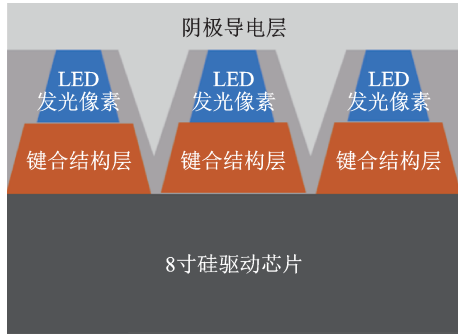


图2 Micro LED 微显示阵列剖面结构示意图

Fig.2 Profile schematic of Micro LED microdisplay array

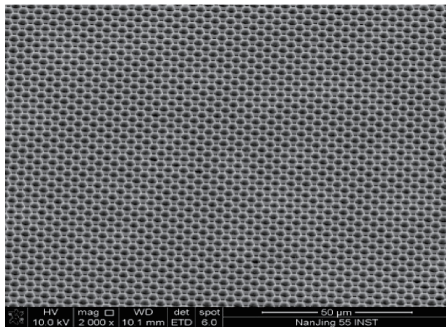


图3 Micro LED 微显示像素阵列形貌图

Fig.3 Topography of Micro LED microdisplay pixel array

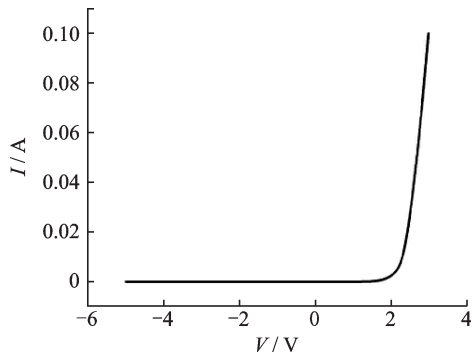


图4 Micro LED 微显示阵列 I-V 特性

Fig.4 I-V characteristics of Micro LED microdisplay array

在光学特性方面, Micro LED 阵列在电流驱动下,实现了正常点亮,绿色 Micro LED 阵列获得了较高的发光亮度(如图5)。随着硅基外延材料和器件工艺技术的进步,阵列亮度还有较大提升空间。

在显示特性方面,开发了高质量的晶圆级键合工艺,连接了发光二极管阳极与硅基驱动像素电路,实现了驱动芯片对单个发光二极管的独立控制,成功将外部信号接入 Micro LED 显示阵列,完成了图像显示(如图6)和视频输出。

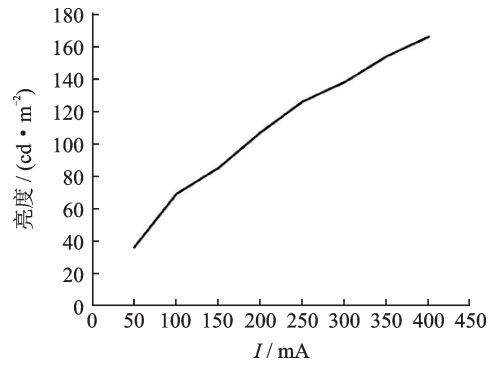


图5 Micro LED 微显示阵列 I-L 特性

Fig.5 I-L characteristics of Micro LED microdisplay array



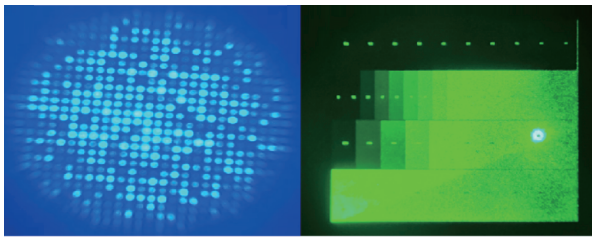
图6 Micro LED 微显示阵列显示图片

Fig.6 Display pictures of Micro LED microdisplay array

3 微显示芯片工艺批产难点分析

Micro LED 微显示芯片工艺存在功耗和彩色化难题。在功耗方面,因 GaN 材料的高可靠性,能通过高密度电流输入获得高亮度,但必须付出高功耗的代价,这会导致器件整体升温,降低显示性能和长期寿命,对光电显示系统也是一种负担,并危及近眼使用安全。提高光电显示效率及做好散热设计是必须采取的措施,涉及的技术领域包括外延材料、器件工艺、驱动芯片和显示模组等各方面,包含光电热等多维度物理场,技术交叉复杂^[6]。在彩色化方面,目前业界思路百花齐放,包括量子点色转换、三单色光学合成和外延法等方案,但没有形成统一的最佳方案^[2-4]。总之在面向批产需求时,现有技术需进一步研究与优化。

上述问题一旦在技术上实现突破,易于达成比较稳定的工艺状态并实现批产能力。在初级产品时期,可以忍受相对低下的性能和效率,但显示缺陷易于被人眼捕捉,无法忽视,过多的显示缺陷会导致良率大幅下降,芯片成本居高不下,难以实现市场可接受的价格^[6],同时也会造成安全隐患大幅度增加,降低芯片长期使用寿命。Micro LED 微显示芯片的显示缺陷主要包括:宏观不均匀性视觉缺陷,像素级亮度不均匀性缺陷,像素级坏点缺陷等^[7-8],如图7所示。



