

文章编号: 2095-4980(2016)03-0461-06

晶圆级 LED 驱动电路系统

徐 飞^{1,2}, 蔡 勇¹, 时广轶², 张亦斌^{1,3}, 徐建伟^{1,4}

(1.中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123; 2.北京大学 软件与微电子学院, 江苏 无锡 214122;
3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.中国科学技术大学, 江苏 苏州 230026)

摘 要: 发光二极管(LED)是恒流工作的器件, 并且随着 LED 功率的不断增大, 散热问题变得越来越突出, 温度控制十分必要。当 LED 功率比较小时, 可以用温度传感器来检测它的温度; 而当 LED 做到晶圆级发光二极管(WLED), 功率达到千瓦, 传统的驱动方式、散热方式以及温度的控制已不再适用。晶圆级发光二极管有多条支路, 采用多路恒流以保证每条支路的电流相同。对于温度的控制, 将晶圆级发光二极管平均结温变化量的测量转换为对冷却液温度的变化量的测量, 进而通过与冷却液温度变化量的关系进行控制。本设计解决了晶圆级发光二极管因工艺问题导致的“抢电流”的问题, 并将复杂的温度控制变得简单化, 而且节省成本。

关键词: 晶圆级发光二极管; 多路恒流; 温度控制

中图分类号: TN91.3; TP301.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201603.0461

Wafer level LED drive circuit system

XU Fei^{1,2}, CAI Yong¹, SHI Guangyi², ZHANG Yibin^{1,3}, XU Jianwei^{1,4}

(1.Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou Jiangsu 215123, China; 2.School of Software and Microelectronics at Wuxi, Peking University, Wuxi Jiangsu 214122, China; 3.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.University of Science and Technology of China, Suzhou Jiangsu 230026, China)

Abstract: Light Emitting Diode(LED) is a constant current device. With the increase of power of LED, heat dissipation issues become increasingly prominent, and the temperature control is necessary. When the power of LED is relatively small, the temperature sensor can be used to detect its temperature; but the power of wafer level LED reaches kilowatts, the traditional methods of drive, heat dissipation and temperature control are no longer applicable. The Wafer level LED has multiple branches, therefore multi-channel constant current is adopted to guarantee the same current of each branch. For temperature control, the wafer level LED average junction temperature measurement of the change is converted to a measurement of the coolant temperature change. The temperature is further controlled by the relationship with the coolant temperature change. This design solves the problem of “current concentration” caused by the manufacturing issues of wafer level LED, simplifies the sophisticated temperature control, and cuts the cost as well.

Key words: Wafer level LED; multi-channel constant current; temperature control

LED 作为新一代半导体固态照明光源, 已被广泛地应用于显示器、电视机、彩光装饰和照明, LED 必将取代普通灯泡成为通用照明和特殊照明的主流器件^[1]。据统计, 目前 LED 白光照明灯具出现的失效故障, 70%左右是电源问题^[2], 所以 LED 驱动电路的功能及性能直接决定着 LED 的性能和寿命。

随着 LED 的应用范围日益扩大, 特别是近年来高功率超高亮度 LED 的问世, 大大拓展了 LED 的应用领域, 高光效 LED 市场正由显示领域向照明领域扩展。目前 LED 的发光率仅能达到 10%~30%, 也就是说还有 70%~90% 的热量转换成了热能^[3], 高性能 LED 光学性能和可靠性的提高, 都依赖于芯片的结温。如何监控结温, 尤其是实时的结温监控, 成为可能制约 LED 应用而又急待解决的问题^[4]。晶圆级 LED, 是将整个晶圆作为一个器件, 有 10 条支路, 每条支路含有 65 个小 LED 单元。这是一种新型的 LED 器件结构, 省去了划片封装^[5]的工作。它的总功率>1 000 W, 光功率>150 W, 具有很高的光强, 但是也能看出热耗散功率同样很高, 传统的驱动方式^[6-10]、

