

GaN 基高压直流发光二极管制备及其性能分析*

曹东兴¹⁾²⁾ 郭志友^{1)†} 梁伏波²⁾ 杨小东²⁾ 黄鸿勇¹⁾

1) (华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州 510631)

2) (鹤山丽得电子实业有限公司, 江门 529728)

(2011年8月22日收到; 2011年11月29日收到修改稿)

GaN 基高压直流发光二极管工艺制备, 采用蓝宝石图形衬底 (PSS) 外延片制备正梯形芯粒结构的 GaN 基高压直流 LED. 相对其他结构器件, 该结构器件发光效率最高, 封装白光后, 在色温 4500 K, 驱动电流 20 mA 时, 光效 116.06 lm/W, 对应电压 50 V. 测试其 I - V 曲线表明, 开启电压为 36 V, 对应驱动电流为 1.5 mA; 在电流 15 mA 至 50 mA 时, 光功率随驱动电流增加近似于线性增加, 在此区域光效随电流增加而降低的幅度比较缓慢, 表明 GaN 基高压直流 LED 适宜于采用大电流密度驱动, 而不会出现驱动电流密度增加导致量子效率明显下降 (efficiency droop), 为从芯片层面研究解决量子效率下降难题提供了一种新思路.

关键词: GaN 基高压直流发光二极管, 蓝宝石图形衬底, 正梯形芯粒结构, 发光效率

PACS: 85.60.Jb, 78.55.Cr, 78.90.+t

1 引言

LED 作为一种节能环保的固态半导体光源, 具有很多优点, 发展 LED 产业受到各国政府的高度重视^[1,2]. LED 在全球通用照明领域扮演着越来越重要的角色. 但应用于该领域的产品主要限于大功率 LED, 但是大功率 LED 需要大电流驱动, 而造成器件热耗严重, 导致器件老化严重甚至烧坏. 大电流驱动对散热铝外壳的要求比较高, 导致照明灯具成本居高不下, 限制了 LED 照明的普及. 目前使用最广泛的外延材料的衬底是成本较低的蓝宝石衬底^[3]. 在通用照明应用需求下, 蓝宝石衬底 GaN 基高压 LED 的概念被提了出来. 简单而言, 把一个芯片的外延层分割成数个芯粒单元, 并把它们串联起来, 则构成高电压 LED 芯片, 这是狭义上的高压发光二极管. 广义上的高压 LED 是指把一个芯片的外延层分割成数个芯粒单元, 并通过片上电路设计连接而构成的 LED 芯片. 按照此电路设计定义, 目前公认的高压 LED 可以分为两大类: 高压直流 LED 和高压交流 LED. 高压直流 LED 在封装或应用端采用桥式电路实现高压交流驱动, 而高压交流 LED 则将桥式电路设计于芯片层面来实现

高压交流驱动. 由于高压交流 LED 的部分芯粒分时点亮, 导致发光效率较高压直流 LED 要低, 所以本文只设计高压直流 LED, 高压直流 LED 芯片相对于传统直流 LED 芯片具有以下优势: 直接用市电高压驱动, 简化电源匹配, 减少电压转换的能源损失, 降低成本及功耗; 相互隔离的单元, 更均匀的电流分布, 更高的发光效率. 而且所集成芯粒为同一外延片的相邻区域, 光电特性参数高度一致, 可以很匹配的适应封装和应用端需求, 减少了所需的线绑定, 简化了封装, 解决多晶封装的可靠性问题. 此外, 为了满足需求, 高压直流 LED 可以定制芯片尺寸和或内核数量, 而制造流程也与传统 LED 兼容.

高压直流 LED 应用于通用照明市场更能展现低能耗和高效率等优点, 相比传统低压直流大功率 LED 有二大竞争优势: 第一, 在同样输出功率下, 高压直流 LED 所需的驱动电流大大低于低压直流 LED, 工作时耗散的功率要远低于低压直流 LED; 第二, 高压直流 LED 可以大幅降低 AC-DC 转换效率损失. 因此, 采用高压直流 LED 来开发 LED 通用照明灯具产品, 大幅降低对散热外壳和对散热系统的设计要求, 也意味着整体 LED 照明灯具成本的有效降低, 从而有力扫清了 LED 照明

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877069) 资助的课题

† E-mail: guozy@sncu.edu.cn

灯具进入室内照明市场的最大技术障碍. 为了应对即将到来的 LED 通用照明市场, 2010 年下半年, 国际领先的 LED 供应商如 Cree、Nichia 和 Lumileds 都宣布开发高压直流 LED, 而国内在该领域还鲜有研究, 基于上述原因, 本文开展了 GaN 基高压直流 LED 制备研究并测试分析其光电参数特性.

