

探测器非线性对可见光通信系统幅频响应的影响

唐丹颖 李洪磊 陈雄斌* 裴为华 陈弘达

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 在探测器光电转换效率的理论分析和实际测试结果基础上,建立了其功率-电流($P-I$)特性的非线性模型。基于该模型分析了探测器工作于线性区和饱和区的光电转换能力,将实际测试结果和理论分析结合,研究了探测器响应度饱和情况下可见光通信系统的幅频响应的变化。实验结果表明在可见光通信(VLC)系统的设计中,荧光粉的余辉虽然不会被高速调制,但是它会降低光电探测器的幅频响应度,由于光功率过大导致的探测器响应度饱和会影响系统的幅频响应幅值和系统带宽。

关键词 光通信; 可见光通信; 光电转换; 探测器; 非线性

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0405002

Effects of Detector's Nonlinearity on Frequency Response of Visible Light Communication System

Tang Danying Li Honglei Chen Xiongbin Pei Weihua Chen Hongda

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A nonlinearity model of the detector's power-current ($P-I$) characteristics is established based on the theories and experiments in respect to photo-electric conversion efficiency. The model is used to analyze the detector's photo-electric conversion ability in both linear and nonlinear cases. With the theories and experiments, the frequency response of the visible light communication (VLC) system when photodiode becomes saturated is studied. It proves that although the afterglow of fluorescent powder cannot be modulated in high speed, it can decrease the frequency response of the detector. The detector's saturation due to the high optical power has an effect on the frequency response and the bandwidth in VLC system.

Key words optical communications; visible light communications; photo-electric conversion; photodiode; nonlinearity

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 230.5170

1 引言

白光 LED 由于其环保、节能、寿命长、体积小等诸多优势已经逐步在照明设备中占据一席之地,LED 极高的响应速度及较高的调制带宽也使其兼具照明和通信的功能^[1-2]。可见光通信(VLC)是将白光 LED 的照明和通信相融合的技术,相比于传统的射频无线通信,可见光通信技术无电磁污染,无需申请频率许可证,安全性和可靠性更高。加之半导

体照明逐步被推广和应用,国内外对可见光通信技术的关注度日益提升^[3]。

自 2000 年日本研究人员提出室内可见光通信之后,针对可见光通信的研究相继涌现。Zeng 等^[4-7]一直致力于提高 LED 的带宽以获取更高的通信速率。2013 年, Azhar 等^[8]利用 4 通道的多入多出正交频分复用(MIMO-OFDM)实现了 1.1 Gb/s 传输速率的可见光通信模块。Komine

收稿日期: 2013-09-26; **收到修改稿日期**: 2013-11-20

基金项目: 国家 973 计划(2013CB329205)、国家 863 计划(2011AA03A114, 2013AA013602, 2013AA013603, 2013AA03A104)

作者简介: 唐丹颖(1989—),女,硕士研究生,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: tangdanying@semi.ac.cn

导师简介: 陈弘达(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子与微电子集成器件、集成电路与系统等方面的研究。E-mail: hdchen@semi.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: chenxiongbin@semi.ac.cn

等^[9]为可见光通信的先行者,对 LED 室内通信系统进行了建模、实验和各种理论分析,是最早开始全面而基础的理论与实验研究的。在国内,也有越来越多的学者对可见光通信技术的各种调制方式、编码方式等进行研究^[10-18]。

白光 LED 的产生方式有多种,目前可见光通信研究中较为常用的是利用蓝光 LED 激发黄色荧光粉和利用 RGB 三色 LED 混合产生白光 LED^[19]。由于荧光粉的迟滞效应,导致其对调制信号的响应较慢,是制约 LED 调制带宽的重要因素,所以在实验中采用蓝色滤光片滤除黄光部分,在接收端只对蓝光进行检测。本文采用蓝光激发荧光粉的白光 LED 进行实验,对探测器的功率-电流($P-I$)特性进行测试,并使探测器工作在线性区,对可见光通信系统在加入滤光片前后的幅频响应进行对比分析,研究探测器响应度饱和和对 VLC 系统幅频响应的影响。