散热方式^[11]以及温度的控制已不再适用。晶圆级 LED 采用的是水冷方式散热,导热液体和晶圆级 LED 背面直接接触。本文提出了多路恒流^[12]以及温度控制的设计。

1 系统组成及工作原理

1.1 恒流设计

从晶圆级 LED 的拓扑结构(见图 1),可以看出其有 10 条支路,有别于其他串并联形式的 LED^[13-15],晶圆级 LED(实物图见图 2)由于工艺过程中很难保证完全的均匀一致性,这些支路的 LED 正向压降会出现一定的差异,因此在驱动晶圆级 LED 时会使各路电流不均匀,在电流大的支路结温上升较电流小的支路快,这使得大电流支路的正向压降 U_f 降低得较快,在供电电压不变的情况下大电流支路的电流将会变大,形成一个正反馈,使大电流支路的电流越来越大,小电流支路的电流越来越小。为了解决这种“抢电流”而造成的发光不均匀的情况,本文做了如图 3 所示的设计,对 10 条晶圆级 LED 支路分别做恒流设计,并且配合设计一个键盘控制对电流进行手动调节。

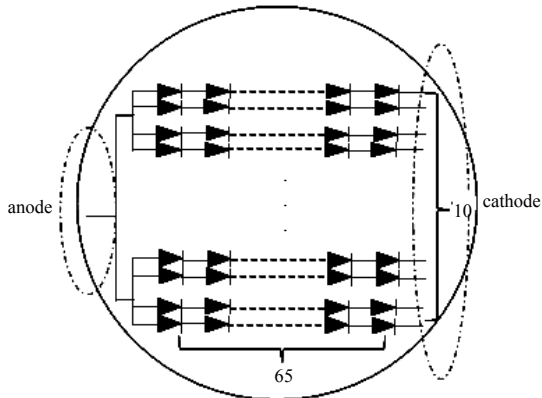


Fig.1 Topological schematic diagram of Wafer-Level LED
图 1 晶圆级 LED 拓扑结构

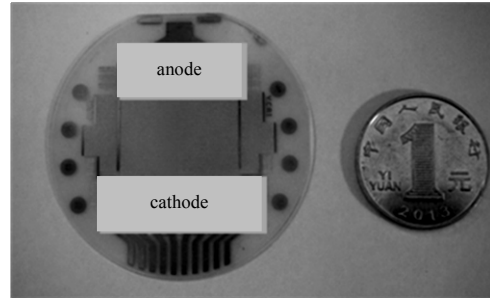


Fig.2 Physical of Wafer-Level LED
图 2 晶圆级 LED 实物图

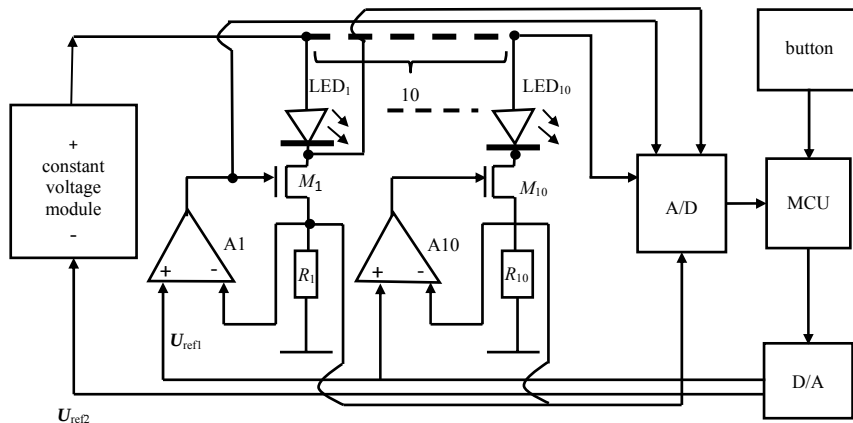


Fig.3 Block diagram of the system
图 3 系统结构框图

系统以 STM32F103RC 为控制核心,稳压模块提供工作所需要的电压,A/D 采集取样电阻 $R_1 \sim R_{10}$ 的电压,经过比例-积分-微分(Proportion-Integral-Derivative, PID)算法的处理,动态调整 D/A 输出电压从而保证恒流。