2 GaN 基高压直流 LED 制备

2.1 GaN 基高压直流 LED 外延片制备

在本试验中所用的 LED 外延片结构采用 MOCVD 在 C 面 (0001) 蓝宝石衬底上生长 GaN 半导体层. 在外延生长之前, 首先对衬底进行有机清洗并用 HF 进行表面处理. 生长采用氢气 (H₂) 和氮气 (N₂) 作为载气, 所使用的 Ga 源, In 源, N

源分别是三甲基镓 (TMGa), 三甲基铟 (TMIn) 和氨气 (NH₃), 所使用的 p 型掺杂剂和 n 型掺杂剂分别是二茂镁 (Cp₂Mg) 和硅烷 (SiH₄). 衬底在反应室内经过高温热处理去除表面杂质, 再采用二步法生长, 先生长一层 30 nm 的低温 (780 °C) GaN 缓冲层, 然后升温 (1100 °C) 生长 1 μm 的非故意掺杂的 GaN 半导体层和 3 μm 的 n 型 GaN 体材料 (Si-1.0 × 10¹⁹ cm⁻³). LED 结构的样品在此基础上继续生长由 15 个周期 In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN(2.5 nm/12.5 nm) 量子阱 (MQW) 构成的有源区, 其上为 30 nm 的 p 型 Al_{0.15}Ga_{0.85}N 电子阻挡层, 最后生长 300 nm 的 p 型 GaN 接触层 (Mg-1.85 × 10¹⁹ cm⁻³), 同时粗化外延层表面. TEM 拍摄的外延层结构如图 1 所示; 外延层载流子浓度随外延层厚度的变化曲线如图 2 所示.

