

考虑小尺寸效应的 Micro-LED 驱动结构设计

殷录桥^{1,2}, 张雪松¹, 任开琳¹, 张楠³, 郝茂盛³, 李春亚^{2*}, 张建华^{1,2}¹上海大学微电子学院, 上海 200444;²上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072;³上海芯元基半导体科技有限公司, 上海 201601

摘要 设计一款芯片尺寸为 300 μm 的蓝绿光微型发光二极管(Micro-LED)并将其点亮,通过 TCAD 仿真对芯片尺寸为 10、38、100、300 μm 的 Micro-LED 进行模拟仿真,探究了 Micro-LED 的小尺寸效应,发现随着 Micro-LED 尺寸的减小,开关损耗增加。因此,针对提高小尺寸 Micro-LED 单点像素的驱动电流密度过程中产生的开关损耗增加的问题,模拟仿真驱动电路驱动 Micro-LED 的开关特性过程,进行减小开关损耗的研究。利用 Sentaurus TCAD 软件进行仿真,设计了一台沟道长度为 0.18 μm 的 p 型金属氧化物半导体场效应晶体管(PMOS)器件,将 PMOS 器件和 Micro-LED 器件通过钢凸点进行键合,并对 PMOS 驱动电路驱动单独 Micro-LED 像素进行仿真,进一步进行 PMOS 驱动两个 Micro-LED 像素的仿真,从而模拟阵列像素驱动的情况,通过比较开关延迟时间判断驱动效果并进行实验验证,发现当 PMOS 接入限流电阻驱动 Micro-LED 时,阻值越小,驱动效果越好,而且起到消除浪涌、限流分压的作用,但 PMOS 直接驱动 Micro-LED 比加入限流电阻的效果更好,PMOS 驱动阵列 Micro-LED 相比于驱动单独 Micro-LED 开关损耗更小、驱动效果更好。

关键词 光学器件; 微型发光二极管; 小尺寸效应; PMOS 驱动; 开关延迟时间

中图分类号 TN312+.8; TN386.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS0223003

1 引言

微型发光二极管(Micro-LED)是指高密度集成的 LED 阵列,每个 LED 尺寸为数十微米,是一种自发射器件,单像素能够产生高亮度,可以实现每一个像素点的控制和单点光驱动^[1-4],具有良好的应用前景。

Micro-LED 显示利用无机 LED 器件作为发光像素来实现主动发光矩阵式显示,在功耗、分辨率、对比度、寿命等方面超过了目前主流的液晶(LCD)、有机发光二极管(OLED)显示,表明显示领域研究已经取得重大进步^[5-7]。但是, Micro-LED 的应用在以下方面依然面临着一些挑战:小尺寸效应、芯片和背板技术、巨量转移技术、全彩化技术、键合和驱动技术、缺陷和良率技术、检测和维修技术等^[8-13]。

Micro-LED 显示阵列可以通过两种方式实现驱动,根据结构的不同,分为被动矩阵(无源)驱动方式和主动矩阵(有源)驱动方式^[14]。被动矩阵驱动中,水平像素组共用同一电极,垂直像素组共用另一电极,此种方式的制作成本及技术门槛较低,但受制于驱动方式,无法很好地实现高分辨率显示^[15]。主动矩阵驱动中,所有像素阴极之间通过共用 n 型 GaN 层形成连接,每个像素的阳极与硅基互补金属氧化物半导体(CMOS)

驱动背板进行金属键合,整体采用背发光方式,这种驱动方式的反应速度较快,不受扫描电极数量的限制,每个像素单元可以实现单独寻址,独立控制,适用于多数场合^[16]。

本文设计了尺寸为 10、38、100、300 μm 的 Micro-LED 器件,并进行 300 μm 的 Micro-LED 点亮实验。首先,设计一种 p 型金属氧化物场效应晶体管(PMOS)驱动器件,并采用 Micro-LED 主动驱动方式进行 PMOS 驱动 Micro-LED 器件的仿真模拟。根据 LED 的小尺寸效应,即随着 LED 尺寸的减小,LED 的辐射复合率、出光功率和光提取效率逐渐减小,导致 Micro-LED 单位像素发光强度降低。为保持发光强度不变,需要降低 Micro-LED 的损耗,而开关损耗是 Micro-LED 损耗的重要组成部分,因此,针对 Micro-LED 的小尺寸效应,模拟仿真驱动电路驱动 Micro-LED 的开关特性过程,进行减小开关损耗的研究。另外,PMOS 直接驱动 Micro-LED 电路还会存在浪涌现象,因此对 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 电路进行仿真分析,发现 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 电路的开关延迟时间较 PMOS 直接驱动 Micro-LED 电路长,开关损耗更多,开关特性相对较差,但浪涌现象得到了明显改善,且 PMOS 外加限流电阻驱动

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-09-27; 录用日期: 2022-10-21; 网络首发日期: 2022-10-30

基金项目: 上海市 2021 年度科技创新行动计划高新技术领域项目(21511101302,20010500100)

通信作者: lichunya2006@163.com

Micro-LED起到了限流分压的作用。其次,接入不同阻值的限流电阻,发现在PMOS外加限流电阻驱动单独Micro-LED的情况下,接入的限流电阻阻值越小,开关延迟时间越短,开关损耗越少,驱动效果越好。最后,分析了键合中铜凸点等金属的寄生电阻和空气的寄生电容情况以及两个Micro-LED之间的寄生情况,并对两个驱动像素的情况进行仿真,发现PMOS驱动Micro-LED阵列相较于PMOS驱动单独Micro-LED的开关延迟时间更短,开关损耗更少,驱动效果更好。

2 Micro-LED 器件结构及 Micro-LED 的点亮

2.1 Micro-LED 器件结构

Micro-LED的工作原理与大尺寸的LED基本相同,本质上都是PN结在通电后或光激发后电子和空穴复合辐射出光子,光子从Micro-LED出射就使得Micro-LED发光^[17-18]。根据结构的不同,Micro-LED可以大致分为正装型、垂直型和倒装型^[19],本文采用垂直型Micro-LED器件结构,其外延结构如图1所示。外延材料自下而上分别是n型GaN层、多量子阱(MQW)发光层、p型AlGaIn层及p型GaIn层,其中多量子阱发光层包含GaIn势垒层和InGaIn量子阱层^[20-21]。在n-GaN下方和p-GaN上方是一层薄的接触层作为n电极和p电极,两侧是钝化层。

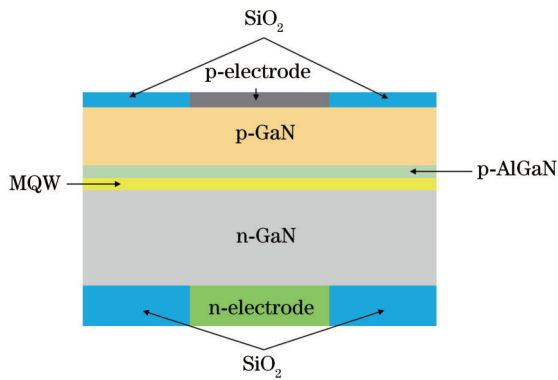


图1 Micro-LED 器件外延结构

Fig. 1 Epitaxial structure of Micro-LED device

2.2 Micro-LED 器件的仿真结果

基于Sentaurus软件的SWB环境来组织、实施TCAD仿真项目的设计和运用,以参数化形式实现TCAD项目。对于Micro-LED,采用的物理模型包括迁移率模型、隧道模型、压电极化模型、不完全电离模型、辐射复合模型、非平衡载流子复合(SRH复合)模型、俄歇复合(Auger复合)模型和漂移扩散模型等。图2展示了尺寸为10、38、100、300 μm 的Micro-LED设备物理结构仿真结果。Micro-LED结构仿真自下而上的区域材料及其厚度参数分别为5.6 μm 的n型GaIn层、7 nm的GaIn势垒层、3 nm的InGaIn量子阱

层、50 nm的p型AlGaIn层及0.74 μm 的p型GaIn层,其中上方SiO₂钝化层厚度为0.1 μm ,下方SiO₂钝化层厚度为0.7 μm ;对n型GaIn层进行 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的硅掺杂,对p型GaIn层进行 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的硼掺杂,InGaIn中In的原子数分数为0.05,即5%,AlGaIn中Al的原子数分数为0.3,即30%。图3所示为300 μm 的Micro-LED的正向伏安特性曲线仿真结果。可以看到:Micro-LED的开启电压为2.926 V,小于2.926 V的电压被称为死区电压,此时外电场不足以克服内电场对多数载流子的阻碍作用,正向电流几乎为0;当正向电压超过2.926 V后,内电场强度被大大削弱,Micro-LED导通,电流随电压的增加而增大,当正向电压为5 V时,电流可达到68 μA 。

2.3 Micro-LED 小尺寸效应仿真

根据中国科学院长春光学精密机械与物理研究所对Micro-LED小尺寸效应的研究结果,小尺寸Micro-LED需要更大的注入电流密度方可达到微分串联电阻值的平衡^[22]。因此,本实验在中国科学院相关研究的基础上,通过对不同尺寸的Micro-LED进行仿真,探究辐射复合率和出光效率(LEE)^[23]对Micro-LED小尺寸化的影响,即Micro-LED的小尺寸效应。

探究辐射复合率对小尺寸Micro-LED的影响,其辐射复合率正比于电子浓度和空穴浓度的乘积,计算公式为

$$R = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt} = Bnp, \quad (1)$$

式中: R 为辐射复合率; t 为时间; n 、 p 分别为电子浓度和空穴浓度; B 为双分子复合系数,对于III族半导体 B 为 $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

不同尺寸下辐射复合率的仿真结果如图4所示,数值统计结果如表1所示。可以发现,随着Micro-LED尺寸的减小,其辐射复合率也逐渐减小,由此导致Micro-LED的非辐射复合率增大,其内量子效率降低,进而导致Micro-LED单位像素发光强度降低。

探究LEE对小尺寸Micro-LED的影响。基于有限差分时域(FDTD)方法对Micro-LED LEE进行仿真,首先建立并分析具有垂直侧壁的Micro-LED基本叠层结构,对仿真模型的结构参数设置进行适当简化,如图5(a)所示。整个Micro-LED被包含在计算域中,计算域的所有吸收边界均设置为完美匹配层(PML),叠层结构主要包括厚度为0.74 μm 的p-GaIn层、厚度为50 nm的AlGaIn层、厚度为10 nm的MQW层,GaIn层、AlGaIn层和MQW层的折射率分别为 $2.45 + 0.0016i$ 、 $2.40 + 0.01785i$ 和 $2.48 + 7.32 \times 10^{-5}i$ 。MQW层光源用中心波长为450 nm的电偶极子源代替,电偶极子源是可以设置功率的稳定电源^[24],在p-GaIn侧设置功率监视器,用于收集传输功率。在本研究中,LEE的定义为功率监视器接收的光提取功率与偶极子源的发射功率之比。图5(b)所示为10 μm

