

量子阱厚度和势垒掺杂对大功率 AlGaInP LED 发光效率衰减特性的影响^①

李玉强 刘 超 柴永灏 牛萍娟 于莉媛 宁平凡

(天津工业大学 电气工程与自动化学院、天津市电工电能新技术重点实验室
大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心,天津 300387)

摘 要 GaAs 基 AlGaInP LED 是目前光电子器件研究领域的国际前沿和热点,伴随工业制备技术的日趋成熟,其稳定性和发光效率都得到了明显的提升.但是,在超高电流下工作的 AlGaInP 大功率芯片仍存在着发光效率衰减严重的问题.目前已知的影响因素主要是载流子的溢出和俄歇复合的加强与否.本文通过分析具有不同势阱厚度和势垒中不同浓度的 P 型掺杂的 AlGaInP 样品的光致发光图谱变化与电流密度和辐射效率的关系,发现在势阱厚度为 20 nm,势垒 P 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,可以显著改善大功率 LED 的高温衰减特性.

关键词 大功率;AlGaInP;LED; 俄歇复合;载流子溢出

中图分类号 TN383+.1

文献标识码 A

0 引言

随着发光二极管(LED)量子效率的不断提高,GaN 基蓝绿光 LED 已经在照明领域取得了优秀的成绩^[1,2].随着用户体验度不断的提高,高显色指数白光越来越受到市场的青睐,而 AlGaInP LED 和 InGaN LED 相结合的方式是得到高显色指数白光照明的通用方式,这使得 AlGaInP LED 又重新受到关注.在照明领域,光电子器件能否走向市场并取代传统照明的最重要因素是亮度和成本,为了满足亮度和成本的需求,LED 需要用更小的尺寸来达到更高的亮度^[3,4].这样就需要用更高的电流来驱动,随着 LED 的工作电流密度变大,进而带来更大的热效应,其结温增速也随之增加^[5-9].LED 在大电流密度和高结温下工作时,其外量子效率或光电转换效率迅速衰减,这种现象称其为 Droop 效应. Droop 效应是 LED 光效提升的一个巨大障碍,而高温使得 Droop 效应更加明显.当前热 Droop 效应在 GaN 蓝绿光 LED 中的研究比较广泛^[1,2],然而其产生机理仍然不是很清晰,主要的说法有:(1) 电子和空穴的动能不对称造成的载流子泄漏;(2) 俄歇复合;(3) PN 节的热效应;(4) 电流的丛聚效应;(5) 缺陷重组和自发复合饱和等^[10-12],主流的研究结论更倾向于载流子泄漏与俄歇复合.在 AlGaInP 红光 LED 和 InGaN 蓝绿光 LED 中均存在热 Droop 的现象^[12,13],本文在大功率外延片结构的基础上,制备了 6 个不同的样品,分别设计了不同的量子阱厚度和不同浓度的 P 型势垒掺杂,来研究俄歇复合与载流子泄漏对发光效率的影响.通过双晶衍射、光致发光和电致发光等测试方法对样品进行了分析,发现 LED 势阱厚度在 20 nm 时量子效率的衰减得到了改善.当势垒的掺杂浓度在 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,量子效率的衰减得到更大幅度的改善,同时也说明在大电流密度高结温条件下,电子溢出占据 AlGaInP LED 效率 Droop 的主导地位.

① 收稿日期:2018-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(11605145);天津市自然科学基金项目(18JJCQNJC03700,15JJCQNJC41800);天津市教委科研项目-自然科学(2018KJ210,2017ZD06,2018ZD15);吉林大学超硬材料国家重点实验室开放课题项目(201709)资助

通讯作者:牛萍娟,女,汉族,博士,教授,博士生导师,研究方向:新型半导体光电器件,E-mail:niupingjuan@tjpu.edu.cn.

1 实验设计

本文所有样品均在德国 Aixtron 2800G4 机台上生长制备, Ga、Al、In、Mg 和 Zn 所使用的 MO 源分别为: TMGa、TMAI、TMIn、MgCP2 和 DEZn, 载气为高纯 H_2 . 反应室温度 $700^\circ C$, 以(100)偏(111) 15° GaAs 为基板进行外延生长. 样品结构草图如图 1 所示.

