

文章编号: 2095-4980(2015)04-0659-06

一种具有新型过温保护功能的 LED 恒流驱动电路

陶 亮, 曾以成, 武世明

(湘潭大学 光电工程系, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 设计了一种具有滞回和过温缓冲保护功能的发光二极管(LED)恒流驱动电路。该电路由恒流驱动模块、滞回和过温关断模块、延时复位模块、滞回和过温缓冲模块组成; 实现了电路的双温度滞回和过温缓冲保护功能, 可对缓冲阶段所处的时域区间和温度区间进行调节。电路在过温缓冲跳变点和过温关断点附近分别有 5 °C 和 29 °C 的温度滞回区间, 避免了电路发生热振荡, 增大了电路正常工作区的范围, 可保证电路高效稳定地运行。

关键词: 恒流驱动; 温度滞回; 延时复位; 过温缓冲保护; 热振荡

中图分类号: TN432

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0659

Design of constant current driver of LED circuit with late-model over-temperature buffer protection

TAO Liang, ZENG Yicheng, WU Shiming

(Materials and Optical Physics College, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: The experiment focuses on the design of constant current driver of Light Emitting Diode (LED) circuit with hysteresis and over-temperature buffer protection, which consists of four modules a constant current driver module, an over-temperature shutdown module, a delay reset module and an over-temperature hysteresis buffer module. The design has realized the function of double temperature hysteresis and thermal buffer protection. The time-domain and temperature range are adjustable in this stage of buffer. The circuit has a temperature hysteresis interval of 5 °C and 29 °C in the thermal buffer jump points and thermal breakpoint respectively, which avoids the thermal oscillation in circuit. This design expands the span of the normal work area of the circuit, ensuring a stable and efficient operation of the circuit.

Key words: constant current driver; temperature hysteresis; delay reset; over-temperature buffer protection; thermal oscillation

随着大功率白光 LED 在灯光装饰和照明中的普遍应用, 对大功率白光 LED 驱动芯片的需求也越来越大, 而输出功率的增大使得芯片温度上升明显。研究表明, 芯片温度平均每升高 1 °C, 绝缘性场效应(Metal Oxide Semiconductor, MOS)管的驱动能力将下降约 4%, 集成电路失效率增加 1 倍^[1]。目前过温保护电路存在稳定电压高、功耗大等缺点^[2], 对此讨论焦点几乎集中在降低电路的功耗、提高温度检测精确度和电路转换速度等方面, 采取的对策典型的有: 文献[3]利用晶体管的温度特性来检测温度, 其电路功耗低, 结构简单, 对温度检测精确度高。文献[4]通过产生与绝对温度正相关电流和与绝对温度负相关的电流, 然后再利用电流比较器, 输出一个含有温度控制信息的逻辑信号, 使得电路在翻转时具有更高的转换速度。文献[5]采取利用载流子迁移率 μ 的负温度特性产生与绝对温度成正比(Proportional To Absolute Temperature, PTAT)电压, 从而降低了电路功耗。但上述方案均存在电路在达到过温点立即关断的缺点, 限制了过温保护电路的使用价值和适用范围。文献[6]提出的电流自适应 LED 驱动电路存在过温点和电流下降幅度均不能调节, 若电路持续升温, 将会导致电路失效的缺陷。

针对上述方案的不足, 本文提出的方案能实现电路的温度滞回和过温缓冲保护功能, 电路在过温条件下经缓冲阶段缓冲后可恢复正常工作状态。

功率管 M_{10} 关断时,

$$U_{\text{ptat}} = I \frac{S_7}{S_5} (R_{\text{ptat}2} + R_{\text{sense}3}) \quad (7)$$

功率管 M_{10} 导通时, $R_{\text{sense}3}$ 被短接,

$$U_{\text{ptat}} = I \frac{S_7}{S_5} R_{\text{ptat}2} \quad (8)$$

式中: S_5, S_7, S_8, S_9 分别为 M_5, M_7, M_8, M_9 的宽长比; $R_{\text{ptat}1}$ 和 $R_{\text{ptat}2}$ 为外接的温度系数极低的电阻; 外接电阻 $R_{\text{sense}3}$ 和功率管 M_{10} 用来实现温度的滞回。

取功率管 M_{10} 关断时进行分析, 对 μ 的温度表达式进行级数展开, 并进行近似得到:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-m} = \mu_0 \left[1 + \frac{m}{T_0} (T - T_0) \right]^{-1} \quad (9)$$