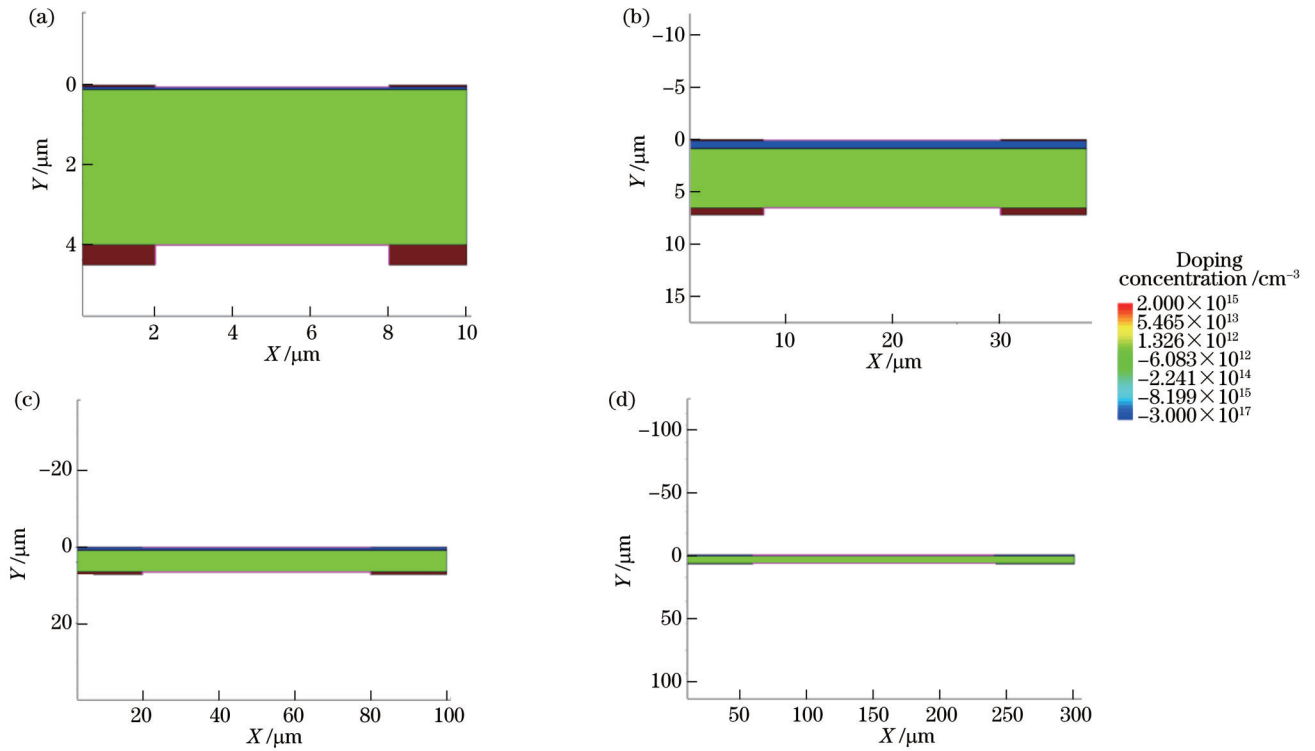


图 2 不同芯片尺寸下 Micro-LED 结构的仿真结果。(a) 10 μm ; (b) 38 μm ; (c) 100 μm ; (d) 300 μm

Fig. 2 Simulation results of Micro-LED structure under different chip sizes. (a) 10 μm ; (b) 38 μm ; (c) 100 μm ; (d) 300 μm

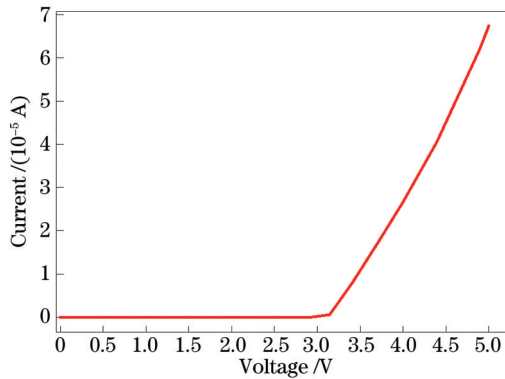


图 3 Micro-LED 的 I - V 特性曲线

Fig. 3 I - V characteristic curve of Micro-LED

Micro-LED 在 FDTD 中的仿真结构, 得到的偶极子源输出光功率和不同 Micro-LED 芯片尺寸下的监视器接收的光功率如图 6 所示, 数值统计结果如表 1 所示。可以看到, 随着 Micro-LED 尺寸的减小, 其出光功率逐渐减小, 并且 LEE 也逐渐减小, 从 300 μm 时的 29.31% 减小到 10 μm 时的 14.53%, 由此导致 Micro-LED 单位像素发光强度降低。

从辐射复合率和 LEE 对 Micro-LED 小尺寸化的影响来看, 小尺寸效应会导致 Micro-LED 单位像素发光强度降低。如果想保持 Micro-LED 单位像素发光强度不变, 需要降低 Micro-LED 的损耗, 而开关损耗是 Micro-LED 损耗的重要组成部分^[25], 因此接下来进行优化驱动以减小开关损耗的研究。

2.4 Micro-LED 的点亮

点亮 300 μm 可混合蓝绿光 Micro-LED, 结果如图 7 所示。在测试温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 采用成像色度计 PROMetric® 和 True Test 自动化视觉检测软件测量 Micro-LED 的亮度, 在 100 mA 下, 点亮的混合蓝绿光 Micro-LED 具有 546862 cd/m^2 的亮度。

3 PMOS 驱动器的结构及参数设计

3.1 PMOS 器件结构

金属氧化物半导体场效应 (MOS) 晶体管可分为 n 沟道与 p 沟道两大类, 本文采用 p 沟道增强型金属氧化物半导体场效应晶体管, 其结构如图 8 所示。该结构的衬底为 n 型衬底, 进行 p 型掺杂形成源极和漏极, 源极和漏极之间为晶体管沟道区, 氧化层在多晶硅栅极下方。p 沟道硅 MOS 场效应晶体管在 n 型硅衬底上有两个 p^+ 区, 分别为源极和漏极, 两极之间不导通; 源极上加有足够的正电压 (栅极接地) 时, 栅极下的 n 型硅表面呈现 p 型反型层, 成为连接源极和漏极的沟道。两块源漏掺杂区之间的距离为沟道长度 L , 而垂直于沟道长度的有效源漏区尺寸为沟道宽度 W 。

3.2 PMOS 参数设计

PMOS 器件的长度为 1.48 μm , 高度为 1.2 μm , 沟道长度 $L=0.18 \mu\text{m}$, 沟道宽度 $W=4.5 \mu\text{m}$ 。氧化层的厚度 $t_{\text{ox}}=1.6 \text{ nm}$ 。用于产生表面反型层 (为产生传导沟道) 的栅-源电压值 V_{GS} 称为阈值电压 V_{T} 。阈值电压的计算公式为

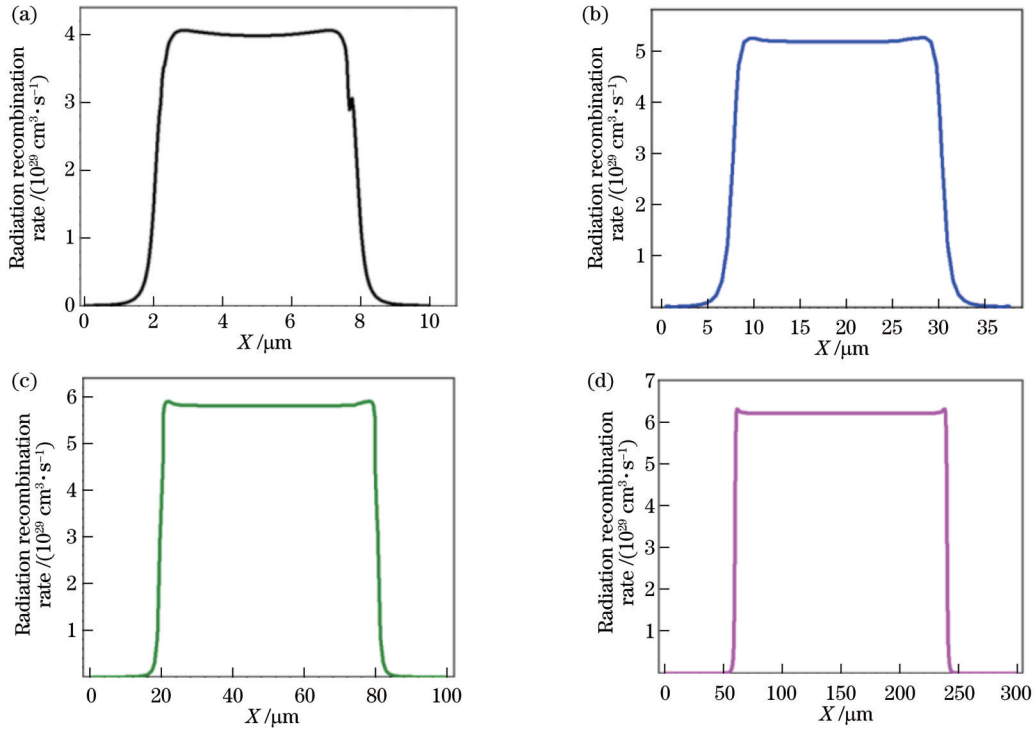


图 4 不同尺寸下的辐射复合率仿真结果。(a) 10 μm ; (b) 38 μm ; (c) 100 μm ; (d) 300 μm

Fig. 4 Simulation results of radiation recombination rate under different sizes. (a) 10 μm ; (b) 38 μm ; (c) 100 μm ; (d) 300 μm

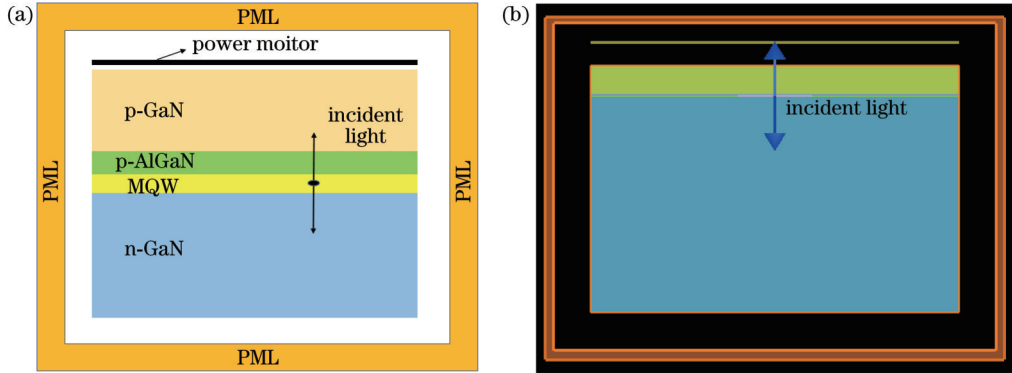


图 5 基于 FDTD 对 Micro-LED LEE 的仿真结果。(a) 基于 FDTD 方法构建的 Micro-LED 叠层结构; (b) FDTD 中 10 μm Micro-LED 的仿真结构

Fig. 5 Simulation results of Micro-LED LEE based on FDTD. (a) Micro-LED laminated structure based on FDTD method; (b) simulation structure of 10 μm Micro-LED in FDTD

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} - 2\phi_{F(\text{sub})}} - \sqrt{|2\phi_{F(\text{sub})}|} \right), \quad (2)$$

式中: V_{T0} 为零衬底偏置时的阈值电压; γ 为衬底偏置系数; V_{SB} 为衬底偏置电压; $\phi_{F(\text{sub})}$ 为衬底费米电势。

$$V_{T0} = \Phi_{GC} - 2\phi_F - \frac{Q_{B0}}{C_{OX}} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}}, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_D\epsilon_{si}}}{C_{OX}}, \quad (4)$$

式中: Φ_{GC} 为栅极和沟道间的功函数差; Q_{B0} 为耗尽区电荷密度; C_{OX} 为单位面积的栅极氧化电容; q 为单位(电子)电荷; ϵ_{si} 为硅的介电常数; N_D 为衬底掺杂浓度。