2 实验结果与分析

2.1 势阱和势垒厚度的影响

由俄歇复合寿命公式可知^[14], 俄歇复合与材料带隙成反比, 与器件的工作温度和载流子浓度以及阱区和垒区的电子波函数交叠程度成正比. 由于阱区与垒区的电子波函数交叠程度还影响内量子效率, 因此需要找到最佳值. 本实验选取的材料里具有相同的带隙和载流子浓度, 在相同的工作温度条件下, 通过改变其阱和垒的厚度, 进一步改变波函数交叠情况, 找到俄歇复合最低参数条件^[15,16]. 共进行三组样品的生长, 样品 A、B 和 C 在其他条件相同的情况下, 通过改变阱和垒的厚度, 同时对阱中的 Al 组分进行调节, 保证 3 个样品的峰值波长基本相同. 三个样品涉及的主要参数如表 1 所示. 对外延片进行辐射效率测试使用的是 SP90155 光影像检测仪; 光致发光光谱(PL)的测量使用的是 RPM2000 设备; X 光衍射(XRD)曲线的测量使用的是帕纳科 X Pert Pro Mrd XL 设备.

图 2 是 A、B 和 C 三个样品测得的室温 PL 光谱. 从三个样品的光致发光强度上可见, 随着量子阱的厚度加厚, 激发中心随之变多, 其 PL 强度随之增强. LED 器件的 PL 谱因上面的覆层太多, 其发光强度的误差较大, 这里不做量化分析. 从半峰宽上看, 三个样品的差异不大, 显示在无应力的情况下阱宽的变化未对晶格质量产生影响. 三个样品的峰值都比较准确的落在了 607 ± 2 nm 内, 不会对实验结果的分析产生影响.

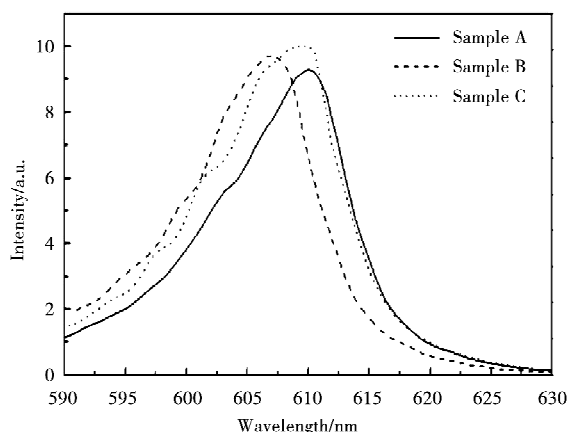


图 2 A、B 和 C 样品的室温光致发光图谱

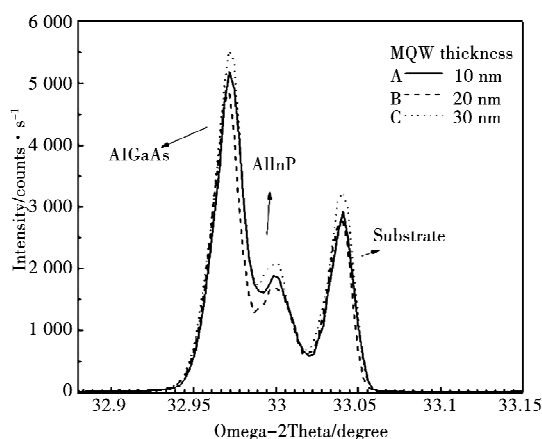


图 3 A、B 和 C 样品的 X 射线衍射谱

图 3 是通过 X 射线扫描(004)面测得的衍射图. X 轴最左边峰强最大值处对应的是 N 型 AlGaInP 的电流扩展层, 该层进行了负应变调节弥补外延的翘曲现象, 中间的峰位为 NP 型 AlGaInP 的峰, 最右边为 GaAs 衬底峰, 再向两边则是 MQW 的衍射峰. MQW 主峰应该和衬底重合, 由于无应变 MQW 的整体厚度和电流扩展层相比相差较多, 所以其强度比较弱, 未能很好的显示出来, 可以从衬底峰的半宽和衍射峰清晰度的判断 MQW 的状况, 从上图判断 MQW 的生长和匹配控制的都比较好.