恒流工作原理:保证 MOS 管工作在饱和区,因为只有工作到饱和区时,电流才不会受到漏极电压的影响,关系式如式(1)所示。

$$U_{DD} - U_{LED} \geq U_{GS} - U_{th} \quad (1)$$

MOS 管工作在饱和区时的工作,电流为:

$$I = \beta (U_{GS} - U_{th})^2 \quad (2)$$

$$U_{GS} = U_G - U_S \quad (3)$$

$$U_G = A(U_{\text{ref1}} - I_{\text{last}} \times R) \quad (4)$$

$$U_S = I \times R_n \quad (5)$$

综上所述:

$$I = \beta \left(A(U_{\text{ref1}} - I_{\text{last}} \times R_n) - I_{\text{last}} \times R_n - U_{\text{th}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: A 为运放的放大系数; U_{ref1} 为 DA 的输出电压; I_{last} 为上一次的电流值; R_n 为 MOS 管源极采样电阻, n 为支路序列号, $n=1,2,3\cdots$ 。

当电流增大时, U_S 增加, 经过负反馈后的输出电压减小, 即 U_G 减小, 电流减小; 当电流减小时, U_S 减小, 经过负反馈后的输出电压增加, 即 U_G 增加, 电流增大。这样就构成了一个闭环控制, 起到恒流的效果。晶圆级 LED 各支路的电流值为:

$$I = \frac{U_{\text{ref1}}}{R_n} \quad (7)$$

式中单路电流调节范围为 0~0.3 A, 整个器件电流范围为 0~3 A。

由于 LED 的热效应的影响, LED 的 U_f 会发生变化, 相对的工作电流也会发生变化, 所以要对工作电流进行动态调整。PID^[16]是自动化控制中应用最广泛的控制方式。在本设计中, 采用增量式 PID^[6]控制对采样电压的偏差值进行处理, 从而控制 U_{ref1} 的输出。PID 的控制原理图如图 4 所示, 图中 c 是实际值; r 是给定值; $e=r-c$, 为偏差值。

公式如下:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (8)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (9)$$

式中: $e(k)$ 为第 k 次采样时的偏差值; $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时的偏差值; $e(k-2)$ 为第 $k-2$ 次采样时的偏差值; k 为采样序号, $k=0,1,2\cdots$; $\Delta u(k)$ 为输出控制信号的增量; $u(k)$ 为输出控制信号; $u(k-1)$ 为上一次的输出控制信号; K_p 为比例项, 主要用来减少偏差; K_i 为积分项, 主要用于消除静差, 提高系统的无差度; K_D 为微分项, 主要用来加快系统的修正速度, 缩短调节时间。经过试验得到 $K_p=0.2, K_i=0.015, K_D=0$ 。

同时要实现自适应的效果, 即在调节电流大小时, 控制稳压模块提供的电压随之增大或者减小。稳压电源提供的电压由 3 部分组成: 10 条支路 LED 正向压降最大值, N 型金属-氧化物-半导体(N-Metal-Oxide-Semiconductor)以及取样电阻。为了保证恒流电路正常工作, NMOS 需工作在饱和区, 即 $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{TH}$, 所以 MOS 管漏极电压可以设定为 $U_{DS} - U_{TH}$; 由于每一路 LED 的正向压降 U_f 不相同, 比较选出最大的 U_f 来保证所有支路的 LED 都能够正常工作。这样能够保证整个系统效率最高。稳压电源提供的电压:

$$U = U_{GS} - U_{TH} + U_{f,\max} + U_R \quad (10)$$

$$U = U_G - U_{TH} + U_{f,\max} \quad (11)$$

1.2 温度控制

晶圆级 LED 功率大, 在使用中很可能结温超过安全范围, 需要对这种器件的结温进行控制。直接测量晶圆级 LED 的结温比较复杂, 很难集成在驱动电源中, 因此, 本设计中采用了间接测温再进行控制的方法, 即: 通过对 LED 支路的导通电压进行测试, 当导通电压低于某个阈值时, 降低 LED 支路的电流, 降低功耗, 起到控制结温的作用, 无须关注 LED 实时的结温。这一控制方法中, 如何确定导通

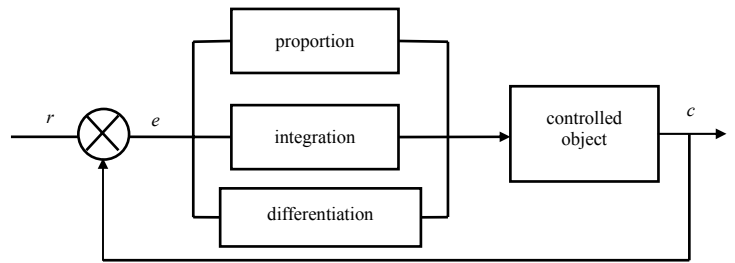


Fig.4 Principle diagram of the PID control
图 4 PID 控制原理图

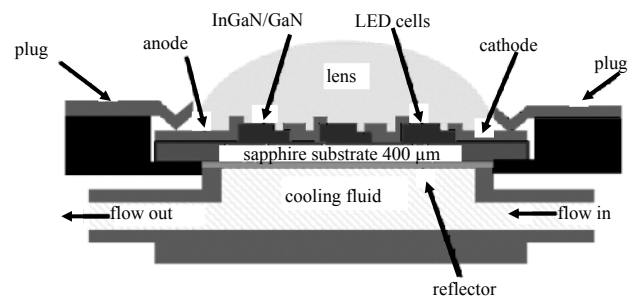


Fig.5 Water cooling system of Wafer-Level LED
图 5 晶圆级 LED 水冷散热系统

电压的阈值是其中的关键，本文设计了新的测试方法来确定导通电压与晶圆级 LED 平均结温的关系，进而确定导通电压的阈值。

如图 5 所示，在水温达到动态平衡的情况下，忽略对流系数和导热系数对温度的影响，冷却液升高的温度可以看作 LED 升高的平均结温。根据 LED 在电流 I_f 为常量时，LED 的 P-N 结上的正向电压 U_f 具有负温度系数特性，即随着 P-N 结温上升， U_f 成线性下降关系，可以推测冷却液的温度变化量和 LED 的正向压降的变化量也存在线性关系。可以利用此特性，只需测试得到冷却液温度变化量和 LED 的正向压降的变化量的线性系数 k ，就能通过控制 LED 正向压降的变化量来控制 LED 的结温。

晶圆级 LED 的正向压降在选定时段内的变化值，即：

$$\Delta U_f = U_{LED_now} - U_{LED}$$

(12)

式中： U_{LED_now} 为选定时刻 LED 器件的工作电压； U_{LED} 为 LED 器件的初始工作电压。再依据式(13)

$$\Delta U_f = \Delta T \times k$$

(13)

获得冷却液温度变化量，亦即获得晶圆级 LED 的平均结温变化量。

将温度变化量控制在 $T_1 \sim T_2$ 的范围内，即将范围控制在 $kT_1 \sim kT_2$ 。若晶圆级 LED 超过限定值 kT_1 ，则通过 MCU 减小 LED 工作功率；当降低到设定值 kT_2 以下，则恢复到之前的工作状态。这样将温度测试系统结合到驱动电路中，只需求得当前的正向压降的增量，就能够得到此时的温度从而进行控制。