2 探测器的 $P-I$ 特性

2.1 理论分析

采用的探测器为 PIN 型探测器(S10784),探测器光敏面直径为 3 mm,可探测光谱范围为 400~1000 nm,对黄光的探测灵敏度高于对蓝光的探测灵敏度,所以黄光功率是主要被探测的对象,且在相同光功率下,探测器对黄光的响应度大于蓝光。光电探测器用来表征其光电转换能力的一个重要参数为响应度 R ^[20],即

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{q\eta}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24}, \quad (1)$$

式中 R 的单位为 A/W, I_{ph} 为光电流, P_{opt} 为光功率; h 为普朗克常数, c 为光波波速, ν 为光的频率, λ 为光波长, η 为光电转换效率。在入射光波长变化较小甚至不变的情况下,探测器的响应度与其光电转换效率呈正比,因而可用来表征探测器的光电转换能力。

2.2 $P-I$ 非线性特性测试

设计如图 1 所示实验装置,由于交流小信号的功率极小,只有 0 dBm(1 mW),因此探测器 $P-I$ 曲线的测试在 LED 只加 200 mA 的 T 径偏置器(bias-T)直流偏置的条件下进行,不输入交流信号。光链路如图 3 所示,光源和探测器之间的光衰减器(GCO-0701M)用来控制通过光链路的光强,接收端光功率计(O455F-13R)测量在光衰减器不同的刻度下对应的光功率。在相同实验条件下,测试接收电路的光生电流。探测器接收端放大电路如图 3 所示,探测器产生的光电流 I_{ph} 经过跨阻放大器放大

(R 表示电阻, C 表示电容),可测隔直电容 $C1$ 前端电压 V_1 ,两者关系如下:

$$V_1 = 3300 I_{ph}. \quad (2)$$

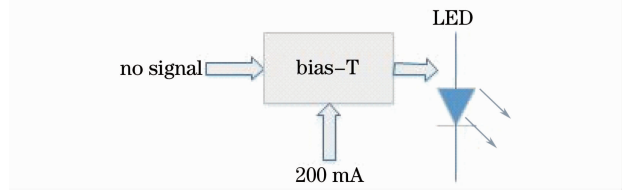


图 1 发射端工作示意图

Fig. 1 Schematic of transmitter

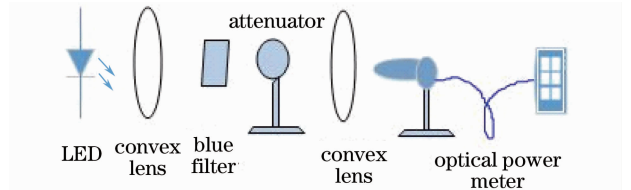


图 2 可见光通信链路图

Fig. 2 Schematic of the optical link

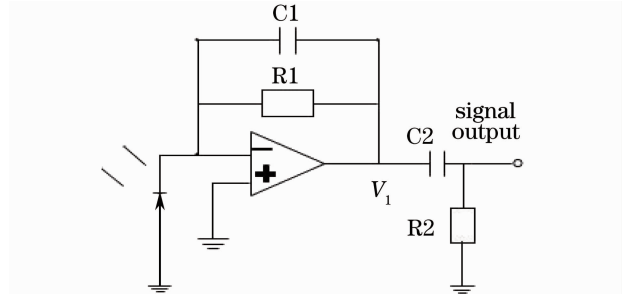


图 3 光接收机前端电路示意图

Fig. 3 Schematic of amplify circuit of receiver

实验中放大电路允许的最大信号电压远高于实验测试链路中所能测得的饱和电压,所以实验所得数据不受放大电路饱和电压影响,能够真实反映探测器的特性。经过实验测试和计算,得到探测器的 $P-I$ 特性曲线如图 4 所示。 $P-I$ 曲线的斜率代表探测器的响应度 R ,当光功率超过一定值时,探测器将工作于饱和区。

