

文章编号: 1007-2780(2012)03-0371-07

大功率 LED 效率特性分析与驱动方案设计

覃雪玲, 何志毅*, 何 宁

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004, E-mail: txl05150117@163.com)

摘 要: 考察了大功率 LED 量子效率衰落问题的研究进展并检测和比较了当前市场不同产品的大功率 LED 性能, 随着 LED 效率-电流特性的逐渐改善, 其最高效率所对应驱动电流开始超过额定电流。由此提出 LED 的矩形波脉冲驱动策略, 驱动电路中 MOS 晶体管栅极由低频 (200~800 Hz) 矩形脉冲调制高频 (~40 kHz) 脉冲产生的间歇式 PWM 脉冲串来控制, 在输出端滤除高频成分后得到接近于矩形波的低频脉冲电流输出。在调节驱动电路的电流工作点以达到负载 LED 最高发光效率工作点同时, 约束输出脉冲峰值电流与占空比以保证 LED 驱动电流的平均值恒定。

关 键 词: 大功率 LED; 脉冲驱动; 效率衰落; 极值效率; LED 背光源

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122703.0371

Efficiency Characteristic Analysis and Driving Scheme Design of Power LEDs

QIN Xue-ling, HE Zhi-yi*, HE Ning

(Information & Communication College, Guilin University of Electronic Technology,

Guilin 541004, China, E-mail: txl05150117@163.com)

Abstract: Development of the research on power LEDs' quantum efficiency droop was investigated. Several LED products with different performance of high power operation were compared. Due to the improvement of the LEDs' efficiency dependence on the driving current, their operating current corresponding to the maximum efficiency are exceeding their rating values. Under this circumstance, a driving strategy by rectangular pulse is proposed. In the driving circuit, the MOSFET's gate was controlled by an intermittent waveform of PWM pulse series which is generated by modulating the rectangular pulses at lower frequency (200~800 Hz) on those at higher frequency (~40 kHz), whereby an approximately rectangular waveform at the lower frequency of the current pulses can be obtained by filtering the high frequency components. The peak current and duty ratio of the output drive to the loaded LED were correlated to maintain the constant drive current in average while the operating current was regulated to reach the maximum efficiency of the loaded LED.

Key words: high power LED; pulse drive; efficiency droop; maximum efficiency; LED back-light source

收稿日期: 2011-11-01; 修订日期: 2012-01-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61077036, No. 60972084); 广西自然科学基金 (No. 2011jjA70094); 研究生创新项目 (No. 2010105950809M19)

作者简介: 覃雪玲 (1986-), 女, 广西来宾人, 硕士研究生, 从事 LED 智能照明技术的研究。

* 通讯联系人, E-mail: hezhiyi@guet.edu.cn

1 引 言

LED 的发光效率目前已经达到并且正在超过荧光灯、HID 灯等传统光源的水平,在通用照明领域将逐渐成为主流光源,同时在专用照明领域的应用,如作为 LCD 背光源或投影光源也日益广泛,LED 已经从手机到计算机显示器迅速扩张到液晶电视,大面积取代传统的冷阴极荧光灯。由于 LED 具有与气体放电灯完全不同的电流-电压特性,低压直流驱动、恒流状态下工作,对于 LED 驱动电路的设计与过去气体放电灯电子镇流器有很大的不同。我们在设计时除考虑驱动电路和负载 LED 的电气参数以外,还应对这种新型照明光源的光电特性及其驱动电路之间的匹配予以足够重视。

光源设计的最终主要目标是达到足够长的使用寿命和尽可能高的光电转换效率。对于大功率 LED 来说,不仅要保证驱动电路的电功率效率,如果驱动电路的输出电压/电流与它匹配得不好,会使其发光效率大打折扣。目前照明 LED 大部分采用基于蓝光芯片(封装时加黄光或红绿光荧光粉)的 LED, GaN 基 LED 的发光量子效率会随着注入电流大小发生明显变化^[1];在小电流密度下随着注入电流的增加而升高,而达到一个极值点后会随着注入电流的增加而显著降低,这种现象称为量子效率衰落(droop),在后续的讨论中我们把这个工作点的电流密度表示为 j_{\max} 。这一现象严重地影响了 LED 的大功率特性。从 2007 年开始各相关研究机构对此作了大量报道^[1],目前实验研究表明 droop 现象逐渐得到改善,有的声称已经解决了这一问题^[2-4]。这一中上游技术的发展趋势应引起我们充分的重视,本文在过去研究^[1]的基础上,及时地开发作为下游环节与之相适应的驱动技术,对于 LED 的实际应用和及时掌握相关知识产权都具有重要意义。