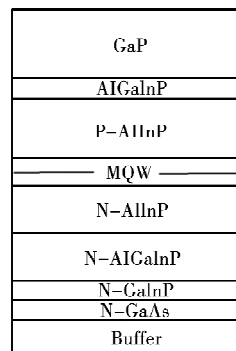


图 1 AlGaInP LED 结构草图

表 1 样品 A、B 和 C 为不同量子阱厚度的三个样品

Sample	Layer	Component	Thickness/nm
A	Well	$(Al_{0.1}Ga_{0.9})_{0.5}In_{0.5}P$	10
	Barrier	$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$	10
B	Well	$(Al_{0.1}Ga_{0.9})_{0.5}In_{0.5}P$	20
	Barrier	$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$	20
C	Well	$(Al_{0.1}Ga_{0.9})_{0.5}In_{0.5}P$	30
	Barrier	$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$	30

图 4 是由 IS 机台测得的在 85℃ 恒温下的电流密度与发光效率的曲线. 从样品 A 和 B 的曲线上可以判断,随着 MQW 厚度的增加,发光效率在大电流密度下的衰减变慢,而样品 C 则出现了效率降低的情况,怀疑是随着阱的厚度增加,俄歇复合有减弱的趋势^[17],但是电子的波函数交叠的减少导致量子效应也在减少,所以保持两个因素的平衡时,阱厚度需控制在 20 nm 左右.

2.2 势垒掺杂浓度的影响

载流子溢出^[18]是另外一个影响大功率 LED 高温大电流下效率衰减的主要因素. 影响原因是空穴的有效质量大于电子的有效质量,空穴迁移速率较低,在高温和高电流密度下电子过多的迁移到 P 型去复合,导致发光效率的降低. 本实验制备了三个样品 D、E 和 F,它们均为在得到了最优阱垒厚度 200 nm 的基础上,分别在垒上进行了不同浓度的 P 型掺杂所得. 掺杂源选用 DEZn,主要参数如表 2.

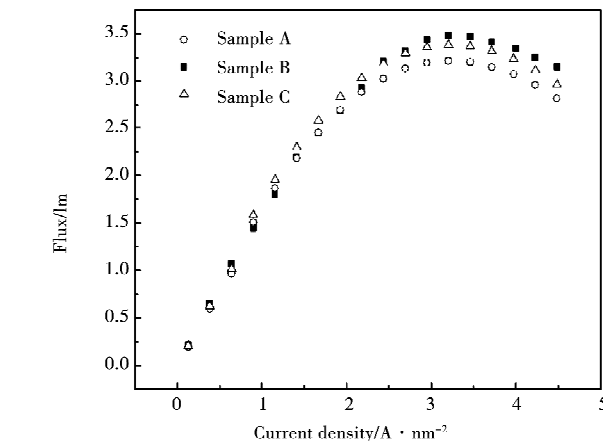


图 4 358K 温度下样品 A、B 和 C 电流密度和辐射效率的关系

表 2 样品 D、E 和 F 为不同浓度 P 型掺杂的三个样品

Sample	layer	Component	Concentration/cm ⁻³
D	Well	(Al _{0.1} Ga _{0.9}) _{0.5} In _{0.5} P	Un-doped
	Barrier	(Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P	5 × 10 ¹⁶
E	Well	(Al _{0.1} Ga _{0.9}) _{0.5} In _{0.5} P	Un-doped
	Barrier	(Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P	1 × 10 ¹⁷
F	Well	(Al _{0.1} Ga _{0.9}) _{0.5} In _{0.5} P	Un-doped
	Barrier	(Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P	5 × 10 ¹⁷

图 5 是三个样品的 PL 图谱,在相同的测试条件下,样品 E 出现了强度饱和的现象. 当有氧和 Si 掺杂引入有源区的时候会出现强度饱和的相同现象^[19],我们判断该情况的出现可能是由于 Zn 扩散到了势垒中^[20,21],产生了其它浅能级,但真实机理还需要进一步的研究.