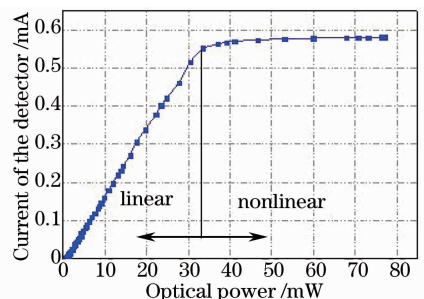


图 4 探测器 $P-I$ 特性曲线

Fig. 4 $P-I$ curve of the detector

3 探测器非线性特性的影响

3.1 实验测试

为分析探测器工作在饱和区对系统的影响,设计了幅频响应测试实验装置,系统采用正弦信号调制,发射端设备连接如图 5 所示,光链路如图 2 所示,并将光探测器置于图中光功率计的位置,探测器光探测面与光功率计的光探测面大致处于同一位置。从网络分析仪(E5071B)给 LED 输入一定幅度的正弦信号,偏置器的直流偏置电流为 200 mA;从图 2 所示放大电路的隔直电容 C2 后端将信号引出到网络分析仪,观察系统的幅频响应;保持输入信号幅度不变,对加滤光片和不加滤光片的系统幅频响应进行记录。实验中应使不加滤光片时接收端光功率大小达到图 4 $P-I$ 曲线中的饱和段,并且调节光衰减器使光功率从饱和区向线性区逐渐减小。

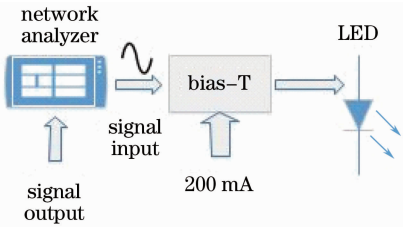


图 5 幅频响应测试链路发射端示意图

Fig. 5 Schematic of the transmitting end in the frequency response measuring experiment

图 6 为加滤光片前后的系统幅频响应曲线。实

验中加滤光片前后并没有引入有源器件,加滤光片之后光强减弱,幅频响应曲线应该是整体下降,而图中曲线在低频段下降,在高频段有所抬升。此时白光功率为 77 mW/cm^2 ,如图 6 中标注,当频率为 100 MHz 时,幅频响应值抬升了 17 dB。在白光功率为 77 mW 时测得加滤光片前后的幅频响应图,加滤光片前探测器工作在饱和区,加滤光片后工作在线性区,线性区的幅频响应曲线在频率为 100 MHz 时抬升了 17 dB,而系统的带宽则提高了约 3 MHz。

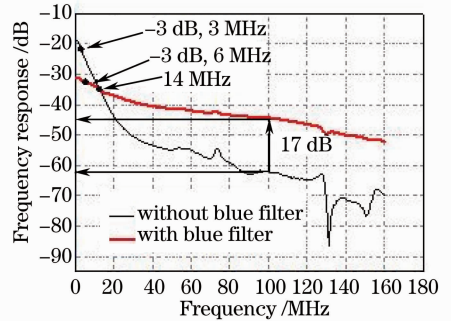


图 6 加滤光片前后的幅频响应曲线

Fig. 6 Frequency response with and without blue filter

通过改变直流偏置电流的大小,测量了在不同白光发射功率下,接收机电路的幅频响应特性。图 7 为几组不同光功率下加滤光片前后的幅频响应曲线的对比图,光功率大小从探测器 $P-I$ 曲线图的饱和区逐渐减小到接近线性区。由图 7 所示结果可知,

