

便携式系统中高效率、高精度、 低噪声 LED 驱动电路设计研究

郭嘉帅^{1,2}, 王小力¹

(1 西安交通大学 VLSI 设计研究中心, 陕西 西安 710049; 2 上海威讯半导体公司, 上海 201203)

摘 要: 根据便携式系统应用要求, 设计了一种高效率、高精度、低噪声电荷泵 (Light Emitting Diode, LED) 驱动电路. 设计采用 1 倍 / 1.5 倍电荷泵升压方案, 驱动 4 个白光 LED. 改进的 LDO (Low Drop Out) 电流控制电路将 LED 正向电流误差控制在 3% 以内, 同时使系统最高驱动效率达到 90.16%. 电荷泵电路设计采用 8 位线性反馈移位寄存器 (Linear Feedback Shift Register, LFSR) 产生的伪随机序列作为时钟信号, 明显实现了开关噪声 29.94dB 的衰减. 设计基于主流 CMOS 工艺, 版图面积为 1.51mm × 1.14mm, 并流片. 仿真结果验证了设计的可行性. 该驱动电路易于实现便携式系统中不同模块的集成, 在实际应用中具有较大的参考价值.

关键词: LED 驱动电路; 电荷泵; LDO 电流控制电路; LFSR

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)02-0080-05

Design of High Efficiency High Accuracy and Low Noise LED Driver Used in Portable Application

GUO Jia-shuai^{1,2}, WANG Xiao-li¹

(1 VLSI Design and Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 RFMD Shanghai Design Center, Shanghai 201203, China)

Abstract: In terms of requirements in portable application, this paper presents the design of high efficiency, high accuracy and low noise LED (Light Emitting Diode) driver circuit. 1X/1.5X charge pump circuit is used to drive 4 LEDs. An improved LDO (Low Drop Out) current regulator circuit is designed to limited current error into 3% and achieves highest drive efficiency of 90.16% at the same time. Charge pump circuit design uses pseudorandom sequence generated by 8-bit LFSR (Linear Feedback Shift Register). Switching noise is suppressed for 29.94dB. This design bases on IBM cmrf7sf 5V process, layout area is 1.51mm × 1.14mm. It has been sent for tape out already. Simulation results prove the feasibility of this design. The LED driver designed is easy to be integrated with other modules in portable system and has a great value in practical application.

Key words: LED driver circuit; charge pump; LDO current regulator; LFSR

1 引言

随着 LED 技术的发展, 白光 LED 已成为便携式设备显示系统的主要背光源. 它具有寿命长、发光效率高和不产生电磁干扰等特点. 当正向电流为

20mA 时, 正向压降为 3.2V~3.4V. 由于 LED 的发光强度与正向电流成正比, 则可通过控制正向电流来控制 LED 的发光强度. 若单个 LED 不能满足亮度需求时, 可采用多个 LED 并联或串联方式, 获得较为理想的亮度. 研究表明, 恒流驱动方案可以在

LED 电学特性具有一定偏差时实现发光亮度的一致性和均匀性控制. 便携式产品的广泛应用对 LED 驱动电路设计提出了高效率、高精度和低噪声的要求,并成为设计中的重要问题而被普遍研究^[1-2]. 文中设计了一种 LED 驱动电路,仿真结果满足设计要求和产品技术性能,对于改善便携式系统应用有重要意义.

2 LED 驱动电路

便携式设备使用的锂电池在使用周期中电压范围为 2.9V~5.5V. 当电压低于 LED 正向导通电压时,需进行升压变换,保证电池使用周期内 LED 的正常发光. 升压变换器一般为 Boost 型和电荷泵型两种:Boost 型变换效率高、输出电压高、控制灵活,但使用的片外电感占用体积较大,并具有 EMI 辐射;电荷泵型变换效率高,EMI 辐射较小,占用体积小,但升压倍数固定,输出电压较低. 由于便携式设备对体积和 EMI 辐射的要求较高,因此,本文采用电荷泵升压作为系统设计方案.

电荷泵 LED 驱动电路如图 1 所示. 系统包含电荷泵,控制信号产生电路和恒流驱动电路等模块. 本文着重从效率、电流控制精度、噪声辐射等方面优化 LED 驱动电路设计.

