Micro-LED器件工作原理、工艺实现方法及未来发展趋势和挑战

姓名 李霄奕; 学号 PB21511897

摘 要

近年来，半导体光电技术持续发展。同时，伴随着便携式显示设备的大规模应用，用户对于低功耗、高亮度、高分辨率的显示技术的需求不断提升。其中，属于在发光二极管（LED）技术日渐成熟的背景下，微型发光二极管（Micro LED）应运而生，它融合了半导体微纳加工技术。相比于液晶（LCD），它不需要使用背光板，而是直接发出对应颜色的光。跟同属于新一代显示技术的竞争对手——有机发光二极管（OLED）相比，Micro LED具有高亮度、长寿命、快速响应时间、工作温度范围宽和光转换效率高等优点，使其成为下一代显示技术的重要候选。但同时，也存在制造成本高等缺点。本文对Micro LED的发光原理、制造工艺进行介绍，并在最后分析目前Micro LED面临的困难和挑战，并对Micro LED的未来进行展望。

**关键字：**Micro-LED，工作原理，工艺实现原理，发展前景，技术趋势

## 目 录

摘要---------------------------------------------------------------Ⅰ

[目录 2](#_Toc168423447)

[第一章 绪论 3](#_Toc168423448)

[1.1 研究背景及发展历程 3](#_Toc168423449)

[1.2 章节安排 3](#_Toc168423450)

[第二章 Micro LED工作原理 5](#_Toc168423451)

[2.1 发光原理 5](#_Toc168423452)

[2.2 控制原理 5](#_Toc168423453)

[第三章 Micro LED的工艺实现方法 7](#_Toc168423454)

[3.1 像素点的工艺实现 7](#_Toc168423455)

[3.1.1 倒装结构 7](#_Toc168423456)

[3.1.2 垂直结构 8](#_Toc168423457)

[3.2 全彩阵列的工艺实现 10](#_Toc168423458)

[3.2.1 金属微凸点制备技术 10](#_Toc168423459)

[3.2.2 巨量转移技术 11](#_Toc168423460)

[第四章 Micro LED面临的挑战 12](#_Toc168423461)

[4.1 技术方面的挑战 12](#_Toc168423462)

[4.1.1 巨量转移技术 12](#_Toc168423463)

[4.1.2 全彩技术 12](#_Toc168423464)

[4.1.3 驱动技术 12](#_Toc168423465)

[4.1.4 修复技术 12](#_Toc168423466)

[4.2 市场方面的挑战 13](#_Toc168423467)

[4.2.1 成本 13](#_Toc168423468)

[4.2.2 竞品 13](#_Toc168423469)

[4.2.3 使用场景 13](#_Toc168423470)

[第五章 总结 14](#_Toc168423471)

# 绪论

### 1.1 研究背景及发展历程

Micro LED发源于传统的LED技术，传统的LED大小从1mm到150μm不等。传统的LED对显示技术的运用在于作为LCD的背光板。随着LCD的技术发展，为了解决显示黑色时带来的对比度不佳，作为背光板的LED灯珠制程开始缩小，这同时也发展出更多用途（见图1），其中的代表就是Mini LED，Mini LED通过分区控制背光亮度从而实现更高的对比度和更低的功耗。但是，Mini LED只能算是LCD背光技术的升级，并没有从物理层面上进行突破。

有机发光二极管（Organic Light-emitting Diode）简称OLED，如图2，相比于LCD，OLED属于自发光器件，跳过了由于过滤偏振光和绿光板而带来的能量损耗，同时，OLED的发光是由正负极通电强弱所决定的，而每个正负极都能够单独控制，因此，可以单独控制每个像素点。在显示黑色区块较多的图片时，相比于LCD能带来更低的功耗和更高的对比度。同时，因为更少的器件层，OLED也能够降低屏幕所需厚度，有利于对便携式设备的应用。但是，OLED属于有机材料，在使用过程中，正负极的电子迁移会导致有机分子老化，长期发出单一颜色的像素点会亮度降低，像素点不均匀导致屏幕产生色差，俗称烧屏。

2000年，德州理工大学的Hongxing Jiang和Jingyu Lin发明了Micro LED[1]。相比于OLED，这种器件将OLED中的有机材料换成了无机材料GaN。这有效地提高了发光器件的寿命。相比于LED，Micro LED实质上就是将LED薄膜化、小型化、矩阵化的产物。和传统LCD相比，Micro LED和OLED的优点相同——正负极像素点的单独调控、直接发光带来的发光效率提升。但是相比于OLED的工艺成熟，目前Micro LED仍然存在大量成本以及良品率的问题。但即便如此，这种高密度的阵列器件具有高亮度、低能耗、快响应、高分辨率、高对比度和长寿命等优势（如图3）[2-4]，逐渐在微型显示、可见光通信、生物医学、无掩膜光刻等方面得到应用。[5-9]

### 1.2 章节安排

本文主要研究了Micro LED的工作原理、制作工艺、以及在生产过程中遇到的问题和挑战，同时提出了相应的解决策略。最后，本文对未来Micro LED技术的发展方向和趋势进行了预测和总结。