2 实 验

2.1 实验方法

在文献[1]中相对效率的测量是以不同脉冲峰值电流而保持相同平均电流(通过适当调节脉冲占空比)驱动 LED 来检测平均光强,其变化实际上就是相对量子效率随注入电路电流变化的关系。这种方法对光探测器的响应速度和线性响应

范围要求比较低,可采用普通光电池。在本文中我们利用具有高速和良好线性响应的 New Port 光检测器 1601-FC-AC,采用了更加快捷的峰值采样方法,峰值光强与峰值电流之比就是量子效率对注入电流的相对变化关系。脉冲电流的频率为 1 Hz,占空比固定为 1%,这样省去了调节占空比的麻烦,而即使峰值电流达到 1 mA 时平均电流也只有 10 mA,LED 发热量很少,排除了因封装及其他散热条件不同而导致测量结果不同的可能,所以这种方法的测量结果所反映的主要是 LED 芯片的性能。测量中 LED 驱动电路的结构与文献[1]基本相同。

电路制作所用到的主要元器件中,负载为 20 W 多芯片封装的 LED 光源,开关晶体管使用 MOS 场效应管 IRF840,电感为铁氧体磁芯线圈。电路设计先通过仿真设计软件 Multisim 进行,再制作硬件电路并调试后达到设计的输出特性。电路工作供电用~220 V 市电整流后的直流电压(平均 300 V 左右),在不同驱动条件下 LED 发光效率通过其发光强度的相对值来比较,检测时将 LED 光源和光强检测仪(硒光电池光度计)固定。电流波形测量中所用的电流取样电阻采用贴片式无感电阻,测量电流电压波形所用示波器为 Tektronix-TDS1002。

2.2 大功率 LED 的效率特性和驱动策略

早期的蓝光或白光 LED 在电流密度很小($<10 \text{ A/cm}^2$)时量子效率就开始迅速随着注入电流的增加而下降^[5],一方面为降低成本应尽可能地提高单个 LED 的功率和光通量,而 LED 额定电流所对应的电流密度在 40 A/cm^2 左右^[6],工作在额定电流下的 LED,即使排除器件温升的影响,发光效率一般都比它在小电流注入的最佳状态明显降低。各国相关机构对这种现象进行了大量研究^[1-5, 7-8],目前对它的产生机制还在争议中,但对于提高 LED 大功率工作状态下的发光效率,除采用有源区与 P 区之间电子阻挡层^[1]的方法以外,找到了如下一些解决的有效方法:

(1)基于俄歇复合的 droop 机制,采用比较宽的量子阱或异质结 LED^[2-4],降低势阱区域的载流子浓度,减小俄歇复合的几率;

(2)在非极性的 m-平面而不是 c-平面上生长外延层制作 InGaN 发光器件^[5, 7],可以延缓量子效率随注入电流密度下降的斜率,在 100 A/cm^2

电流密度时发光效率比峰值只下降了13%;

(3)有源区组分为缓变的In、Ga比例,调整能带结构,提高空穴的传输效率,改善有源区载流子浓度分布^[8];

(4)采用合理的电极结构和形状使电流密度分布均匀,如通过蓝宝石衬底剥离制作上下电极结构取代同侧表面结构电极^[9-12],网状电极形状^[13]或起电流扩散作用的透明导电层^[14-15]取代点接触电极形状等技术。

通过以上几个方面的改进,LED的大功率工作性能得到了很大的提高,有的LED的 j_{\max} 值已经达到了 100 A/cm^2 以上^[2-4]。但是由于散热条件的限制,通常LED额定电流密度在 40 A/cm^2 左右^[15],例如1W的LED额定电流值通常是350mA,典型的芯片面积在 1 mm^2 左右,对应电流密度为 35 A/cm^2 。即使LED的 j_{\max} 值达到了 100 A/cm^2 ,如果持续工作在这一电流上肯定会因过热而烧毁。所以针对LED芯片性能的不断提高,设计与之相适应的驱动方案,最终才能得到较高的光源整体性能。否则,如果驱动电路的输出波形与负载LED的光电特性不匹配,发光效率相差可达到25%以上^[1]。我们检测了市场上所能得到的多款不同来源芯片封装的1W白光LED效率-电流特性,同时与美国Cree公司最近的蓝光芯片封装的同类产品相比较,结果如图1所示。