衬底费米电势的计算公式为

$$\phi_{F(\text{sub})} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_i}{N_D} \right), \quad (5)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T 为温度(室温下 $T=300\text{ K}$); n_i 为温度 T 的函数(室温下 $n_i=1.45 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$)。

栅极和沟道间的功函数差的计算公式为

$$\Phi_{GC} = \phi_{F(\text{sub})} - \phi_{\text{Gate}}, \quad (6)$$

式中: ϕ_{Gate} 为栅极费米电势。

耗尽区电荷密度的计算公式为

$$Q_{B0} = -\sqrt{2qN_D\epsilon_{si}|-2\phi_{F(\text{sub})} + V_{SB}|}, \quad (7)$$

式中: V_{SB} 为衬底和源极之间加入的偏压。

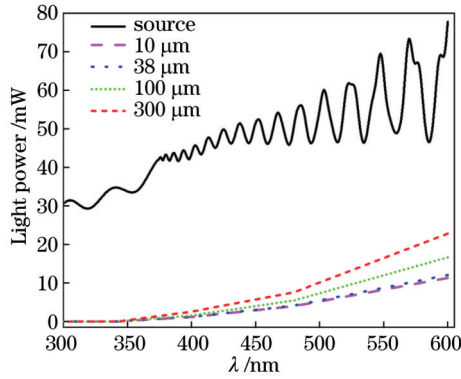


图 6 偶极子源输出光功率和不同 Micro-LED 芯片尺寸下的监视器接收的光功率

Fig. 6 Light power output by dipole source and light power received by the monitor with different Micro-LED chip sizes

表 1 不同尺寸下辐射复合率值和 LEE

Table 1 Radiation recombination rate and LEE under different sizes

LED size / μm	Radiation recombination rate / ($10^{29} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	LEE / %
10	4.07	14.53
38	5.25	15.51
100	5.91	21.36
300	6.32	29.31

氧化界面电荷的计算公式为

$$Q_{\text{OX}} = qN_{\text{OX}}, \quad (8)$$

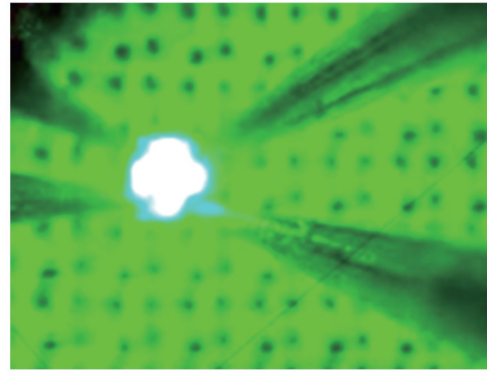


图 7 Micro-LED 点亮示意图

Fig. 7 Schematic of Micro-LED lighting

式中: N_{OX} 为氧化层交界面的固有电荷密度, $N_{\text{OX}} = 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。

通过硅氧化层电介质常数 ϵ_{OX} 和氧化厚度 t_{OX} 可以得到单位面积的栅极氧化电容 C_{OX} , 公式为

$$C_{\text{OX}} = \frac{\epsilon_{\text{OX}}}{t_{\text{OX}}}. \quad (9)$$

根据 MOS 管的设计经验, $0.18 \mu\text{m}$ 工艺 PMOS 管的阈值电压为 -0.5 V 左右。MOS 管的氧化层厚度 t_{OX} 设置为 1.6 nm , 且衬底偏置与源极电势相同, 即 $V_{\text{SB}} = 0$ 。结合式 (2)~(9), 可以得出 MOS 管的阈值电压计算公式为

$$V_{\text{T}} = V_{\text{T0}} = \Phi_{\text{GC}} - 2\phi_{\text{F(sub)}} - \frac{Q_{\text{B0}}}{C_{\text{OX}}} - \frac{Q_{\text{OX}}}{C_{\text{OX}}}. \quad (10)$$

将 $V_{\text{T}} = -0.5 \text{ V}$ 代入相应公式可以得到 PMOS 管的衬底掺杂浓度 N_{D} 为 $4.202 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

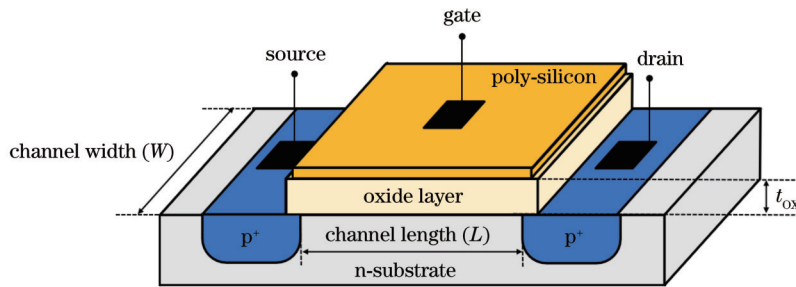


图 8 PMOS 器件结构

Fig. 8 Structure of PMOS device

PMOS 的关键参数值如表 2 所示, 其中衬底掺杂浓度是阈值电压的重要影响参数之一: 衬底掺杂浓度越低, PMOS 器件的阈值电压越小; 反之, 阈值电压值越高。另一个影响阈值电压的因素是氧化层厚度 t_{OX} , 氧化层的厚度越薄, 单位面积栅电容越大, 相应的阈值

电压数值越小。因此, 衬底掺杂浓度和氧化层厚度的改变会导致 PMOS 阈值电压仿真值与预期阈值电压不符, 需要进行细致调节。本文调节结果如下: 衬底掺杂浓度 N_{D} 为 $4.202 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 氧化层厚度 t_{OX} 设置为 1.6 nm 。

表 2 PMOS 的关键参数值

Table 2 Key parameter values of PMOS

Parameter	Threshold voltage /V	Channel length / μm	Channel width / μm	Substrate doping concentration / cm^{-3}	Oxide layer thickness /nm	Device length / μm	Device height / μm
Value	-0.5	0.18	4.5	4.202×10^{18}	1.6	1.48	1.2

3.3 PMOS 结构仿真结果

将仿真参数值代入 Sentaurus TCAD 仿真软件中仿真 MOS 管的电特性,采用混合模式,根据得到的输出特性曲线进行参数调整,从而得到 MOS 管的各项物理参数,并根据转移特性曲线得到 PMOS 管的阈值电压仿真值,将其与预期阈值电压值进行比较,从而判断仿真结果正确与否。PMOS 器件的仿真结果如图 9 所示,其中图 9(a)所示为 PMOS 设备物理结构的仿真结果,图 9(b)所示为栅极电压 V_g 为 -1.0 、 -2.0 、 -3.0 、 -4.0 、 -5.0 V 的固定值时,PMOS 器件的漏极电流和漏极电压的关系曲线。从图 9(b)可以发现:在栅极电压值小于开启电压的条件下,漏极电流曲线

在漏极电压为高电平时呈现线性曲线,此时 PMOS 相当于一个可变电阻,漏极电流曲线在漏极电压为低电平时,漏极电流不随漏极电压变化,此时漏极电流主要取决于栅极电压。图 9(c)、(d)为 PMOS 器件的转移特性曲线及其局部放大图。将固定的源漏电压下 PMOS 管饱和区的漏极电流与栅源电压之间的关系称为转移特性,PMOS 器件在漏极电压 V_d 为 -3.0 、 -4.0 、 -5.0 V 的固定值时,从漏极电流随栅极电压变化的曲线可以得到 PMOS 的阈值电压为 $V_{TP} \approx -0.5$ V,符合预期阈值电压值要求,进而验证了所设计 PMOS 仿真模型的正确性。

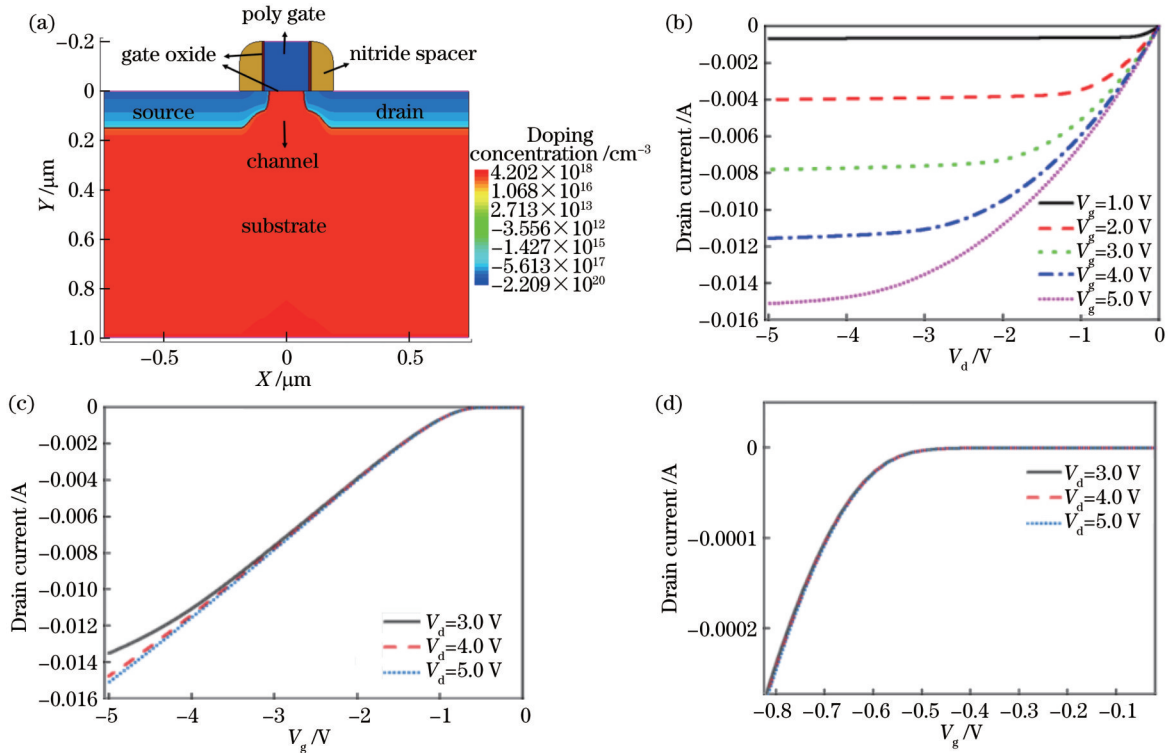


图 9 PMOS 仿真结果。(a) PMOS 设备的物理结构;(b)输出特性曲线;(c)(d)转移特性曲线及其局部放大图

Fig. 9 PMOS simulation results. (a) Physical structure of PMOS device; (b) output characteristic curve; (c)(d) transfer characteristic curves and their local enlargements

4 驱动结构设计及开关损耗机理

4.1 驱动电路的设计

Micro-LED 的驱动主要有 CMOS 驱动和 TFT 驱动两种方式,其中 CMOS 驱动可以实现 Micro-LED 单像素驱动,具有高可靠性、高均匀性和高迁移率的特点^[26],因此本文选用 CMOS 驱动中的 PMOS 驱动方式。另外,在 LED 开启时会产生浪涌电流的问题,在驱动电路串联一个限流电阻,既可以防止 Micro-LED 开启时浪涌电流的冲击,又可以起到限流分压的作用^[27-29]。