2 软件设计

系统主流程图如图 6 所示，主要功能为实现多路恒流、调压以及温度监控的功能。在系统开始工作以后，整个系统需要完成初始化，其中包括中断的初始化、延迟函数的初始化、串口的初始化、键盘的初始化、A/D 的初始化、D/A 的初始化。整个初始化过程中，最重要的是要采集晶圆级 LED 初始电压，即晶圆级 LED 刚开始工作时，温度对其没有影响时的电压值。当按下启动键时，系统从待机状态开始工作，进行上述的初始化工作，然后通过微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)控制 D/A 输出电压，控制稳压模块的输出以及控制电流的大小，给晶圆级 LED 加电，通过 A/D 采集其初始电压。之后判断是否有调整按键按下，如果有则进行电流电压的调整，再进行 PID 调整电流以及 MCU 调整总电压；如果没有调整键按下，则直接进行 PID 调整电流以及 MCU 调整总电压。

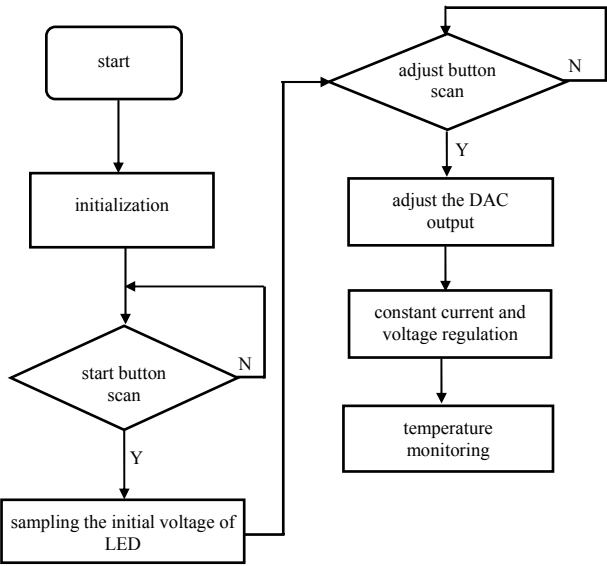


Fig.6 System flow chart
图 6 系统流程图

3 实验结果与分析

3.1 恒流测试

表 1 为晶圆级 LED10 条支路实际电流与设定电流数据对比，取 50 mA~300 mA 中 6 个点， $I_1 \sim I_{10}$ 分别为 1~10 路对应的电流大小；表 2 为晶圆级 LED10 条支路在不同电流下实际电流值与设定值之间的最大偏差。

表 1 实际电流与设定电流数据对比
Table1 Actual current and set current

set current/mA	I_1 /mA	I_2 /mA	I_3 /mA	I_4 /mA	I_5 /mA	I_6 /mA	I_7 /mA	I_8 /mA	I_9 /mA	I_{10} /mA	standard deviation/%
50	50.9	49.3	51.0	51.1	51.5	50.4	51.0	49.7	50.0	50.1	1.40
100	100.1	100.1	100.9	101.3	100.7	99.7	100.3	101.1	100.1	100.5	0.50
150	150.7	150.7	150.1	149.8	151.1	150.6	150.9	150.6	150.1	150.4	0.20
200	200.6	201.3	200.9	200.6	200.9	200.1	201.3	201.3	200.1	199.8	0.30
250	249.9	250.6	249.8	250.2	250.9	250.2	249.7	250.5	250.5	250.5	0.15
300	300.0	301.1	300.5	300.1	300.1	299.9	299.8	300.3	300.3	300.5	0.13

通过表 1 和表 2 可发现,实际电流值与设定值相比较,最大偏差为 3%,并且随着设定值的增加,最大偏差逐渐降低,当电流设定在 300 mA 时,最大偏差降低到 0.17%以下,实现了较好的恒流。并且从表 1 的标准差看出,支路之间的电流标准差最大为 1.4%,离散性较小,并且随着设定值的增加,标准差逐渐变小,证明了本设计较好地解决了支路之间“抢电流”的问题。