从图中可以看到,Cree公司的LED产品效率极值点所对应的电流已经从2009年的250mA^[1]

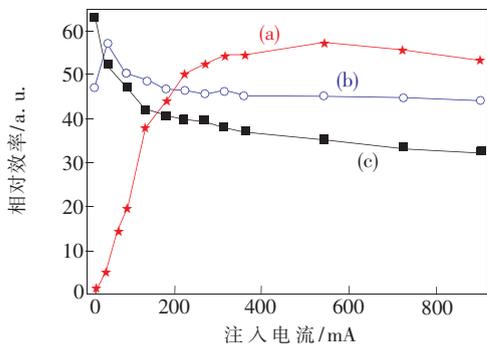


图1 不同1W白光LED(蓝光芯片)的相对发光效率与注入电流关系特性的比较。(a)Cree公司产品;(b,c)其他公司产品。

Fig. 1 Comparison of emitting efficiencies dependent on the injected currents for several 1 W white LEDs (blue chip). (a) products of Cree; (b, c) Products from other companies.

在近期提高到550mA左右。我们测量了目前市场上能得到的其他来源芯片封装的产品,在注入电流很小($< 50\text{ mA}$)时效率就开始下降了,但有部分产品也有一定程度的改善,如图1中的效率曲线(b)在大电流注入时的下降就比(c)平缓得多,这可能就是采用m平面GaN外延制作的结果。大部分产品的效率-电流曲线都像曲线c那样,电流时已经比最高效率下降了30%以上,虽然在小电流注入时效率较高,但这没有多大意义,因为我们一般不会把成本较高的功率型LED当小功率用。不过随着各厂家对于LED效率-电流特性的重视,将来也会逐渐提高其大功率工作性能,实现像曲线(a)那样的特性。

所以,除了考虑功率因数、输入电流波形的高次谐波含量和电功率效率等电参数以外,设计者必须充分考虑到LED器件的光电效率特性,才能开发出相匹配的驱动电路以达到最终的高效光输出。由于LED的伏安特性的负温变化关系,以及不同LED器件的电流-电压特性的不一致,一般采用恒流模式、通常是恒直流的方式来驱动LED。但随着LED大功率工作特性的逐渐改善,效率极值点电流 j_{\max} 就像图1(a)那样,超过其额定值,以恒直流方式工作在额定电流值的LED显然没有达到最高效率。在这种情况下应采用矩形脉冲的电流波形,调节合适的占空比,使峰值电流处于LED效率最高工作点,平均值处于额定电流值。这样既可以将LED的电流工作点固定在效率最高点,又能保证它能够安全可靠地工作。

此外,紫外LED的效率极值点电流一般比较大^[16],往往超过其额定电流,采用以上脉冲驱动方式则可以避开效率低下的较低效率工作区域,获得比较高的发光效率。可见光LED效率衰落问题^[2-7]虽然目前还是在实验室和市场上高端产品得到了解决,但相信这方面的技术肯定会在不久的将来大规模市场化。

2.3 脉冲驱动方案设计与实现

大功率LED与其他光源一样,通常采用开关电源作为驱动电源,典型的降压电路模块如图2(a)所示,该电路原型已在文献[1]中描述,属于峰值电流控制型驱动电路^[17],在几十kHz的开关频率下利用铁氧体磁芯电感 L 来限流,使电流在MOS晶体管Q导通后呈斜坡式的增加, R 为电流取样电阻,它将电流信号反馈到PWM控制电

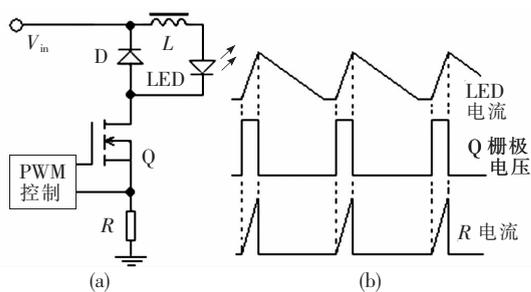


图 2 驱动 LED 典型的开关电路示意图 (a) 和线路中的电流/电压波形图 (b)

Fig. 2 Schematic diagram of a typical switch circuit for LED drive (a), and current/voltage waveforms in the circuit (b).