PMOS 驱动单独 Micro-LED 像素电路的电路图如图 10(a)所示,分别为 PMOS 直接驱动 Micro-LED、

PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 两种。令 PMOS 一直处于上管位置, Micro-LED 一端接地,其中限流电阻的阻值 r 分别选择 100Ω 、 500Ω 、 1000Ω 和 $10 \text{ k}\Omega$,并接入电路进行仿真分析。图 10(b)为驱动阵列像素仿真电路图, CMOS 驱动背板采用 PMOS 作为驱动器件,用直径为 $6 \mu\text{m}$ 的钢球作为焊料进行凸点键合连接驱动背板和 Micro-LED 芯片,焊料与驱动背板间的电极(焊盘)采用厚度为 $0.20 \mu\text{m}/0.05 \mu\text{m}/0.13 \mu\text{m}$ 的 Au/Ni/Al 的材料层,焊料与 Micro-LED 间的电极采用 $1.00 \mu\text{m}/0.10 \mu\text{m}$ 的 Au/Pt 材料层,其中: Au 可以保护底层的材料不被氧化及维持可焊性; Ni 可以保证电镀层与焊盘之间的结合强度,提高耐磨性; Al 可以改善材料的力学性能,提高流动性; Pt 具有良

好的导热性和导电性,且化学性质稳定,从而保证焊盘

与芯片的电连接。

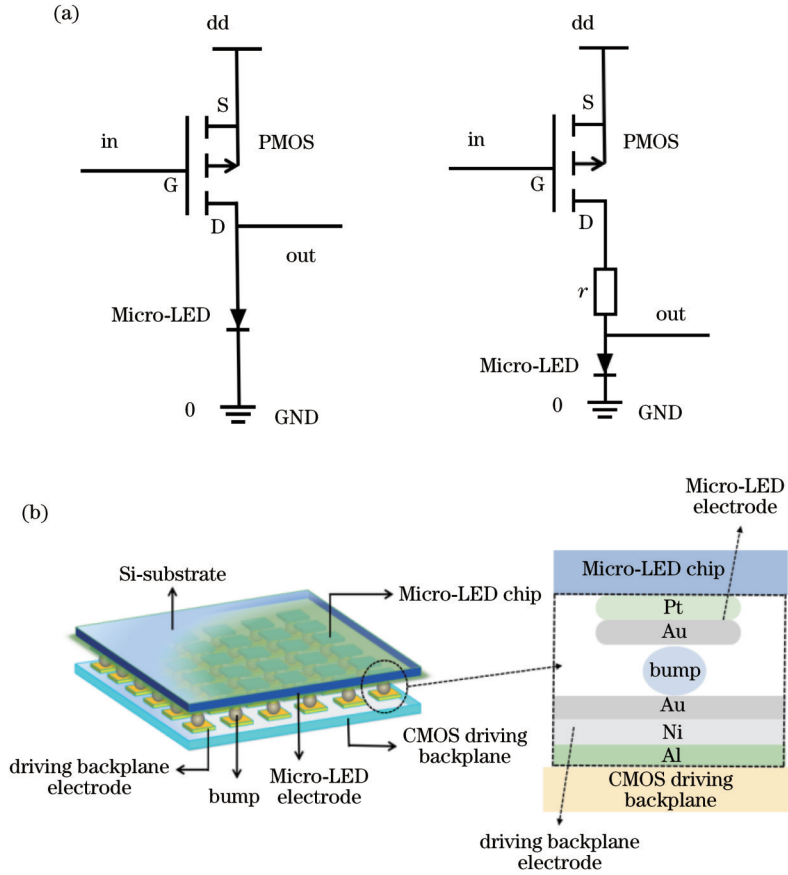


图 10 PMOS 驱动 Micro-LED 像素电路图。(a)驱动单独像素时的仿真电路图(左:直接驱动;右:外加限流电阻驱动);(b)驱动阵列像素时的仿真电路图

Fig. 10 Circuit diagram of PMOS driven Micro-LED pixel. (a) Simulation circuit diagram of driving individual pixel (left: direct driving; right: driving by external current limiting resistor); (b) simulation circuit diagram of driving array pixels

4.2 键合结构的设计

电阻电容等效电路如图 11 所示,其中 r_1 为键合后钢凸点形成的阻值, r_2 为 PMOS 与钢凸点间电极的阻值, r_3 为 Micro-LED 芯片与钢凸点间电极的阻值, 这 3 个金属互联的等效电阻形成了 Micro-LED 与驱动背板之间的寄生电阻^[30], c_1 为键合后 Micro-LED 芯片与 CMOS 驱动器间的寄生电容。

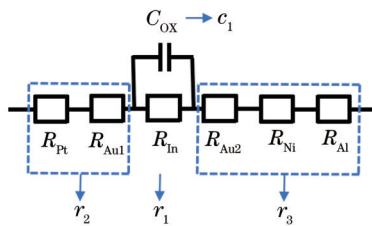


图 11 键合等效电路图

Fig. 11 Bond equivalent circuit diagram

键合回流焊 In 层 ($\phi 6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$), In 球回流焊过程可表示为

$$h = \left(\frac{3V}{8\pi} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (11)$$

式中: h 为通过回流重新形成的凸块高度; V 为剥离前的凸块体积。通过计算得到 h 的值为 $2.381 \mu\text{m}$ 。

金属导体电阻的计算公式为

$$R = \frac{\rho L}{S}, \quad (12)$$

式中: L 为金属导体的长度, 在本文中为各金属层的厚度值; S 为金属导体的横截面面积; ρ 为 20°C 时的金属材料电阻率。Al 的电阻率为 $2.6548 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, Ni 的电阻率为 $6.84 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, Au 的电阻率为 $2.4 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, Pt 的电阻率为 $10.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, In 的电阻率为 $8.37 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。对 Micro-LED 阵列芯片与 PMOS 驱动器之间的寄生电阻等效电阻值进行计算, 得到各金属层寄生电阻的等效电阻值如下: $R_{\text{Pt}} = 5.27 \times 10^{-5} \Omega$, $R_{\text{Au1}} = 1.19 \times 10^{-4} \Omega$, $R_{\text{In}} = 0.0042 \Omega$, $R_{\text{Au2}} = 3.32 \times 10^{-6} \Omega$, $R_{\text{Ni}} = 2.37 \times 10^{-6} \Omega$, $R_{\text{Al}} = 2.39 \times 10^{-6} \Omega$ 。

Micro-LED 在工作温度下寄生电阻的计算公式为

$$R_T = R_0 \times [1 + \delta(T - T_0)], \quad (13)$$

式中： R_T 为在工作温度 T 下的电阻值； R_0 为 T_0 时的导体电阻； δ 为导体的电阻温度系数。Al 的电阻温度系数为 $0.00429\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，Ni 的电阻温度系数为 $0.0069\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，Au 的电阻温度系数为 $0.00324\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，Pt 的电阻温度系数为 $0.00374\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。根据已有的研究结果^[31]，当 Micro-LED 阵列技术中 Micro-LED 的工作电流为 $60\text{ }\mu\text{A}$ 时，工作温度约为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ ，因此本文选择 Micro-LED 的工作温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ ，则各金属层寄生电阻在工作温度下的等效电阻值为 $R'_{\text{Pt}}=5.664\times 10^{-5}\text{ }\Omega$ ， $R'_{\text{Au1}}=1.267\times$

$10^{-4}\text{ }\Omega$ ， $R'_{\text{Au2}}=3.535\times 10^{-6}\text{ }\Omega$ ， $R'_{\text{Ni}}=2.697\times 10^{-6}\text{ }\Omega$ ， $R'_{\text{Al}}=2.595\times 10^{-6}\text{ }\Omega$ 。由此可以得到寄生电阻： $r_1=0.0042\text{ }\Omega$ ， $r_2=1.833\times 10^{-4}\text{ }\Omega$ ， $r_3=8.827\times 10^{-6}\text{ }\Omega$ 。

电容等效电路如图 12 所示，钢凸点上方电极是圆形电极，下方电极是正方形电极，圆形电极包括在正方形电极内，因此，所形成的平行板为圆形，直径为 L_0 ，在上下方电极接触处还存在薄薄的一层二氧化硅膜，用来进行电隔离，厚度为 h_1 和 h_3 ， h_2 为键合后钢凸点的高度。

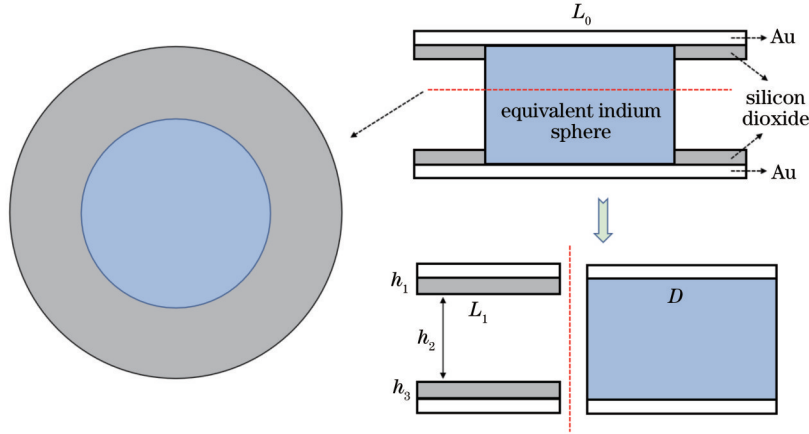


图 12 等效电容电路

Fig. 12 Equivalent capacitance circuit

两层平行板间寄生电容的计算公式为

$$C = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times S_0}{d}, \quad (14)$$

式中： C 为电容； ϵ_r 为介电常数，空气的介电常数为 1，二氧化硅的介电常数为 3.9； S_0 为两板正对面积； ϵ_0 为真空电容率，为 8.86×10^{-12} ； d 为两板间距离，即 h 。进而求得空气和二氧化硅的等效电容分别为 $C_0=7.636\times 10^{-16}\text{ F}$ ， $C_{\text{SiO}_2}=1.768\times 10^{-14}\text{ F}$ 。

寄生电容部分相当于中间一个空气型电容，上下各一个二氧化硅型电容，3 个电容为串联关系，根据电容串联计算公式，求得 Micro-LED 芯片与 CMOS 驱动器间寄生电容 C_{OX} 即 c_1 为 $7.031\times 10^{-16}\text{ F}$ 。

利用 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 像素电路进行仿真，探索寄生情况对驱动性能的影响，电路如图 13 所示，其中 r_4 为两个相邻 Micro-LED 像素间的寄生电阻，且两个相邻 Micro-LED 像素间的寄生电阻定义为反向偏压与漏电流的比值。根据经验，两个相邻

Micro-LED 像素间的寄生电阻约为 $1.2\times 10^{12}\text{ }\Omega$ ^[32]，即 $r_4=1.2\times 10^{12}\text{ }\Omega$ (表 3)。

4.3 驱动电路开关损耗的产生机制

Micro-LED 开关损耗的产生与 Micro-LED 本身的结电容密切相关。理想二极管可以等效为一个零开通关断响应时间 (开通和关断损耗) 的电子开关，其功耗为 0，但实际上不存在理想二极管，实际的二极管由于存在结电容效应，在其通态和断态之间切换时存在一个暂态过程，且暂态过程的电压-电流特性随时间变化。当二极管正向压降从 0 开始增大，存在一个缓冲电压，经过缓冲电压后逐渐趋于平稳，对应的回复时间称为开启损耗时间，将开启损耗时间对应的电流值变化的 10%~90% 的阶段定义为关断延迟时间 t_{on} 。开启损耗的计算公式为

$$P_{\text{on}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{on}}} v_F(t) i_F(t) dt \approx \frac{1}{2} V_{\text{fp}} I_{\text{fp}} t_{\text{open}} f, \quad (15)$$

式中： V_{fp} 为正向峰值电压； I_{fp} 为正向峰值电流； f 为二极

表 3 Micro-LED 驱动电路的寄生电阻和电容的参数汇总

Table 3 Parameter summary of parasitic resistance and capacitance of Micro-LED driving circuit