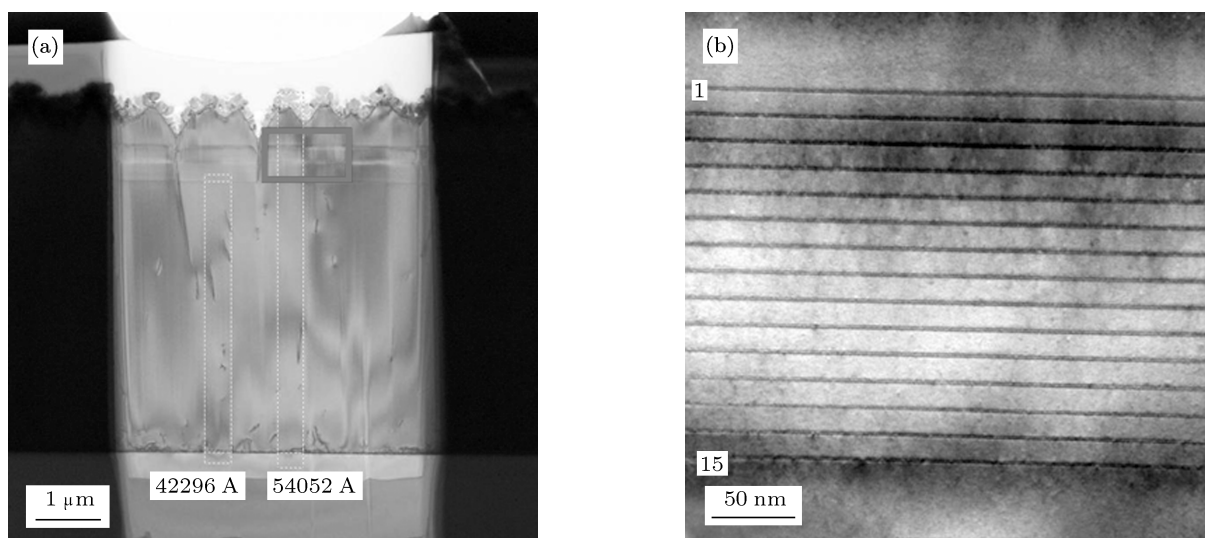


图 1 外延层结构 TEM 图 (a) 外延层结构; (b) 图 (a) 深色框标注的发光区放大图

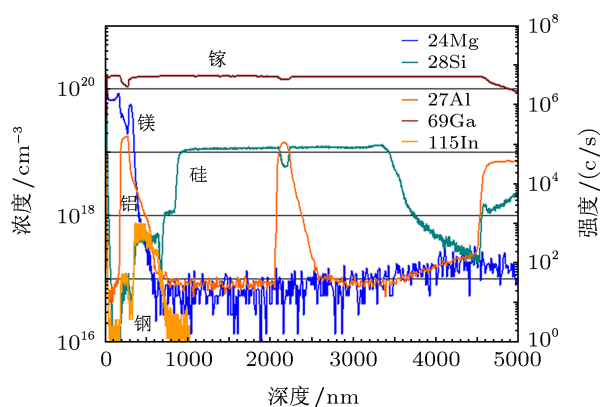


图 2 外延层载流子浓度随外延层厚度的变化曲线

2.2 GaN 基高压直流 LED 光刻版的设计优化

通常市电电压为 220 V, 单颗传统蓝色 LED 的电压为 3 V 左右, 所以单颗高压直流 LED 最多可以串联 73 颗二极管芯粒, 考虑到整流二极管所分配的电压, 那么单颗高压直流 LED 实际上最多可以串联 70 颗二极管芯粒. 可以设计高压直流 LED 工作电压 50 V—220 V ($I \leq 20$ mA), 由此设计单颗高压直流 LED 芯片的芯粒数目约为 16 到 70 颗, 考虑外延片缺陷面积导致的良率问题, 实验设计单颗高压直流 LED 芯片同时工作的芯粒数目为 16 颗.

由于芯粒上电极相距较远时会导致电流扩散

不均匀, 从而造成芯片发光区域亮度不均匀. 设计光刻版时, 将每一颗芯粒都设计成长形状, 电极设计位于长方形芯粒的长边区域. 考虑到芯片的电极部分占据一定的面积, 电极过大导致发光区面积减小, 同时也造成了电极吸光, 由此造成芯片的光

效不高; 电极过小导致电流扩散不均匀, 造成芯片发光区域不均匀, 同时导致芯片电压升高. 光刻版设计电路时, 我们将芯粒的电极宽度尺寸宽度进行优化, 权衡高压直流 LED 的光电特性, 得到最佳设计尺寸. 光刻版设计电路见图 3(a).

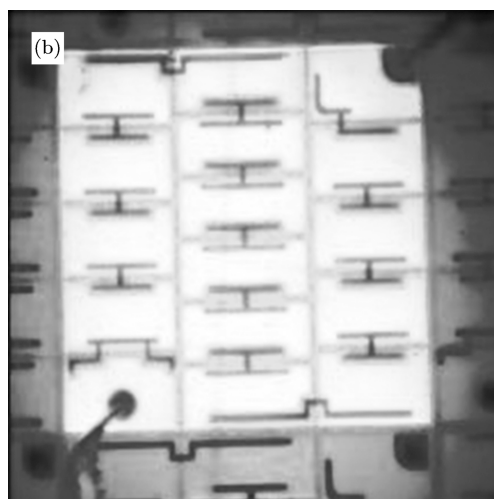
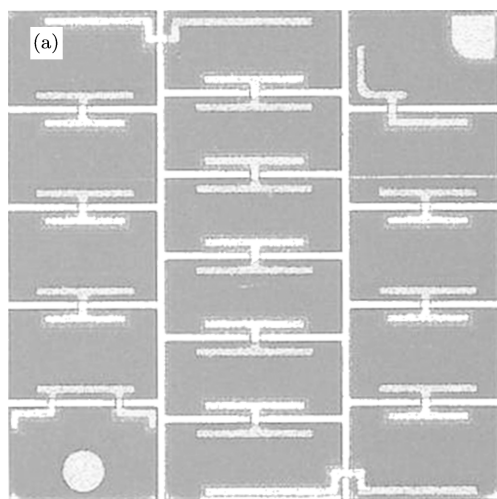


图3 高压直流 LED 光刻版优化设计 (a) 高压直流 LED 优化电路器件; (b) 高压直流 LED 点亮图

观察芯片点亮图 3(b), 芯片发光分布比较均匀, 测试对比发现, 驱动电压达到了 50 V ($I = 20$ mA), 即每颗小芯粒的电压为 3.125 V, 芯片封装成白光后, 达到了 105 lm.

2.3 高压直流 LED 芯粒结构优化

本实验制备了三种芯粒结构的高压直流 LED: 垂直侧面角度芯粒; 倒梯形侧面角度芯粒; 正梯形侧面角度芯粒, 如图 4 所示. 垂直侧面角度芯粒采用硬掩膜进行 ICP 刻蚀工艺制备; 倒梯形侧面角度芯粒采用侧面粗化工艺制备^[4]; 正梯形侧面角度芯粒采用软掩膜进行 ICP 刻蚀工艺制备. 制备所得高压直流 LED 都采用了全方位反射镜工艺 (ODR)^[5].