式中: μ_0 是常温下 ($T=T_0$) 电子迁移率; m 为温度相关因子。将式(7)和式(9)代入式(8)得到:

$$U_{\text{ptat}} = 2 \frac{(\sqrt{1/S_8} - \sqrt{1/S_9})^2}{\mu_0 C_{\text{OX}} R_{\text{ptat}1}^2} \left[1 + \frac{m}{T_0} (T - T_0) \right] \times \frac{S_7}{S_5} \times (R_{\text{ptat}2} + R_{\text{sense}3}) \quad (10)$$

同理在功率管 M_{10} 闭合时, 得到:

$$U_{\text{ptat}} = 2 \frac{(\sqrt{1/S_8} - \sqrt{1/S_9})^2}{\mu_0 C_{\text{OX}} R_{\text{ptat}1}^2} \left[1 + \frac{m}{T_0} (T - T_0) \right] \times \frac{S_7}{S_5} \times R_{\text{ptat}2} \quad (11)$$

当输出相同电压 U_{ptat} 时, 即令式(10)等于式(11)时, 得到:

$$T_1 \frac{m}{T_0} (R_{\text{ptat}2} + R_{\text{sense}3}) - T_2 \frac{m}{T_0} R_{\text{ptat}2} = (m-1) R_{\text{sense}3} \quad (12)$$

式中 $\frac{m}{T_0}$ 是正的与温度无关的因子, 因此 U_{ptat} 是与绝对温度成正比的 PTAT 电压, 并且可以通过调整 $R_{\text{ptat}1}$ 或者 $R_{\text{ptat}2}$

来调整 U_{ptat} 的大小, 进而设定电路的关断温度, 通过改变功率管 M_{10} 开关状态, 实现温度的滞回, 通过改变 $R_{\text{sense}3}$ 的大小, 可以改变过温关断点附近的温度滞回区间; 同理, 通过改变 $R_{\text{sense}4}$ 的大小, 可以改变过温缓冲跳变点附近的温度滞回区间; 通过调节关断点和缓冲跳变点的温度值来调节缓冲阶段所处的温度范围。

1.3 滞回和过温缓冲模块

本模块利用 PTAT 电压产生电路、比较器、反相器、功率 MOS 管来实现。在正向第一个温度控制点时, U_m 由高电平变为低电平, 功率管 M_3 关断, I_{sense} 减小,

$$I_{\text{LED}} = K I_{\text{sense}} = K \frac{3.28 - 1.54}{R_{\text{sense}1} + R_{\text{sense}2}} = K \frac{1.74}{R_{\text{sense}1} + R_{\text{sense}2}} \quad (13)$$

当温度超过驱动电路的一个温度控制点 117°C 时:

1) 取样电阻阻值由 $R_{\text{sense}1}$ 变为 $R_{\text{sense}1} + R_{\text{sense}2}$, 且取样电阻两端的电压降恒定, 由式(1)得到:

$$P_1 = \frac{\Delta U^2}{R_{\text{sense}1} + R_{\text{sense}2}} - \frac{\Delta U^2}{R_{\text{sense}1}} \quad (14)$$

式中: P_1 为取样电阻增大时节省的功耗; ΔU 为取样电阻两端的恒定的电压降。

2) 驱动电流 I_{LED} 不是立即变为零, 而是减小到设定值, 因此系统的功耗在 LED 负载部分减少了:

$$P_2 = M (I_{\text{LED}0}^2 - I_{\text{LED}1}^2) R_0 \quad (15)$$

式中: P_2 为电路节省的功耗; M 为 LED 灯阵列的串数; $I_{\text{LED}0}$ 为 LED 限流前的电流; $I_{\text{LED}1}$ 为适当限流后的电流, R_0 为采样电阻。