表 2 不同电流下的最大偏差

Table2 Maximum deviation of the different currents

set current/mA	deviation/%
50	3.000
100	1.300
150	0.600
200	0.650
250	0.240
300	0.167

表 3 不同电流值下 MOS 管栅极电压

Table3 Gate voltage of MOSFET at different current values

I/mA	U_G/V
50	2.375
100	2.724
150	2.975
200	3.275
250	3.525
300	3.863

3.2 温度测试

测试条件:晶圆级 LED 工作电流为 0.3 A,初始水温 29.3 ℃,初始 U_f 为 211.531 V,观察水温的变化以及 LED 正向压降的变化(说明:该实验只测量了其中一路)。在水温达到动态平衡的情况下,忽略对流系数和导热系数对温度的影响,冷却液上升的温度可以看作 LED 升高的平均结温。

从图 7 可以看出,温度变化量、LED 正向压降变化量成线性关系,并且得到比例系数 $k=-0.165\ 2$ 。如将温度变化量限制在 10 ℃~50 ℃ 的范围内,只要监控变化量的范围在 1.65 V~8.26 V,一旦超过这个范围,则降低晶圆级 LED 工作时的功率。

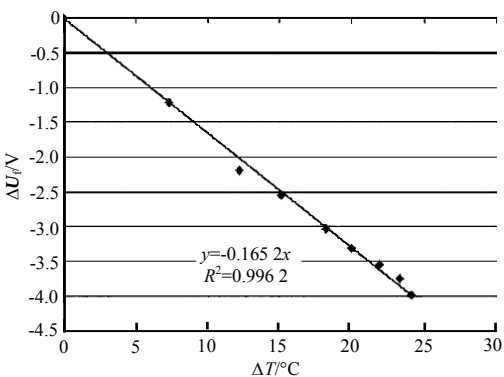


Fig.7 ΔU_f and ΔT
图 7 ΔU_f 与 ΔT 关系图

3.3 自适应测试

经过测试,得到 MOS 管栅极电压,即运放输出端电压,所用 MOS 管阈值电压为 1 V,以及得到每一条 LED 的电压,如表 3、表 4 所示。

表 4 不同电流值下 10 路 LED 电压

Table4 Ten different branches of the LED voltage at different current values

I/mA	U_{LED}/V									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
50	190.696	192.414	190.961	188.170	186.855	185.132	181.359	184.710	185.025	188.402
100	204.641	205.141	203.776	200.765	200.620	200.537	198.736	199.857	207.355	203.614
150	214.752	215.150	213.698	210.771	210.880	210.650	210.385	209.946	210.350	211.621
200	222.678	222.805	221.631	219.302	219.195	218.919	219.038	218.465	218.350	220.645
250	230.752	231.460	229.418	226.638	225.747	226.472	226.811	225.564	225.187	227.808
300	236.315	234.620	235.863	233.156	232.429	232.534	233.727	232.273	231.411	233.521

由此可以得到稳压模块在不同电流下应该提供的电压 U_{DD} ,如表 5 所示。

表 5 不同电流值下所需总电压

Table5 Total voltage required for different current values

I/mA	U_{DD}/V
50	193.789
100	206.841
150	217.125
200	225.080
250	233.985
300	239.115

4 结论

本设计解决了晶圆级 LED 因工艺上的缺陷导致的支路之间抢电流的问题,使其能够在各个电流值下各个 LED 支路电流相同。将晶圆级 LED 平均结温变化量的测量转换为对冷却液温度的变化量的测量,进而通过 LED 正向压降变化量与冷却液温度变化量的关系进行控制。不外加温度传感芯片,节省成本。

参考文献:

[1] 李磊. LED 照明电源的研究与设计[D]. 南京:南京理工大学,2013. (LI Lei. Research and design of LED lighting power[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2013.)