全文结构如下：

第一章为绪论，主要阐述了本研究的背景、发展历程，同时概述了国内外研究现状，并介绍了本文的结构安排。

第二章是对Micro LED工作原理的简要概述。

第三章详细介绍了Micro LED的制作工艺，以及在其制备过程中可能。

第四章则是探讨了Micro-LED遇到的问题和挑战，并提出了相应的解决方案。

第五章对全文做出总结。

图2 不同发光器件的结构对比

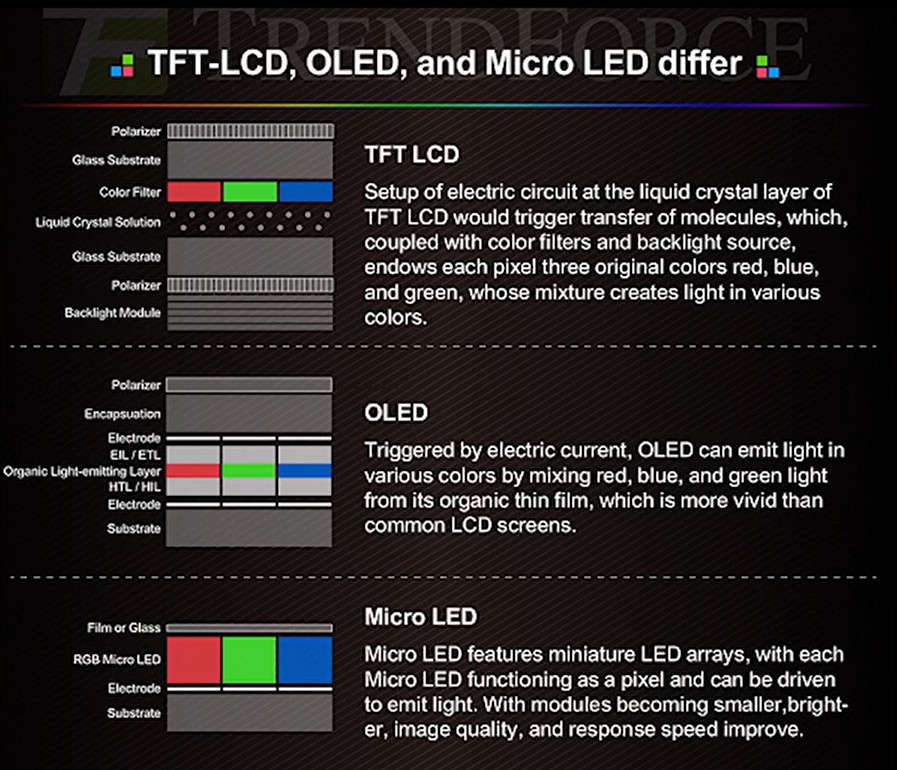


图3 不同显示技术的性能对比

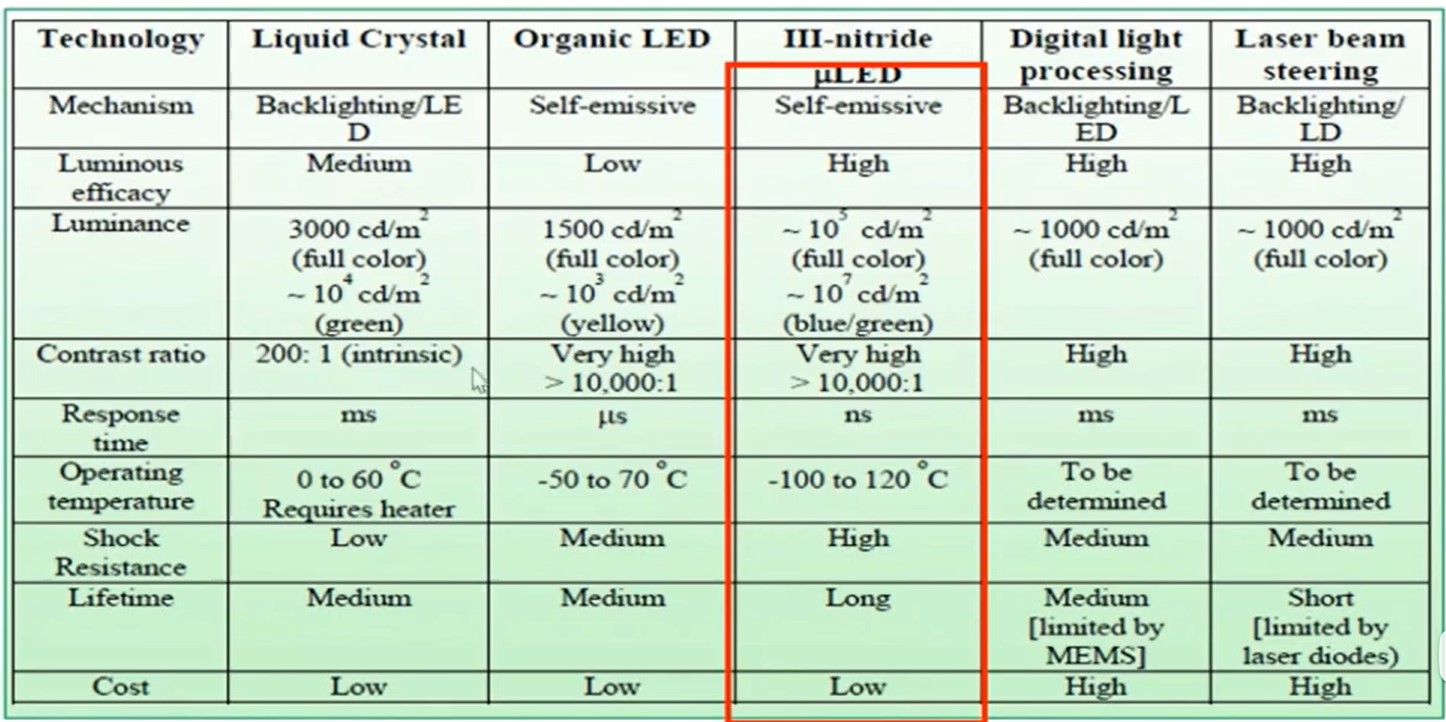
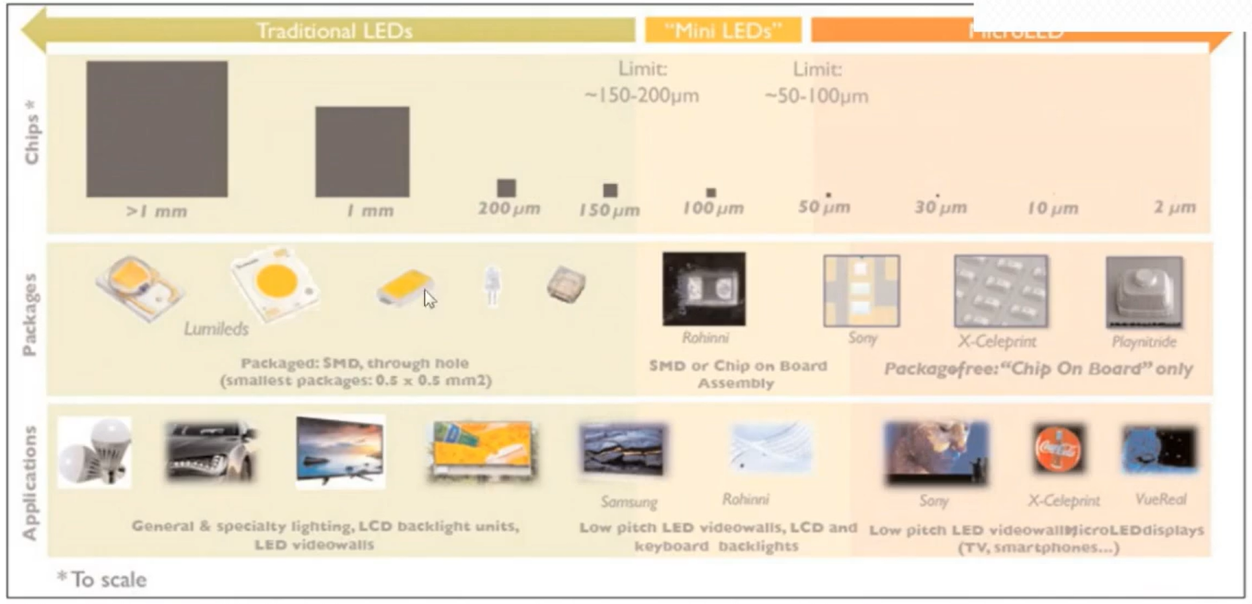


图1 LED制程的缩小以及带来的相关应用



# Micro LED工作原理

### 2.1 发光原理

Micro LED发光本质上和LED发光原理相同，如图4，LED本质上是一个二极管，二极管正向导通时，电子从N区扩散至P区，在P区的导带与价带空穴复合，损失的能量以光子的形式散发出去，这就是LED的发光原理，通过改变不同的材料，我们能够调整导带与价带的位置，实现不同的带隙宽度，实现不同的光子能量，从而实现不同的光的频率，即光的颜色。