整体电路在过温缓冲阶段节省的功耗为:

$$P = P_1 + P_2 \quad (16)$$

由式(14)、式(15)、式(16)可知, 电路达到设定的第一个温度控制点后, 功耗会明显下降, 利于电路快速散热,

促使电路恢复正常工作。

1.4 延时复位模块

如图3所示,当电路正常工作时,延时复位电路中输入 U_x 为高电平,则输出 U_m 为高电平,开关管 M_3 的栅压维持在高电平, M_3 导通,电路正常工作;当电路进入缓冲区时,输入 U_x 为低电平, U_a 为高电平,在延时时间内 U_b 为低电平, U_c 为低电平, U_m 为低电平,开关管 M_3 的栅压维持在低电平, M_3 关断,电路工作在缓冲区;经过设定延时时间后, U_x 仍为低电平, U_a 经过延时后得到的 U_b 变为高电平,导致 U_c 变为高电平,从而 U_m 为高电平,开关管 M_3 的栅压维持在高电平, M_3 导通,电路恢复正常工作,则电路在设定延迟时间内处于过温缓冲阶段,具体见图7,这样就实现了电路的延时复位功能。

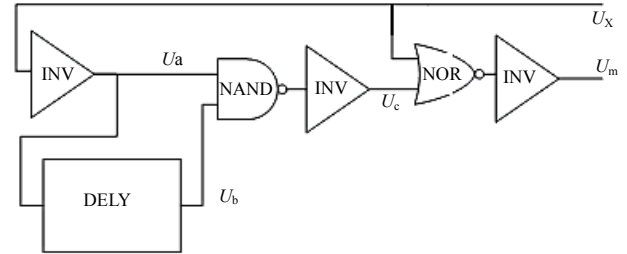


Fig.3 A delay reset circuit
图3 延时复位电路

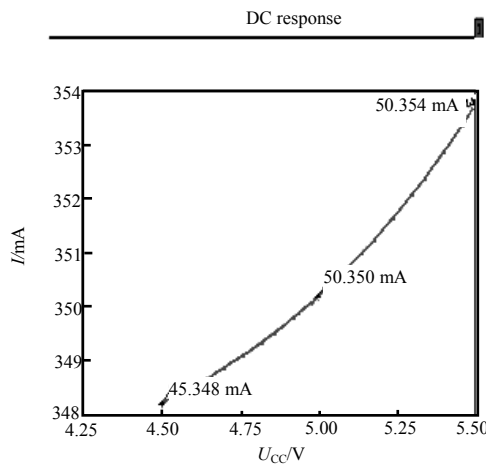


Fig.4 Diagram of drive current change with LED
图4 驱动电流随LED电源电压变化曲线

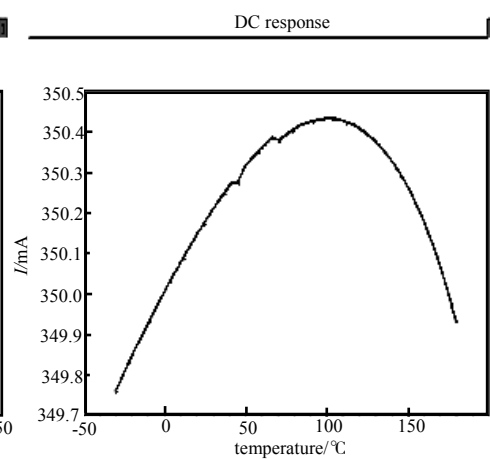


Fig.5 Diagram of drive current change with the temperature
图5 驱动电流随温度变化曲线

2 仿真测试结果

整体电路通过 CSMC 0.5 μm BiCMOS 工艺、Cadence spectre 仿真。设置 R_{sense1} 为 3.35 k Ω , V_{DD} 为 5 V, 令 5 V 的 LED 电源电压 U_{CC} 产生 $\pm 10\%$ 的波动, 此时恒流输出情况如图4所示。驱动电流由 348 mA 变化到 354 mA, 波动百分比仅为 1.71%。设置 R_{sense1} 为 3.35 k Ω , R_{sense2} 为 0, V_{DD} 为 5 V, U_{CC} 为 5 V, 对输出电流在 $-30^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$ 温度范围内进行仿真, 此时恒流输出情况如图5所示。驱动电流由 349.76 mA 变化到 350.43 mA, 波动百分比仅为 0.2%。