测试发现倒梯形侧面角度的高压直流 LED, 相对垂直角度的高压直流 LED, 其亮度提升约为 20%, 芯粒的四个侧面不再是相互平行, 可以使得射到芯片侧面的光, 经侧面的反射到顶面, 以小于临界角的角度出射; 同时, 射到顶面大于临界角的光可以从侧面出射, 从而大大提高了芯片的出光效率, 此做法类似于 Krames 等^[6]制作的截倒金字塔 (Truncated Inverted Pyramid, TIP) 形状 Al-GaInP LED, 大大提高了芯片的出光效率. 但是产品良率下降 30%, 主要原因在于芯粒制成倒梯形侧面角度后, 连接桥电路攀爬侧壁很容易造成断

裂, 造成串联芯粒断路. 正梯形侧面角度的高压直流 LED, 其亮度相对垂直角度的高压直流 LED, 提升约为 35%, 产品良率提升 2%, 主要原因在于芯粒制成正梯形侧面角度后, 连接桥电路攀爬侧壁容易, 同时芯粒的发光区面积增大, 侧壁出光使得出光面积也增大, 而且芯粒发出的一部分光线不会在芯粒与芯粒之间, 芯粒与衬底之间, 芯粒内部发生来回折反射, 而是从芯粒正梯形侧面直接出射到空气中^[7], 由此提升了芯片亮度, 提高了器件可靠性.

3 图形化衬底应用于高压直流 LED 的效果研究

蓝宝石图形衬底技术 (PSS) 通过在蓝宝石衬底表面制作具有细微结构的图形, 然后再在这种图形化的衬底表面进行 GaN 半导体材料外延. 采用 PSS 衬底生长 GaN 外延层, 制备正梯形侧面角度高压直流 LED, 相对普通衬底制备的正梯形侧面角度高压直流 LED, 测试发现两者的伏安特性曲线基本重合, 可见两者电性基本一致. 20 mA 驱动时, 芯片光功率相对普通衬底制备的正梯形侧面角度高压直流 LED 的光功率提升约为 26%. 普通衬底外延片制备的正梯形侧面角度, 高压直流 LED 与 PSS 衬底外延片制备的正梯形侧面角度, 高压直流 LED 的光功率随驱动电流变化比较曲线如图 6 所示.

