

VLC 系统偏置电流对 LED 调制带宽的影响分析

宋小庆, 魏有财, 赵梓旭, 王慕煜

(陆军装甲兵学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 偏置电流对 LED 内部温度、结电阻和载流子浓度产生的变化导致 LED 频率响应发生改变。分析了偏置电流对 LED 频率响应的影响机理以及对调制带宽的影响规律, 并通过测试平台进行了测试验证。结果表明: 红、绿、蓝 LED 工作在额定功率以下时, 偏置电流与调制带宽基本处于线性正比关系, 在接近和超过额定功率时, 调制带宽变化缓慢并最终趋于稳定。偏置电流对荧光粉 LED 的调制带宽几乎没有影响。此研究对可见光通信系统偏置电流的选取及均衡电路的设计提供参考。

关键词: LED; 可见光通信; 调制带宽; 额定功率; 偏置电流

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1222007

Analysis of influence of VLC system bias current on LED modulation bandwidth

Song Xiaoqing, Wei Youcai, Zhao Zixu, Wang Muyu

(Department of Control Engineering, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Bias current exerts influence on the LED performance parameters including the internal temperature, junction resistance, and the carrier concentration, which has an effect on frequency response. In this paper, the influence mechanism of bias current on frequency response was analyzed, and the influence trend of DC bias on modulation bandwidth was researched and tested. The results demonstrate that the bias current is basically linearly proportional to the modulation bandwidth while LED's (red, green or blue) working power is less than the rated power. When the working power is close to or exceeds the rated power, the modulation bandwidth will change slowly and eventually stabilizes. With respect to phosphor LED, the bias current has almost no effect on it. This study may provide reference for the selection of bias current and the design of equalization circuit in visible light communication system.

Key words: LED; visible light communication; modulation bandwidth; rated power; bias current

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51507190); 陆军装备部重点实验室项目(2014zx28)

作者简介: 宋小庆(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆综合电子系统及可见光通信技术等方面的研究。

Email: swxq@vip.sina.com

0 引言

LED 具有高效率、高亮度、长寿命以及低成本等优点,市场前景广阔,取代白炽灯和荧光灯等传统照明灯具的趋势明显。LED 可见光通信(VLC)技术作为新兴的无线接入技术,与传统的射频无线通信技术相比,具有绿色环保、高安全性、免疫电磁干扰、无需频谱认证以及能够实现照明和通信双重功能等优点,近年来成为国内外的研究热点。

RGB-LED 以及 PC-LED 是白光 LED 的两种主要类型。PC-LED 中荧光粉发出的黄光分量响应速度慢,其调制带宽较低,通常 -3 dB 带宽只有几 MHz。RGB-LED 通过红蓝绿三色芯片独立分布,无荧光分量,其调制带宽高于 PC-LED,但也只在十几 MHz 左右。为满足 VLC 高速传输需求,通常可通过均衡电路的设计弥补 LED 高频信号的衰减,从而提高 LED 的调制带宽^[1-3]。为不影响其照明功能,需要在 VLC 端引入直流偏置^[4-6]。然而,不同的偏置电流会对 LED 内部温度、结电阻和载流子浓度产生不同的影响,从而对 LED 频率响应及均衡电路设计带来相应的改变。参考文献[6]直接将 LED 等效为由电感和电阻串联构成的定参数等效模型,并根据定参数下的 LED 频率响应曲线进行均衡补偿设计,忽略了偏置电流对 LED 内部结电阻参数产生的影响。参考文献[7]主要根据室内照明标准进行偏置电流的选取,没有深入分析和考虑偏置电流对调制带宽产生的影响。文中就直流偏置对 LED 频率响应特性及带宽的影响机理进行了分析,并通过测试平台对可见光通信系统中常用的四种大功率(1W)LED 频率响应特性进行了测试验证,探究了偏置电流对不同类型 LED 调制带宽的影响规律,为 VLC 系统选取合理的偏置电流提供理论指导和参考。

1 VLC 通信模型

1.1 基本模型

VLC 系统结构如图 1 所示,包括三个主要部分:发射端、无线通信链路和接收端。发射端将发送信息存储调制后与直流偏置电流耦合并驱动 LED 发出光信号,输出的光强度随输入信息的变化而变化。光信号经无线通信链路被接收端光电探测器