过温缓冲模块与过温关断模块测试如下, 取 $R_{\text{sense2}}=1 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{ptat1}}=6.5 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{ptat2}}=65 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{ptat3}}=6.25 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{ptat4}}=50 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{sense3}}=10 \text{ k}\Omega$ 。对整体电路输出的驱动电流在 $-30^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$ 和 $180^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$ 仿真温度范围内进行仿真得到驱动电流的输出特性如图6所示, 可以看出电流在 117°C 范围内恒定为 350 mA, 在 $117^\circ\text{C} \sim 138^\circ\text{C}$ 范围内恒定地维持在 240 mA, 当温度反方向下降到 112°C 时, 缓冲阶段结束, 电路恢复正常工作; 超过 138°C , 电流跳变为零, 过温关断功能实现。在反向降温至 109°C 时, 电路恢复正常工作。同时可以看出, 整体电路的过温关断点附近的温度滞回区间为

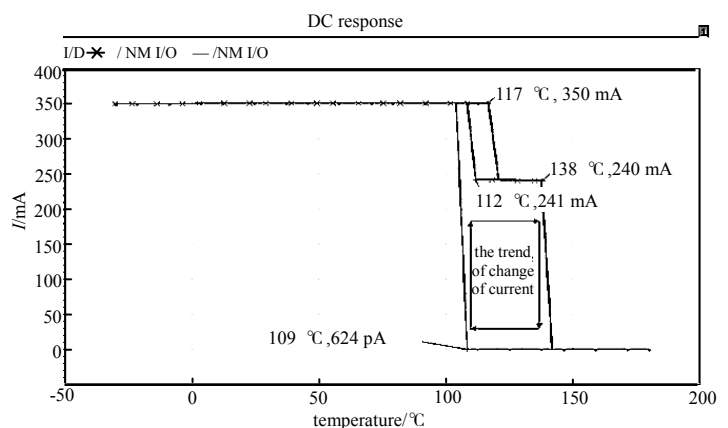


Fig.6 Diagram of drive current change with the positive and negative changes of the temperature
图6 整体电路的驱动电流随温度正向和负向变化的输出特性曲线

29 ℃, 过温缓冲的温度滞回区间为5 ℃, 过温缓冲阶段所处的温度范围为18 ℃。

设定延时电路的延迟时间为1 s, 对电路在130 ℃条件下进行瞬态仿真, 在此温度条件下电路处于缓冲阶段。由图7可知, 经过1 s的延时后, M_3 的栅压被拉高, 开关管导通, 驱动电流由缓冲阶段的240 mA跳变为正常工作时的350 mA。缓冲阶段结束, 电路恢复正常工作。上述结果说明, 设计的延时复位电路能达到预期效果。

参数选取同前例, 外接电阻 $R_{sense4}=2.6\text{ k}\Omega$, R_{sense2} 分别为1 kΩ, 5 kΩ, 9 kΩ时, 对整体电路输出的驱动电流在-30 ℃~180 ℃温度范围内进行仿真得到驱动电流的输出特性, 如图8所示, 可以看出随着 R_{sense2} 的增大, 电路输出的驱动电流不断减小, 由此可调节过温缓冲阶段驱动电流的大小。

外接电阻 $R_{sense4}=2.6\text{ k}\Omega$, R_{ptat4} 在48 kΩ~58 kΩ区间内进行扫描, 同时对整体电路输出的驱动电流在-30 ℃~180 ℃温度范围内进行仿真得到驱动电流的输出特性如图9, 可以看出随着 R_{ptat4} 的增大, 电路输出的驱动电流发生跳变的拐点温度不断减小, 则电路的温度缓冲区间不断增大。