随着技术发展，相比于同异质结结构，双异质结结构能够有效提高复合效率。双异质结结构由P型和N型的宽带隙半导体组成，并且把窄带隙半导体材料掺杂在在P型半导体材料和N型半导体材料之间，窄带隙材料能有效对过剩载流子进行限制，从而促进器件中电子和空穴的复合。

根据不同的带隙宽度，常用的LED 材料包括GaP/GaAsP（红光）、AlGaAs（红外光）、AlGaInP（长波）和GaN（蓝光）四类III-V族材料。[10]

不同颜色的LED的影响因素可能会略有参差，例如，在带宽方面，蓝色发光二极管会受到RC时间常数的限制，而绿色发光二极管则受到载流子复合速率的限制。[11]

### 2.2 控制原理

MicroLED的一个关键特点是它们可以单独控制，这意味着每个微小的LED单元可以独立开关，从而实现极高的对比度和精确的局部调光。通过组合三个可以独立发光的子像素（红色、绿色和蓝色），MicroLED 显示器可以产生多种颜色并实现高分辨率。

对于光强，分为模拟调制和PWM调制，模拟调制即控制加在每个像素点的电压来控制光强，而PWM调制则是通过外部时钟或震荡电路，控制像素点电压的占空比，来达到控制发光的时间，通常来讲，PWM调光的频率需要高于2000Hz才能使得人眼较为舒适和安全。其中，一种较为创新型的PWM调光电路为7T1C脉冲幅度调制（Pulse Amplitude Modulation，PAM）电路[12]，如图5。