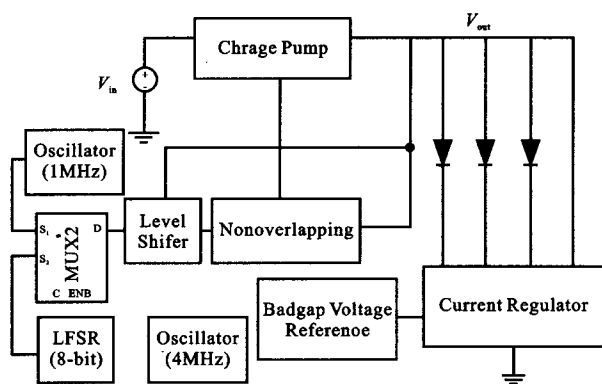


图1 电荷泵 LED 驱动电路的结构

LED 驱动电路效率定义为 LED 的消耗功率与电源输入总功率的比值:

$$\eta = \frac{P_{LED}}{P_{LED} + P_{Conversion_Loss} + P_{Current_Control_loss}} \quad (1)$$

从式(1)看出,电源能量损耗主要来自开关损耗、导通损耗和恒流驱动电路损耗. 通过优化开关频率和开关管尺寸,可以在开关损耗与导通损耗之间取得折中. 由于恒流驱动电路损耗是限制电荷泵 LED 效率提高的主要因素^[3],因此,文中重点研究

如何在提高电流控制精度的同时,减小恒流驱动电路损耗. 并使用伪随机序列作为电荷泵驱动信号,减小开关噪声,满足便携式系统应用的要求.

3 驱动电路设计

3.1 恒流驱动电路的设计

对基于电感的 boost 型升压驱动电路,实现恒流驱动的方案比较灵活,主要是通过反馈环路控制输出电压来获得恒定输出电流. 对于电荷泵型驱动电路,传统的恒流驱动电路由 MOS 管做电流源构成,并在已有产品中得到广泛应用^[4]. 其电路结构如图 2 所示.

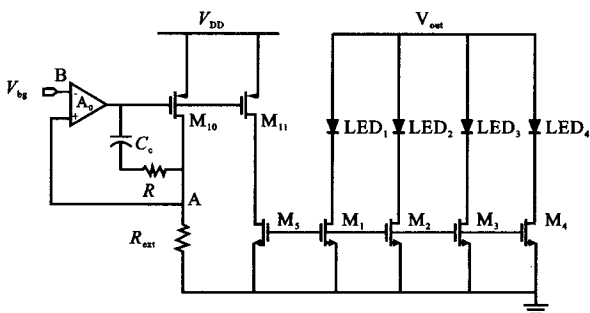


图2 传统的 LED 恒流驱动电路

该电路结构可以通过 $M_1 \sim M_5$ 版图上的对称, 实现 LED 之间电流的良好匹配. 但仿真结果表明, 当输出电压改变或 LED 电学特性偏差导致恒流源上电压降不同时, $M_1 \sim M_4$ 的沟道长度调制效应会显著影响 LED 电流的数值和匹配精度. 增加 NMOS 管沟道长度可减小沟道长度调制效应带来的误差. 但是当 LED 正向电流为 20mA 时, $M_1 \sim M_4$ 工作在饱和区, 宽长比为 $12.8\text{mm}/2\mu\text{m}$. 增加沟道长度会使设计的版图面积成倍增加.

在分析传统设计的基础上,文中根据高效率、高精度的设计要求,将一种 LDO 电流源用做 LED 电流控制电路,其结构如图 3 所示.

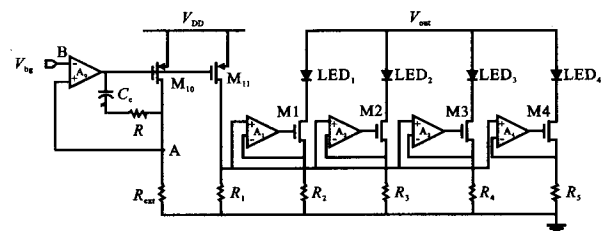


图3 LDO 电流控制电路结构

从图 3 看出, A_0 和 M_{10} 构成负反馈环路, 通过基准电压 V_{bg} 和片外电阻 R_{ext} 得到数值精确的电流 V_{bg}/R_{ext} . A_1 与 M_1 构成负反馈环路, 控制运放 A_1 的两个输入端电压相等, 因此, R_1 和 R_2 上的电压