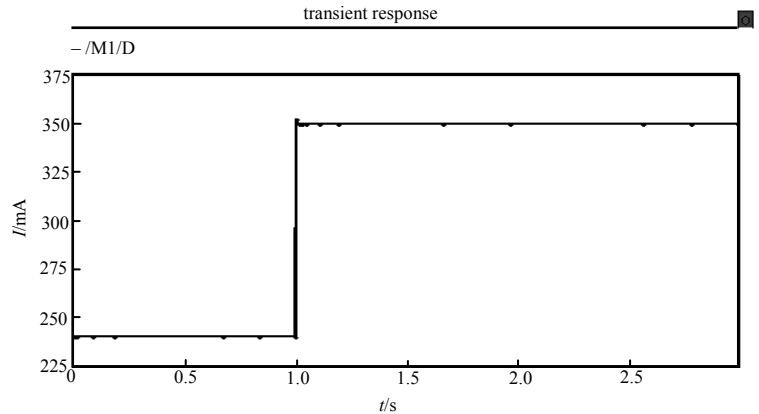


Fig.7 Transient response of the drive current at 130 ℃
图7 在130 ℃温度条件下电路驱动电流的瞬态响应

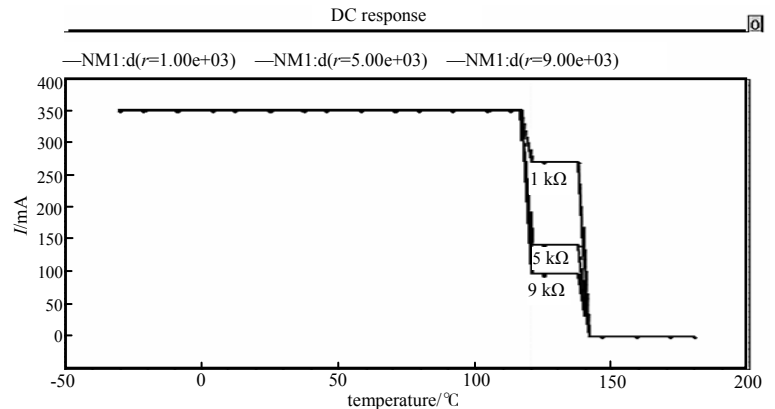


Fig.8 Diagram of drive current change with the R_{sense2}
图8 外接电阻 R_{sense2} 变化时恒流输出特性曲线

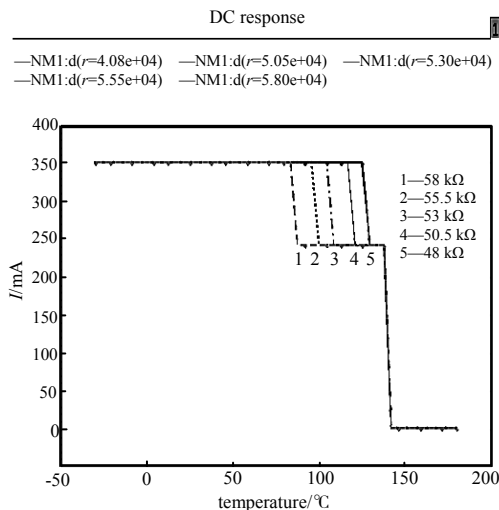


Fig.9 Diagram of drive current change with the R_{ptat4}
图9 外接电阻 R_{ptat4} 变化时恒流输出特性曲线

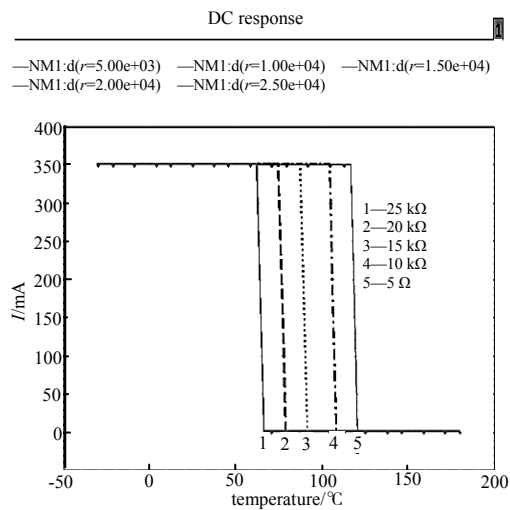


Fig.10 Diagram of drive current change with the R_{ptat3}
图10 外接电阻 R_{ptat3} 变化时恒流输出特性曲线

当对外接电阻 R_{sense3} 在5 kΩ~25 kΩ范围内进行扫描, 同时对整体电路输出的驱动电流在180 ℃~30 ℃温度范围内进行仿真得到驱动电流的输出特性如图10, 可以看出随着 R_{sense3} 的增大, 电路输出的驱动电流发生截止的拐点温度不断减小, 则电路降温时的导通温度不断减小, 可以达到调节过温关断点温度滞回区间的目的, 同样调节 R_{sense4} 可以调节电路在过温缓冲跳变点的温度滞回区间的范围。

3 结论

本驱动电路与传统的LED驱动电路相比,其优势在于:a)电路在达到设定温度控制点时,驱动电流不是立刻变为0,而是降至设定的恒定驱动电流,使电路功耗下降,利于电路散热,促使电路恢复正常工作,并且驱动电流下降幅度可由外接电阻进行调节,避免LED灯具因过热产生大的光衰而导致早期失效,延长了LED的使用寿命;b)对电路所处的缓冲阶段可实现时域和温度区间的调节,使得电路应用更富有灵活性,提升了电路的工作区间和应用范围;c)设计了双温度滞回区间,温度滞回区间的大小可通过外接电阻进行调节,避免了电路发生热振荡。