路,可以根据电流峰值来控制 MOS 管 Q 栅极的输出脉冲宽度。

图 2 (b) 是各主要节点的电流或电压波形,在 Q 导通期间电感 L 储存电磁能量,LED 电流逐渐上升,Q 关断时 L 通过续流二极管向 LED 释放电磁能,LED 电流逐渐下降,直到下一个周期,所以 LED 的电流波形接近三角波。如果对 LED 恒直流驱动,只需在 LED 两端并联一个足够容值的电容既可。但如果要输出矩形脉冲波形的电流,由于电流在限流电感 L 储能释能过程中不可能发生突变,也就不可能获得陡峭的上升沿与下降沿和矩形脉冲电流波形。也不能为此而采用电阻限流的方法,否则大量电能消耗在电阻上,将导致很低的电功率效率。

为了在保证电功率效率的前提下获得大功率矩形脉冲电流输出,设计并制作图 3(a) 的恒流控制驱动电路,电路中高频 PWM 控制部分主要由比较器 CM、JK 触发器和时钟脉冲发生器 OSC (~ 40 kHz) 组成。在比较器 CM 同相端接收电流取样电阻 R_{cs} 反馈过来的电压信号与反相端的参考电压 U_{ref} 进行比较,在时钟周期的初始阶段 MOS 管栅极处于高电平,晶体管导通。在图 2 (b) 中 MOS 管 Q 导通时,在 L_1 和 L_2 的限制下电流是逐渐上升的,当 R 电流取样信号瞬态值超过参考电压 U_{ref} 时,比较器输出高电平通过反相器 NOT1 后再通过与门对 MOS 管栅极输出低电平使 MOS 管关断,这时 R_{cs} 无电流比较器输出会迅速跳变,但由于 JK 触发器 R 端先前通过电阻 R_6 输入为高电平,而使其输出端 Q 由高电平转为低电平,通过与门 AND₁ 的另一个输入端锁住了对

MOS 管栅极的低电平状态,在当前周期内使之不会再发生第二次跳变。直到下一个周期时钟的脉冲 Q 端才输出高电平,使 MOS 管再次导通。这样就实现了 PWM 恒流控制。

低频脉冲发生器 OCSL ($200 \sim 800$ Hz) 通过与门 AND₂ 将其输出信号调制在对 MOS 管栅极输出的高频脉冲上,只有在低频脉冲处于高电平时期间才有高频脉冲输出,这样就形成了间歇式的矩形脉冲波, L_1 为限流主电感,如果将高频成分通过 C_4 、 L_2 、 C_5 的 π 型滤波方式滤掉后可得到接近矩形波脉冲的低频波包。对于普通照明光源来说,只要低频电流矩形波的频率大于 60 Hz,人眼视觉上不会有频闪的感觉。这样在使用电感而不

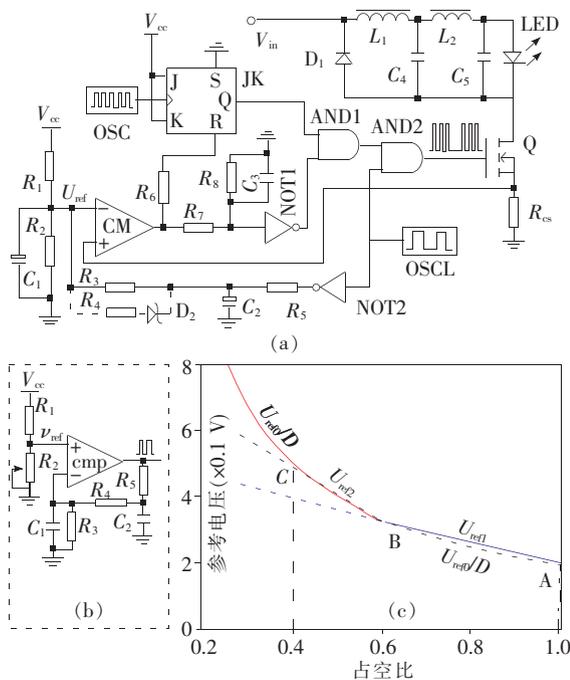


图 3 (a) PWM 恒流控制的 LED 驱动电路原理图; (b) 时钟脉冲 OSC 和低频矩形脉冲 OSCL 发生电路; (c) 满足平均输出驱动电流恒定所需条件 $U_{ref} = U_{ref0}/D$, 使比较器 CM 参考电压 U_{ref} 与低频脉冲占空比 D 成近似反比关系。

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the PWM constant-current controlling circuit for LED drive; (b) Generating circuit of clock pulse OSC and low frequency rectangular pulses OSCL; (c) An approximate inverse ratio relationship between the reference voltage U_{ref} of the comparator CM and the duty ratio D of the low frequency pulses, for keeping the average output current constant as the condition of $U_{ref} = U_{ref0}/D$.

