

蓝光发光二极管的响应特性

苏 晨¹ 陈贵楚¹ 郑树文¹ 贺龙飞¹ 皮 辉¹ 许毅钦^{1,2} 童金辉¹ 范广涵¹

(¹ 华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631)
² 广东省工业技术研究院, 广东 广州 510651)

摘要 利用方波脉冲调制和正弦波调制方法对自生长台阶形的蓝光发光二极管(LED)进行脉冲响应特性及调制带宽的测量分析;并利用 APSYS 软件计算了此种台阶形蓝光 LED 的能带图,计算表明,台阶形导带带阶提高了 43 meV,价带带阶下降了 36 meV。这一结果说明:采用台阶形电子阻挡层(EBL)的结构设计,有利于提高 LED 的发光功率和响应特性,这一性能的提高主要是由于更高的有源区载流子注入密度,进而提升有源区的电子-空穴辐射复合率。

关键词 光电子学;发光二极管;响应特性;调制带宽;有源区

中图分类号 O47 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0623002

Response Characteristic of Blue Light-Emitting Diodes

Su Chen¹ Chen Guichu¹ Zheng Shuwen¹ He Longfei¹ Pi Hui¹

Xu Yiqin^{1,2} Tong Jinhui¹ Fan Ganghan¹

¹ Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510631, China

² Industrial Technology Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510651, China

Abstract The impulse response characteristics and modulation bandwidth of blue light-emitting diode with a special-designed AlGaN staircase electron blocking layer are investigated by using square wave pulse and sine wave modulation methods. And the energy band diagrams of the blue light-emitting diode (LED) with this special-designed staircase electron blocking layer have been numerically investigated using the APSYS simulation software. The simulation shows that ΔE_c increases 43 meV and ΔE_v decreases 36 meV. The results show that blue light-emitting diode with a special-designed AlGaN staircase electron blocking layer has better light output power and response performance. The superior performance can be attributed to higher carrier injection density of the active region, which improves the electron/hole radiative recombination rate.

Key words optoelectronics; light-emitting diode; response characteristic; modulation bandwidth; active area

OCIS codes 230.3670; 230.0250; 250.5590

1 引 言

以 GaN 材料为基础的蓝光发光二极管(LED)由于拥有节能、寿命长等特性,被广泛应用于显示屏、背光源和照明等领域^[1]。随着近年来 LED 研究的深入,蓝光 LED 的响应特性也引起了人们的关注,学者

们期待透过 LED 的响应特性去探索蓝光 LED 的新功能技术,如以蓝光 LED 为基础的可见光照明与无线光通信技术相结合而产生的可见光通信技术^[2,3],由于该技术具有生物安全、无需无线电频谱认证、无电磁干扰和信息安全性高等优点而受到广泛关注,有

收稿日期: 2013-01-14; **收到修改稿日期**: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61176043)、广东省战略性新兴产业专项资金(2010A081002005, 2011A081301003, 2012A080304016)和华南师范大学青年教师科研培育基金项目(2012KJ018)资助课题。

作者简介: 苏 晨(1987—),男,硕士研究生,主要从事光电子材料与器件方面的研究。E-mail: 702154029@qq.com

导师简介: 范广涵(1945—),男,教授,主要从事半导体薄膜、发光材料与器件等方面的研究。E-mail: gfan@scnu.edu.cn (通信联系人)

望成为新一代智能照明的技术基石。相比传统的 650 nm 通讯波段,商用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光纤在 500 nm 左右有更宽的光学带宽和更小的传输损耗(0.09 dB/m 相对于 0.125 dB/m)^[4],与该波段半导体激光器相比,蓝绿 LED 具有直接电流可调、紧凑、可单片集成和成本低等优点,是 PMMA 光纤理想的通讯光源。蓝光 LED 所产生的高速脉冲光可以应用于生化分析、时间分辨率荧光光谱等生物、化学关键领域。蓝光 LED 的本身的响应特性决定了可见光通信光纤通信系统的可用带宽,决定了高速脉冲光的最小脉宽。所以,如何提高蓝光 LED 的频率响应,拓展其带宽是实现这些特殊应用必须要解决的难题之一。