Parameter	Resistance of bonded indium bump r_1 / Ω	Resistance of electrode between indium bump and PMOS r_2 / Ω	Resistance value of electrode between indium bump and Micro-LED chip r_3 / Ω	Parasitic resistance between adjacent Micro-LED r_4 / Ω	Parasitic capacitance between Micro-LED chip and CMOS driver c_1 / F
Value	0.0042	1.833×10^{-4}	8.827×10^{-6}	1.2×10^{12}	7.031×10^{-16}

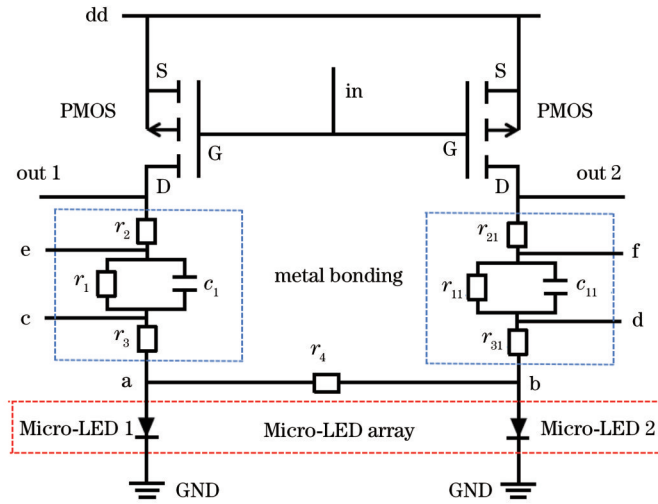


图 13 驱动阵列像素仿真电路
Fig. 13 Simulation circuit of driving array pixels

管的频率; $v_F(t)$ 为正向压降; $i_F(t)$ 为正向电流。

当给二极管施加一个反向电压时, 二极管并不会立即关断, 而是需要一定时间才能获得反向阻断的能力, 这个时间叫作关断损耗时间, 将关断损耗时间对应的电流值变化的 90%~10% 的阶段定义为关断延迟时间 t_{off} 。关断损耗的计算公式为

$$P_{off} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} v_F(t) i_F(t) dt \approx \frac{1}{2} \cdot V_p I_p t_{off} f, \quad (16)$$

式中: t_1 为二极管的反向恢复开始时间; t_2 为二极管的反向恢复结束时间; V_p 为正向峰值电压; I_p 为正向峰值电流。

开启损耗和关断损耗的加和即为开关损耗, 因此, 开启延迟时间和关断延迟时间越短, 开启损耗和关断损耗越小, 则开关损耗越小。

5 PMOS 驱动 Micro-LED 的仿真结果及分析

5.1 PMOS 驱动单独 Micro-LED 像素的仿真结果及分析

PMOS 直接驱动 Micro-LED 的仿真结果如图 14 所示。图 14(a) 所示为 PMOS 直接驱动 Micro-LED 的传输特性曲线。当输入低电平时, PMOS 处于开启状态, Micro-LED 端输出电压接近 5 V, 通过 Micro-LED 的电流值接近 66 μ A; 随着输入电压的增加, Micro-LED 端输出电压缓慢减小, 通过 Micro-LED 的电流值也缓慢减小, 直到输入电压为 4 V 左右时, PMOS 关断, Micro-LED 端输出电压和通过 Micro-LED 的电流值发生剧烈变化, 直到 PMOS 关断; 当输入高电平时, 其输出电压达不到 0 V, 大约在 2.7 V 左右, 通过 Micro-LED 的电流值接近于 0 A (0.973 pA), 这是因为高电平时 PMOS 不完全处于关断状态, 有电流通过, 且 PMOS 的等效电阻值和 Micro-LED 的等效电阻

值相近, 导致 PMOS 和 Micro-LED 分压接近。因此, 驱动电路形成了低电平开启、高电平关断的开关特性。

驱动电路开关特性的优良除了根据传输特性曲线判断以外, 还有一个相对更加重要的参考条件, 即瞬态特性曲线中的开关延迟时间, 开关延迟时间越小, 则驱动电路的开关性能越优越。PMOS 直接驱动 Micro-LED 的瞬态特性曲线仿真结果如图 14(b) 所示, 其中输入电压是一个梯形的脉冲电压曲线, 周期为 140×10^{-12} s。在低电平时, PMOS 开启, 电路导通, 通过 Micro-LED 的电流为 71.63 μ A, 随着时间的推移, 输入电压呈线性增加, 通过 Micro-LED 的电流值也呈现增长的趋势, 峰值为 3.37 mA, 此时 PMOS 关断, 通过 Micro-LED 的电流值剧烈下降, 直到达到平稳状态, 这一过程的电流值变化的 10%~90% 阶段对应的时间即定义为关断延迟时间 t_{off} , 其中关断开始时间为 $t_{off,0}$, 关断结束时间为 $t_{off,1}$ 。随着时间的推移, 输入电压达到峰值 5 V 并持续 60 ps, 之后输入电压再次下降并导致通过 Micro-LED 的电流产生剧烈下降, 谷值为 -3.89 mA。PMOS 再次开通, 通过 Micro-LED 的电流从谷值开始增加, 直到达到平稳状态, 这一过程中电流值变化的 10%~90% 的阶段对应的时间即定义为开启延迟时间 t_{on} , 其中开启开始时间为 $t_{on,0}$, 开启结束时间为 $t_{on,1}$ 。

PMOS 直接驱动 Micro-LED 的开关特性曲线如图 15 所示, 其中关断过程在左侧, 开启过程在右侧。在关断过程中, A_{off} 为关断峰值电流点, B_{off} 为关断平稳电流点, C_{off} 为关断开始电流点, D_{off} 为关断结束电流点, $t_{off,0}$ 为关断开始时间; $t_{off,1}$ 为关断结束时间。在开启过程中, A_{on} 为开启平稳电流点; B_{on} 为开启谷值电流点; C_{on} 为开启结束电流点; D_{on} 为开启开始电流点; $t_{on,0}$ 为开启开始时间; $t_{on,1}$ 为开启结束时间。由仿真结果分析得出, 在关断过程中, $A_{off}=3.37$ mA, $B_{off}=2.55$ μ A,

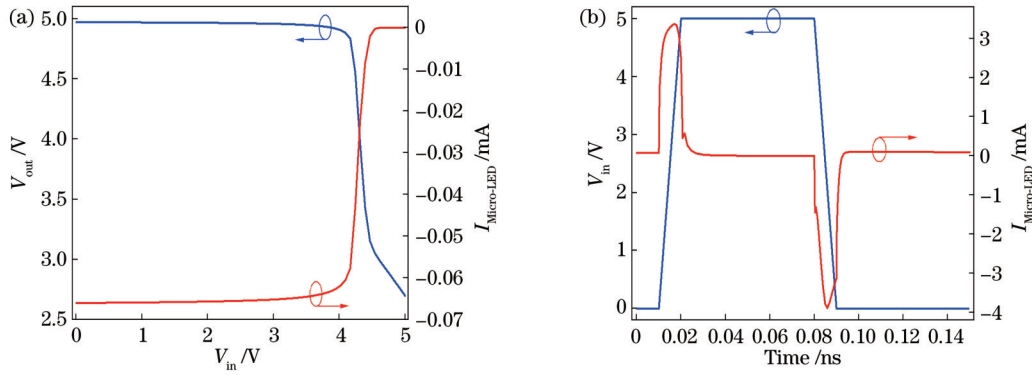


图 14 PMOS 直接驱动 Micro-LED 的特性曲线。(a) 传输特性曲线；(b) 瞬态特性曲线

Fig. 14 Characteristic curves of Micro-LED directly driven by PMOS. (a) Transmission characteristic curves; (b) transient characteristic curves

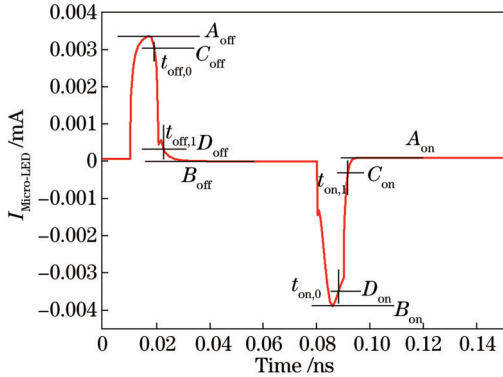


图 15 PMOS 直接驱动 Micro-LED 的开关特性曲线

Fig. 15 Switching characteristic curve of Micro-LED directly driven by PMOS

$C_{off}=3.03$ mA, $D_{off}=0.34$ mA, $t_{off,0}=0.0191$ ns, $t_{off,1}=0.0226$ ns, 则关断延迟时间 $t_{off}=t_{off,1}-t_{off,0}=3.5$ ps; 在开启过程中, $A_{on}=0.098$ mA, $B_{on}=-3.889$ mA, $C_{on}=-0.3$ mA, $D_{on}=-3.49$ mA, $t_{on,0}=0.0881$ ns, $t_{on,1}=0.0916$ ns, 则开启延迟时间 $t_{on}=t_{on,1}-t_{on,0}=3.5$ ps。PMOS 直接驱动 Micro-LED 电路的开关延迟时间很短, 开关特性良好, 但是在曲线中可以看到明显的突刺状的电流浪涌情况。

PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的仿真结果如图 16 和图 17 所示。图 16 所示为 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的传输特性曲线, 其中加入的限流电阻 r 的阻值分别为 $100\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1000\ \Omega$ 和 $10\ \text{k}\Omega$ 。PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的瞬态特性曲线仿真结果如图 17 所示, 从仿真结果可以看到, 电流曲线是平滑无突刺的, 电流浪涌现象得到了明显改善, 并且流过 Micro-LED 的电流数值明显减小, 限流电阻起到了限流分压的作用。

图 18 所示为 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的开关特性曲线。当限流电阻为 $100\ \Omega$ 时, 由仿真结果分析得出: 在关断过程中, $A_{off}=2.93$ mA, $B_{off}=1.46\ \mu\text{A}$, $C_{off}=2.638$ mA, $D_{off}=0.294$ mA, $t_{off,0}=$

