

GaN基高压发光二极管理想因子与单元个数关系研究

白俊雪 郭伟玲 孙捷 樊星 韩禹 孙晓 徐儒 雷璐

Research on the relationship between ideality factor and number of units of GaN-based high voltage light-emitting diode

Bai Jun-Xue Guo Wei-Ling Sun Jie Fan Xing Han Yu Sun Xiao Xu Ru Lei Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 017303 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.017303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.017303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Si\(110\)和Si\(111\)衬底上制备InGaN/GaN蓝光发光二极管](#)

[InGaN/GaN blue light emitting diodes grown on Si\(110\) and Si\(111\) substrates](#)

物理学报.2014, 63(20): 207304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.207304>

[含有量子点的双波长LED的光谱调控](#)

[The spectrum-control of dual-wavelength LED with quantum dots planted in quantum wells](#)

物理学报.2013, 62(11): 117304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.117304>

[高迁移率非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管的制备与特性研究](#)

[The preparation and characteristics research of high mobility amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors](#)

物理学报.2013, 62(7): 077302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.077302>

[指数掺杂反射式GaAlAs和GaAs光电阴极比较研究](#)

[Comparison between exponential-doping reflection-mode GaAlAs and GaAs photocathodes](#)

物理学报.2013, 62(3): 037303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037303>

[GaN基LED量子阱内量子点发光性质的模拟分析](#)

[Theoretical study of luminance of GaN quantum dots planted in quantum well](#)

物理学报.2012, 61(22): 227303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.227303>

GaN基高压发光二极管理想因子与单元个数关系研究*

白俊雪 郭伟玲[†] 孙捷 樊星 韩禹 孙晓 徐儒 雷珺

(北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2014年7月4日收到; 2014年9月10日收到修改稿)

理想因子能够反映电流、载流子泄漏以及缺陷导致的非辐射复合等现象. 针对目前报道的 GaN 基发光二极管的理想因子的问题, 通过对高压发光二极管 $I-V$ 曲线的拟合计算出了理想因子 n 的数值, 分别讨论了 12 V, 19 V, 51 V 和 80 V GaN 基高压发光二极管的理想因子与其结构中串联晶粒个数的关系, 分析了理想因子大小与光谱半高宽 (FWHM) 的变化关系. 另外, 还对电流拥挤效应对理想因子的影响进行了分析. 结果表明: 高压发光二极管理想因子 n 随串联晶粒个数的增加几乎为线性规律增加, 高压发光二极管理想因子 n 是由其串联单元理想因子之和构成的. 这对 GaN 基高压发光二极管理想因子的研究具有参考价值.

关键词: GaN 基发光二极管, 高压, 理想因子, 串联单元

PACS: 73.61.Ey, 73.40.-c, 73.90.+f, 73.43.cd

DOI: 10.7498/aps.64.017303

1 引言

近些年, 氮化镓 (GaN) 基发光二极管 (LED) 有了很大的发展, 被广泛应用于交通信号灯指示、大屏幕全彩显示、汽车照明、室内照明、夜景装饰以及手机背光源等领域, 并且还是照明用白光 LED 光源的关键器件^[1]. 然而目前发现在蓝宝石衬底上外延生长的 GaN 基蓝光 LED 的理想因子有文献^[2-5]报道大于 2, 而按照 Sah-Noyce-Shockley^[6]理论, pn 结中当载流子运输机理为扩散电流时, 其理想因子为 1, 当载流子运输机理为复合电流时, 其理想因子为 2, 理想因子能够反映电流、载流子泄漏以及缺陷导致的非辐射复合等现象. 高压 LED 是新一代的器件, 是把一个芯片的外延层分割成数个单元, 然后经互联电极将它们串联起来的一类器件. 高压 LED 具备普通 LED 的共性, 同时在相同功率下, 由于工作电压高, 驱动电流小的优势而备受用户欢迎.