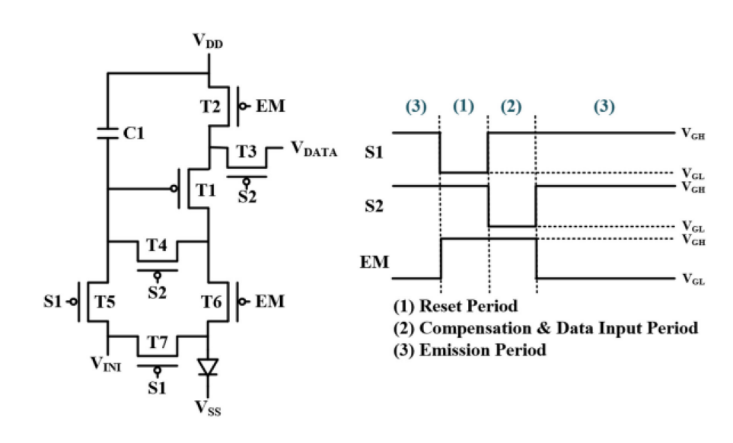


图5 7T1C脉冲幅度调制电路

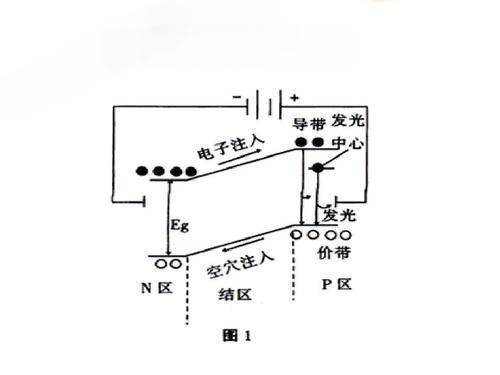


图4 LED发光原理

对于寻址，也有两种方式，一种叫无源寻址，一种叫有源寻址，无源寻址的 Micro-LED 同列 LED 共用 n 电极，同排 LED 共用 p 电极，如图6所示。有源寻址的的Micro-LED则是全部像素点共用n电极，每个像素点有单独的p电极控制，有源寻址的方式具有更高的驱动精度控制，相比于无源驱动，行列扫描线的电阻对有源驱动的影响更小，Micro-LED的集成密度也能相应提升，如图7所示。[13]

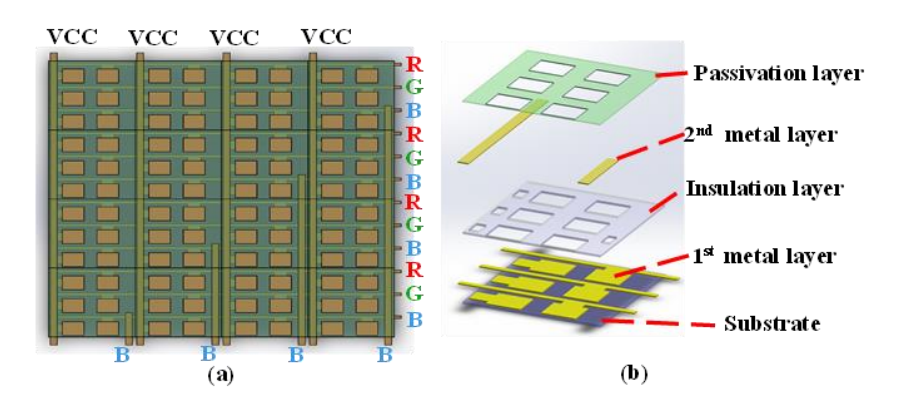


图6 无源寻址的背板设计图

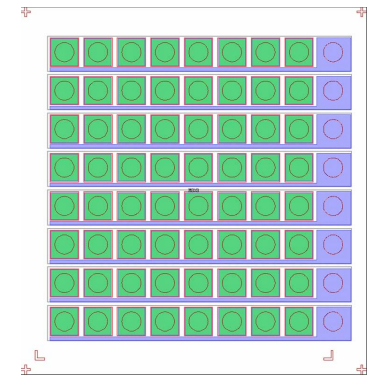


图7 有源寻址的布局图

# Micro LED的工艺实现方法

### 3.1 像素点的工艺实现

细化到像素点的结构，目前较为主流的结构有两种：倒装结构和垂直结构

### 3.1.1 倒装结构

倒装结构 Micro-LED 具有工艺简单、热阻抗低、排列密度高等优点，在需要较高发光功率和发光稳定性的场合中发挥着重要作用。图8显示了其中一种倒装结构的3D图。

本文以一种生长在蓝宝石衬底上的GaN的Micro-LED为例，介绍该倒装结构Micro-LED的制备方法。

图9标出了该器件的各层材料信息，制备方法如下：

1. LED外延片激活、清洗：在氮气中加热500摄氏度15分钟，激活镁离子（类似于退火），然后用盐酸、硫酸、双氧水等试剂清洗表面，除去玷污，然后烘干。
2. ITO膜生长：使用电子束在表面蒸镀一层ITO膜。
3. ITO膜的形状：光刻，对ITO进行湿法刻蚀，随后快速退火。
4. SiO2掩膜：光刻，分别使用磁控溅射和电子束蒸镀生长二氧化硅，再去胶。
5. 干法刻蚀：利用SiO2作为保护层，进行干法刻蚀，再去除二氧化硅。
6. 制备n电极：光刻，再使用热蒸发和电子束蒸镀制备n电极金属。
7. 制备介质层：用PECVD制备介质膜，光刻，再使用干法刻蚀
8. 制备p电极：光刻，再使用热蒸发和电子束蒸镀制备p电极金属