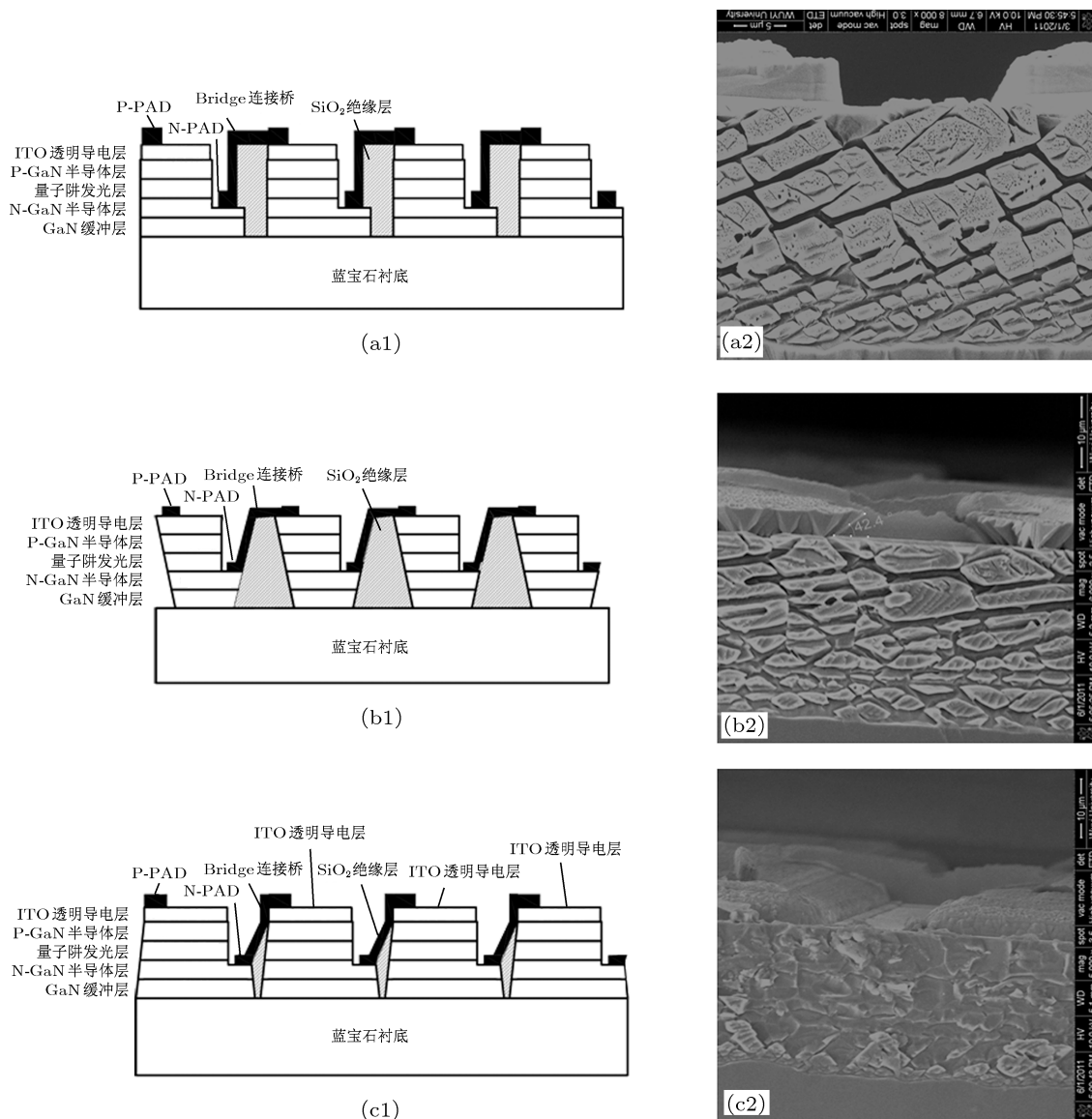


图4 本实验制备的三种芯粒结构 (a-1)垂直侧面角度芯粒示意图; (a-2)垂直侧面角度芯粒 SEM 扫描图 (b-1)倒梯形侧面角度芯粒示意图; (b-2)倒梯形侧面角度芯粒 SEM 扫描图 (c-1)正梯形侧面角度芯粒示意图; (c-2)正梯形侧面角度芯粒 SEM 扫描图

