

一种硅基 OLED 微显示芯片的 PMU 设计

蔡 俊¹, 宋 飞¹, 陈晓烽¹, 冉 峰²

(1 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001; 2 上海大学 微电子研发中心, 上海 200072)

摘 要: 设计了一种集成在硅基 OLED 微显示芯片上的电源管理单元(PMU). 该 PMU 采用 Cuk 型 DC-DC 变换器和 LDO 相结合的新型结构, 其中 Cuk 电路采用 PWM 调制的峰值电流控制模式输出负电压, 同时 Cuk 电路产生的脉冲电压经过滤波得到直流电压, 该电压通过 LDO 模块输出正电压. 电路的整体设计和仿真在 SMIC 0.18 μm 1.8 V/5 V CMOS 数模混合工艺下完成, 仿真结果表明, 在 2 MHz 开关频率和 3.3 V 标准输入电压条件下, 输出正电压在 2~5.5 V 范围内可调, 输出负电压在 -2~-5.5 V 范围内可调, 纹波均小于 5 mV. 输出正、负电压的线性调整率分别为 5 mV/V 和 20 mV/V, 负载调整率分别为 0.04 mV/mA 和 0.15 mV/mA, 满足 PMU 的设计指标.

关键词: 硅基 OLED; PMU; Cuk; LDO

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)04-0135-05

A Design of PMU for the OLED-on-Silicon Micro-Display Chip

CAI Jun¹, SONG Fei¹, CHEN Xiao-feng¹, RAN Feng²

(1 School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2 Microelectronic Research & Development Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A power management unit (PMU) is proposed that can be integrated in the OLED-on-Silicon micro-display devices. The PMU uses a new structure that combine a Cuk type DC-DC converter and low drop-out voltage regulator(LDO). The DC-DC converter is used to generate negative voltage output with PWM modulation, meanwhile the LDO generates positive voltage output. The PMU is designed under SMIC 0.18 μm 1.8V/5V CMOS mix-signal process. With the 3.3 V input power voltage, the output voltage has an adjustable positive voltage range of 2 ~ 5.5 V along and a negative voltage range of -2 ~ -5.5 V. The simulation results show that the output ripple of voltage is less than 5 mV. The positive and negative voltage output linear regulation is 5 mV/V and 20mV/V. Also, a load regulation of 0.04 mV/mA and 0.15 mV/mA is designed to meet the PMU specification.

Key words: OLED-on-Silicon; PMU; Cuk; LDO

1 引言

随着近几年微电子科技的蓬勃发展,特别是 VR、AR 技术日新月异快速发展的今天,硅基 OLED 微型显示设备作为便携式人机交互的桥梁引起人们的高度重视. 其中硅基微显示器具有主动发光、可视范围宽、工作温度范围大、响应速度快等优

点,尤其适合应用于小型、微型可视化设备,如:头戴式设备、移动终端以及眼镜式可视设备等^[1]. 传统的微型显示器需要外部供电,不仅占用较大的面积而且增加功耗. 本文从系统集成的角度出发,研究设计了便于集成的新型电源管理器,将其与像素驱动电路、存储器、控制电路等集成在一起,实现了独立集成芯片的设计.

由于硅基 OLED 器件为高压器件,所以需要通
过外加高压,或者由电路产生合适的电压对其进
行供电. 图 1 为 PMU 电路原理框图,为了减少板级电
压源标准的数目,设计采用所提供的 $V_{IN} = 3.3\text{ V}$
的标准电压. 为了给 OLED 提供一个可以调整的电
源电压,采用两组电压供电,其中, V_{OP} 给像素驱
动电路提供正电压, V_{ON} 为硅基 OLED 公共阴极提
供负电压. 需要大约 $8\sim 10\text{ V}$ 的电压差 ($V_{OP} - V_{ON}$)
施加在硅基 OLED 像素电路上. OLED 的发光亮度对
输出电压 V_{OP} 与 V_{ON} 的变化比较敏感. 负载变化和
输入电源电压变化会引起 V_{OP} 与 V_{ON} 的变化,因此
 V_{OP} 与 V_{ON} 不仅要有较小的纹波,还需要尽可能小的
线性调整率和负载调整率.