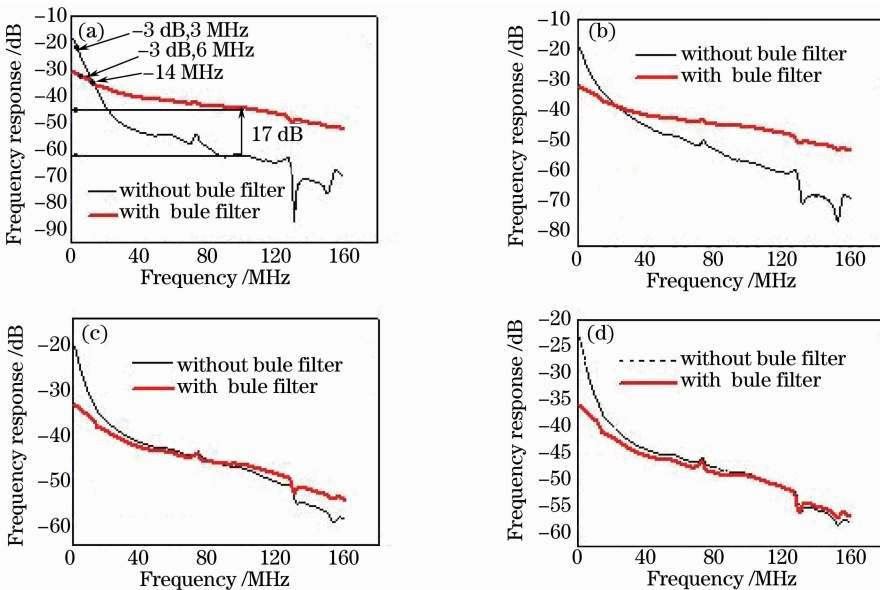


图 7 白光功率从高到低变化对幅频响应曲线的影响。(a) $P=77 \text{ mW}$; (b) $P=53 \text{ mW}$; (c) $P=39 \text{ mW}$; (d) $P=23.3 \text{ mW}$

Fig. 7 Effects on system's frequency response under different optical powers. (a) $P=77 \text{ mW}$; (b) $P=53 \text{ mW}$; (c) $P=39 \text{ mW}$; (d) $P=23.3 \text{ mW}$

在白光功率由 77 mW 逐渐变小的过程中,加滤光片之后的幅频响应曲线在高频段的抬升幅度逐渐减小至零,并且两条曲线的交点也在逐渐往高频方向移动。上述实验现象证明探测器的响应度饱和会导致 VLC 系统的幅频响应降低,使系统带宽减小。

3.2 理论分析

3.2.1 LED 光源分析

光源部分采用一颗额定功率为 1 W 的 LED。在 LED 光源驱动部分加上一定大小的偏置电流,输入一定频率的正弦小信号,在接收端探测器处,定义接收到的总光功率为 P_1 ,由直流电流产生的蓝光和黄光光功率分别为 P_A 和 P_B ,由正弦小信号产生的蓝光和黄光光功率分别为 P'_A 和 P'_B ,可以得到

$$P_1 = P_A + P_B + P'_A + P'_B. \quad (3)$$

输入高频信号时,由于荧光粉的迟滞效应,黄光对信号的响应较慢,因此 $P'_B \approx 0$ 。定义接收到的总光功率为 P'_1 ,可以得到

$$P'_1 = P_A + P_B + P'_A. \quad (4)$$

在 LED 光源和探测器之间加入蓝色滤光片,则接收端探测到的光源成分基本为蓝光,分别定义输入低频信号和高频信号时接收端的总光功率为 P_2 和 P'_2 ,无论输入信号的频率如何变化,都有

$$P_2 = P'_2 = P_A + P'_A. \quad (5)$$

对于利用蓝光激发荧光粉产生白光的 LED,白光的主要成分为蓝光和黄光,并且蓝光成分功率较低^[21]。又由于荧光粉具有迟滞效应,所以在低频部分荧光粉对信号的响应远大于蓝光,而在高频部分

几乎没有响应。

3.2.2 探测器非线性特性的理论分析

在图 2 隔直电容后端测 LED 的幅频响应,只有交流信号能被检测到,其中 P_{out} 为接收端的输出功率, P_{in} 为在发射端的输入功率。由于电路设计中使输入端和输出端阻抗匹配,幅频响应值由下式决定:

$$|H| = 10\lg \frac{P_{out}}{P_{in}} = 10\lg \frac{I_{signal}^2}{I_0^2}, \quad (6)$$