(a) 像素级亮度不均匀性缺陷 (b) 宏观及像素级显示缺陷

图 7 Micro LED 微显示芯片显示缺陷

Fig.7 Display defects of Micro LED microdisplay chip

宏观不均匀性视觉缺陷在人眼目视时即可发现,多半来自光刻、刻蚀、薄膜生长等工艺不均匀,比如光刻曝光时焦平面与圆片平面的不平行,涂胶

时的跨台阶划线等,这类缺陷造成的工艺差异位置不完全固定,且不易被工艺参数具体表征,但在宏观视觉下呈现明显的过渡性差异。像素级亮度不均匀性缺陷在显微镜下可观察到,表现为某些像素在亮度上存在明显差距,其原因主要归为像素级电学差异,如二极管正向导通电学差异或侧壁洁净度引起的漏电差异等,存在较强的随机性。像素级坏点缺陷也可在显微镜下观察到,尺寸较大时肉眼可以观察到,主要原因为各步工艺过程中的随机性颗粒、缺陷引起的像素级电学异常或光路阻挡,导致某些像素无法观察到光输出。

主要缺陷及建议改善措施总结如表 1。

表 1 主要缺陷及建议改善措施

Tab.1 Main defects and improving measurements

序号	缺陷类型	表现形式	可能原因	建议改善措施
1	宏观不均匀性视觉缺陷	片状缺陷	大面积片状污染物 光刻焦平面失真	工艺控制与清洗 大面积光刻时的焦平面精确校准
		划线状缺陷	人为、设备接触式划伤 高台阶、大颗粒在旋转工艺中放大	工艺控制与排故 台阶与光刻优化;大颗粒控制与清洁
		环形缺陷	工艺产生气泡	流体控制、台阶优化等
2	像素级亮度不均匀性缺陷	邻近像素亮度明显差异	像素导通电学差异	像素图形化工艺控制与清洁、阴阳极导通电阻优化、外延质量提升 ^[2] 等
3	像素级坏点缺陷	像素级亮点	像素驱动电路电流失控	像素驱动控制管工艺及设计优化
		像素级暗点	像素驱动电路断路	像素驱动电路接口清洁
			二极管断路 颗粒遮挡光路	阴阳极接口清洁 工艺控制与清洁

上述缺陷是比较典型的缺陷,但并非全部。分析了缺陷原因,认为 Micro LED 微显示芯片工艺流程较为冗长,增大了缺陷污染的几率和缺陷控制的难度,对批产工艺的稳定性 and 良率造成极大影响。要解决上述缺陷问题,除了在工艺条件上通过技术优化达成高均匀性和高良率之外,对整体工艺流程的严格管控亦相当关键。

4 结束语

从满足消费类电子应用的需求出发,选择了与驱动晶圆尺寸匹配的 200 mm 硅基 Micro LED 工艺路线,研究突破了晶圆级键合和衬底转移、微小尺寸像素垂直型 Micro LED 器件制备等技术,实现了单色 Micro LED 微显示阵列的点亮和显示功能。

应用于近眼显示的 Micro LED 微显示芯片性能要求高,制备工艺复杂,存在光电效率、散热、彩色化等很多难题尚待突破,需要外延材料、光学材料、驱动电路、器件工艺和显示模组等各领域研究力量长期的共同努力,而解决好显示缺陷等基础性

工艺问题并降低芯片成本、突破单色芯片的批量产品化及应用难题应被置于优先的努力方向。一旦能形成初级产品的批量应用,必将给三代半导体和新型显示等产业注入巨大激励,为高端 Micro LED 微显示芯片的研究开发打造良性循环的发展环境,为高端信息产业发展奠定坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 严 群. 基于微米级 LED 阵列的高度集成半导体信息显示[J]. 光电子技术, 2022, 42(3): 0159-0166.
- [2] 蒋府龙, 许非凡, 刘召军, 等. 氮化镓基 Micro LED 显示技术研究进展[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(11): 2013-2023.
- [3] 季洪雷, 张萍萍, 陈乃军, 等. Micro LED 显示的发展现状与技术挑战[J]. 液晶与显示, 2021, 36(8): 1101-1112.
- [4] 邵建鹏, 郭伟玲. Micro LED 显示技术研究进展[J]. 照明工程学报, 2019, 30(1): 18-25.
- [5] 耿 怡. Micro LED 技术和产业化研究进展[J]. 微纳电子与智能制造, 2021, 3(3): 4-7.
- [6] 陈佳昕, 李梦梅, 郭伟玲. Micro LED 微显示芯片制备技术[J]. 照明工程学报, 2021, 32(1): 12-18.
- [7] 冯玉森, 郑瑞涛, 王 峰, 等. LED 显示单元显示缺陷检测[J]. 电子科技, 2013, 26(9): 185-188.
- [8] 邹海明. LED 显示单元显示缺陷检测分析[J]. 电子信息, 2020, 5: 40-41.