0.02065 ns, $t_{off,1}=0.02463$ ns, 则关断延迟时间 $t_{off}=t_{off,1}-t_{off,0}=3.98$ ps; 在开启过程中, $A_{on}=0.07$ mA, $B_{on}=-3.219$ mA, $C_{on}=-0.26$ mA, $D_{on}=-2.89$ mA, $t_{on,0}=0.09002$ ns, $t_{on,1}=0.09371$ ns, 则开启延迟时间 $t_{on}=t_{on,1}-t_{on,0}=3.69$ ps。当限流电阻为 $500\ \Omega$ 时, 由仿真结果分析得出: 在关断过程中, $A_{off}=1.61$ mA, $B_{off}=1.85\ \mu\text{A}$, $C_{off}=1.45$ mA, $D_{off}=0.16$ mA, $t_{off,0}=0.02$ ns, $t_{off,1}=0.03671$ ns, 则关断延迟时间 $t_{off}=t_{off,1}-t_{off,0}=16.71$ ps; 在开启过程中, $A_{on}=0.0665$ mA, $B_{on}=-1.8154$ mA, $C_{on}=-0.12169$ mA, $D_{on}=-1.62721$ mA, $t_{on,0}=0.08635$ ns, $t_{on,1}=0.09321$ ns, 则开启延迟时间 $t_{on}=t_{on,1}-t_{on,0}=6.86$ ps。当限流电阻为 $1000\ \Omega$ 时, 由仿真结果分析得出: 在关断过程中, $A_{off}=0.92$ mA, $B_{off}=15.81\ \mu\text{A}$, $C_{off}=0.83$ mA, $D_{off}=0.11$ mA, $t_{off,0}=0.03171$ ns, $t_{off,1}=0.05657$ ns, 则关断延迟时间 $t_{off}=t_{off,1}-t_{off,0}=24.86$ ps; 在开启过程中, $A_{on}=0.0597$ mA, $B_{on}=-1.1744$ mA, $C_{on}=-0.06371$ mA, $D_{on}=-1.05099$ mA, $t_{on,0}=0.08321$ ns, $t_{on,1}=0.09014$ ns, 则开启延迟时间 $t_{on}=t_{on,1}-t_{on,0}=6.93$ ps。当限流电阻为 $10\ \text{k}\Omega$ 时, 由仿真结果可知, 关断过程中无法达到关断电流平稳的状态, 即未出现完全关断的现象, 关断延迟时间非常大, 仿真结果无法计算; 在开启过程中, $A_{on}=0.0455$ mA, $B_{on}=-0.0928$ mA, $C_{on}=0.03167$ mA, $D_{on}=-0.07897$ mA, $t_{on,0}=0.09095$ ns, $t_{on,1}=0.1035$ ns, 则关断延迟时间 $t_{on}=t_{on,1}-t_{on,0}=12.55$ ps。

分析 PMOS 驱动单独 Micro-LED 的仿真结果, 可以发现, 当驱动电路加入限流电阻时, 浪涌现象得到了明显的改善, 可见限流电阻起到了限流分压的作用, 但 PMOS 直接驱动单独 Micro-LED 相较于 PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的开关延迟时间更短, 驱动效果更好。PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的情况下, 接入的限流电阻阻值越小, 则开关延迟时间越短, 驱动效果越好。

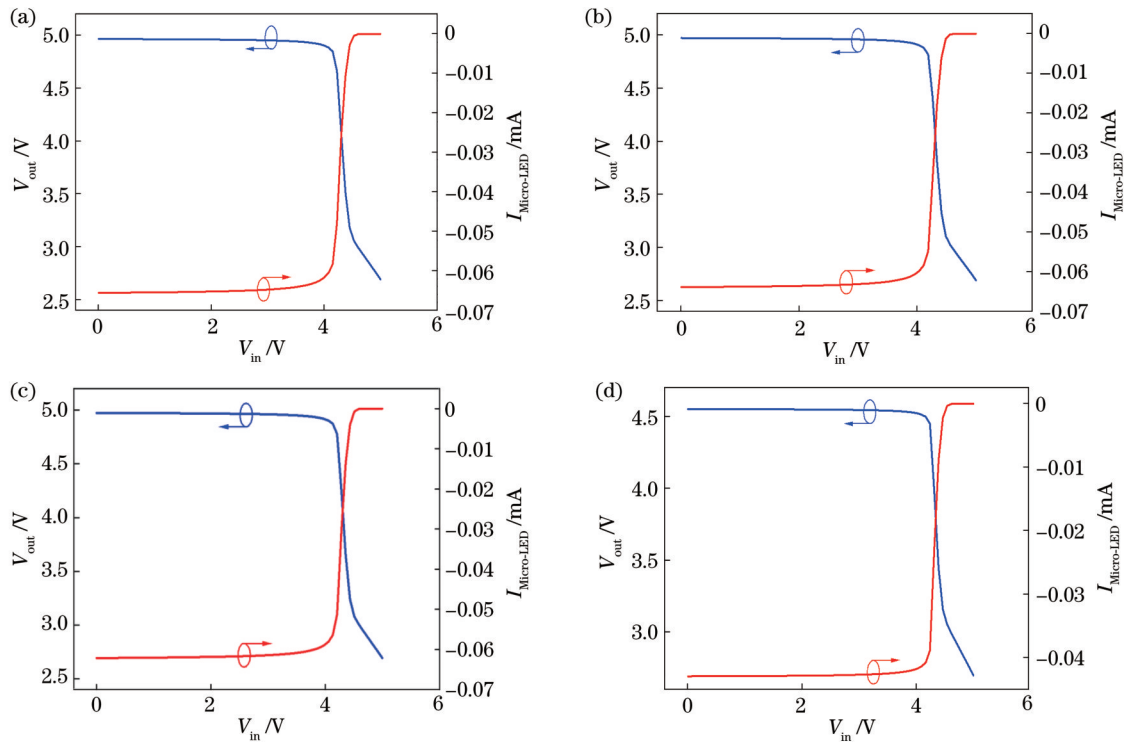


图 16 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的传输特性曲线。(a) $r=100\ \Omega$; (b) $r=500\ \Omega$; (c) $r=1000\ \Omega$; (d) $r=10\ k\Omega$

Fig. 16 Transmission characteristic curves of Micro-LED driven by PMOS with current limiting resistor. (a) $r=100\ \Omega$; (b) $r=500\ \Omega$; (c) $r=1000\ \Omega$; (d) $r=10\ k\Omega$

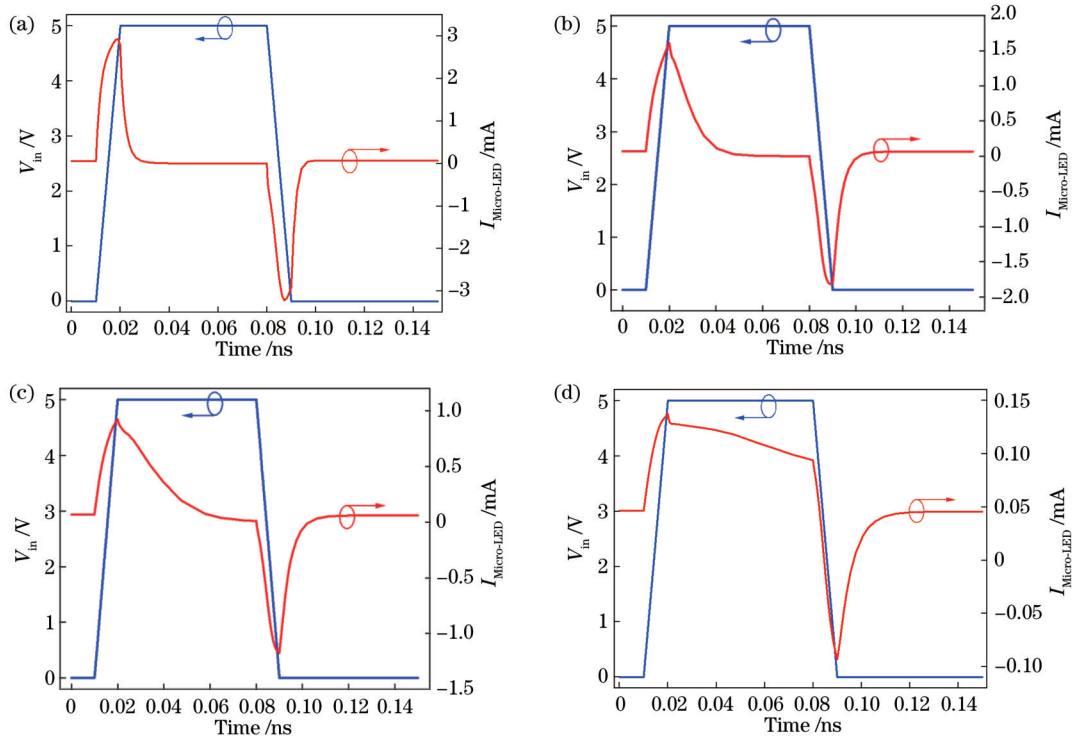


图 17 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的瞬态特性曲线。(a) $r=100\ \Omega$; (b) $r=500\ \Omega$; (c) $r=1000\ \Omega$; (d) $r=10\ k\Omega$

Fig. 17 Transient characteristic curves of Micro-LED driven by PMOS with current limiting resistor. (a) $r=100\ \Omega$; (b) $r=500\ \Omega$; (c) $r=1000\ \Omega$; (d) $r=10\ k\Omega$

5.2 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 的仿真结果分析

PMOS 驱动阵列 Micro-LED 的仿真结果如图 19 所示,其中图 19(a)所示为 PMOS 驱动阵列 Micro-

LED 的传输特性曲线,图 19(b)所示为 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 的瞬态特性曲线。

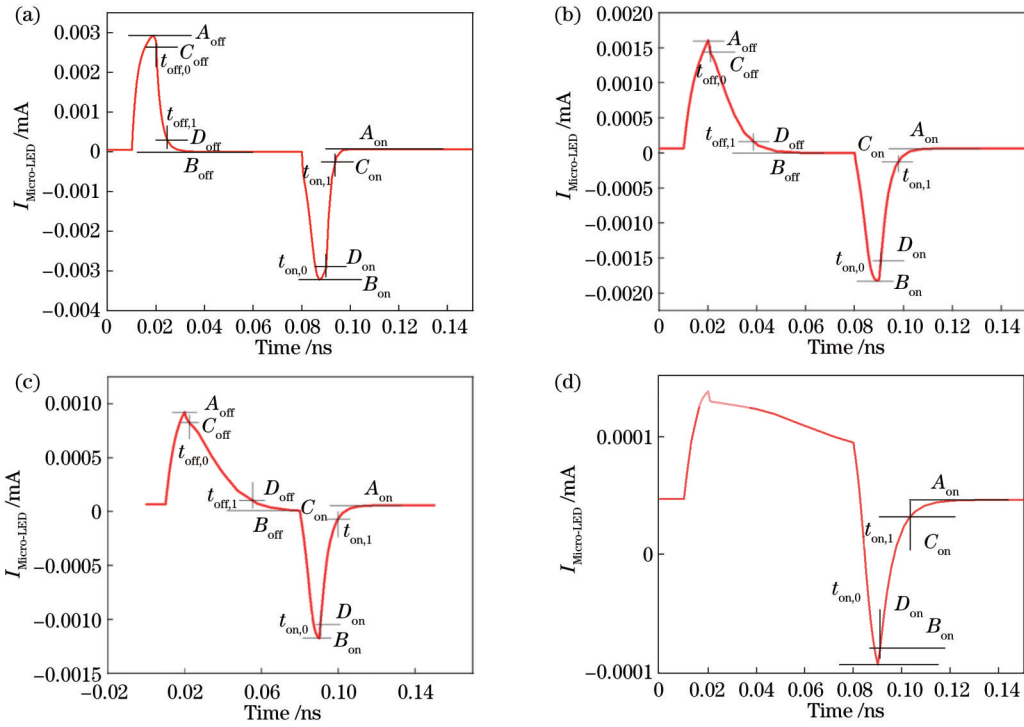


图 18 PMOS外加限流电阻驱动 Micro-LED 的开关特性曲线。(a) $r=100\ \Omega$; (b) $r=500\ \Omega$; (c) $r=1000\ \Omega$; (d) $r=10\ k\Omega$
 Fig. 18 Switching characteristic curves of Micro-LED driven by PMOS with current limiting resistor. (a) $r=100\ \Omega$; (b) $r=500\ \Omega$; (c) $r=1000\ \Omega$; (d) $r=10\ k\Omega$