图 6 是 D、E 和 F 三个样品的(004)面衍射峰分布,其峰位分布和 A、B、和 C 三个样品一致.

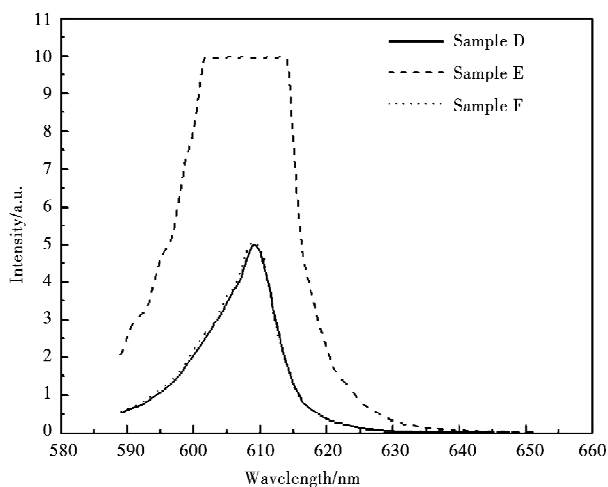


图 5 样品 D、E 和 F 的光致发光图

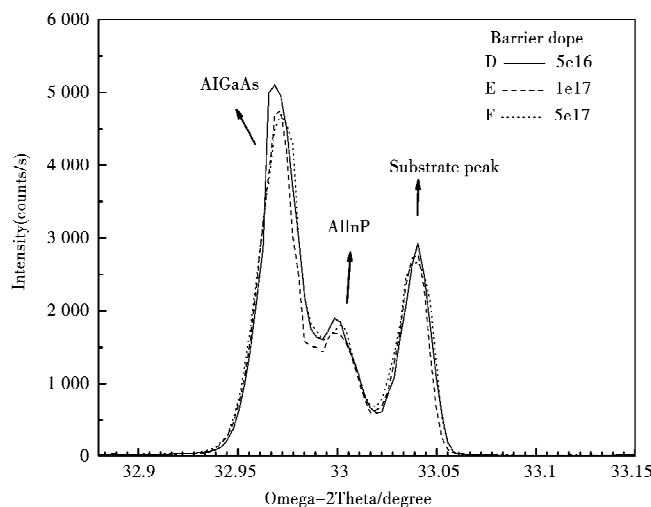


图 6 样品 D、E 和 F 的 X 射线衍射谱

图 7 是三个样品在 358K 温度下发光效率和电流密度曲线. X 轴为注入到芯片的电流密度, Y 轴为辐射效率. 从曲线上可见,在 5 × 10¹⁶ cm⁻³ 浓度的掺杂时,衰减情况出现了小幅度的减弱;掺杂到 1 × 10¹⁷ cm⁻³ 时,在小电流时出现了效率低的情况,当电流密度大于 2.5 A · mm⁻² 时,发光效率的衰减得到大幅改善. 原因可能是:在小电流状态下,电子和空穴的迁移速率差距体现的不够明显,而 P 掺杂加高了势垒,使得电子

的迁移受到影响,致使量子效率下降^[21];随着电流密度的增加,电子出现过剩,空穴的迁移不足以构成效率下降的主要因素,而P掺杂增大了空穴在垒中迁移速率,所以在高电流密度下,垒区P掺杂的效果得到了显现.但是F样品将P掺杂提高到 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,量子效率出现了大幅下降的情况.结合从PL图谱上观察到的异常情况可推断, $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的浓度不会对垒的晶格质量有大的影响^[22,23].量子效率下降的原因应该是过多的Zn扩散到阱中,使得阱垒界面不够尖锐,产生了过多的隧穿电子.可见垒中掺杂可以有效改善大电流的亮度衰减,最佳的掺杂浓度在 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 左右.