(Photoelectric Detector, PD)接收,并将光信号转换为电信号,并通过调制解调恢复发送端传来的原始信息。

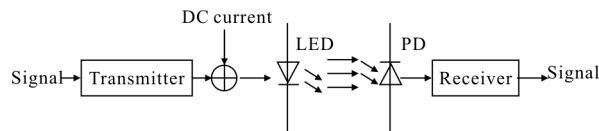


图 1 可见光通信系统原理

Fig.1 Principle of visible light communication system

1.2 调制带宽

通信系统中,调制带宽是衡量系统性能的重要指标。对于 VLC 通信系统,在输入信号幅值不变的情况下,LED 输出交流的光功率下降到某一低频参考频率值的一半时(-3 dB)的频率就是 LED 的调制带宽^[8]。随着输入信号频率的提高,由于注入 LED 载流子的速度赶不上调制信号的变化,输出功率将逐步下降。其输出光功率与频率的关系用下式表示:

$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi f\tau)^2}} \quad (1)$$

式中: f 为输入到 LED 的交流信号频率; $P(f)$ 为 LED 的归一化频率响应^[9]。

由于光电探测器响应电流大小与接收到的光功率呈线性关系,故可用接收端响应电流的变化来表征 LED 输出光功率的变化。如图 2 所示。

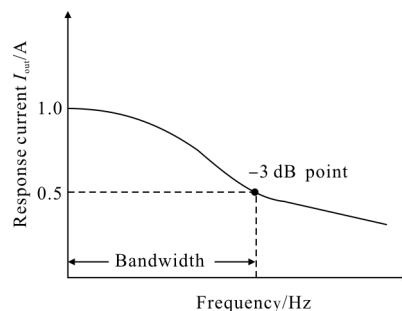


图 2 调制带宽定义

Fig.2 Modulation bandwidth definition

实际应用中,为方便测量,通常将电流信号转化为电压信号,即:

$$V_{pp}(f_{-3dB}) = \frac{1}{2} V_{pp}(f_0) \quad (2)$$

式中: $V_{pp}(f)$ 为频率为 f 的输入信号响应电压峰峰值; $V_{pp}(f_0)$ 为某一低频输入信号 f_0 的响应电压峰峰值; f_{-3dB} 为 -3 dB 带宽点。

2 理论分析

2.1 LED 等效模型

LED 等效电路如图 3 所示^[10]。其中, R_D 和 C 组成的并联网路为 LED 内 PN 结的结电阻和结电容, R_S 和 L 分别是 LED 两端金属引脚连接处及涂覆层表面的级联电阻和寄生电感。

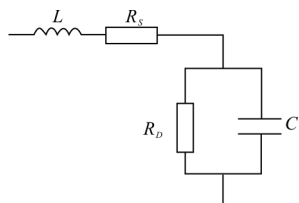


图 3 LED 等效电路

Fig.3 LED equivalent circuit

LED 通过 PN 结发出光子,PN 结的结构直接影响着 LED 的发光特性,其时间常数等于载流子寿命 $\tau=R_D C$ (电子与空穴的平均复合时间)并影响了 LED 的频率响应。LED 的域等效阻抗为:

$$Z(\omega)=j\omega L+R_S+\frac{R_D}{1+j\omega\tau} \quad (3)$$

式中: ω 为交流信号的角频率。可以看出,当在低频段时,阻抗主要考虑 R_S 和 R_D 两部分,而在高频时, R_D 作用相对减弱。

2.2 偏置电流的变化对 LED 频率响应的影响分析

LED 通过注入 PN 结的载流子发生辐射复合作用发光。LED 调制带宽和 PN 结载流子成反比关系^[11]:

$$f_{-3dB}=\frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau} \quad (4)$$

参考文献[12]给出了载流子的复合机率与结温的关系式:

$$W_{em} \propto \exp[(E_g-h\nu)/k_B T] T^3 \quad (5)$$

式中: h 为普朗克常量; ν 为光子频率; E_g 和 k_B 均为常量; T 为 LED 的结温。参考文献[12]同时给出了偏置电流与结温和发光效率的测试结果,如图 4 和图 5 所示。

可以看出,PN 结温度与加载到 LED 上的驱动电流近似呈线性上升关系,与发光效率是反比关系。因此,偏置电流增加将导致 LED 结温上升,发光效率降低,接收光功率强度减弱。与此同时,提高偏置电流,PN 结势阱中载流子的浓度变高,载流