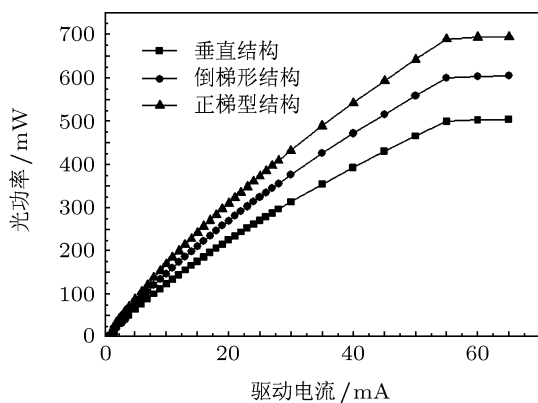


图5 高压直流 LED 芯粒结构光功率随驱动电流变化曲线

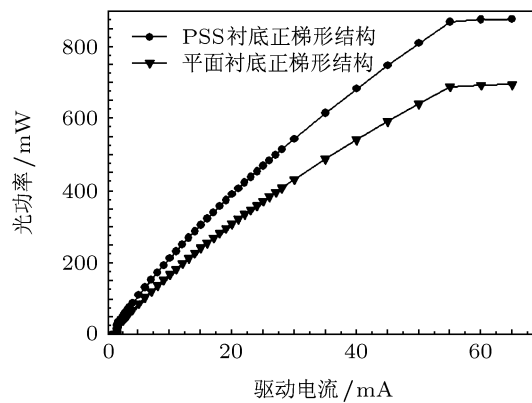


图6 采用 PSS 衬底、芯片侧面角度及高压直流 LED 的光功率随驱动电流曲线

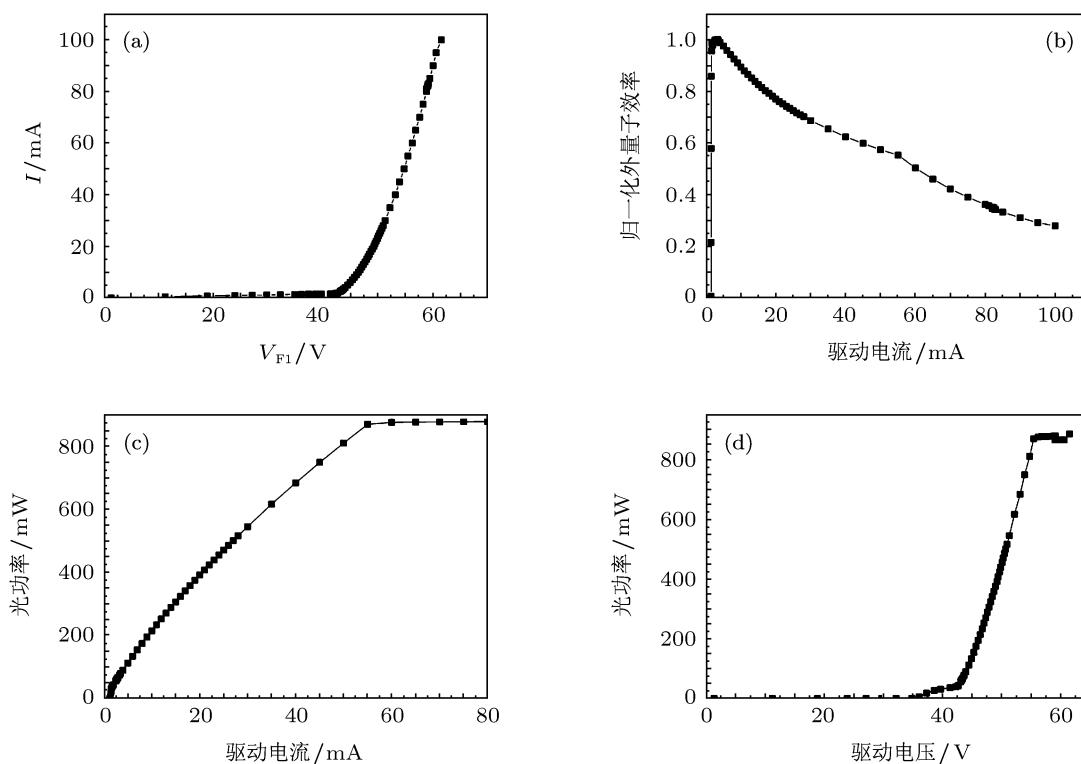


图7 PSS衬底外延片制备的正梯形侧面角度高压直流LED光电参数曲线 (a) 高压直流LED I - V 特性曲线; (b) 高压直流LED 归一化外量子效率特性曲线; (c) 高压直流LED 光功率随电流变化特性曲线; (d) 高压直流LED 光功率随电压变化特性曲线

研究认为可以归结为三点原因综合作用的结果: 图形化的界面改变了 GaN 材料的生长过程, 能抑制缺陷向外延表面的延伸, 提高器件内量子效率^[8]; 粗糙化的蓝宝石界面能散射从有源区发射的光子, 使得原本全反射的光子有机会出射到器件外部, 能有效提高光提取效率^[9]; 还有一优点是发射到隔离槽底部的光线被 PSS 图形直接折反射到空气中, 增加光线正向出射几率. 基于上述三点原因, 芯片光功率得到大幅提升.

4 高压直流 LED 参数测试分析

采用测试机测试 PSS 衬底外延片制备正梯形侧面角度高压直流 LED 芯片. 测试机电源可提供顺向最高 400 V 电压, 最高 400 mA 电流, 最高瞬间功率 10 W 的电源, 以电流源形式或电压源的形式输出. 光电测试数据如图 7.

4.1 电学性能测试

图 7(a) 为高压直流 LED 的 I - V 特性曲线, 测试条件: 电流从 0.1 mA 到 100 mA, 测试温度为 25 °C. 由图可知, 随着电流增大, 电压未出现饱和现象. 对

于 LED 的 I - V 特性关系满足^[10,11]:

$$I = I_d \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{kT} \right] + I_r \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{2kT} \right], \quad (1)$$

I_d 和 I_r 分别是由扩散和复合所引起的饱和电流, R_s 为器件的串联电阻. 由图中在 20 mA 工作电流附近的 I - V 特性关系得到 $R_s = 242.1 \pm 3.4 \Omega$, 及每一颗芯粒的 $R_s = 15.131 \pm 0.213 \Omega$. 忽略 R_s 对工作电流的影响, (1) 式可以简化为:

$$I = I_d \exp[\alpha V] + I_r \exp[\beta V]. \quad (2)$$

当电流从 0 mA 逐渐增大时, 传统 LED 的 I - V 特性曲线随电流增大呈现出两段不同区域, 而高压直流 LED 的 I - V 特性曲线则呈现三段不同的区域:

当 $I < 1.7$ mA 时, 高压直流 LED 芯片的 I - V 特性曲线呈线性关系: $I = 4 \times 10^{-5}V + 6 \times 10^{-5}$; 当 $1.7 \text{ mA} \leq I < 15$ mA 时, 高压直流 LED 芯片的 I - V 特性曲线呈指数关系:

$$I = 2 \times 10^{-10} \times \exp(0.3801 V); \quad (3)$$

当 $I \geq 15$ mA 时, 高压直流 LED 芯片的 I - V 特性曲线呈线性关系: $I = 0.0064V - 0.2965$; 高压直流 LED 的 I - V 特性曲线多分出一个微小电流区域, 原因在于高压直流 LED 是将传统 LED 集成串联而

成, 将小电流驱动时的 I - V 特性串联放大, 从而必须独立分析此区域.

4.2 光学性能测试

由图 7 可以看出: 高压直流 LED 开启电压为 36 V, 对应驱动电流为 1.5 mA, 在驱动电流介于 15 mA 到 50 mA 之间时, 光功率随驱动电流增加近似于线性增加. 在此区域光效随电流增加而降低的幅度比较缓慢, 说明我们制作的高压直流 LED 适宜于采用大电流密度驱动, 而不会随驱动电流增加出现明显的量子效率下降 (efficiency droop) 问题^[12], 体现了高压直流 LED 的优势, 这一点与 Wang 的研究结果相符合^[13]. 原因在于高压直流 LED 的驱动电流远远低于功率型 LED, 从而有效的减少了大电流驱动发热导致的芯片内部非辐射复合几率. 驱动电流达到 55 mA 时, 光功率不再随电流变化, 说明此时载流子接近饱和. 光效最高点对应之驱动电流为 2.7 mA, 对应电压为 43 V.

作为对比, 我们制作了高压直流 LED 和功率型发光二极管的尺寸都为 $1194 \mu\text{m} \times 1194 \mu\text{m}$, 功率型发光二极管采用 350 mA 电流驱动, 高压直流 LED 采用 20 mA 电流驱动, 功率型发光二极管的电流密度为 24.56 A/cm^2 , 而高压直流 LED 的电流密度为 23.46 A/cm^2 , 可见高压直流 LED 芯片在把电流均匀分布于芯片方面具有优势, 进而具有更为稳定的量子效率. 通过计算, 我们发现在高压直流 LED 芯片中, 电流密度要小于功率型发光二极管, 不容易在电流引入点的附近产生电流拥塞. 这为我们提供了一种在芯片层面解决量子效率随电流密度增大而下降问题的新思路, 也展示了进一步研究高压直流 LED 的价值.

封装白光测试, 采用 PSS 衬底外延片制备正梯形侧面角度高压直流发光二极管, 在色温 4500 K, 标准测试室温 20 mA 下, 测得白光高压直流发光二

极管的发光效率为 116.06 lm/W , 测试数据见表 1.

表 1 PSS 衬底用外延片制备的正梯形侧面角度高压直流 LED 封装后测试数据

I/mA	ϕ_v/lm	$l/(\text{m/W})$	V_f/V
5	33.01	148.63	44.41
10	62.55	133.38	46.09
15	88.71	121.44	48.07
20	116.06	116.06	50.00
25	135.38	106.48	50.58
30	156.23	98.36	52.94

5 结论

本文设计和开发了工艺完整的工作电压为 50 V ($I \leq 20 \text{ mA}$) 的高压直流 LED 的器件, 并对高压直流 LED 芯片结构优化. 采用 PSS 衬底的外延片制备的正梯形芯粒结构的高压直流 LED 为最佳结构器件, 利用检测仪器和设备测试其光电性能: 高压直流 LED 开启电压为 36 V, 对应驱动电流为 1.5 mA; 在驱动电流介于 15 mA 到 50 mA 之间时, 光功率随驱动电流增加近似于线性增加, 在此区域光效随电流增加而降低的幅度比较缓慢, 说明我们制作的高压直流 LED 适宜于采用大电流密度驱动, 而不会随驱动电流密度增加出现明显的量子效率下降问题, 为我们在芯片层面解决量子效率随电流增大而下降问题的提供了一种新思路. 驱动电流达到 55 mA 时, 光功率不再随电流变化, 说明此时载流子接近饱和; 光效最高点对应之驱动电流为 2.7 mA, 对应电压为 43 V. 封装白光后测试表明: 此结构的发光效率最高, 在色温 4500 K、标准测试室温 20 mA 驱动时光效高达 116.06 lm/W , 此时驱动电压为 50 V. 这一研究成果达到国内先进水平.