目前,国际上有多项研究单位正开展高响应速率的蓝光 LED 的研究工作。例如日本 Kato 小组^[5]分析有源区的量子阱数量对蓝光 LED 响应特性的影响,结果表明单量子阱结构更容易获得高的响应速率和更好的温度特性,在 20 mA 条件下得到 250 Mbit/s 的光纤传输速率,但文献^[4]没有给出发光功率的相关数据。许晋玮课题组^[4,6]通过量子阱垒层局部 n 型掺杂、限制有源区面积、电极结构及表面钝化得到了 100 mA 下光响应速率宽度为 330 MHz 的蓝绿 LED,但器件光功率不高,仅适用于光纤通信;同时他们还证明小面积串联芯片可以解决大面积芯片电流拥挤及电容过大对蓝光 LED 响应特性的影响,通过控制芯片数量得到想要的器件工作电压和发光功率,但这对芯片一致性和工艺提出更高的要求。

而国内的研究人员对 LED 的关注,主要集中在 LED 的白光照明应用,关注 LED 光源的结构设计及工艺优化以提升其光效,对蓝光 LED 的光响应特性较少关注。

LED 的响应特性跟有源区注入浓度和有源区载流子复合过程密切相关^[7]。传统的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 电子阻挡层由于 Al 组分恒定,存在极化诱导效应造成能带弯曲,不能有效的阻挡电子溢出^[8];由于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 GaN 间大的价带带阶的差异,阻碍了空穴有效注入量子阱区^[8];同时,高 Al 组分的电子阻挡层(EBL)与量子阱最后一个垒层和 p-GaN 层由于较大的晶格不匹配而产生大的界面缺陷^[9]。此外,电子($200\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和空穴($10\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)迁移率的差异和 p-GaN 中低的空穴浓度造成了载流子在有源区的不对称分布^[10],从而造成有源区载流子浓度分布不均,降低电子-空穴对的有效辐射复合效率,影响了 LED 的发光功率和响应时间。Zhang 等^[9]研究了组分连续渐变的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 电子阻挡层(EBL),样品的倒易空间图

显示组分连续渐变的 EBL 降低了 EBL 和最后一个垒界面的晶格不匹配度,从而影响靠近 EBL 的部分量子阱的应力,减弱极化电场,增强对电子限制和空穴的注入;但连续改变 Ga 和 Al 的组分的生长方法,容易造成 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的 EBL Al 组分不稳定,增加器件制备的工艺难度^[11]。为了更深入分析电子阻挡层对 LED 发光功率的影响,本文通过金属有机化合物气相沉积(MOCVD)技术制备出具有台阶形 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 电子阻挡层的蓝光 LED,并通过方波脉冲和正弦波调制方法对该蓝光 LED 进行脉冲响应特性及调制带宽的测量分析。

2 实 验

2.1 样品

采用 MOCVD 系统在蓝宝石衬底上制备出传统结构 LED 和台阶形电子阻挡层结构 LED。生长 25 nm 厚低温 GaN 成核层、2.0 μm 的 u-GaN 和 2.0 μm 的 n-GaN,掺杂分子浓度为 $5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$;有源区由 6 个周期的量子阱组成,其中阱层为 3.0 nm 的 $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$,垒层为 10 nm GaN。为改善垒层质量,前 4 个垒层 n 型掺杂,掺杂分子浓度为 $5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$;在最后一个垒层上分别生长 1 号样品(15 nm 厚 p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 电子阻挡层)和 2 号样品(Al 组分设为 0.05-0.1-0.15-0.1-0.05 多层渐变的台阶形 p- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$,每层厚度为 3 nm),掺杂分子浓度为 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$;最后生长 170 nm p-GaN。LED 芯片尺寸为 $300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}$,并封装成 3020 的贴片 LED 管。