目前设计硅基 OLED 的 PMU 时普遍采用两种
单独的拓扑结构 (Buck, Boost, Buck-Boost 等) 分别
输出正负电压,或者采用单电感多输出的 DC-DC 拓
扑结构^[2-3]. 本文设计了一种 Cuk 变换器和 LDO 相
结合的新型结构, Cuk 电路的优点是输出电压纹波
较小,同时也克服了 LDO 的缺点,使输出电压大于
输入电源电压. 此时也出现了 LDO 输出电压具有
纹波的新缺点,但是通过调节滤波电容可以使输出
纹波在要求的范围内.

2 电源管理器设计

如图 1 所示,由于所需的电感和电容无法全部
集成到芯片内部,因而采用少量外接分立元件的
方式. 其中,虚线框内 LDO、PWM 控制模块和功率管
 MP_1 均采用集成电路工艺进行设计制作. V_{ON} 输出
部分采用 PWM 调制的峰值电流控制方式^[4]. 功率
管漏端的脉冲信号 V_{INDUCT} 经过 D_2 和 C_3 组成的滤波
电路,得到直流纹波电压 V_{IP} ,将 V_{IP} 输入到 LDO 控
制模块从而产生稳定的 V_{OP} 输出. 图 1 中显示 V_{OP} 、
 V_{ON} 和像素电路构成一个环路,则有输出电流 $I_{OP} =$
 $I_{ON} = I_O$.

当 PMU 在稳定工作时,令正负电压输出端负
载电阻为 R_L , LDO 模块中调整管 MP_2 的等效电阻
为 R_{M2} . 由于 M_1 管开关周期为 T ,则占空比 D 可
表示为 $D = T_{on}/T$,其中 T_{on} 为一个 T 内 M_1 开启的
时间. R_{SENSE} 为无损电流检测电阻,其具体检测方式
如图 4 中所示.

当 PWM 控制信号处于上升沿时,功率管 MP_1
开启,而此时 D_1 、 D_2 关断. V_{IN} 向 L_1 充电, C_1 上的电
荷经过 L_2 分配到 C_2 ,并为 R_L 供电,其中 LDO 模块
由 C_3 提供电压 V_{IP} . 此时列 KVL 方程并作拉氏变换

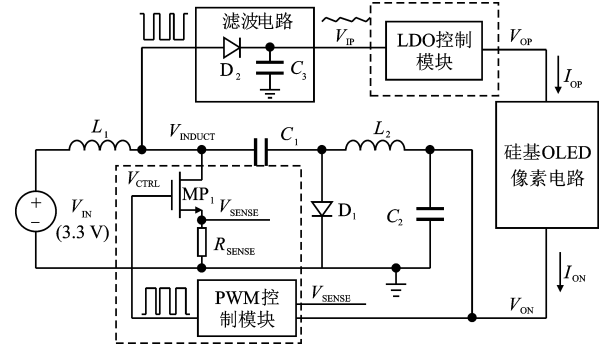


图 1 PMU 的电路原理框图

可以求得 L_1 中电流和时间的关系式,通过 L_1 中的
电流在 $t_{on} = DT$ 时达到最大值,其增加量如式 (1)
所示.

$$i_{L1max} = i_{L1}(t_{on}) = \frac{V_{IN}DT}{L_1} \quad (1)$$

当开关截止时, D_1 与 D_2 导通. V_{IN} 通过 L_1 给
 C_1 、 C_3 提供电荷,并且给 R_L 、 R_{M2} 供电,而此时的 C_2
和 L_2 给 R_L 供电. 因为 L_1 增加的能量转移到 C_1 、 C_3
上,当 $C_1 = C_3$ 时,可知 C_1 、 C_3 两端电压变化量是
相同的,均为 V_{C+} ,其能量转移关系如式 (2) 所示.

$$\frac{1}{2}L_1(i_{L1max})^2 = \frac{1}{2}(C_1 + C_3)(V_{C+})^2 \quad (2)$$

同理, L_2 中通过的电流在 $T_{off} = (1-D)T$ 时达
到最小值,其减小量如式 (3) 所示.

$$i_{L2min} = i_{L2}(t_{off}) = \frac{V_{OP}(1-D)T}{L_2} \quad (3)$$

此时 L_2 能量减少量恰好是在功率管 MP_1 导通
时 C_1 的能量减少量,如式 (4) 所示,其中 V_{C-} 为 C_1
两端电压减小量.