[2] 半导体照明产业发展须关注一个重点[J]. 电源世界, 2009(10):8. (Semiconductor lighting industry to be a focus of attention[J].

- The World of Power Supply, 2009(10):8.)
- [3] 余彬海,王轰浩. 结温与热阻制约大功率LED发展[J]. 发光学报, 2005,26(6):761-763. (YU Binhai,WANG Honghao. Junction temperature and thermal resistance constraints high-power LED development[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2005,26(6):761-763.)
- [4] 温怀疆. LED结温测试方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010. (WEN Huaijiang. The test method of LED junction temperature research[D]. Hangzhou,China:Zhejiang University, 2010.)
- [5] 吴运铨. 大功率LED封装工艺技术[J]. 湖南农机, 2013,40:61-62. (WU Yunquan. Highpower LED packaging technology[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2013,40:61-62.)
- [6] LI Yancun,CHEN Chernlin. A novel single-stage high-power-factor AC-to-DC LED driving circuit with leakage inductance energy recycling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012,59(2):793-802.
- [7] 钟龙平,马智杰,徐欣歌,等. 一种线性恒流的LED驱动电路设计[J]. 电子设计工程, 2011,19(2):116-118. (ZHONG Longping,MA Zhijie,XU Xinge,et al. A liner constant current LED driver circuit[J]. Electronic Design Engineering, 2011,19(2):116-118.)
- [8] 单英艳. 高亮LED驱动电路的设计研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009. (SHAN Yingyan. HL-LED driver circuit design research[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2009.)
- [9] LEUNG Wingyan,MAN Tszyn,CHAN Mansun. A high-power-LED driver with power-efficient LED current sensing circuit[C]// 2008. ESSCIRC 2008 34th European. Edinburgh:IEEE, 2008:354-357.
- [10] HUANG Chijen,CHUANG Yingchun,KE Yulung. Design of closed-loop buck-boost converter for LED driver circuit[C]// Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference(I&CPS). [S.l.]:IEEE Industrial & Commercial Power Systems Tech., 2011:1-6.
- [11] 郭凌曦,左敦稳,孙玉利,等. LED散热技术及其研究进展[J]. 照明工程学报, 2013,24(3):64-70. (GUO Lingxi,ZUO Dunwen,SUN Yuli,et al. The research progress of LED heat dissipation technology[J]. Journal of Lighting Engineering, 2013,24(3):64-70.)
- [12] HU Yuequan,MILAN M,JOVANOVIC. LED driver with self-adaptive drive voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2008,23(6):3116-3125.
- [13] BROECK H,SAUERLANDER G,VENDT M. Power driver topologies and control schemes for LEDs[C]// in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf.(APEC). Anaheim,CA,USA:IEEE, 2007:1319-1325.
- [14] PAN T F,CHIU H J,CHENG S J. An improved single stage flyback PFC converter for high-luminance lighting LED lamps[C]// in Proc. 8th Int. Conf. Electron. Xi'an:IEEE, 2007:212-215.
- [15] CHIU H J,CHENG S J. LED backlight driving system for large-scale LCD panels[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2007,54(5): 2751-2760.
- [16] 穆云田. 基于单片机控制的直流恒流源的设计[D]. 天津:河北工业大学, 2007. (MU Yuntian. The design of DC constant-current source controlled based on SCM[D]. Tianjin,China:Hebei University of Technology, 2007.)

作者简介:



徐 飞(1990-),男,江苏省苏州市人,硕士,主要研究方向为LED驱动电路.email:xufeimiss@163.com.

蔡 勇(1972-),男,南京市人,研究员,主要研究方向为LED工艺.

时广轶(1979-),男,黑龙江省双鸭山市人,副教授,主要研究方向为MEMS技术.

张亦斌(1988-),男,山东省滨州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为LED工艺.

徐建伟(1991-),男,安徽省芜湖市人,在读硕士研究生,主要研究方向为LED工艺.