- [1] Liu N X, Wang H B, Liu J P, Niu N H, Han J, Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1424 (in Chinese) [刘乃鑫, 王怀兵, 刘建平, 牛南辉, 韩军, 沈光地 2006 物理学报 **55** 1424]
- [2] Nakamura S, Mukai T, Senoh M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1687
- [3] Xu B, Yu Q X, Wu Q H, Liao Y, Wang G Z, Fang R C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 204 (in Chinese) [徐波, 余庆选, 吴气虹, 廖源, 王冠中, 方容川 2004 物理学报 **53** 204]
- [4] Windisch R, Heremans P, Knobloch A, Kiesel P, Döhler G H, Dutta B, Borgh G 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2256
- [5] Dong Y J, Zhang J B, Chen H T, Zeng X H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 0778 (in Chinese) [董雅娟, 张俊兵, 陈海涛, 曾祥华 2011 物

理学报 **60** 0778]

- [6] Krames M R, Ochiai-Holcomb M, Höfler G E, Carter-Coman C, Chen E I, Tao I H, Gillot P, Cardner N F, Chui H C, Huang J W, Stockman S A, Kish F A, Craford M G, Tan T S, Kaiot C P, Hueschen M, Posselt J, Loh B, Sasser G, Collins D 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2365
- [7] Shmatov O, Li Z S 2003 *IEE Proc.-Optoelectron.* **150** 273
- [8] Kato Y, Kitamura S, Hiramatsu K, Sawaki N 1994 *J. Cryst. Growth* **144** 133
- [9] Jiang Y, Luo Y, Wang L, Li H T, Xi G Y, Zhao W, Han Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3468 (in Chinese) [江洋, 罗毅, 汪莱, 李洪涛,

- 席光义, 赵维, 韩彦军 2009 物理学报 **58** 3468]
- [10] Jin Y Z, Hu Y P, Zeng X H, Yang Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1258 (in Chinese) [金豫浙, 胡益培, 曾祥华, 杨益军 2010 物理学报 **59** 1258]
- [11] Wang L J, Zhang S M, Zhu J H, Zhu J J, Zhao D G, Liu Z S, Jiang D S, Wang Y T, Yang H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 017307
- [12] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, Kim J K, Schubert E F, Piprek J, Park Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 183507
- [13] Wang C H, Lin D W, Lee C Y, Tsai M A, Chen G L, Kuo H T, Hsu W H, Kuo H C, Lu T C, Wang S C, Chi G C 2011 *IEEE Electron Device Letters* **32** 1098

The preparation and performance analysis of GaN-based high-voltage DC light emitting diode*

Cao Dong-Xing¹⁾²⁾ Guo Zhi-You^{1)†} Liang Fu-Bo²⁾
Yang Xiao-Dong²⁾ Huang Hong-Yong¹⁾

1) (*Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Institute of Optoelectronic Material and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China*)

2) (*Yinyu Semiconductor Photonics Ltd., Jiangmen 529728, China*)

(Received 22 August 2011; revised manuscript received 29 November 2011)

Abstract

The design and the preparation of GaN-based high-voltage DC light emitting diode are realized. It is found that the device, whose chip structure is truncated pyramid using the epitaxial wafer whose substrate is a patterned sapphire substrate, has a higher luminous efficiency than other chip structures. The luminous efficiency increases up to 116.06 lm/W when the device is packaged into white LED at a color temperature of 4500 K which is driven by 20 mA, and the corresponding voltage is 50 V. The I - V curve shows that the threshold voltage is 36 V, corresponding to a drive current of 1.5 mA. The optical power increases approximately linearly with the increase of driving current when the driving current increases from 15 mA to 50 mA, and the luminous efficiency in this range decreases more slowly with the increase of driving current, indicating that the GaN-based high-voltage DC LED is favourably driven by large current density, and severe efficiency droop will not appear as the drive current density increases, which offers a new idea for studying and solving the efficiency droop problem from the chip level.

Keywords: GaN-based high-voltage DC light emitting diode, pattern sapphire substrate, truncated pyramid chip structure, luminous efficiency

PACS: 85.60.Jb, 78.55.Cr, 78.90.+t

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60877069).

† E-mail: guozy@senu.edu.cn