$$\frac{1}{2}L_2(i_{L2min})^2 = \frac{1}{2}C_1(V_{C-})^2 \quad (4)$$

式 (5) 表示电路处于稳定状态时 C_1 在周期 T 内
无论充电还是放电都有 $V_{C+} = V_{C-}$.

$$\frac{V_{IN}DT}{\sqrt{L_1(C_1 + C_3)}} = -\frac{V_{ON}(1-D)T}{\sqrt{L_2C_1}} \quad (5)$$

根据式 (5) 可以得到 V_{OP} 、 V_{ON} 和输入电压的关
系,如式 (6)、(7) 所示.

$$\frac{V_{ON}}{V_{IN}} = -\frac{D}{(1-D)} \sqrt{\frac{L_2C_1}{L_1(C_1 + C_3)}} \quad (6)$$

$$\frac{V_{OP}}{V_{IN}} = \frac{R_LDT}{(R_L + R_{M2})[1 - e^{-\frac{DT}{(R_L + R_{M2})C_3}}] \sqrt{(C_1 + C_3)L_1}} \quad (7)$$

由式 (6)、(7) 可知, D 越大, V_{OP} 、 V_{ON} 的数值也
越大.

3 模块电路设计

3.1 LDO 控制模块

图 2 所示为 LDO 控制模块电路图,OP_RDAC 模块通过分压电阻将输出电压 V_{OP} 转变为电压 V_{FB} ,其中 8 位 $PRS<7:0>$ 信号通过开关管调节分压电阻的大小.基准电压 V_{BG} 与反馈电压 V_{FB} 通过运放来改变调整管 MP_2 的栅电压,从而达到控制 V_{OP} 大小的目的. C_O 为输出电容,其值在皮法量级,可以集成在芯片内部^[5].其中 R, C 为补偿网络.

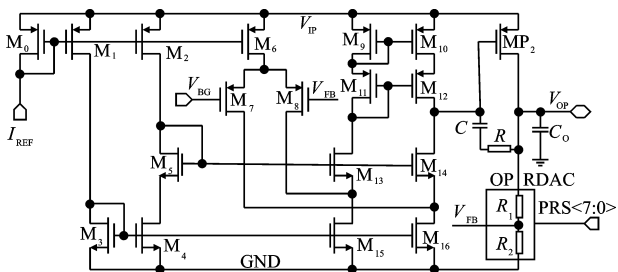


图 2 LDO 控制模块电路图

输出电流 I_O 通过调整管 MP_2 ,其最大值达到了几百毫安,这就要求 MP_2 管有足够大的宽长比,而 MP_2 管的面积与引入的寄生电容成正比,所以调整管 MP_2 的栅长 L_2 应取符合要求的最小值,栅宽 W_2 达到了毫米量级^[6].

运放是 LDO 控制模块的核心部件,其采用共源共栅的电路结构,其设计性能的好坏会直接影响反馈环路的稳定和输出正电压 V_{OP} 的纹波大小.其中 AMP 的输出端电阻和 MP_2 管的等效电容产生的极点作为主极点,而 R_L 和 C_O 产生的极点作为次极点.由于 I_O 发生变化使得 R_L 也跟着发生变化,导致环路的次极点在一定的范围内移动.在设计电路时应充分考虑次极点的移动范围,通过利用 R, C 构成的补偿电路产生的零点使得环路具有足够的相位裕度^[7].

3.2 PWM 控制模块

图 3 所示为 PWM 控制模块的框图,采用内环电流外环电压的双环反馈方式.ON_RDAC 模块将负压 V_{ON} 转换成正电压 V_N ,再与 V_{BG} 相比较.通过 8 位 $NRS<7:0>$ 信号改变分压电阻来调节 V_N ,从而实现输出负电压的调整.VCO 产生的 V_{SLOPE} 信号和检测电压 V_{SENSE} 信号通过斜坡补偿电路进行叠加得到 V_{RAMP} 信号,最后 V_{RAMP} 与 EA 的输出电压 V_A 相比较,产生所需的 PWM 波.由于在启动初始阶段会产生浪涌电流,使电感电流达到饱和,因而,在

EA 输出端加上一个软启动电路,通过箝位电压 V_A ,使其缓慢均匀上升,一定时间后,通过控制软启动电路断开,使比较环路开始正常工作. MP_1 作为功率管,工作在 2 MHz 频率下,流过大电流,需要驱动电路才能使 MP_1 正常工作^[8].其中驱动部分 (DRIVE) 采用非交叠结构,通过限制其导通电流来降低能耗.