式中 I_0 表示输入正弦信号的电流, I_{signal} 表示接收端隔直后输出的信号电流。由(6)式可知,在输入 I_0 一定的情况下, I_{signal} 越大,系统的幅频响应越大。

根据图 6 中加滤光片前后的幅频响应曲线图,可将实验结果分为低频和高频两部分,以白光和蓝光的幅频响应曲线交汇点为节点分开。

在探测器的 $P-I$ 特性曲线上,分别对低频和高频部分的工作点 P_1 、 P_2 、 P'_1 、 P'_2 作标识,结合(3)~(5)式进行分析。由于输入的正弦信号很小(0 dBm),所以对工作点处的分析进行了放大处理。如图 8(a)、(b)所示,图(a)为低频段工作示意图, I_{signal} 由 P'_A 和 P'_B 在探测器上产生的交流信号叠加,且 P'_B 远大于 P'_A ,由此得 P_1 点的原始信号幅值远大于 P_2 点,即使位于饱和区,其放大后的信号幅度也高于 P_2 点;而图(b)为高频段工作示意图,加滤光片前后的 I_{signal} 都是来源于蓝光对交流信号响应产生的功率 P'_A ,交流原始信号幅值几乎相等, P'_2 点能够放大信号,而 P'_1 点会降低信号幅度,由此得 P'_2 点放大后的信号幅值高于 P'_1 点。

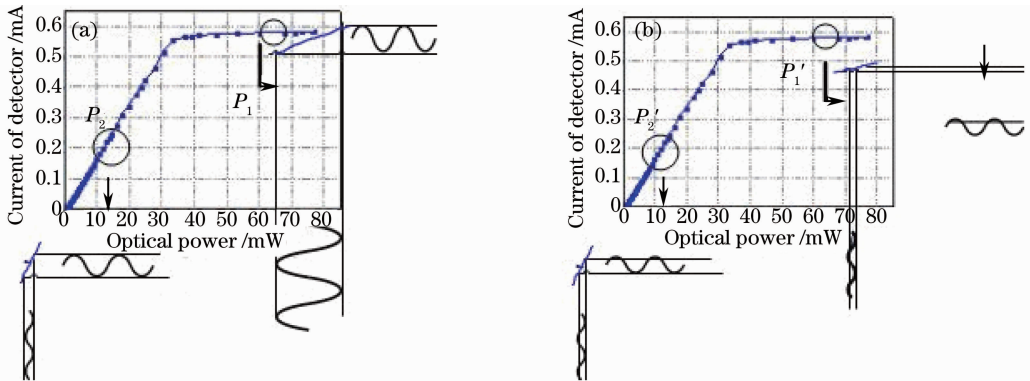


图 8 加滤光片前后的工作点分析示意图。(a) 低频段; (b) 高频段

Fig. 8 Analysis of detector's operating point with and without blue filter. (a) Low frequency; (b) high frequency

由此可证明图 6 中经过滤光之后信号高频段的幅频响应反而增大的现象的合理性。当发射端输入原始信号过高,或接收端光强过强导致探测器光电转换效率降低时,甚至可能出现失真。

4 结 论

由于探测器 $P-I$ 特性的非线性,当探测器光敏面接收光功率大于 34 mW/cm^2 时,光生电流基本不随光功率的变化而变化,进入响应度饱和区,导致

系统幅频响应降低, 带宽减小。在白光功率为 77 mW/cm^2 的情况下, 通过加滤光片使探测器工作在线性区, 使系统幅频响应曲线在频率为 100 MHz 时抬升了 17 dB , 而系统的带宽则提高了约 3 MHz 。该研究有助于分析和指导 VLC 系统设计中关于接收端的光强控制、系统带宽的提高以及系统受外界光源干扰等问题, 对构建性能优良的 VLC 系统具有一定指导作用。