是电阻限流的情况下也能获得对LED负载的大电流矩形脉冲输出,适当控制脉冲电流峰值,即可使LED处于最佳电流工作点 j_{\max} 。产生脉冲矩形波可以有很多方法,在此两个高、低频脉冲发生器OSC、OSCL分别利用了4个比较器芯片LM339多余的另外两个单元,如图3(b)所示,通过设置 R_1 、 R_5 和 C_1 、 C_2 可分别获得低频、高频的脉冲,在低频脉冲发生器中如果调节 R_2 改变同相端参考电压值 U_{ref} ,可改变输出脉冲的占空比。

按照以上方案,如果驱动电源与LED是固定负载,则在生产阶段直接根据LED的效率-电流关系特性固定驱动电流波形以达到两者之间的最佳匹配。另外,如果驱动电源与LED负载不是固定关系,即可能负载不同特性的LED,为了维持LED的平均电流恒定在额定值附近工作以保证恒流驱动,还要调节输出脉冲的占空比,对于矩形脉冲来说就是维持峰值电流与占空比乘积 $i_0 = i_p \times D$ 即平均电流不变。如果在调节占空比或峰值电流两者之一时自动约束另一个参数满足这一关系,既可省去需要分别调试这两个参数的麻烦,简化了在线调试过程,便于批量制作或规模生产,也可提高驱动电源与LED负载匹配的准确性,还可在使用阶段将调试接口提供给一些专业用户,在驱动电源和LED光源往往来自不同厂家、以及不同批次LED不同特性的情况下,便于用户自行根据不同来源的LED光源产品调节工作点以得到最高发光效率。

为此设计了一个简单的电路来实现占空比和峰值电流的关联即后者与前者的反比关系 $i_p = i_0/D$,由于峰值电流与参考电压 U_{ref} 决定,可通过图3(a)的反相器 NOT_2 、 R_5 - C_2 积分、降压电阻 R_3 来实现,当减小OSCL(通过调节图(b)中的 R_2 占空比)时, NOT_2 将其输出反向并积分后输出到比较器CM的反相端使参考电压 U_{ref} 增加(反之依然),因而也使对MOS管和LED的峰值电流增加,在 $U_{\text{ref}} \ll V_{\text{cc}}$ 和 $R_2 \ll R_3$ 的情况下, U_{ref} 的该变量随 D 的变化为负线性关系,这时在比较器CM反相端输入的参考电压为:

$$U_{\text{ref1}} \approx U_{\text{ref0}} + (1-D)V_{\text{cc}}R_2/R_3 \quad (1)$$

式中 U_{ref0} 为占空比100%时的参考电压, V_{cc} 为工作电压(10V),采用合适的 R_3 阻值,可以使这个负线性关系在一定占空比范围(0.6~1.0)非常接近 U_{ref} 与 D 的反比关系 U_{ref0}/D ,如图3(c)所示

的AB线段。但在比B点更小占空比的区域这个关系远离所要求满足的反比关系,要在更大范围达到近似反比关系,则需在 R_3 并联一个合适的电阻 R_4 与齐纳二极管 D_2 ,图3(a)虚线连接部分,使 R_5 - C_2 积分超出 D_2 的临界电压 V_z 后的负线性关系斜率更陡(线段BC),正好与 $1/D$ 曲线在BC的范围接近重合,在更宽范围内仍近似于反比关系,一般在占空比0.4~1.0及其所对应峰值电流的范围已经足够了。BC段的关系为:

$$U_{\text{ref2}} \approx U_{\text{ref1}} + [(1-D)V_{\text{cc}} - V_z]R_2/R_4 \quad (2)$$