图10展示了制备倒装结构的工艺流程效果图。

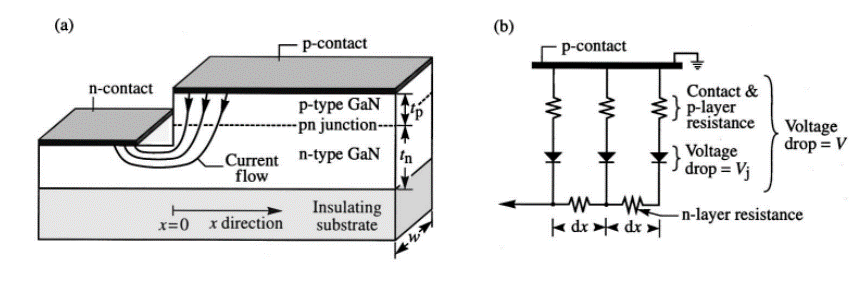


图8 倒装结构的简化模型图

### 3.1.2 垂直结构

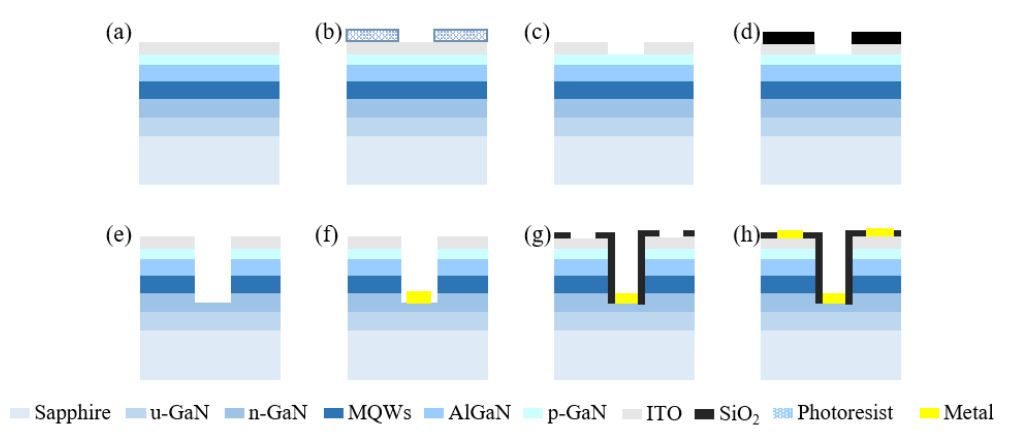


图10 倒装结构Micro-LED的工艺制备流程效果图

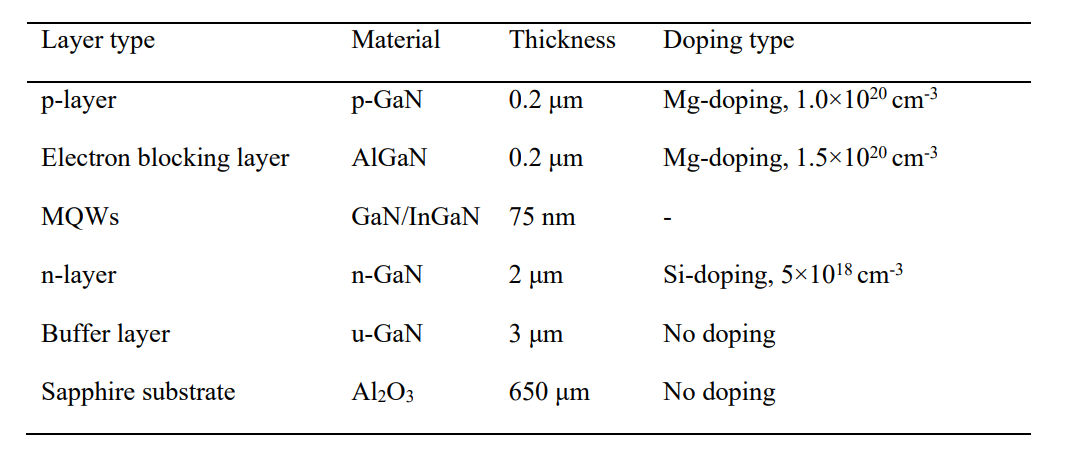


图9 倒装结构Micro-LED的各层材料信息

相比于倒装结构的Micro-LED，垂直结构的形态的光的功率更高，电阻也更低，更适合一些高效率和高功率的照明场景。但是，相应的工艺也更加的复杂，也存在诸多问题，比如刻蚀带来的侧壁损失、P型反射镜的不足、金属键合方案的优化等等。

本文以如图11所示的垂直型结构的红光AlGaInP的Micro-LED为例，介绍垂直型结构的Mirco-LED阵列的制备流程。

1. 外延片的生长制备：使用MOCVD，在GaAs衬底上分别从下往上生长n-GaInP、n-GaAs、n-AlGaInP、若干层的GaInP和AlGaInP来形成多量子阱（MQWS），p-AlInP、p-AlGaInP、p-GaP
2. 电流阻挡层（CBL）的制备：沉积二氧化硅层，并开孔，作为电流阻挡层
3. p电极制备和晶圆键合：使用硅晶圆，正面制备Cr等金属，反面制备Ti等金属，然后在热和压力的作用下，键合金属和器件连接，制备出p电极，形成欧姆接触，同时也是p型反射镜。
4. 去除衬底：将器件翻面，使用湿法腐蚀去除GaAs衬底和n-GaInP缓冲层，为接下来的n电极制备做准备。
5. 像素分离：因为需要干法刻蚀的深度较深，先用磁控溅射和电子束蒸镀制备二氧化硅掩模版，然后进行干法刻蚀至CBL层，这能将一个个像素分离，然后使用PI等绝缘性物质填充刻蚀缝隙，进行电学绝缘。
6. n电极制备：在分离好的像素上面制备出金属，作为n电极。