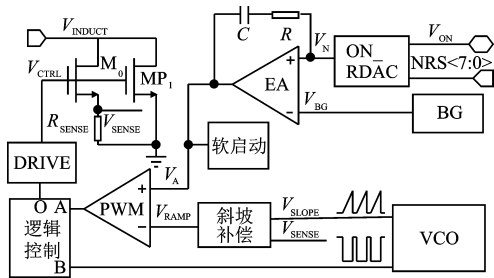


图 3 PWM 控制模块框图

误差放大器 (EA) 采用跨导运放 (OTA) 结构,其放大倍数要合理选择,高增益意味着线性度降低,而增益降低输出纹波就会变大,同时也会影响环路稳定性.对于双环反馈系统,电压环路和电流环路均需要进行频率补偿^[9].首先分析电压环路,相对于单一的电压反馈模式来说峰值电流模式中的电压环路的稳定性更容易实现.芯片外部电路存在一个由 C_2, R_{L_2} 引入的低频作为主极点,EA 输出端的电阻和 M_0 管等效电容产生第二个极点,RC 补偿网络产生一个处在两个极点之间的零点,从而使反馈环路获得充足的相位裕度.

对于内环电流反馈,当电路工作在连续导通模式 (CCM) 且 $D>0.5$ 时需要进行斜坡补偿^[10].图 4 所示为电流检测和斜坡补偿电路图,传统的电流检测采用串联电阻的方式,精确度高却无法做到无损检测,本文在设计时通过并联功率管 MP_1 的等比管 M_0 来实现对电感 L_1 上电流的无损检测,同时通过给 M_0 串联电阻 R_{SENSE} 也兼顾了检测的精确度.将 VCO 产生的斜坡信号转换成电流信号 I_{SLOPE} 与检测电流信号 I_{SENSE} 相加,并通过电阻 R_5 得到所需的斜坡补偿信号 V_{RAMP} .

4 整体电路仿真和版图设计

4.1 整体电路仿真

采用 Cadence Spectre 工具进行仿真研究, C_{uk} 电路工作在 2 MHz 频率下.通过控制信号 $PRS<7:0>$, $NRS<7:0>$ 调节 V_{OP} , V_{ON} ,实现了正电压 V_{OP} 在 2~5.5 V 范围内可调;负电压 V_{ON} 在 -2~-5.5 V 范围内可调.

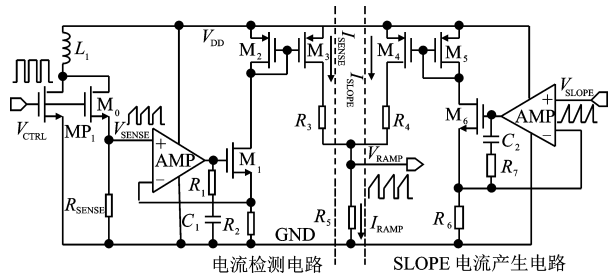


图 4 电流检测和斜坡补偿电路图

对 PMU 进行瞬态仿真(tran), $V_{IN}=3.3\text{ V}$,输出电压 $V_{OP}=5\text{ V}$, $V_{ON}=-5\text{ V}$. 负载电流 $I_O=300\text{ mA}$. 图 5 为电源管理单元整体瞬态仿真波形.