国内外的一些研究报道中介绍了蓝宝石衬底

GaN 基 LED 的理想因子大的原因, 总体上有三种原因: 1) 衬底与外延层的晶格常数相差很大, 使得外延层中存在大量的位错缺陷, 提出载流子的主要运输机理为隧道复合而不是扩散复合^[7-10]. 2) 文献^[2]分析了 GaN LED 大的理想因子的机理并提出了一个模型: 认为实际测出的理想因子是其 LED 结构 (金属半导体接触, 异质结, 同质结等) 各部分理想因子之和. 3) 文献^[11]指出理想因子大的原因是由于电流拥挤效应的影响.

蓝宝石衬底 GaN 基高压 LED 理想因子的研究尚未见报道, 本论文通过实验对几种高压 LED 的理想因子进行了研究, 分析了高压 LED 的理想因子与串联单元个数以及光参数的关系.

2 理论分析

2.1 理想因子的计算

理想二极管的 $I-V$ 特性方程为

$$I = I_s [\exp(qV/nkT) - 1], \quad (1)$$

* 国家科技支撑计划 (批准号: 2011BAE01B14) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn

其中 I_s 为反向饱和电流, q 为电子电荷, k 为波尔兹曼常熟, n 为理想因子, 室温时, $kT/q = 0.02569$ V, 在外加电压大于零点几伏时, (1) 式可以简化为

$$I = I_s \exp(qV/nkT). \quad (2)$$

LED 在制造过程中, 常常形成并不需要的寄生电阻, 并且大功率 LED 工作在额定电流时, 欧姆接触引起的压降也不能忽略, 则 (2) 式需要修正, 假设串联电阻为 R_s , 则实际 LED 的 I - V 特性为

$$V_F = R_s I + (\ln I - \ln I_s)nkT/q. \quad (3)$$

对 (3) 式两边对电流 I 进行求导后并乘以电流 I 可得

$$IdV_F/dI = R_s I + nkT/q, \quad (4)$$

IdV_F/dI 与正向电流 I 成线性关系, 本文采用最小二乘法算法进行实测点的直线拟合, 直线斜率为 R_s , 理想因子 n 由拟合曲线在纵轴上的截距 b 来获得.

2.2 高压 LED 结构分析

高压 LED 是一种芯片结构复杂的 LED, 是在同一衬底上制造出多颗相互隔离的小功率 LED, 然后采用半导体工艺制造互联电极将他们串联在一起.

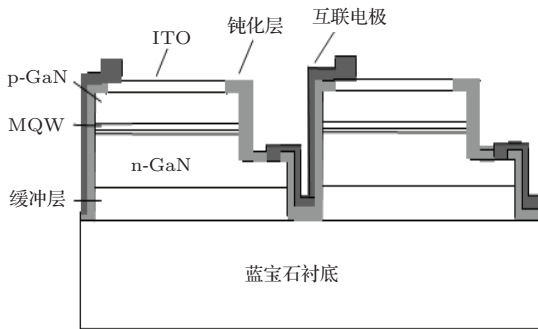


图1 高压 LED 结构示意图

那么

$$V_F = \sum_i V_{Fi}, \quad (5)$$

$$= \sum_i [R_{si}I + (\ln I - \ln I_s)n_i kT/q]. \quad (6)$$

化简得到

$$IdV_F/dI = \sum_i R_{si}I + \sum_i n_i kT/q. \quad (7)$$

可以看出, 画出 IdV_F/dI - I 曲线, 拟合得出曲线在纵轴上的截距就可以算出各个串联晶粒二极管的理想因子总和, 即 $n = b/0.02569$.

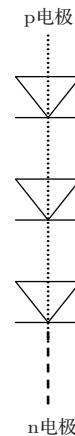


图2 高压 LED 等效电路图

3 实验

本实验所用的高压芯片是从国内某公司购买来的蓝宝石衬底 GaN 基 LED 芯片, 其中 12 V 的高压芯片是本实验室设计并制备的. 为防止封装时引起的缺陷对理想因子的影响^[10], 将购买来的裸芯器件直接压焊在管座上而没有进行环氧树脂封装. 测试设备为 Keithley 仪器公司的 2430 和浙大三色的 LED 光电色热测试系统.