参考文献:

- [1] YAN Lianghai, WU Jin, PANG Jian, et al. Analysis and design of over-current and temperature protect for LDO circuit[J]. Chinese Journal of Electron Device, 2006, 29(1): 127-129.
- [2] 张岱, 朱江. 一种新型过热保护电路的设计[J]. 辽宁大学学报, 2011, 38(1): 16-18. (ZHANG Dai, ZHU Jiang. A design of thermal-shutdown circuit[J]. Journal of Liaoning University, 2011, 38(1): 16-18.)
- [3] 卢一鑫, 李院院. 两种低功耗新型过温保护电路的设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(18): 159-161. (LU Yixin, LI Yuanyuan. Design of two novel low power over temperature protection circuits[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(18): 159-161.)
- [4] 蔡小祥, 张雨河, 王会影, 等. 一种基于电流比较的新型过温保护电路[J]. 微电子学, 2012, 42(1): 58-62. (CAI Xiaoxiang, ZHANG Yuhe, WANG Huiying, et al. A novel thermal protection circuit based on current comparison[J]. Microelectronics, 2012, 42(1): 58-62.)
- [5] 李祥, 曾以成, 石合地. 带过温保护功能的LED恒流驱动电路设计[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(2): 108-111. (LI Xiang, ZENG Yicheng, SHI Hedi. Design of constant current LED driver circuit with thermal-shutdown function[J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18(2): 108-111.)
- [6] 石合地, 曾以成, 李祥. 电流自适应高寿命低功耗LED驱动器[J]. 固体电子学研究与进展, 2013, 33(4): 389-393. (SHI Hedi, ZENG Yicheng, LI Xiang. An adaptive current LED drive with long life and low-power[J]. Research & Progress of SSE Solid State Electronics, 2013, 33(4): 389-393.)
- [7] 王永顺, 史琳, 王好德. 一种输出可调CMOS带隙基准电压源的设计[J]. 半导体技术, 2010, 35(7): 736-739. (WANG Yongshun, SHI Lin, WANG Haode. CMOS bandgap reference design with adjustable output[J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(7): 736-739.)
- [8] 张啸诚, 邢建力. 一种高电源抑制比和高精度带隙电压源设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(3): 359-362. (ZHANG Xiaocheng, XING Jianli. A BiCMOS-based bandgap reference circuit with high PSRR and precision[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Engineering Technology, 2012, 10(3): 359-362.)
- [9] EDWARD KFL. A low voltage CMOS bandgap reference without using an opamp[J]. IEEE Custom Integrated Circuits, 2009, 13(1): 501-504.
- [10] 凌朝东, 梁爱梅, 刘一平. 恒流LDO型串联大功率白光LED驱动器的设计[J]. 微电子学, 2009, 39(5): 657-661. (LING Chaodong, LIANG Aimei, LIU Yiping. Design of constant current LDO driver for power white LED[J]. Microelectronics, 2009, 39(5): 657-661.)
- [11] 张赛, 李冬梅. 一种高效率白光LED驱动器的设计[J]. 微电子学, 2007, 37(3): 428-431. (ZHANG Sai, LI Dongmei. Design of High-efficiency white-LED driver[J]. Microelectronics, 2007, 37(3): 428-431.)
- [12] SHI weitao, JIANG Guoping. Design of a high stability low power consumption CMOS thermal-shutdown circuit[J]. Chinese Journal of Electron Device, 2006, 29(2): 330-334.
- [13] 张慕辉, 刘诗斌, 冯勇. 具有滞回功能的过温保护电路[J]. 仪表技术与传感器, 2009, 2(2): 94-95. (ZHANG Muhui, LIU Shibin, FENG Yong. Over temperature protect circuit with hysteresis[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009, 2(2): 94-95.)

作者简介:



陶 亮(1988-), 男, 山东省日照市人, 硕士, 主要研究方向为LED驱动电路与设计。
email: tl8096@126.com.

曾以成(1962-), 男, 湖南省涟源市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、LED驱动电路与设计。

武世明(1987-), 男, 山西省大同市人, 硕士, 主要研究方向为LED驱动电路与设计。