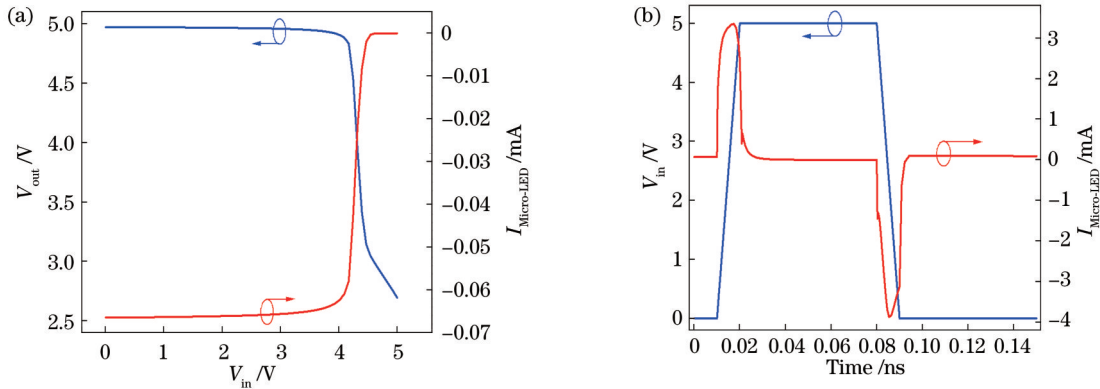


图 19 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 仿真结果。(a) 传输特性曲线; (b) 瞬态特性曲线
 Fig. 19 Simulation results of array Micro-LED driven by PMOS. (a) Transmission characteristic curves; (b) transient characteristic curves

图 20 所示为 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 的开关特性曲线。由仿真结果分析得出:在关断过程中, $A_{off}=3.35\ \text{mA}$, $B_{off}=2.63\ \mu\text{A}$, $C_{off}=3.013\ \text{mA}$, $D_{off}=0.335\ \text{mA}$, $t_{off,0}=0.0195\ \text{ns}$, $t_{off,1}=0.0225\ \text{ns}$, 则关断延迟时间 $t_{off}=t_{off,1}-t_{off,0}=3\ \text{ps}$; 在开启过程中, $A_{on}=0.1\ \text{mA}$, $B_{on}=-3.872\ \text{mA}$, $C_{on}=-0.297\ \text{mA}$, $D_{on}=-3.475\ \text{mA}$, $t_{on,0}=0.0882\ \text{ns}$, $t_{on,1}=0.0917\ \text{ns}$, 则开启延迟时间 $t_{on}=t_{on,1}-t_{on,0}=3.5\ \text{ps}$ 。

分析 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 的仿真结果可以发现, PMOS 驱动阵列 Micro-LED 相较于 PMOS 驱动单独 Micro-LED 的开关延迟时间更短, 开关损耗更

少, 驱动效果更好。

5.3 仿真结果分析及验证

二极管在开关转换过程中出现的开关时间延迟, 实质上是由 PN 结的电容效应引起的, 二极管的暂态开关过程就是 PN 结电容的充、放电过程, 其中二极管由截止过渡到导通, 相当于电容充电。出现二极管开关延迟的情况^[33]如下: 1) 外部电路决定的正向电流越小, 存储电荷数量越少, 则延迟时间越短; 2) 二极管两端电压越大, PN 结面积越小, 管内存储电荷数量越少, 延迟时间越短; 3) 反向电流越大, 存储电荷消失得越快, 则延迟时间越短。

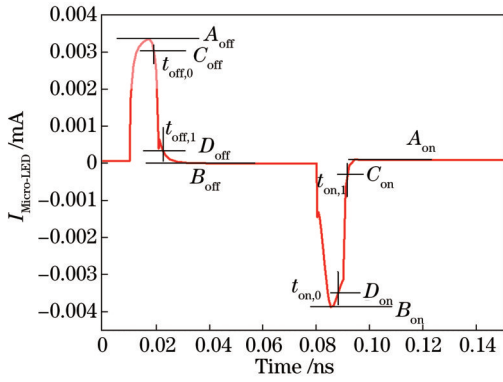


图 20 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 的开关特性曲线

Fig. 20 Switching characteristic curve of array Micro-LED driven by PMOS

不同驱动状态下关断延迟时间的统计结果如表 4 所示,可以发现,PMOS 驱动阵列 Micro-LED 相较于 PMOS 驱动单独 Micro-LED 的开关延迟时间更短、开关损耗更少、驱动效果更好。PMOS 直接驱动单独 Micro-LED 相较于 PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的开关延迟时间更短,开关损耗更少,驱动

效果更好。在 PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的情况下,接入的限流电阻阻值越小,则开关延迟时间越短,开关损耗越少,驱动效果越好。

对二极管开关延迟的情况进行分析,PMOS 驱动阵列 Micro-LED 相当于进行电路并联, Micro-LED 两端电压没有发生变化,但流过 Micro-LED 的正向电流比 PMOS 驱动单独 Micro-LED 的情况小了很多,由此导致每一条路径的 Micro-LED 存储电荷数量相对减少,则延迟时间更短,而延迟时间短就可以让驱动电路的开关损耗更少,使得电路整体损耗减少,进而增强了驱动效果。在 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的情况下, Micro-LED 两端电压发生了变化,接入的限流电阻阻值越大, Micro-LED 两端电压越小,由此导致 PN 结面积越大,管内存储电荷数量越多,延迟时间就越长,则开关损耗变多,驱动效果变差。由此可以解释 PMOS 直接驱动 Micro-LED 相较于 PMOS 外加限流电阻驱动 Micro-LED 的开关延迟时间更短,驱动效果更好,并且接入的限流电阻阻值越小,则开关延迟时间越短,驱动效果越好的实验结果。

表 4 不同驱动状态下关断延迟时间的统计结果

Table 4 Statistics results of turn-off delay time in different driving states

State of PMOS driven array Micro-LED	Driven by Direct drive	Driven by	Driven by	Driven by	Driven by	Driving array
		100 Ω current limiting resistor	500 Ω current limiting resistor	1000 Ω current limiting resistor	10 k Ω current limiting resistor	
Turn-off delay time /ps	3.50	3.98	16.71	24.86	∞	3.0
Opening delay time /ps	3.50	3.69	6.86	6.93	12.55	3.50

对仿真过程的验证结果如图 21 所示,其中:图 21(a)所示为 PMOS 驱动单独蓝光 Micro-LED 像素的显示图像,在 100 mA 驱动电流下, Micro-LED 的亮度为 323352 cd/m²;图 21(b)所示为 PMOS 驱动单独绿光 Micro-LED 像素的显示图像,在 100 mA 驱动电流下, Micro-LED 的亮度为 252321 cd/m²;图 21(c)所示为 PMOS 串联 100 Ω 限流电阻驱动单独蓝光 Micro-LED 像素的显示图像,在 100 mA 驱动电流下, Micro-LED 的亮度为 204271 cd/m²;图 21(d)所示为 PMOS 串联 100 Ω 限流电阻驱动单独绿光 Micro-LED 像素的显示图像,在 100 mA 驱动电流下, Micro-LED 的亮度为 131622 cd/m²;图 21(e)所示为 PMOS 驱动由绿光和蓝光组成的阵列 Micro-LED 像素的显示图像,在 100 mA 驱动电流下, Micro-LED 的亮度为 443926 cd/m²。

从不同驱动情况下 100 mA 电流时的 Micro-LED 亮度来看, PMOS 驱动阵列 Micro-LED 相较于 PMOS 驱动单独 Micro-LED 的亮度更高,驱动效果更好。PMOS 直接驱动单独 Micro-LED 相较于 PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的亮度更高,驱动效果更好。所得到的实验验证结果与仿真结果一致。

6 结 论

分析了 Micro-LED 的小尺寸效应,发现随着 Micro-LED 尺寸的减小,其辐射复合率、出光功率和光提取效率逐渐减小,导致 Micro-LED 单位像素发光强度降低,为保持发光强度不变,需要降低 Micro-LED 的损耗,而开关损耗是 Micro-LED 损耗的重要组成部分,针对 Micro-LED 的小尺寸效应,模拟仿真驱动电路驱动 Micro-LED 的开关特性过程,以进行减小开关损耗的研究。设计了一台 0.18 μm 量级的 PMOS,将 PMOS 器件和 Micro-LED 器件通过钢凸点进行凸点键合,并对 PMOS 驱动电路驱动单独 Micro-LED 和阵列 Micro-LED 进行仿真分析,通过比较由开关延迟时间导致的开关损耗情况判断驱动效果,发现 PMOS 驱动阵列 Micro-LED 相较于 PMOS 驱动单独 Micro-LED 的开关延迟时间更短,开关损耗更少,驱动效果更好。PMOS 直接驱动单独 Micro-LED 相较于 PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的开关延迟时间更短,开关损耗更少,驱动效果更好。PMOS 外加限流电阻驱动单独 Micro-LED 的情况下,接入的

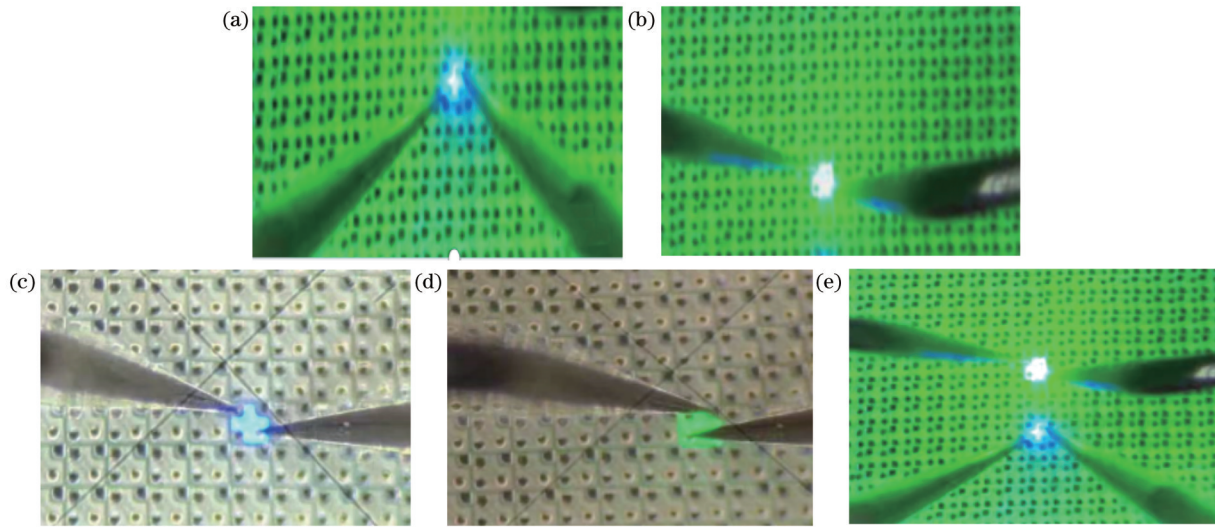


图 21 不同驱动状态下的 Micro-LED 显示图像。(a) PMOS 驱动单独蓝光/绿光 Micro-LED 像素的显示图像;(b) PMOS 驱动单独绿光 Micro-LED 像素的显示图像;(c) PMOS 串联 100 Ω 限流电阻驱动单独蓝光 Micro-LED 像素的显示图像;(d) PMOS 串联 100 Ω 限流电阻驱动单独绿光 Micro-LED 像素的显示图像;(e) PMOS 驱动绿光和蓝光组成的阵列 Micro-LED 像素的显示图像

Fig. 21 Micro-LED display images under different driving states. (a) Display image of individual blue Micro-LED pixel driven by PMOS; (b) display image of individual green Micro-LED pixel driven by PMOS; (c) display image of individual blue Micro-LED pixel driven by PMOS with 100 Ω current limiting resistor; (d) display image of individual green Micro-LED pixel driven by PMOS with 100 Ω current limiting resistor; (e) display image of array Micro-LED pixels composed of green light and blue light driven by PMOS