图12展示了大致的制备工艺流程

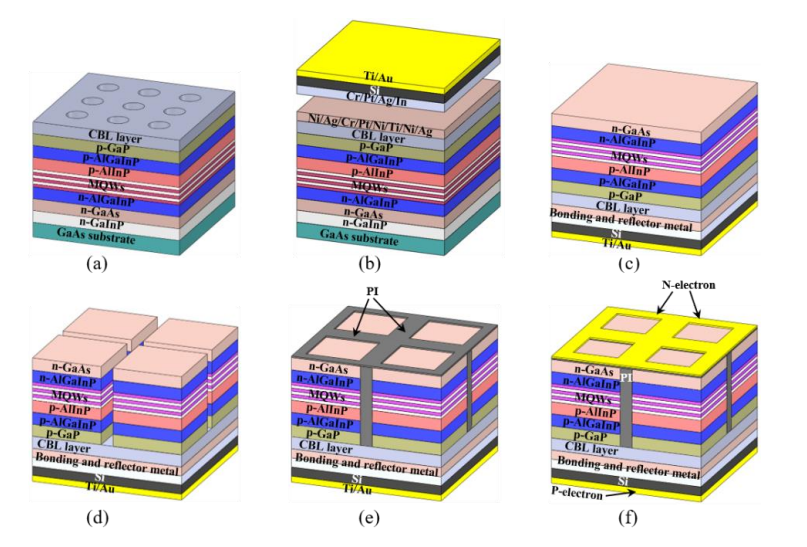


图12 垂直结构Micro-LED的工艺制备流程效果图

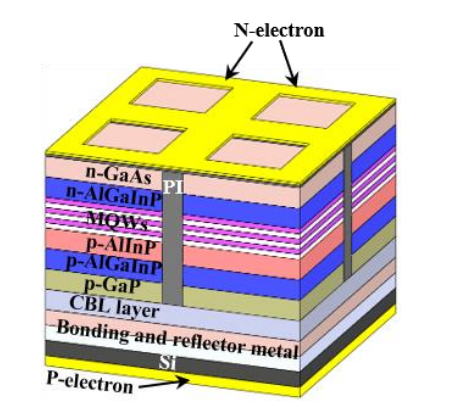


图11 垂直结构Micro-LED的器件3D图

### 3.2 全彩阵列的工艺实现

上述讨论的制备工艺都是针对单个像素点的器件单元制备流程，但是想要实现全彩的显示屏，就需要把红、绿、蓝三种颜色的显示单元集成到同一系统中，以下介绍几种常见的键合过程中的关键工艺方法。

### 3.2.1 金属微凸点制备技术

制备微凸点阵列的技术手段主要有两大类：一类是事先做好金属圆球，然后控制相关设备将金属球放置在基板上来形成微凸点阵列，例如植球法；另一类则不事先制备金属球，而是直接在晶圆上制造金属球，比如丝网印刷法、钉头凸点法、电镀法、蒸镀法、可控塌陷芯片连接新工艺（C4NP）以及喷射法。下面着重介绍其中的钉头凸点法。

Matsushita公司于1997年通过对引线键合的技术研究[14-15]，成功衍生出钉头凸点法[16]，主要过程为：

1. 电火花放电融化金属在金属丝末端形成球状凸点。
2. 劈刀夹断金属凸点。
3. 在超声波、热量、压力的共同作用下，将金属球键合到基板上
4. 劈刀抬起，转向制备下一个金属微凸点
5. 制备完所有微凸点，统一进行平坦化工艺，去除尾部

图13展示了大致的工艺过程。

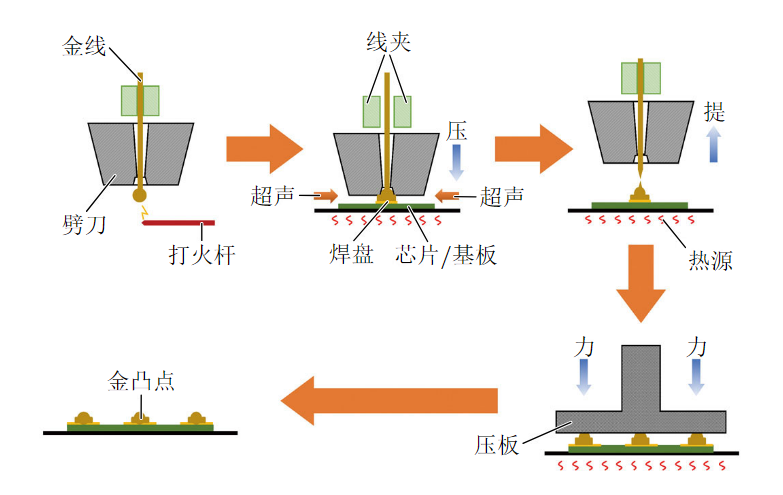


图13 钉头凸点法工艺流程示意图

### 3.2.2 巨量转移技术

巨量转移技术作为实现实际Micro-LED屏幕的关键技术，目前处于各国科技的交锋，技术路线百花齐放，并且各个技术路线齐头并进，并不存在先后顺序和相互借鉴的情况。可以大致将巨量转移技术路线分为三大类：自组装、整体转移和拾取转移。对于拾取转移，又可分为真空拾取、静电拾取、磁拾取、转膜印刷。其中几种主要的技术路线如图14所示。