3 结果与和讨论

以一个20W的LED(额定电流1A、电压20V)为负载,按图3的设计制作驱动电路并采用合适的元器件及其参数,经仔细调试后获得了恒定平均电流的脉冲输出,其中JK触发器高频时钟OSC脉冲为40kHz,OSCL低频矩形脉冲频率设置为250Hz,在调整占空比时该频率有所改变,但决定LED发光强度的是驱动电流大小和占空比,频率改变对于LED的平均发光强度没有影响。从示波器观察到在不同工作点下电流的平均值基本相同。图4显示了占空比分别为100%、75%和50%的LED电流波形,这样我们可以根据不同的LED效率-电流特性在保证驱动平均电流恒定的情况下调节其峰值电流工作点而使驱动电源与LED负载达到最高效率匹配。如果将该脉冲驱动方式应用于LCD背光源,则需要保持光源的驱动脉冲与帧同步信号时钟具有相同相位,

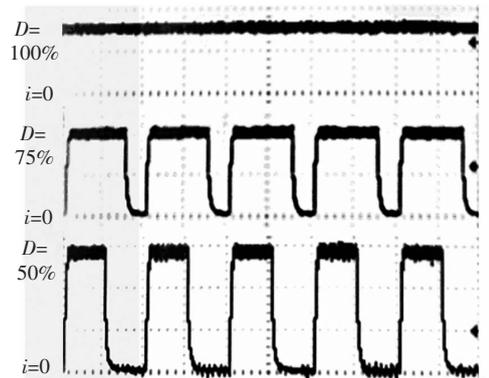


图4 驱动电路在不同占空比 $D=100\%$ 、 75% 、 50% 下对LED负载驱动电流的实际测量波形(水平2ms/div)。

Fig. 4 Driving current waveforms measured at various duty ratios of $D=100\%$, 75% , 50% of the driver to the LED load.

只需要在低频脉冲发生器 OSCL 的图 3(b) 电路中,通过帧同步信号脉冲的上升沿对电容 C_1 放电即可。

如前所述,当前市场上一般的照明 LED 产品的大功率特性还不理想,一般效率极值点对应电流都远低于额定电流,所以在以上波形的电流驱动下所检测到的光强还是以占空比 100% 的恒定直流驱动最高。但是对于 Cree 芯片封装的 LED,在 330 mA 的平均电流下照度计测量结果显示,采用图 3 所示的脉冲驱动方式(峰值电流 550 mA,占空比 60%),比恒定直流驱动的发光亮度高 7% 左右。

LED 光源与气体放电光源相比,另外一显著特点是 0~100% 额定功率范围可连续调光,如适应环境照明和 LCD 背光源亮度调节等方面的应用。调光分为两种方式:PWM 调光和线性调光,前者为在一定周期内调制矩形脉冲电流的宽度即占空比来实现光源亮度调节,后者则是恒直流驱动方式下改变电流幅度来进行亮度调节。以上 Cree 芯片 LED 驱动在额定功率附近采用不同的两种驱动方式效率相差只有 7%,但对其进行调光控制的时候,如果平均电流调到在 200 mA 以下,在相同的平均电流下脉冲驱动方式(峰值电流仍为 550 mA)明显比恒直流驱动的亮度高,因为我们在图 1 中看到这种大功率工作特性良好的 LED 在小电流下反而不如一般的产品。将来其他厂家产品的大功率工作特性也会迅速改进,LED 的最高效率电流工作点 j_{\max} 也将逐步提高。由于调光主要是为了节能,即使在 LED 的 j_{\max} 值稍低于额定值的情况下,结合两种方式进行调光更为有效;在工作电流较高时采用恒直流线性

调光方式,当电流值调节到效率极值点电流值以下时,开始采用 PWM 调光方式,电流峰值维持在效率极值点不变以达到最佳节能状态。

值得注意的是,采用何种方式以及相关参数来驱动 LED,除了考虑单个器件的光通量和发光效率以外,还要考虑到不同驱动方式对 LED 老化进程的影响。过去的研究报道证明^[18-19],在合适的占空比和峰值电流下,矩形脉冲驱动方式在这方面的性能要优于恒直流驱动方式,也就是前者比后者使 LED 光源可以具有更长的使用寿命。