2.2 测试方法

LED 的光电特性测试采用杭州远方 PMS-50 型 LED 光电特性测试系统。LED 响应特性可用两种方法测量^[12,13],一种是方波脉冲调制法,另一种是正弦波调制法。前者直接用方波驱动 LED,后者需在正弦小信号上叠加一定的直流偏置。所用设备包括:Tektronix AFG3101 函数信号发生器(产生上升沿小于 5 ns 方波及 100 MHz 正弦波)、Tektronix TDS2024 示波器(上升沿小于 2.5 ns)、Tektronix TCP312 100 MHz 高频电流探头、New Focus 1601 1 GHz 高速光电探测器、ZFBT-4R2GW + 0.1 ~ 4.2 GHz 偏置器、LWDQGS PS303PM 直流偏置电源。图 1 为方波脉冲调制法测试系统示意图,图 2 正弦波调制法测试系统示意图。LED 是电流驱动器件,对电压变化非常敏感,用高频电流探头来确定流过 LED 的电流,该探头是利用霍尔效应测量流过导线的电流波形、幅值,测试精度为 1 mA。

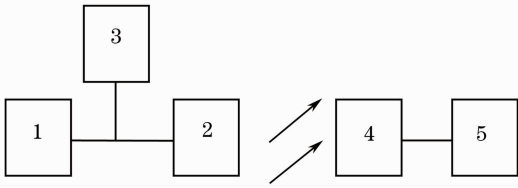


图 1 方波脉冲调制法测试系统示意图
Fig. 1 Setup for square wave modulation method

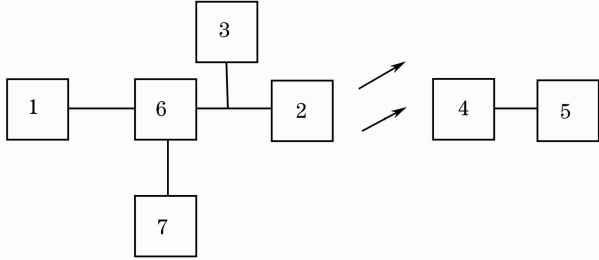


图 2 正弦波调至法测试系统示意图

Fig. 2 Setup for sine wave modulation method

图 2 中 1 为函数信号发生器; 2 为 LED 被测件; 3 为高频电流探头; 4 为高速光电探测器; 5 为示波器; 图 3 中 1 为函数信号发生器; 2 为 LED 被测件; 3 为高频电流探头; 4 为高速光电探测器; 5 为示波器; 6 为偏置器; 7 为直流偏置电源。

3 结果与讨论

3.1 EBL 结构设计对 LED 电压和光功率的影响

图 3 为样品 1 和样品 2 的正向直流 $I-V$ 曲线图。其中样品 2 在 20 mA 下的正向电压比样品 1 减小了 0.14 V, 并随电流增大其电压差异更明显。图 4 为样品 1 和样品 2 的能带图, 由图中可以看出样品 1 采用相同组分的 $Al_xGa_{1-x}N$ 的 EBL 由于与

GaN 晶格失配较大, 极化诱导效应显著, 造成能带更加倾斜, 相比样品 2 的导带带阶减小 43 meV, 使电子更容易溢出有源区, 影响有源区的电子-空穴对的辐射复合速率; 同时, 由于 EBL 电子阻挡层和 p-GaN 层之间存在极化电场, 导致 EBL 和 p-GaN 界面处价带形成空穴集聚的凹口, 而在 GaN 垒层与 EBL 界面处价带形成对空穴阻挡作用的尖峰^[14], 使价带带阶升高, 从而需要在更大的偏置电压下驱动载流子输运。样品 2 的台阶形 EBL 由多层渐变 Al 组分的 $Al_xGa_{1-x}N$ 构成, 相比样品 1 的正向电压值降低, 这应该是由于两侧的低铝组分 $Al_xGa_{1-x}N$ 层与 GaN 垒层及 p-GaN 层晶格适配较小, 可以起到缓冲的作用, 改善了界面质量, 降低了 EBL 和 p-GaN 层之间的压电极化电场, 使 GaN 垒层与 EBL 界面处价带的尖峰减弱, 与样品 1 相比, 样品 2 的价带带阶下降了 36 meV, 使空穴更容易注入有源区, 提高了空穴的有效注入率。