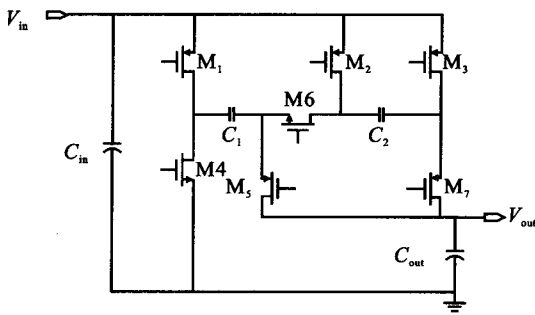


图6 1倍/1.5倍电荷泵升压电路

产生的伪随机序列.因此,文中采用伪随机序列作为电荷泵的时钟信号,可以实现开关噪声能量谱的扩展. n 位LFSR产生的伪随机序列具有如下的性质:

(1) 序列的循环周期为 $2^n - 1$,即每经过 $2^n - 1$ 个时钟周期序列将重复出现;

(2) 每一循环周期内信号翻转次数为 $2^n - 1$,序列中0和1的数目相同;

(3) 每一循环中单个0或1的脉冲个数为 2^{n-1} ,两个0或1相连的脉冲个数是 2^{n-2} ,依此类推, $n-1$ 个0或1相连的脉冲个数为1.该脉冲时间决定了电荷泵输出电压的最大纹波值.

与效率相同情况下使用固定频率方波信号驱动的电荷泵设计进行比较.结果表明,使用伪随机序列作为电荷泵驱动信号在噪声衰减方面具有明显优点.当驱动信号频率为1MHz时,用4MHz方波作为LFSR的驱动信号,可保证开关动作的频率相同.

对于LFSR位数的选择,位数越长的LFSR产生的伪随机信号循环周期越长,所达到的能量谱分散效果越好.但更长位数的LFSR会造成输出电压的纹波越大.输出电压纹波可以通过增大输出电容来减小,设计时折中考虑选取了8位LFSR.

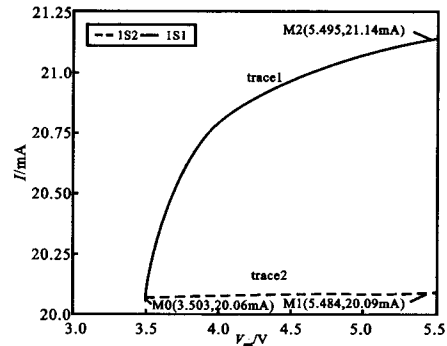
4 仿真实验

4.1 LDO电流控制电路的仿真

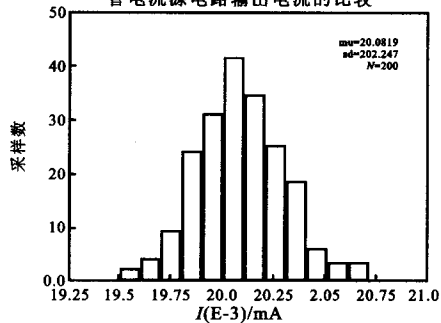
本设计基于IBM cmrf7sf 5V工艺,对LDO电流控制电路进行了仿真.结果表明NMOS管电流源器件沟道长度为 $2\mu\text{m}$ 时,输出电压变化对两种方案输出电流影响,如图7(a)所示.

从图7(a)看到,输出电压变化范围为3.5V~5.5V时,LDO电流控制电路输出电流(trace2)变化为20.06mA~20.09mA,变化范围为0.15%;NMOS管电流源的输出电流(trace1)变化为20.06mA~21.14mA,变化范围为5.4%.NMOS管电流源电路版图面积为 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$,LDO电流控制电路版图面积为 $300\mu\text{m} \times 450\mu\text{m}$.LDO电流控

制电路在保证高效率、高精度的同时,将版图面积减小了约一半.从图7(b)看到,考虑工艺偏差和器件间不匹配等因素,LDO电流控制电路的输出电流精度可达.系统输出电压为3.5V时,文中设计的LDO电流控制电路最小工作电压仅为0.2V,LED驱动电路的效率为90.16%,性能明显提高.



(a) LDO电流控制电路和NMOS管电流源电路输出电流的比较



(b) LDO电流控制电路输出电流蒙特卡罗仿真结果

图7 LDO电流控制电路和NMOS管电流源电路输出电流的比较与LDO电流控制电路输出电流蒙特卡罗仿真结果

4.2 低噪声电荷泵电路的仿真

基于IBM cmrf7sf 5V工艺,用频率为966kHz的时钟作为驱动信号,对低噪声电荷泵电路进行仿真.图6中片外电容 C_1 引脚上电压波形频谱如图8(a)所示.采用8位LFSR产生的伪随机序列驱动电荷泵,片外电容 C_1 引脚上电压波形频谱如图8(b)所示.