子寿命 τ 也会缩短,根据公式(4),LED 的调制带宽 f_{-3dB} 变大。

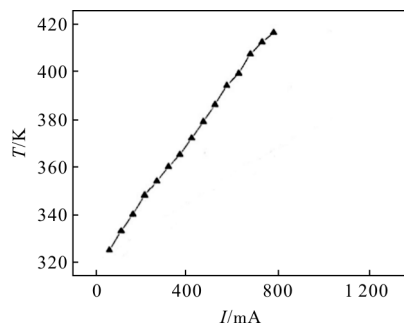


图 4 LED 电流-温度关系曲线^[12]

Fig.4 LED current-temperature curve^[12]

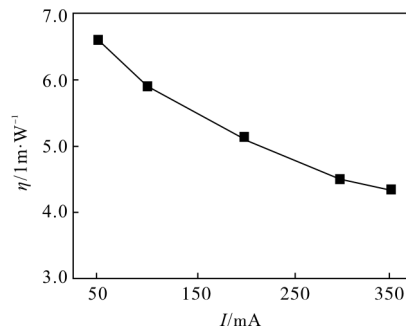


图 5 LED 电流-发光效率关系曲线^[12]

Fig.5 LED current-luminous efficiency curve^[12]

由于 PN 结结电阻随温度的升高而减小,且两者近似成线性关系^[13-14]。文中设置不同结电阻 R_D 等效替代不同偏置电流。利用 Multisim 电路仿真软件对 LED 等效电路进行频率响应仿真,得到 PN 结频率响应曲线如图 6 所示。

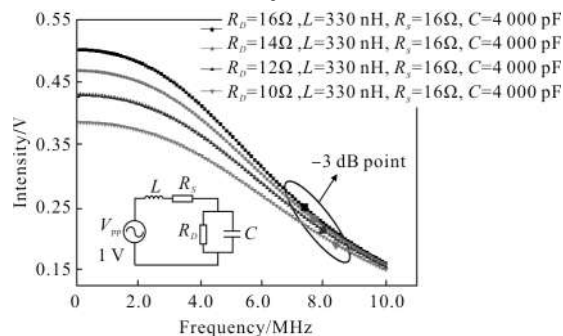


图 6 LED 变参数等效模型频率响应仿真曲线

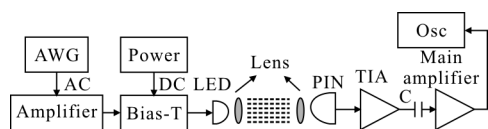
Fig.6 LED frequency response simulation curve of variable parameter equivalent model

可以看出,PN 结电阻越小,其响应强度越小,同时 -3 dB 对应的频率点向右移动,带宽有一定的拓展。

3 实验测试

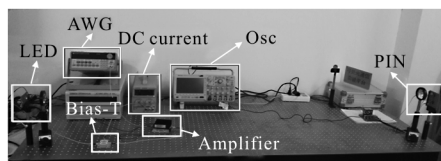
3.1 测试环境构建

为进一步测试真实环境中 LED 的频率响应随偏置电流的变化情况,构建测试平台如图 7(a)所示。信号发生器(Arbitrary Waveform Generator,AWG)用于产生不同频率的交流信号,交流信号通过功率放大器(Amplifier)放大后与直流偏置电流(DC Bias Current)耦合,并驱动 LED 发光。光电探测器(PIN)接收光信号后,通过放大电路 (TIA 以及 Main Amplifier)完成光电转换,通过示波器(Osc)记录交流电压信号。测试平台实物图如图 7(b)所示。