通过对屏幕尺寸的区分，可以分为小尺寸屏幕和大尺寸屏幕，其中制备小尺寸屏幕更注重转移精度，大尺寸屏幕更注重转移速度。以下对几种路线的优劣进行对比和分析：

激光转移：适用于小尺寸的屏幕，它和检测修复连接的更加紧密，因此更容易修复坏点。

stamp（范德华力）：在组装速度和选择性转移方面更占优势，但是也存在芯片必须使用弱化结构的问题，弱化结构意味着芯片的阵列密度和结构需要做一定程度上的牺牲。并且，如果控制不好，组装的面板可能会产生整体偏移，这将是致命性的错误。而且，如果出现坏点，相比于激光转移，范德华力路线的修复坏点过程更为棘手和复杂。

流体组装：可用于制造大尺寸的屏幕，良率也稳步提升，比如首尔大学与LG合作开发的流体自组装技术，实现了高达99.88%的组装良率。但是，需要保护晶圆不受损害，所以流体控制和工艺参数需要进行精准调控，并且对于小尺寸的屏幕，可能不如其它转移技术有效。

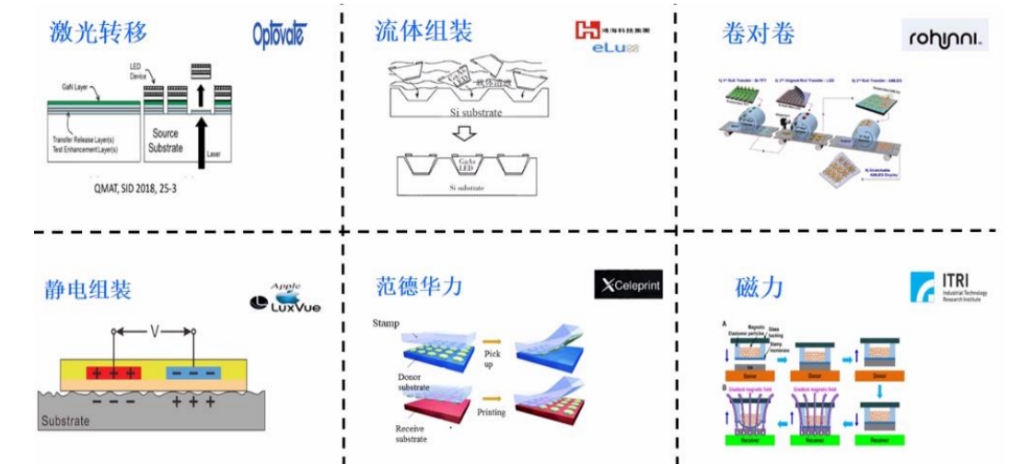


图14 几种主要的巨量转移技术路线

# Micro LED面临的挑战

目前，在走向应用化和商业化的进程中，Micro-LED遇到的挑战困难重重，主要包括经济方面的挑战、技术等方面的挑战。

### 4.1 技术方面的挑战

### 4.1.1 巨量转移技术

相比于已经在市面上大规模问世的OLED，Micro-LED与OLED的其中的最大工艺区别之一就是巨量转移技术。Micro-LED的生产过程中，需要将大量微小的LED芯片精确地转移到目标基底上，这个过程称为巨量转移（Mass Transfer）。目前，这项技术还不够成熟，存在转移精度和均匀性问题、转移精度和均匀性问题和材料兼容性问题。

### 4.1.2 全彩技术

目前，相比于蓝色和绿色LED，Micro-LED中，红色LED的效率相对较低。主要因为：

1. 从量子阱结构来说，红光的波长最长，所以量子阱的宽度最长，这就导致了电子和空穴在量子阱中复合的概率降低，发光效率也相应降低。[17]
2. 目前制造红光Micro-LED的材料相比于蓝光和绿光的半导体材料，晶体结构更加复杂，从而导致电子能级更加复杂，这也影响了红光的发光效率

### 4.1.3 驱动技术

Micro-LED的驱动技术升级也面临着诸多困境。尤其是在保持高效率和低功耗的同时，还要确保快速响应和稳定性。目前，研究和开发的驱动技术主要分为被动驱动和主动驱动两种技术，但都面临成本和复杂性的挑战。

### 4.1.4 修复技术

修复技术与巨量转移技术息息相关，甚至就是巨量转移技术的一部分。修复技术是用于提高良率的一种方法。随着尺寸变小，用于实现修复操作的MEMS系统也要同步缩小，而这是一个巨大的挑战。如果想要通过冗余设计来提高良率，又会面临成本的上升和额外的电路和空间占用。

### 4.2 市场方面的挑战

### 4.2.1 成本

Micro-LED需要使用微纳级别的工艺，这就对洁净间等配套设施提出更高的要求。同时，更小的发光单元、更密集的控制模块也会抬高成本。并且，目前Micro-LED的制造良率偏低，这会造成极大的损耗，进一步推高成本。