限流电阻阻值越小,则开关延迟时间越短,开关损耗越少,驱动效果越好。

参 考 文 献

- [1] Huang Y M, Chen J H, Liou Y H, et al. High-uniform and high-efficient color conversion nanoporous GaN-based micro-LED display with embedded quantum dots[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2696.
- [2] Liou J C. Circuitry of multiplexer-on-chip system within the micro-LED array manufacturing CMOS substrate[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(11): 400.
- [3] Shieh C Y, Tsai C W. Characteristics of CMOS-based Micro LED display by using digital modulation technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S2): 344-346.
- [4] 李建军, 曹红康, 邓军, 等. 面向微显示的小电流 655 nm Micro-RCLED[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1526002.
- [5] Li J J, Cao H K, Deng J, et al. Realization of 655 nm micro-RCLED working at low driving current for micro-displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1526002.
- [6] Bonar, James R, Gareth J V, et al. Integrated colour LED micro-display[P]. US10862010, 2020.
- [7] Hartensveld M. Fully monolithic GaN μ LED display system[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 880-883.
- [8] Meng W Q, Xu F F, Yu Z H, et al. Three-dimensional monolithic micro-LED display driven by atomically thin transistor matrix[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(11): 1231-1236.
- [9] Chang K P, Lien P C, Yen C C, et al. High performance AlGaInP-based micro-LED displays with novel pixel structures [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(24): 1375-1378.
- [10] Zhou X J, Tian P F, Sher C W, et al. Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 71: 100263.
- [11] Hsiang E L, Yang Z Y, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(6): 446-465.
- [12] Wang Y, Dong X B, Han S S, et al. A study on micro-LED stamp transfer technology: requirement and challenges[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S2): 347-348.
- [13] Su Z H, Zhanghu M Y, Liu Z J. Investigation on AR/VR displays based on novel micro-LED technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S1): 609-612.
- [14] Zhang X, Qi L H, Chong W C, et al. Active matrix monolithic micro-LED full-color micro-display[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(1): 47-56.
- [15] 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.
- [16] Tai J P, Guo W L. Research progress of micro LED display technology[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2019, 30(1): 18-25.
- [17] Guo W L, Tai J P, Liu J P, et al. Process optimization of passive matrix GaN-based micro-LED arrays for display applications[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(8): 5195-5201.
- [18] 邹兵, 张文君, 徐阁, 等. LED 微显示技术[J]. *光学仪器*, 2015, 37(4): 293-298.
- [19] Zou B, Zhang W J, Xu G, et al. The technology of micro-size LED display[J]. *Optical Instrument*, 2015, 37(4): 293-298.
- [20] Wu T Z, Sher C W, Lin Y, et al. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
- [21] Huang Y G, 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: 105.
- [22] Lee S L, Cheng C C, Liu C, et al. 9.4-inch 228-ppi flexible micro-LED display[J]. *Journal of the Society for Information*

- Display, 2021, 29(5): 360-369.
- [20] 尹瑞梅, 贾伟, 董海亮, 等. (10-11)面 InGa_N 量子阱中的静电场反转对蓝光 LED 光电性能的影响[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2125001.
Yin R M, Jia W, Dong H L, et al. Influence of electrostatic field inversion in InGa_N quantum well with (10-11) plane on photoelectric properties of blue LED[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(21): 2125001.
- [21] 方奥琪, 郭伟玲, 许昊, 等. 具有新型电极结构的功率 LED 研究[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1923003.
Fang A Q, Guo W L, Xu H, et al. Power light-emitting diode with novel electrode structure[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 1923003.
- [22] 赵永周. Micro-LED 阵列显示器件制备及光电特性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
Zhao Y Z. Fabrication of micro-LED array display device and study on its photoelectric characteristics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [23] 胡新培, 蔡俊虎, 叶媛媛, 等. 高光效 GaN 基 Micro-LED 仿真模型研究[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1525001.
Hu X P, Cai J H, Ye Y Y, et al. Simulation model of GaN-based micro-LED with high light extraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1525001.
- [24] 王海, 严群, 杨天溪, 等. 光栅和随机粗糙表面对微型 LED 光提取效率的提升作用[J]. 微纳电子与智能制造, 2021, 3(3): 72-78.
Wang H, Yan Q, Yang T X, et al. Enhancement of light extraction efficiency of Micro-LEDs by using gratings and randomly roughened surface[J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2021, 3(3): 72-78.
- [25] Qian Z Y, Zhu S J, Shan X Y, et al. Analysis of the efficiency improvement of 273 nm AlGa_N UV-C micro-LEDs[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(19): 195104.
- [26] Ahn H A, Hong S K, Kwon O K. An active matrix micro-pixelated LED display driver for high luminance uniformity using resistance mismatch compensation method[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(6): 724-728.
- [27] Li Q. Design of adaptive dimming power control system for civil aircraft lightplates[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 8-11, 2021, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2021: 988-992.
- [28] Yang J J, Ma H Y, Dou J M, et al. Harmonic characteristics data-driven THD prediction method for LEDs using MEA-GRNN and improved-AdaBoost algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 31297-31308.
- [29] Hughes R W, Warner M. LEDs driven by AC without transformers or rectifiers[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 963.
- [30] Ding K, Avrutin V, Izyumskaya N, et al. Micro-LEDs, a manufacturability perspective[J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1206.
- [31] Shih F, Tsou C, Fang W. A monolithic micromachined thermocouple probe with electroplating nickel for micro-LED inspection[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(6): 864-875.
- [32] Qi L H, Zhang X, Chong W C, et al. 848 ppi high-brightness active-matrix micro-LED micro-display using GaN-on-Si epifabers towards mass production[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10580-10591.
- [33] 戴扬, 卢昭阳, 党江涛, 等. 反向泄漏电流对 GaN 基雪崩渡越时间二极管性能的影响[J]. 现代应用物理, 2021, 12(4): 95-101.
Dai Y, Lu Z Y, Dang J T, et al. Effect of reverse leakage current on the performance of GaN-based impact ionization avalanche transit time diode[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(4): 95-101.

Design of Micro-LED Driving Structure Considering Small Size Effect

Yin Luqiao^{1,2}, Zhang Xuesong¹, Ren Kailin¹, Zhang Nan³, Hao Maosheng³, Li Chunya^{2*},
Zhang Jianhua^{1,2}

¹Department of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Key Laboratory of Advanced Display and System Application, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

³Shanghai Chip Foundation Co., Ltd., Shanghai 201601, China

Abstract

Objective Micro light emitting diode (Micro-LED) is a kind of self-emitting device, and its single pixel can produce high brightness, which can realize the control of each pixel and single-point light driving. It has a very broad application prospect. Micro-LED display surpasses the current mainstream liquid crystal display (LCD) and organic light-emitting diode (OLED) display in terms of power consumption, resolution, contrast, and lifetime, which represents significant progress in the display field. However, the application of Micro-LED still faces challenges such as small size effect, chip and backplane technology, and bonding and driving technology. In this research, we use simulation software to design the structure parameters of Micro-LEDs and light them up, design the PMOS driving backplane, explore the small-size effect of Micro-LEDs, and study how to optimize the driving to improve the small-size effect of Micro-LEDs. We hope that our research will help overcome the current challenges faced by Micro-LEDs and realize the large-scale use of Micro-LEDs as soon as possible.

Methods In this paper, the optimization of driving is studied to improve the small size effect of Micro-LEDs. Firstly, the

structure and parameters of Micro-LEDs of 10 μm , 38 μm , 100 μm , and 300 μm are modeled by the simulation software of Sentaurus TCAD, and the small-size effect of Micro-LEDs is explored through the change in Micro-LED switching loss caused by the change in radiation recombination rate and light-emitting efficiency under small size, and the Micro-LED of 300 μm blue-green light is lit. Next, a PMOS device of 0.18 μm is designed as the driving backplane through Sentaurus simulation, and the PMOS device and Micro-LED device are bonded through indium bumps. Then, the simulation of PMOS driving circuit driving a single Micro-LED, the simulation of PMOS plus current-limiting resistors with different resistance values driving a single Micro-LED, and the simulation of PMOS driving two Micro-LED pixels are carried out to simulate the driving of array pixels. Finally, the driving effect is judged by comparing the switching delay time, and the experimental verification is carried out by using a blue-green Micro-LED of 300 μm .

Results and Discussions According to the self-designed vertical Micro-LED epitaxial structure (Fig. 1), the structure and parameters of Micro-LEDs with different sizes are modeled by using Sentaurus TCAD simulation software (Fig. 2), and the switching voltage is about 2.9 V (Fig. 3). The radiation recombination rate of Micro-LEDs decreases with the decrease in size (Fig. 4), and the light extraction efficiency decreases with the decrease in Micro-LED size (Fig. 6). From the perspective of the influence of radiation recombination rate and light extraction efficiency on Micro-LED miniaturization (Table 1), the small-size effect will lead to the decrease in the luminous intensity of Micro-LED unit pixels. If we want to keep the luminous intensity of the Micro-LED unit pixel constant, it is necessary to reduce the loss of Micro-LEDs, and the switching loss is one of the key factors of Micro-LED loss. In other words, reducing the switching loss can improve the small size effect of Micro-LEDs. The brightness of a blue-green LED of 300 μm can reach 546862 cd/m^2 (Fig. 7). By improving the parameters (Table 2), designing the PMOS driving backplane, and bonding PMOS devices and Micro-LED devices through indium bumps (Fig. 10), we can draw the following conclusions according to the simulation of Micro-LEDs driven by PMOS driving circuit (Table 4). Compared with a single Micro-LED driven by PMOS, the Micro-LED driven by PMOS has a shorter switching delay time, less switching loss, and better driving effect. Compared with PMOS plus current limiting resistor driving single Micro-LED, direct PMOS driving single Micro-LED has a shorter switching delay time, less switching loss, and better driving effect. When a PMOS current limiting resistor is applied to drive a single Micro-LED, a smaller resistance of the connected current limiting resistor is often accompanied by a shorter switching delay time, less switching loss, and better driving effect. The Micro-LED with a blue-green light of 300 μm is used for experimental verification (Fig. 21), and the same conclusion is obtained.

Conclusions In this paper, the Micro-LED's small size effect is studied. It is found that with the decrease in Micro-LED's size, its radiation recombination rate, light output power, and light extraction efficiency gradually decrease, which leads to the decrease in Micro-LED's unit pixel luminous intensity. In order to keep the luminous intensity constant, it is necessary to reduce the Micro-LED's loss, and the switching loss is one of the key factors of Micro-LED's loss. In other words, reducing the switching loss can improve the Micro-LED's small size effect. In view of the small-size effect of Micro-LED, the process of driving Micro-LED by driving circuit is simulated, and the research on reducing switching loss is carried out. In this paper, a PMOS device of 0.18 μm is designed. The PMOS device and Micro-LED device are bonded by an indium bump, and the simulation of PMOS driving circuit driving single Micro-LED and array Micro-LED is carried out. By comparing the switching loss caused by switching delay time, the driving effect is judged. It is found that the Micro-LED driven by PMOS array has a shorter switching delay time, less switching loss, and better driving effect than that driven by PMOS alone. Compared with PMOS plus current limiting resistor driving single Micro-LED, direct PMOS driving single Micro-LED has a shorter switching delay time, less switching loss, and better driving effect. When a PMOS current limiting resistor is applied to drive a single Micro-LED, a smaller resistance of the connected current limiting resistor is often accompanied by a shorter switching delay time, less switching loss, and better driving effect.

Key words optics device; micro light emitting diode; small size effect; PMOS driving; switching delay time