(a) LED 带宽测试平台结构

(a) Structure of LED bandwidth test platform



(b) 测试平台

(b) Test platform

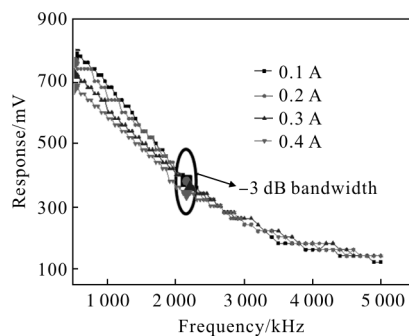
图 7 LED 频率响应测试平台

Fig.7 LED frequency response test platform

3.2 偏置电流变化对 LED 频率响应测试

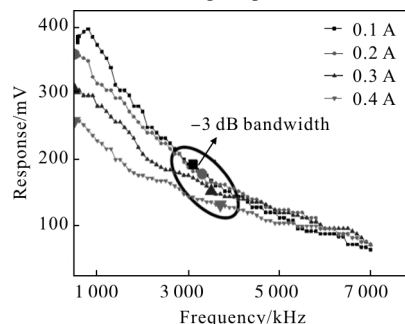
用于照明的 LED 根据发光功率大小可分为小功率型和大功率型(功率 1 W 以上)^[15],鉴于目前可见光通信中常选用 1 W LED 作为通信光源,这里选用额定功率均为 1 W 的荧光粉 LED 及红、绿、蓝三种颜色发光芯片的 LED 作为测试对象。由于 T 径偏置器(Bias-T)通频带为 0.005~4.2 GHz,设置低频参考点为 500 kHz,每间隔 100 kHz 进行频率递增测试。

为了确定偏置电流的选取范围,运用晶体管图示仪进行了 LED 的伏安特性测试:偏置电流达到 0.4 A 时,四种 LED 稍稍高出额定功率。这里选择 0.1、0.2、0.3、0.4 A 四种不同偏置电流对四种 LED 进行幅频特性分组测试,测试结果如图 8 所示。



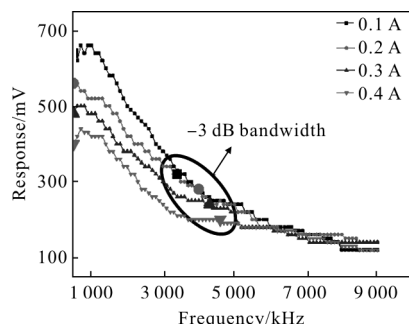
(a) 荧光型白光 LED

(a) White phosphor LED



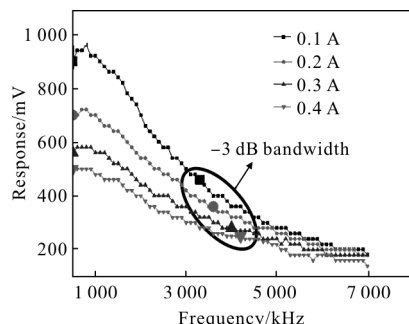
(b) 红光 LED

(b) Red LED



(c) 蓝光 LED

(c) Blue LED



(d) 绿光 LED

(d) Green LED

图 8 四种 LED 幅频特性曲线

Fig.8 Four kinds of LED amplitude-frequency characteristic curve

通过测试曲线可以看出:(1) 四种 LED 的响应强度均随频率增加而衰减;(2) 偏置电流越大,结温变高,发光效率降低,交流信号响应峰峰值降低,LED 频率响应曲线下移;(3) 对于红、绿、蓝单色 LED,偏置电流增大,载流子寿命降低,-3 dB 频率点右移,调制带宽有所提升。呈现的 LED 频率响应变化规律同前面理论分析和仿真结论一致。对于荧光粉 LED,由于蓝光激发出荧光带有迟滞效应,其调制带宽几乎不受偏置电流的影响。

3.3 偏置电流对 LED 调制带宽影响范围测试

为了进一步观察偏置电流对 LED 带宽的影响边界,这里将测量范围扩大到额定功率以上。由于 LED 器件本身的限制,过高的驱动电流将导致 LED 烧毁,因此文中设置最大偏置电流为 0.7 A(接近 2 倍额定功率)。四种 LED 在 0.1~0.7 A 偏置电流下 -3 dB 带宽的变化曲线的测试结果如图 9 所示。

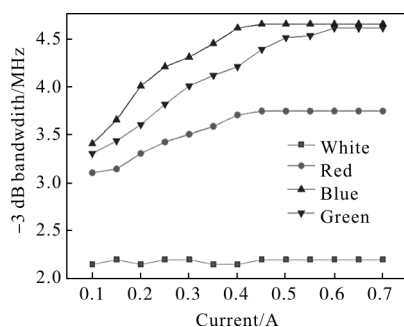


图 9 直流偏置电流与 LED 调制带宽的关系曲线

Fig.9 Relationship curve between DC bias current and LED modulation bandwidth

从图 9 可以看出白光 LED 的带宽在 0.1~0.7 A 范围内基本稳定在 2.2 MHz 左右。而红、绿、蓝 LED 的带宽变化幅度较明显,总结它们的变化情况如表 1 所示。