### 4.2.2 竞品

目前与Micro-LED对标的竞品主要为OLED。OLED和Micro-LED都是自发光器件，但是相比于Micro-LED，OLED不仅拥有更低的制造成本、更成熟的生产技术，并且OLED天生更支持例如曲面屏、折叠屏等的柔性显示场景。作为发展尚未过时的OLED，想要将市场从OLED中替换到Micro-LED存在很大阻力

### 4.2.3 使用场景

Micro-LED具有的高分辨率、高亮度、低功耗和快的响应速度的优点。但是缺少契合这些优点的使用场景。目前仅有AR/VR产业相关是Micro-LED 的优势场景。

# 第五章 总结

Micro-LED 作为一种新兴的显示技术，具有高亮度、低功耗、快速响应、高分辨率等优势，在微型显示、可见光通信、生物医学等领域展现出巨大的应用潜力。本文对Micro-LED的相关制造工艺和器件结构做了简要讨论。然而，Micro-LED 目前仍面临巨量转移技术、全彩技术、驱动技术和修复技术等挑战，需要进一步研究和突破。同时，Micro-LED 也需要应对来自 OLED 等竞品的竞争以及高昂的成本问题。未来，随着技术的不断进步和成本的降低，Micro-LED 有望成为下一代主流显示技术之一，为人们带来更加优质的视觉体验。

Micro-LED 的蓬勃发展，犹如一块待开发的宝地，机遇与挑战并存。对于科研人员而言，这正是展现才华、攻坚克难的时刻。我们有信心也有能力，在不久的将来，攻克这些技术难题，推动 Micro-LED 朝着产业化的方向迈进。随着大屏幕和小型化设备的广泛应用，Micro-LED 将成为显示技术的新宠，引领未来显示技术的发展潮流。科研工作者们正一步步突破技术壁垒，相信 Micro-LED 必将在显示技术领域绽放光彩。

**参考文献**

[1]S. X. Jin, J. Li, J. Z. Li, J. Y. Lin, H. X. Jiang; GaN microdisk light emitting diodes. Appl. Phys. Lett. 31 January 2000; 76 (5): 631–633.

[2]Xu Y, Cui J, Hu Z, et al. Pixel crosstalk in naked-eye micro-LED 3D display[J]. Applied Optics, 2021, 60(20): 5977-5983.

[3]Wang Z, Zhu S, Shan X, et al. Full-color micro-LED display based on a single chip with two

types of InGaN/GaN MQWs[J]. Optics Letters, 2021, 46(17): 4358-4361.

[4]Huang Y, Hsiang E-L, Deng M-Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present

status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 1-16.

[5] Ji B, Guo Z, Wang M, et al. Flexible polyimide-based hybrid opto-electric neural interface with 16 channels of micro-LEDs and electrodes[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2018, 4(1): 27

[6]Xiong J, Hsiang E-L, He Z, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 216.[7] Li L, Lu L, Ren Y, et al. Colocalized, bidirectional optogenetic modulations in freely behaving mice with a wireless dual-color optoelectronic probe[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 839.

[8] Carreira J F C, Xie E, Bian R, et al. On-chip GaN-based dual-color micro-LED arrays and their application in visible light communication[J]. Optics Express, 2019, 27(20): A1517-A1528.[9] R. X. G. Ferreira et al., "High Bandwidth GaN-Based Micro-LEDs for Multi-Gb/s Visible Light Communications," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 19, pp. 2023-2026, 1 Oct.1, 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2581318.

[10]郭浩中, 赖芳仪, 郭守义. LED 原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[11]Z. Li et al., "Bandwidth Analysis of High-Speed InGaN Micro-LEDs by an Equivalent Circuit Model," in IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 5, pp. 785-788, May 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3256422.

[12]C. -L. Lin et al., "Compensation Pixel Circuit to Improve Image Quality for Mobile AMOLED Displays," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 54, no. 2, pp. 489-500, Feb. 2019, doi: 10.1109/JSSC.2018.2881922.

[13]Z. J. Liu, K. M. Wong, C. W. Keung, C. W. Tang and K. M. Lau, "Monolithic LED Microdisplay on Active Matrix Substrate Using Flip-Chip Technology," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 15, no. 4, pp. 1298-1302, July-aug. 2009, doi: 10.1109/JSTQE.2009.2015675.

[14]HERBERT S. Wire bonding process control [J] . Ad-vanced Packaging, 2008, 17(1): 32–34.

[15]SAIKI H, MARUMO Y, NISHITAKE H, et al. De-formation analysis of Au wire bonding [J] . Journalof Materials Processing Technology, 2006, 177(1–3):709–712.

[16]T. Shiraishi, K. Amami, S. Yuhaku, Y. Bessho, K. Eda and T. Ishida, "Stud-bump bonding technique onto an advanced organic substrate for MCM-Ls," Proceedings 1997 International Conference on Multichip Modules, Denver, CO, USA, 1997, pp. 109-114, doi: 10.1109/ICMCM.1997.581157.

[17]Waqar AZEEM, 刘召军, 伏桂月. 基于Ⅲ‍族氮化物的Micro⁃LED挑战及潜在解决方案[J]. 液晶与显示, 2023, 38(7): 892. Waqar AZEEM, Zhao-jun LIU, Gui-yue FU. Challenges and potential solutions of Ⅲ-nitride based Micro-LEDs[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2023, 38(7): 892.