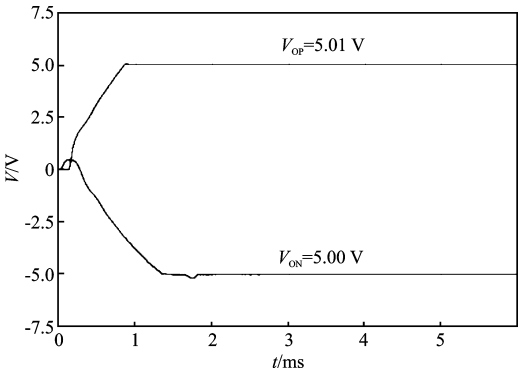


图 5 PMU 整体瞬态仿真波形

图 6 所示的波形为图 5 中 V_{OP} , V_{ON} 的纹波,从图中可知稳定后 V_{OP} 纹波 2.6 mV , V_{ON} 纹波 1.7 mV .

表 1 为电源管理单元线性调整率(LNR)仿真结果,其中 $I_O=300\text{ mA}$, V_{OP} , V_{ON} 电压取中间值.

表 1 线性调整率仿真结果

V_{IN}/V	V_{OP}/V	V_{OP} 纹波/ mV	V_{ON}/V	V_{ON} 纹波/ mV
3	5.008	3.5	-4.995	1.9
3.3	5.009	2.6	-5.003	1.7
4	5.012	2.4	-5.013	1.5

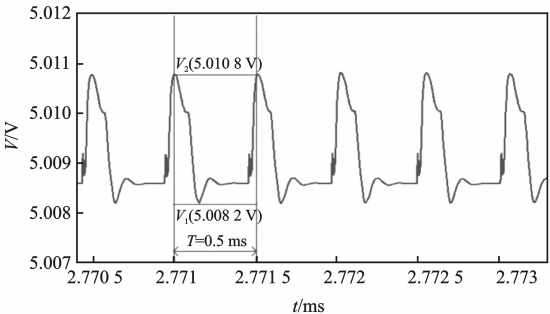
对表 1 数据进行分析 and 计算可以得出, V_{OP} , V_{ON} 的线性调整率分别为 4 mV/V , 18 mV/V .

表 2 为负载调整率(LDR)仿真结果, $V_{IN}=3.3\text{ V}$,令 I_O 分别为 100 mA , 200 mA , 300 mA .

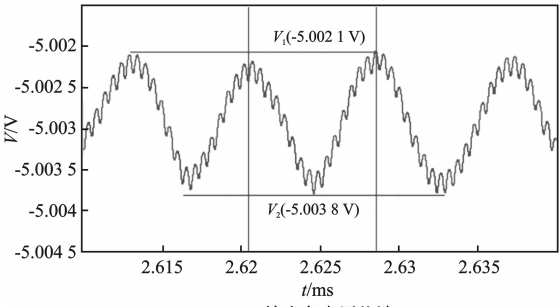
表 2 负载调整率仿真结果

I_O/mA	V_{OP}/V	V_{OP} 纹波/ mV	V_{ON}/V	V_{ON} 纹波/ mV
100	5.013	2.3	-5.023	1.8
200	5.010	2.5	-5.012	2.2
300	5.009	2.6	-5.003	1.7

由表 2 可知, V_{OP} 和 V_{ON} 负载调整率分别为 0.02 mV/mA , 0.1 mV/mA .



(a)输出正电压纹波



(b)输出负电压纹波

图 6 输出电压纹波

4.2 PMU 版图

本设计采用了 SMIC $0.18\text{ }\mu\text{m}$ $1.8\text{ V}/5\text{ V}$ CMOS 工艺,并利用 Calibre 工具的 DRC、LVS 和 PEX 工具进行设计规则检查、版图一致性检查和寄生参数提取. 电源管理器的整体版图如图 7 所示,由于 MP_1 和 MP_2 流过太电流,应将其摆放在边缘位置,远离匹配性要求高的器件,来降低温度梯度对整体电路性能的影响.

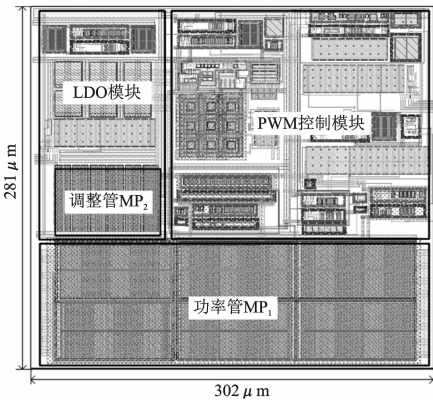


图 7 电源管理器整体版图

5 结束语

本文提出了一种给硅基 OLED 像素电路供电的电源管理单元设计方案,采用 Cuk 型 DC-DC 拓扑和 LDO 相结合的新型电路结构,同时提供正压

和负压输出,且输出电压数值上均大于电源电压.其中负压输出采用内环电流外环电压的峰值电流控制模式,电流检测电路采用并联等比管的无损检测结构,设计了斜坡补偿电路保证电流环路的稳定性,添加了软启动电路以避免电路启动时出现浪涌电流,