表 1 红、绿、蓝 LED 带宽随偏置电流变化情况

Tab.1 Red, green, blue LED bandwidth changing with bias current

Type	Bandwidth (Min)/MHz	Bandwidth (Max)/MHz	Region of change/A	Improved percent
Red LED	3.1	3.7	0.10~0.45	19.4%
Green LED	3.3	4.6	0.10~0.60	39.4%
Blue LED	3.4	4.6	0.10~0.45	35.3%

4 结 论

偏置电流的选取应综合考虑 LED 频率响应、调制带宽、信噪比及使用寿命等因素。通过直流偏置对 LED 内部参数的影响机理分析和测试验证,得到结论如下:(1) 红、绿、蓝单色芯片发光 LED 的电流-带宽特性具有明显的非线性。在额定功率范围内,LED 调制带宽随偏置电流增大而增大。超过额定功率时,LED 调制带宽基本趋于稳定。白光 LED 受荧光粉迟滞效应影响,-3 dB 带宽基本稳定,直流偏置电流对其影响不明显。(2) 对于以红、绿、蓝 LED 为光源的 VLC 系统,偏置电流越大,LED 频率响应曲线越平坦,对均衡电路的补偿能力要求越低。(3) 过大的偏置电流对 LED 使用寿命及发光效率产生一定的影响,应尽量避免 LED 在超过额定功率状态下工作,尤其是白光 LED 直流偏置可适当降低。

参考文献:

- [1] Huang X, Shi J, Li J, et al. 750 Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition IEEE, 2015: 1-3.
- [2] Huang X, Wang Z, Shi J, et al. 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22034-22042.
- [3] Li H, Chen X, Guo J, et al. A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27203.
- [4] Huang Xingxing, Chen Siyuan, Wang Zhixin, et al. 1.2 Gbit/s visible light transmission based on orthogonal frequency-division multiplexing using a phosphorescent white light-emitting diode and a pre-equalization circuit [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(10): 100602.
- [5] Yeh C H, Chow C W, Chen H Y, et al. Adaptive 84.44-190 Mbit/s phosphor-LED wireless communication utilizing no blue filter at practical transmission distance. [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9783-9788.
- [6] Hao L M, O'Brien D, Faulkner G, et al. 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED [C]//

- European Conference on Optical Communication. IEEE, 2008: 1–2.
- [7] Chun H, Manousiadis P, Rajbhandari S, et al. Visible light communication using a blue GaN, and fluorescent polymer color converter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2035–2038.
- [8] Huang B, Tang D, Chen H, et al. 200 Mb/s visible optical wireless transmission based on NRZ–OOK modulation of phosphorescent white LED and a pre–emphasis circuit [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(10): 100604.
- [9] Chi Nan. LED Visible Light Communication Technologies [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [10] Shatalov M, Chitnis A, Koudymov A, et al. Differential carrier lifetime in AlGaIn based multiple quantum well deep UV light emitting diodes at 325 nm[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(10B): L1146–L1148.
- [11] Chi Nan. Key Device and Applications of LED Visible Light Communication [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2015. (in Chinese)
- 迟楠. LED 可见光通信关键器件与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [12] Wang Jian, Huang Xian, Liu Li, et al. Effect of temperature and current on LED luminous efficiency[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(2): 358–362. (in Chinese)
王健, 黄先, 刘丽, 等. 温度和电流对白光 LED 发光效率的影响[J]. 发光学报, 2008, 29(2): 358–362.
- [13] Dai Shuchun. Influence of power effect on the thermal resistance of power LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, 31(6):877–881. (in Chinese)
戴树春. 功率效应对功率 LED 热阻的影响[J]. 发光学报, 2010, 31(6): 877–881.
- [14] Masanobu S. Internal resistance of an LED as a function of temperature[J]. *ISB Journal of Physics*, 2010, 4(1): 1–4.
- [15] Cao Jie. Source performance and modulation technique of visible light communication system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese)
曹捷. 可见光通信系统的光源特性与调制技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.