参 考 文 献

- Masako Akanegawa, Yuichi Tanaka, Masao Nakagawa. Basic study on traffic information system using LED traffic lights[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001, 2(4): 197–203.
- Toshihiko Komine, Masao Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.
- Hoa Le Minh, Zabih Ghassemlooy, Dominic O'Brien, et al.. Indoor gigabit optical wireless communications: challenges and possibilities[C]. 12th International Conference on Transparent Optical Networks, 2010. 1–6.
- Lubin Zeng, Hoa Le Minh, Dominic O'Brien, et al.. Equalisation for high-speed visible light communications using white-LEDs[C]. 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. 170–173.
- J Vutiü, C Kottke, S Nerreter, et al.. 125 Mbit/s over 5 m wireless distance by use of OOK-modulated phosphorescent white LEDs[C]. 35th European Conference on Optical Communication, 2009. 1–2.
- Jelena Vucic, Christoph Kottke, Stefan Nerreter, et al.. 230 Mbit/s via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs[C]. 2010 Conference on (OSA/OFC/NFOEC) Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010, 1–3.
- Jelena Vucic, Christoph Kottke, Stefan Nerreter, et al.. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(24): 3512–3518.
- Ahmad Helmi Azhar, Tuan-Anh Tran, Dominic O'Brien. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(2): 171–174.
- Toshihiko Komine, Shinichiro Haruyama, Masao Nakagawa. Bi-directional visible-light communication using corner cube modulator[C]. The 3rd IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications, 2003. 598–603.
- Kaiyun Cui, Gang Chen, Zhengyuan Xu, et al.. Traffic light to vehicle visible light communication channel characterization[J]. Appl Opt, 2012, 51(27): 6594–6605.
- Zhang Jiankun, Yang Yu, Chen Hongda. Modulation scheme analysis of indoor visible light communications[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405003.
- 张建昆, 杨宇, 陈弘达. 室内可见光通信调制方法分析[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405003.
- Gan Xionglong, Chen Changying, Wei Qifeng, et al.. Research on free space optical ethernet communication using visible light[J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(8): 33–35.
- 干雄龙, 陈长缨, 魏其峰, 等. 以太网自由空间可见光通信系统的研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(8): 33–35.
- Chen Zhiping, Liang Zhongcheng, Ma Zhengbei, et al.. Modulation technology of the visible light parallel communication system based upon 2D-bar code[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s105008.
- 陈治平, 梁忠诚, 马正北, 等. 基于二维码的可见光并行通信系统信号调制技术[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s105008.
- Yuanquan Wang, Yiguang Wang, Nan Chi, et al.. Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED[J]. Opt Express, 2013, 21(1): 1203–1208.
- Li Rongling, Shang Huiliang, Lei Yu, et al.. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050003.
- 李荣玲, 商慧亮, 雷雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050003.
- Rongling Li, Yuanquan Wang, Chanjuan Tang, et al.. Improving performance of 750-Mb/s visible light communication system using adaptive Nyquist windowing[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 080605.
- Wang Xuying, Liang Zhongcheng. Research of the visible light communication system based on MIMO technology[J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(1): 56–59.
- 王旭颖, 梁忠诚. 基于 MIMO 技术的可见光通信系统的研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(1): 56–59.
- Yang Yu, Zhang Jiankun, Liu Bo, et al.. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0805007.
- 杨宇, 张建昆, 刘博, 等. LED 非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0805007.
- Yongsheng Wu, Aiyang Yang, Lihui Feng, et al.. Efficient transmission based on RGB LED lamp for indoor visible light communication[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(3): 030601.
- S M Sze, K wok K Ng. Physics of Semiconductor Devices (Third Edition)[M]. Geng Li, Zhang Ruizhi, Transl. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008. 500–501.
- 施敏, 伍国珏. 半导体器件物理(第三版)[M]. 耿莉, 张瑞智, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2008. 500–501.
- Yang Yu, Liu Bo, Zhang Jiankun, et al.. A visible light communication system based on high-power illumination LED lamp[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(6): 803–807.
- 杨宇, 刘博, 张建昆, 等. 一种基于大功率 LED 照明灯的可见光通信系统[J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(6): 803–807.

栏目编辑: 王晓瑛