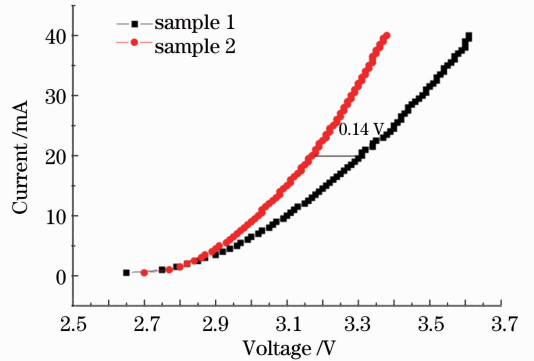


图 3 正向直流 $I-V$ 曲线

Fig. 3 $I-V$ characteristics of forward direct current

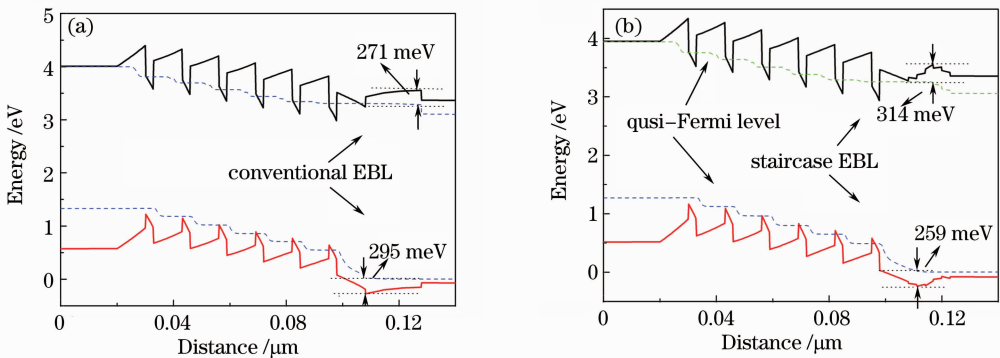


图 4 (a)样品 1 和(b)样品 2 的能带图

Fig. 4 Energy band diagrams of (a) sample 1 and (b) sample 2

图 5 给出了不同电流下样品 1 和样品 2 的发光功率随直流电流的变化曲线。采用台阶形 EBL 的样品 2 有更高的发光功率, 这是因为样品 2 的多层

渐变结果设计能很好改善有源区空穴的注入和对电子的阻挡, 优化载流子在有源区内的分布, 增加载流子的辐射复合, 提高 LED 的发光功率。

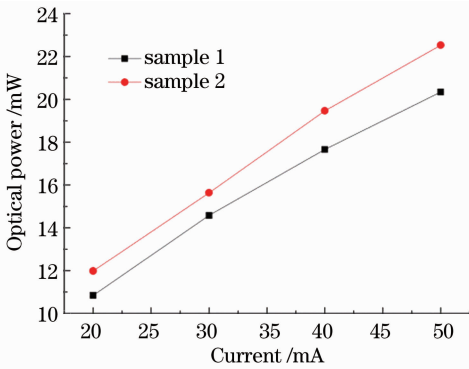


图 5 不同直流电流下的光发功率

Fig. 5 Output optical power under different direct currents

3.2 EBL 结构设计对 LED 响应特性的影响

为了获得蓝光 LED 的响应特性,测试显示方波驱动下的 GaN LED 上升、下降延迟时间都明显高于 GaAs 体系^[15],这可能与 GaN 材料本身更多的缺陷密度有关,因而提升蓝光 LED 的响应特性具有更大的挑战。图 6 给出样品 1 和样品 2 在 0~20 mA、频率 1 MHz、占空比 50% 的调制电流下的上升、下降时间,这里下降时间明显低于上升时间,这跟电压零偏时 LED 内部空间电场对存储电荷的反向抽取有关^[16],其中样品 2 的上升、下降时间明显低于样品 1,显示出样品 2 有更好的电子空穴注入特性,缩短了器件的充放电时间,提高了器件的响应特性。