3 结论

大电流密度高结温会导致AlGaInP红光LED器件的量子效率衰减,其主要原因为俄歇复合与载流子的泄漏.本文通过两组实验对具有不同外延结构的器件进行对比性研究.第一组设计了不同的量子阱厚度,发现量子阱厚度为20 nm时,在高电流密度下效率衰减得到改善.第二组实验在垒上进行P型掺杂,发现在电流密度大于 $2.5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 条件下,随着P型掺杂的升高可以大幅度改善效率衰减;当掺杂浓度控制在 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,饱和电流密度可达 $4.2 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$;超过该浓度后,由于Zn掺杂向势阱内的扩散加重,影响了器件的阱垒的界面质量,会降低器件的量子效率.上述结论同时表明在该芯片尺寸下电流密度超过 $2.5 \text{ A}/\text{mm}^2$ 时,电子溢出是导致AlGaInP LED量子效率下降的主要原因.

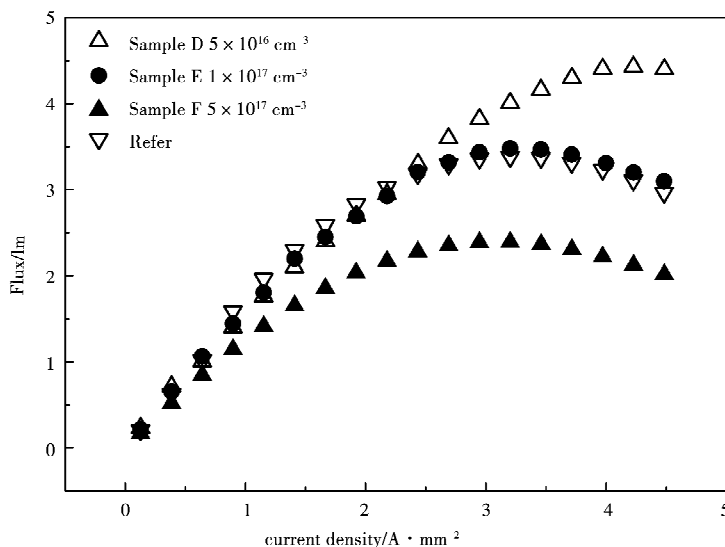


图7 在358K下样品D,E和F电流密度和辐射效率的关系

参 考 文 献

- [1] Ye D Q, Zhang D Y, Wu C Y, et al. Using a compositionally step graded hole reservoir layer with hole accelerating ability for reducing efficiency droop in GaN-based LED [J]. AIP Adv, 2017, 7: 055016.
- [2] Kim S, Cho S, Jeong J, et al. InGaN/GaN light-emitting diode having directhole injection plugs and its high-current operation [J]. Opt Express, 2017, 25(6): 6440.
- [3] Qi Y D, Lu G J, Miao Z L, et al. The research progress of Efficiency droop on GaN based blue LED[J]. Technol Enterp, 2014, 22: 134-137.
- [4] Zhang Z, Zhang Y, Bi W, et al. A charge inverter for III-nitride light-emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2016, 108 (13): 613.
- [5] Lin Y, Gao Y, Lu Y, et al. Study of temperature sensitive optical parameters and junction temperature determination of light emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(20): 202108.
- [6] Chen Y X. Relationship between luminous efficiency and junction temperature of AlGaInP high power LED[J]. Acta Phys Sin-ch Ed, 2011, 60(8): 619-624.
- [7] Wang J, Huang X, Liu L, et al. Effect of Temperature and Current on LED Luminous Efficiency[J]. Chin J Lumin, 2008, 29(2): 358-362.
- [8] Yanagisawa T. The degradation of GaAlAs red light-emitting diodes under continuous and low speed pulse operations[J]. Microelectron Reliab, 1998, 38 (10): 1627-1630.
- [9] Wang Z, Wei T S, Zhao P P, et al. The Influence of Quenching and Partitioning Heat Treatment on Ductile Iron[J]. Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition), 2017, 30(3): 51-55.
- [10] Huang C F, Su Y F, Lin C B, et al. Research on efficiency droop mechanism and improvement in AlGaInP Ultra-High-Brightness LEDs using the transient measurement method[J]. Solid State Electron, 2014, 93(3): 15-20.
- [11] Wang B B, Gao Y J, Gao C C. Passively Q-switched and Mode-locked Nd:GYSGG Laser Using Molybdenum Disulfide (MoS_2) as a Saturable Absorber[J]. Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition), 2017, 30(2): 30-34.
- [12] Olsson A. Temperature dependence of droop onset in optically pumped intrinsic InGaAs/InP heterostructures[J]. Appl Phys Lett,