表1 几种高压 LED 芯片的情况

电压/V	串联晶粒 个数	额定工作 电流/mA	单个发光单元 尺寸/ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	额定工作电流下的 电流密度/(A/cm ²)
12	4	20	250×240	33.33
19	6	15	150×250	40
51	16	20	170×340	35
80	25	15	190×190	41.67



图3 (a), (b), (c), (d) 分别为 12 V, 19 V, 51 V, 80 V 高压 LED 的结构图

4 实验结果与讨论

4.1 高压 LED 电学特性

高压 LED 的 $I-V$ 特性曲线如图 4 所示, 在 20 mA 正向电流工作时, 12 V 高压 LED 的工作电压为 12.49 V; 在 15 mA 正向电流工作时, 19V 高压 LED 的工作电压为 17.04 V; 在 20 mA 正向电流工作时, 51 V 高压 LED 的工作电压为 48.84 V; 在 15 mA 正向电流工作时, 80 V 高压 LED 的工作电压为 77.04 V.

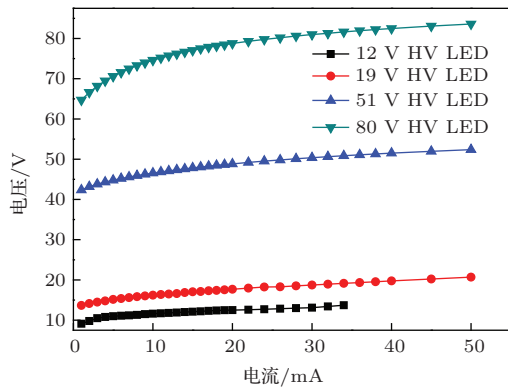


图4 高压 LED $I-V$ 特性曲线

不同范围的注入电流会使 LED 的 pn 结内部电流密度分布发生变化, 从而影响 LED 的 $I-V$ 特性. 小电流注入时, 电流运输机理主要由扩散电流与空间电荷区的复合电流主导; 随着注入电流的增加, 隧穿电流复合机理将会占据主导, 成为决定 LED 内部电流传输的重要因素, 从而引起理想因子呈现不同的变化趋势 [12]. 理想因子随注入强度的变化一般为随注入强度的增加先减小, 然后趋于平衡, 随着注入强度的进一步增大, 理想因子又逐渐增大 [7,12]. 实际的 LED 与理想二极管存在差异, 在正常工作电流范围内属于较大注入强度, 此时 LED

有源区受压电极化和自发极化的影响发生电流隧穿等效阻抗不能忽略, 本文正是在此强度范围内获得反映 LED 特性的理想因子典型值.

4.2 理想因子与串联晶粒个数的关系

根据上述公式, 我们分别计算出了 12 V, 19 V, 51 V, 80 V 高压 LED 的理想因子, 分析计算结果如表 2 所示.

由图 5 理想因子 n 与串联晶粒个数的关系图可以看出, 理想因子随高压 LED 晶粒个数的增加几乎成线性规律增加. 这可能是因为每一个小的晶粒相当于一个小功率 LED, 多颗晶粒串联相当于多个小功率 LED 串联, 且由表 2 可以看出平均每个晶粒的理想因子值与单颗普通功率 LED 理想因子值相当, 所以总的理想因子 n 值是多个小功率 LED 理想因子 n 值相加之和. 这与 Shah 等提出的模型 [2] 是相类似的, 在 Shah 等的文献中提出普通功率型 LED 的理想因子是其 LED 结构中金属半导体接触, 异质结, 同质结等各部分理想因子之和, 是纵向二极管模型理想因子之和, 而本文高压 LED 器件表现出的是理想因子由横向各晶粒的理想因子之和构成.