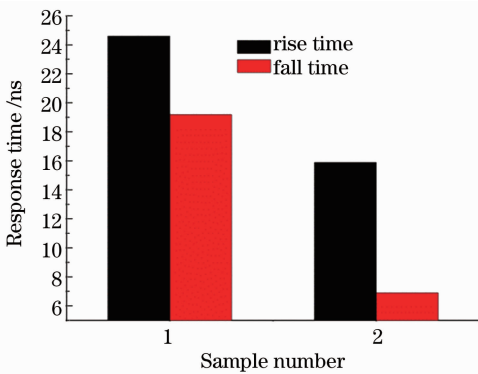


图 6 样品的上升时间和下降时间

Fig. 6 Rise time and fall time of sample

为了进一步研究样品 1 和样品 2 的响应特性,比较了不同偏置电流下器件的 3 dB 响应曲线和带宽,由于存在一定的预偏置,器件内部电容的影响减弱。图 7 为 20 mA 和 50 mA 下样品 1 和样品 2 的响应曲线,样品 2 在频率范围内比样品 1 更平坦,说明其频率特性优于样品 1。

图 8 为样品 1 和样品 2 在不同偏置电流下的响应带宽。样品 2 在 20~50 mA 范围的电流偏置对

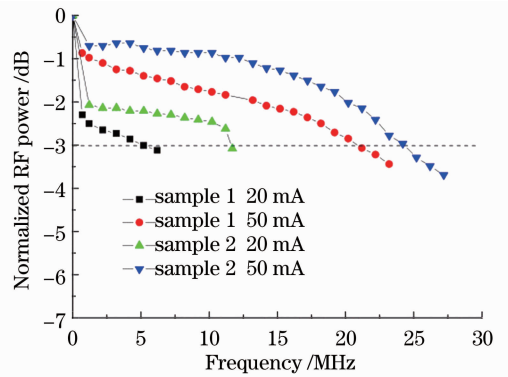


图 7 样品 1 和样品 2 的响应曲线

Fig. 7 Frequency responses curves of sample 1 and sample 2

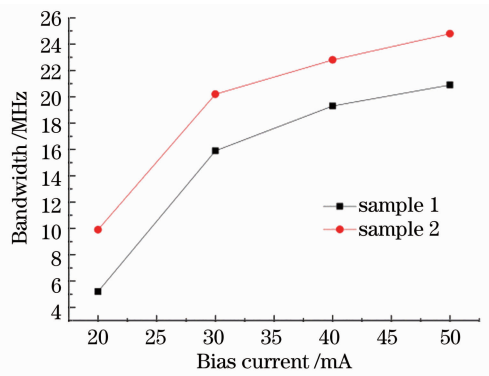


图 8 样品不同偏置电流下带宽

Fig. 8 Bandwidth under different bias currents

应带宽都高于样品 1。根据有源区复合的双分子复合模型,如忽略非辐射复合的影响,LED 的响应带宽跟有源区注入载流子密度可近似表达为^[15]

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{JB}{ed} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 J 为有源区注入载流子密度, B 为辐射复合常数, d 为有源区厚度。因为样品 2 可提高空穴注入率,使相同电流下有源区获得了更高的注入空穴密度,并有效限制电子的溢出,从而使有源区在大偏置电流下仍保持有较大的注入电流密度,由(1)式可知此时对应的响应带宽更大。