- 2013, 102(8): 081123.
- [13] Shi J W, Kuo F M, Lin C W, et al. Investigation of the Efficiency-Droop Mechanism in Vertical Red Light Emitting Diodes Using a Dynamic Measurement Technique[J]. IEEE photonic Tech L, 2011, 23 (21):1585-15.
- [14] Taeng M C, Wu D S, Chen C L, et al. Performance comparison of p-side-up thin-film AlGaInP light emitting diodes with aluminum doped zinc oxide and indium tin oxide transparent conductive layers[J]. Opt Mater Express, 2016, 6(4):1349-1357.
- [15] Xie J Q, N X F, Fan Q, et al. On the efficiency droop in InGaN multiple quantum well blue light emitting diodes and its reduction with p-doped quantum well barriers[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(12): 121107.
- [16] Stevenson R. The LEDs dark secret[J]. IEEE Spectrum, 2009, 46(8): 26-31.
- [17] Pu H Z, Chen C J. Auger recombination and its effect on T₀ in GaInAs/AlInAs QW LD[J]. Semicond Optoelectron, 1998, 6: 356-361.
- [18] Guo C Z, Huang Y Z. The Influence of heterojunction carrier leakage on threshold temperature dependence of InGaAsP semiconductor laser[J]. J Semicond, 1987, 8(2):122-129.
- [19] Dutta N K. Calculation of Auger rates in a quantum well structure and its application to InGaAsP quantum well lasers[J]. J Appl Phys, 1983, 54(3): 1236-1245.
- [20] Li S, Mo C, Wang L, et al. The influence of Si-doping to the growth rate and yellow luminescence of GaN grown by MOCVD[J]. J Lumin, 2001, 93(4): 321-326.
- [21] Xiao D Y, Xu S H. Theoretical and experimental study of deep Zn diffusion through InGaAsP epitaxial layer InP[J]. J Infrared Millim W, 1992(2): 149-152.
- [22] Tan C H, Fan G. Effect of barrier layer Si doping on the performance of AlGaInP/GaInP multiple quantum wells[J]. Semicond Tech, 2005, 30(2):10-12.
- [23] Lee S M, Seong T Y, Lee R T, et al. Effects of Si doping on ordering and domain structures in GaInP[J]. Appl Surf Sci, 2000, 158 (3): 223-228.

Effects of the QW Thickness and QB Doping on Efficiency Attenuation Characteristics of High Power LED AlGaInP

LI Yu-qiang LIU Chao CHAI Yong-hao NIU Ping-juan YU Li-yuan NING Ping-fan

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, Engineering Research Center of High Power Solid State Lighting Application System of Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract Currently, GaAs based AlGaInP LED (Light emitting diode) is an international frontier and hotspot in the field of optoelectronic devices, and its stability and luminous efficiency have been improved obviously with increasingly mature industrial preparation technology. However, the attenuation of the luminous efficiency is still a very serious question for AlGaInP high power chip at high current. The known factors of effect are mainly the carrier overflow and Auger recombination enhancement. Relationship between changes in photoluminescence spectra with current density and radiation efficiency have been analyzed by the different QW (quantum well) thickness and QB (quantum barrier) doping concentration for AlGaInP LED. The high temperature attenuation is improved obviously for QB doping concentration at $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and 20 nm QW thickness.

Key words high power; AlGaInP; LED; auger recombination; carrier overflow