从图8(a)看出,在开关频率上出现6.9dB的噪声电压,3次谐波频率上出现了-2.5dB的噪声电压.使用伪随机序列作为电荷泵时钟信号,开关频率上噪声分量衰减为-17.02dB,三次谐波分量衰减为-32.44dB.电压变换效率情况下,噪声电压分别实现了23.92dB和29.94dB的衰减.

文中用Cadence Spectre对LED驱动电路性能进行了仿真,其性能指标如表1所示.

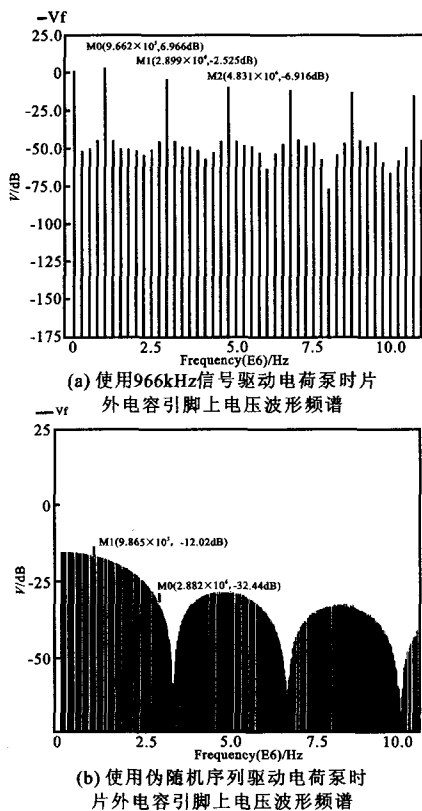


图8 电压波形频谱

表1 LED驱动电路的性能指标

设计工艺	IBM cmrf7sf 5V
输入电压	2.9V~5.5V
升压方案	1X、1.5X 电荷泵升压
变换效率	58%~90.16%
LED 正向电流	20mA×4
LED 电流精度	<3%
开关频率噪声衰减	23.92dB
3次谐波噪声衰减	29.94dB

5 结束语

文中根据便携式系统的要求,结合实际产品开发,设计了一个高效率、高精度、低噪声的LED驱动电路,输出总电流为80mA。当输入电压变化为2.9V~5.5V时,由于LDO电流控制电路的使用,使整个系统的最高效率达到90.16%,电流误差可控制在3%以内。使用LFSR产生的伪随机序列作为电荷泵驱动信号,实现了开关频率和三次谐波频率电压噪

声23.92dB和29.94dB衰减,有效减小了LED驱动电路的EMI噪声辐射。研究表明,设计电路实现了高电流控制精度、高效率 and 低噪声辐射的设计要求,满足产品技术性能,采用IBM cmrf7sf 5V工艺设计和实现了流片。该研究对于便携式系统应用具有较大的参考价值。

参考文献:

- [1] 郝冬艳, 张明, 郑伟. 低功耗VLSI芯片的设计方法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(6): 137-142.
- [2] 古海云, 许居衍, 李丽. 可重构便携式多媒体通信终端[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(12): 53-56.
- [3] Yuequan Hu, Jovanovic M M. A novel LED driver with adaptive drive voltage [C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2008. Lima, Twenty - Third Annual IEEE, 2008: 565-571.
- [4] NCP5604A Datasheet. High efficiency white LED driver [M]. USA: Phoenix, Onsemi Corporation, 2007.
- [5] Ali Tombak, Robert J Baeten, Jon D Jorgenson, et al. Integration of a cellular handset power amplifier and a DC/DC converter in a silicon-on-insulator (SOI) technology [C]// Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. RFIC 2008. USA: Atlanta, IEEE, 2008: 413-416.
- [6] Kam Keong W, Pommerenke David, Cheung-Wei Lam, et al. EMI analysis methods for synchronous buck converter EMI root cause analysis [C]// Electromagnetic Compatibility. Detroit, IEEE International Symposium. 2008: 1-7.
- [7] Worshevsky A, Worshevsky P. Effectiveness of periodical frequency shift for radio frequency emission suppression in DC/DC converter [C]// Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. Russia, IEEE 6th International Symposium, 2005: 19-21.
- [8] Rao A, McIntyre W, Un-Ku Moon, et al. Noise-shaping techniques applied to switched-capacitor voltage regulators [J]. Solid-State Circuits, 2005, 40(2): 422-429.

作者简介:

郭嘉帅 男, 硕士研究生.

王小力 男, 教授, 博士生导师. 研究方向为高性能VLSI与优化设计、集成化芯片系统设计与基础研究.