采用非交叠的功率管驱动电路来降低功耗.性能参数对比如表 3 所示,通过具体数据对比可以看出,本文设计的 PMU 纹波更小,最大负载电流更大,线性调整率和负载调整率也比较小.均满足实际设计的要求.

表 3 性能参数对比

设计主要参数	文献[2]	文献[3]	文献[8]	本文(前仿真)	本文(后仿真)
设计工艺	0.5 μm BiCMOS	0.16 μm CMOS	0.25 μm BCD	0.18 μm CMOS	0.18 μm CMOS
工作频率/MHz	1	1.5	1.5	2	2
输入电压/V	2.7~4.5(3.7)	2.5~4.5	2.5~4.5	3.3	3.3
V_{OP}/V	4.58	4.6	5	2~5.5	2~5.5
V_{ON}/V	-6.24	-2.4~-6.4	-7	-2~-5.5	-2~-5.5
$\text{LDR}(V_{\text{OP}})\text{mV}/\text{mA}$	0.25	—	0.24	0.02	0.04
$\text{LDR}(V_{\text{ON}})\text{mV}/\text{mA}$	1	—	0.3	0.1	0.15
$\text{LNR}(V_{\text{OP}})\text{mV}/\text{V}$	6	25	5	4	5
$\text{LNR}(V_{\text{ON}})\text{mV}/\text{V}$	18	50	15	18	20
V_{OP} 输出纹波/mV	<15	<10	<5	<4	<5
V_{ON} 输出纹波/mV	<5	<25	<11	<3	<5
最大负载电流/mA	240	250	125	350	350

参考文献:

[1] KWAK B C, KWON O K. A 2822-ppi resolution pixel circuit with high luminance uniformity for OLED microdisplays[J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(10): 1083-1088.

[2] CHAE C S, LE H P, LEE K C, et al. A single-inductor step-up DC-DC switching converter with bipolar outputs for active matrix OLED mobile display panels [J]. IEEE J Sol Sta Circ, 2009, 44(2): 509-524.

[3] 王琦,魏延存,李博,等.用于 AM-OLED 的高性能 DC-DC 变换器设计[J]. 微电子学与计算机,2014,31(4): 103-106.

[4] KIM Y, LEE S. A capacitorless LDO regulator with fast feedback technique and low-quiescent current error amplifier[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2013, 60(6): 326-330.

[5] 应建华,张俊,肖靖帆. 高频 PWM DC/DC 转换器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 197-200.

[6] HO M, LEUNG K N. Dynamic bias-current boosting technique for ultralow-power low-dropout regulator in biomedical applications [J]. IEEE Trans Circ & Syst II: Express Briefs, 2011, 58(3): 174-178.

[7] RAZAVI B. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 陈贵灿,程军,张睿智,等译. 西安: 西安交通大学出版社, 2002:284-297.

[8] CHENW C, CHIU C C, HSIEH C Y. A single-inductor bipolar-output converter with 5 mV positive voltage ripple for active matrix OLED [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, Az: IEEE, 2011: 3229-3233.

[9] CHEN K H, HUANG H W, KUO S Y. Fast transient DC-DC converter with on-chip compensated error amplifier [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2007, 54(12): 1150-1154.

[10] 陈远龙,张涛,王影,等. 降压型 DC-DC 转换器的二次斜坡补偿电路设计[J]. 微电子学与计算机,2016, 33(8):82-85.

作者简介:

蔡 俊 男,(1974-),副教授,硕士生导师. 研究方向为数模混合集成电路设计与系统集成.
E-mail: caijundoc@163.com.

宋 飞 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.

陈晓烽 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为模拟与射频集成电路设计.

冉 峰 男,(1954-),教授,博士生导师. 研究方向为新型显示技术与应用集成.