4 结 论

经众多研究机构和产业界的大量工作,大功率 LED 量子效率衰落的问题正在得到解决,其效率极值点电流随着大功率特性的改善逐渐提高,为适应这一技术的发展,开发了 PWM 脉冲驱动电路,通过低频矩形波调制高频矩形波的间歇式脉冲控制 MOS 开关晶体管栅极、在输出端滤除高频成分以后得到低频 ~250 Hz 矩形波脉冲驱动电流,通过峰值电流与该低频输出脉冲占空比相关联系来保证调节峰值电流时平均驱动电流恒定,使驱动电路可与不同效率特性的负载 LED 达到最佳匹配。对于最近出现的大功率特性良好的 InGaN 蓝光芯片 LED 产品或一般紫外 LED,其效率最高工作电流大于额定电流,应采用脉冲驱动方式;而对于当前一般产品额定电流或以上工作时效率不及小电流驱动的情况下,则应采用恒直流的驱动方式,但脉冲驱动方式对于工作在调光模式的 LED 还是具有一定优势,调光的平均电流低于其效率最高工作电流时,采用 PWM 调光也比线性调光的光效更高。

参 考 文 献:

- [1] 张福林,林旭,廖欣,等. InGaN 蓝光 LED 量子效率与注入电流的关系研究 [J]. 光电子·激光,2009,20(11): 1442-1445.
- [2] Reed M L, Readinger E D, Shen H, et al. n-InGaN/p-GaN single heterostructure light emitting diode with p-side down [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(13):133505 (1-3).
- [3] Maier M, Passow T, Kunzer M, et al. Efficiency and non-thermal roll-over of violet emitting GaInN light-emitting diodes grown on substrates with different dislocation densities [J]. *Physica Status Solidi C*, 2009, 6 (6): 1412-1415.
- [4] Lin R M, Lai M J, Chang L B, et al. Effect of an asymmetry AlGaIn barrier on efficiency droop in wide-well InGaIn double-heterostructure light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(18):181108 (1-3).
- [5] Ling S C, Lu T C, Chang S P, et al. Low efficiency droop in blue-green m-plane InGaIn/GaN light emitting diodes

- [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(23):231101 (1-3).
- [6] 李炳乾. 1 W级大功率白光LED发光效率研究[J]. *半导体光电*, 2005, 26(4):314-318.
- [7] Lee J, Li X, Ni X, *et al.* On carrier spillover in c- and m-plane InGaN light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(20):201113 (1-3).
- [8] Lee Y J, Chen C H, Lee C J. Reduction in the efficiency-droop effect of InGaN green light-emitting diodes using gradual quantum wells [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22 (20): 1506-1508.
- [9] 康香宁,包魁. 垂直电极结构 GaN 基发光二极管的研制 [J]. *半导体学报*, 2007, 28(13):483-485.
- [10] 王婷,崔占忠,徐立新. 激光剥离技术实现垂直结构 GaN 基 LED [J]. *光学技术*, 2009, 35(2):172-174.
- [11] 黄亚军,王良臣,刘志强,等. 垂直结构 GaN 基 LEDs 电流分布计算分析 [J]. *半导体技术*, 2009, 34(9):861-864.
- [12] Kim Hyunsoo, Kim Kyoung-Kook, Choi Kwang-Ki, *et al.* Design of high-efficiency GaN-based light emitting diodes with vertical injection geometry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(2): 023510 (1-3).
- [13] 白林,梁宏宝. 大功率白光LED路灯发光板设计与驱动技术 [J]. *发光学报*, 2009, 30(4):487-485.
- [14] Wang S J, Chen S L, Uang K M, *et al.* The use of transparent conducting indium-zinc oxide film as a current spreading layer for vertical-structured high-power GaN-based light-emitting diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 18(10):1146-1148.
- [15] Seo Tae Hoon, Lee Kang Jea, Oh Tae Su, *et al.* Graphene Graphene network on indium tin oxide nanodot nodes for transparent and current spreading electrode in InGaN/GaN light emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98 (25):251114 (1-3).
- [16] Shao X J, Lu H, Chen D J, *et al.* Efficiency droop behavior of direct current aged GaN-based blue light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(16): 163504 (1-3).
- [17] 张普雷,史永胜,史耀华,等. 大功率背光源用LED驱动电路的研究现状与进展 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(1): 68-74.
- [18] Buso S, Spiazzi G, Meneghini M, *et al.* Performance degradation of high-brightness light emitting diodes under DC and pulsed bias [J]. *IEEE Transaction on Device and Mater Reliability*, 2008, 8(2):312-322.
- [19] Yanagisawa T, Kojima T. Degradation of InGaN blue light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations [J]. *Microelectronics Reliability*, 2003, 43 (6):997-980.