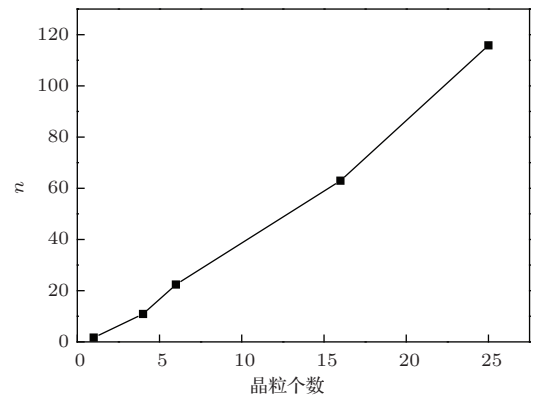


图5 理想因子 n 随串联晶粒个数的变化

表2 理想因子计算值

电压/V	12	19	51	80
串联晶粒个数	4	6	16	25
理想因子 n	10.88	22.4	56.69	115.82
平均每个晶粒的 n 值	2.72	3.73	3.54	4.63
串联电阻/ Ω	63.15	134	144.6	416
平均每个晶粒的串联电阻值/ Ω	15.78	22	9	16.64

4.3 理想因子与光谱半高宽 (FWHM) 的关系

图6比较了12 V, 19 V和80 V高压LED光谱半高宽 (FWHM) 随电流的变化.

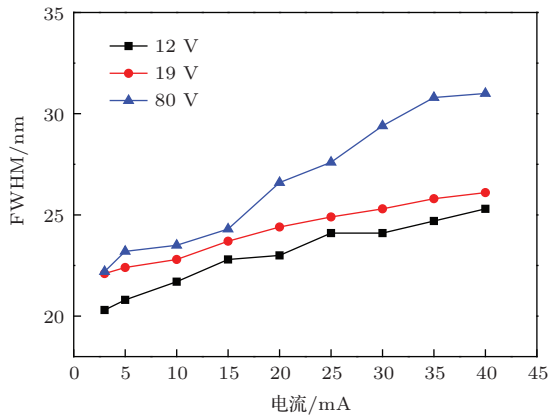


图6 光谱半高宽 (FWHM) 随电流的变化

由图6可以看出, FWHM随电流的增大而增大并且平均晶粒理想因子较大的LED对应的FWHM也越大, 这与文献[11]结果相一致. LED作为半导体器件, 其发光谱包含了丰富的材料结构和状态信息, 根据发光谱归一化表达式[13], 可以看出 E_g 的变化会使LED发光谱发生变化, 而由电流隧穿机理下的理想因子和隧道电流表达式可以得出 E_g 与理想因子的关系[14], 这样就能够得到理想因子与发光谱的关系. 对理想因子较大的LED, 晶体的缺陷以及较强的极化电场会使发射光谱的FWHM展宽, 并且理想因子较大的LED对应的FWHM也越大.

另外, 由表1可以看出, 四种高压LED在额定工作电流下工作时的电流密度分别为33.33 A/cm², 40 A/cm², 35 A/cm², 41.67 A/cm², 对应的每个晶粒的理想因子分别为2.72, 3.73, 3.54和4.63, 发现电流密度较大时, 对应的理想因子也较

大, 这可能是因为较大的电流密度容易在电流引入点附近产生电流拥塞造成的[10].

5 结论

本文计算了蓝宝石衬底GaN基高压LED的理想因子, 室温时计算的12 V, 19 V, 51 V, 80 V的高压LED的理想因子分别为10.88, 22.4, 56.69, 和115.82, 得出平均每个晶粒的理想因子分别为2.72, 3.73, 3.54, 4.63, 和普通单颗功率LED的理想因子大小相当, 并且得出理想因子 n 值随高压LED串联晶粒个数的增加成近线性增加的规律. 这表明高压LED理想因子是由各个晶粒的理想因子之和构成的. 另外, 还研究了高压LED理想因子与光谱半高宽 (FWHM) 的关系, 结果表明理想因子较大的LED对应的光谱半高宽 (FWHM) 也较大. 这可能是因为理想因子的大小与位错等缺陷密度有关, 晶体的缺陷以及较强的极化电场会使发射光谱的FWHM展宽. 最后简明分析了电流拥挤效应对理想因子的影响.