通过比较上述样品 1 和样品 2 的光电特性,可见采用台阶形 EBL 电子阻挡层结构设计,更有利于提高有源区注入载流子密度,既改善了蓝光 LED 的响应特性,又能增加 LED 的光功率输出。

4 结 论

通过 MOCVD 系统制备出台阶形 $Al_xGa_{1-x}N$ EBL 的蓝光 LED,通过与传统 EBL 的蓝光 LED 作电学、发光功率和响应特性测试比较分析,得知此种

台阶形 EBL 的 LED 在电学特性、发光功率和响应特性等方面均有提升, 优化 EBL、改善载流子注入特性是提高蓝光 LED 响应特性及兼顾发光功率的有效方法。

参 考 文 献

- 1 Qian Minhua, Lin Yandan, Sun Yaojie. Photo-electro-thermal-life theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0823001
钱敏华, 林燕丹, 孙耀杰. 基于光-电-热-寿命理论的 LED 寿命预测模型[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0823001
- 2 Li Rongling, Tang Chanjuan, Wang Yuanquan *et al.*. A MISM-OFDM visible light communication system using LED based on subcarrier multiplexing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1105001
李荣玲, 汤婵娟, 王源泉 等. 基于副载波复用的多输入单输出正交频分复用 LED 可见光通信系统[J]. *中国激光*, 2012, **39**(11): 1105001
- 3 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
- 4 J. W. Shi, J. K. Sheu, C. H. Chen *et al.*. High speed GaN-based green light-emitting diodes with partially n-doped active layers and current-confined apertures [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, **29**(2): 158~160
- 5 Satoru Kato, Osamu Fujishima, Takahiro Kozawa *et al.*. High speed GaN-based green LED for POF [J]. *R&D. Review of Toyota CRDL*, 2005, **40**(2): 7~10
- 6 J. W. Shi, J. K. Sheu, C. K. Wang *et al.*. Linear cascade arrays of GaN-based green light-emitting diodes for high-speed and high-power performance [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(18): 1368~1370
- 7 R. H. Saul. Recent advances in the performance and reliability of InGaAsP LED's for lightwave communication systems [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1983, **30**(4): 285~295
- 8 S. H. Han, D. Y. Lee, S. J. Lee *et al.*. Effect of electron blocking layer on efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(23): 231123
- 9 Ning Zhang, Zhe Liu, Tongbo Wei *et al.*. Effect of the graded electron blocking layer on the emission properties of GaN-based green light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(5): 053504
- 10 W. Götz, N. M. Johnson, C. Chen *et al.*. Activation energies of Si donors in GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(22): 3144~3146
- 11 Shoujinn Chang, Shengfu Yu, Rayming Lin *et al.*. InGaN-based light-emitting diodes with an AlGaIn staircase electron blocking layer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(19): 1737~1740
- 12 Ministry of Electronic Industry Standard of the People's Republic of China SJ2658. 10-86 The Testing Method of Semiconductor Infrared Light Emitting Diode SJ2658. 10-86 [S]. Beijing: China Standard Press, 1986
- 13 China Optical and Optoelectronics Manufactures Association SJ/T 11394-2009 Measure Methods of Semiconductor Light Emitting Diodes SJ/T 11394-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009
- 14 Yunyan Zhang, Guangrui Yao. Performance enhancement of blue light-emitting diodes with AlGaIn barriers and a special designed electron-blocking layer [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(9): 093104
- 15 E. F. Schubert. Light-emitting Diodes (second edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 397~399
- 16 R. Wirth, B. Mayer, S. Kugler *et al.*. Fast LEDs for polymer optical fiber communication at 650 nm [C]. *SPIE*, 2005, **6013**: 60130F

栏目编辑: 韩峰