参考文献

- [1] Liu J B, Li P X, Hao Y 2005 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **22** 673 (in Chinese) [刘坚斌, 李培成, 郝跃 2005 量子电子学报 **22** 673]
- [2] Shah J M, Li Y L, Gessmann T, Schubert E F 2003 *Journal of Applied Physics* **94** 2627
- [3] Chitnis A, Kumar A, Shatalov M 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3800
- [4] Casey H C, Muth J, Krishnankutty S 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2867
- [5] Guo W L, Yan W W, Zhu Y X, Liu J P, Ding Y, Cui D S, Wu G Q 2012 *Chin. Phys. B* **12** 440
- [6] Sah C T, Noyce R, Shockley W 2009 *Proceedings of the IRE* **45** 1957
- [7] Liu W H, Li Y Q, Fang W Q, Zhou M X, Liu H C, Mo C L, Wang L, Jiang F Y 2006 *Journal of Functional Materials and Devices* **01** 45 (in Chinese) [刘卫华, 李有

- 群, 方文卿, 周毛兴, 刘和初, 莫春兰, 王立, 江凤益 2006 功能材料与器件学报 **01** 45]
- [8] Liu S W, Guo X, Ai W W, Song Y P, Gu X L, Zhang L, Shen G D 2006 *Semiconductor Opto electronics* **03** 240
- [9] Perlin P, Osinski M, Eliseev P G 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1680
- [10] Zhuang W, Wen J, Wen Y M, Li P, Zhu Y 2011 *Journal of Ptoelectronics-Laser* **09** 1290 (in Chinese) [庄伟, 文静, 文玉梅, 李平, 朱永. 2011 光电子·激光 **09** 1290]
- [11] Malyutenko V K, Bolgov S S 2010 *Proc. SPIE* 7617
- [12] Wen J, Zhuang W, Wen Y M, Li P, Zhao X M, Ma Y D 2011 *Chinese Journal of Luminescence* **32** 1057 (in Chinese) [文静, 庄伟, 文玉梅, 李平, 赵学梅, 马跃东 2011 发光学报 **32** 1057]
- [13] Yan, Lu D, Chen H, Zhang D J, Zheng R, You D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 083504
- [14] Shen X C 2006 *Semiconductor spectra and optical properties* (Beijing: Science Press) p277 (in Chinese) [沈学础 2006 半导体光谱和光学性质 (北京: 科学出版社) 第 277 页]

Research on the relationship between ideality factor and number of units of GaN-based high voltage light-emitting diode*

Bai Jun-Xue Guo Wei-Ling[†] Sun Jie Fan Xing Han Yu Sun Xiao Xu Ru Lei Jun

(Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 4 July 2014; revised manuscript received 10 September 2014)

Abstract

Ideality factor can reflect the current, the carrier leakage, and the phenomenon of non-radiative recombination in light-emitting diode (LED). For the problem of ideality factor from current report about GaN-based LED, the value of ideality factor n is calculated by using the I - V curve fitting of high voltage LED. And the relationship between the ideality factor and the number of units is series in 12, 19, 51 and 80 V GaN-based high-voltage LED are discussed. In addition, the relationship between ideality factor and spectral half width (FWHM) is analyzed, and the impact of current crowding effect on the ideality factor is also studied. Results show that the ideality factor n increases nearly linearly with the number of units in series, indicating that the ideality factor n of high voltage LED is composed of its series units. It is a valuable result for understanding the ideality factor of GaN-based high voltage LED.

Keywords: GaN-based LED, high voltage, ideality factor, connected unit

PACS: 73.61.Ey, 73.40.-c, 73.90.+f, 73.43.cd

DOI: 10.7498/aps.64.017303

* Project supported by the National Key Technologies R&D Program (Grant No.2011BAE01B14).

[†] Corresponding author. E-mail: guoweiling@bjut.edu.cn