

文章编号: 0253-2239(2009)04-1066-04

Si 衬底功率型 GaN 基绿光 LED 性能

苏丽伟¹ 游 达² 程海英^{1,2} 江风益^{1,2}

(¹ 南昌大学教育部发光材料与器件工程研究中心, 江西 南昌 330047)
² 晶能光电(江西)有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要 对本实验室在 Si (111) 衬底上 MOCVD 法生长的芯片尺寸为 $400\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ 功率型绿光 LED 的光电性能进行研究。带有银反射镜的 LED 在 20 mA 的电流下正向工作电压为 3.59 V, 主波长 518 nm, 输出光功率为 7.3 mW, 90 mA 下达到 28.2 mW, 发光功率效率为 7.5%, 光输出饱和电流高达 600 mA。在 200 mA 电流下加速老化 216 h, 有银反射镜的 LED 光衰小于无银反射镜的 LED, 把这一现象归结于 Ag 反射镜在提高出光效率的同时, 降低了芯片本身的温度。本器件有良好的发光效率、光衰和光输出饱和电流等综合特性表明, Si 衬底 GaN 基绿光 LED 具有诱人的发展前景。

关键词 光学材料; Ag 反射镜; 加速老化; Si 衬底; 绿光 LED

中图分类号 TN312⁺.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.1066

Characterization of High-Power GaN-Based Green LED on Si Substrate

Su Liwei¹ You Da² Cheng Haiying^{1,2} Jiang Fengyi^{1,2}

(¹ *Engineering Research Center for Luminescence Materials and Devices Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China*
² *Lattice Power (Jiangxi) Corporation, Nanchang, Jiangxi 330096, China*)

Abstract Optical and electrical characterization of high-power green LED on Si (111) substrate fabricated by MOCVD with chip dimension of $400\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ is studied. The forward bias of the LED with Ag reflector is about 3.59 V under 20 mA, and the light output power is about 7.3 mW with dominant wavelength of 518 nm. The light output power achieves 28.2 mW under 90 mA, the light output efficiency is 7.5%, and the saturated output current is 600 mA. The light degradation of LED with Ag reflector is smaller than that without Ag reflector after 216 h accelerated aging test under 200 mA. This phenomenon is induced by Ag reflector, which can raise the light extraction efficiency and lower the temperature of the chip itself. This characterization of great light efficiency, light degradation and saturated output current suggests that GaN-based green LED on Si substrate has a promising prospect.

Key words optical materials; Ag reflector; current accelerated aging; Si substrate; green LED

1 引 言

宽禁带直接带隙 III 族氮化物已经发展成为制作蓝、绿光波段 LED 器件的最主要材料^[1~3]。采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 方法, 使用 InGaN/GaN 多量子阱结构作为有源层, GaN 基

蓝、绿光 LED 已经实现了商品化生产。在过去的十几年里, 蓝光波段的 InGaN LED 发光效率得到了极大的提高^[4], 可是绿光 LED 器件进展缓慢。相对蓝光, 绿光 InGaN 合金中有着更高的 In 含量, 在生长 InGaN 量子阱时, In 含量的增加会引起 In

收稿日期: 2008-08-29; **收到修改稿日期**: 2008-09-25

基金项目: 国家 863 计划纳米专项(2003AA302160)和国家 863 计划光电子主题课题(2005AA311010)资助课题。

作者简介: 苏丽伟(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体发光材料与器件方面的研究。

E-mail: alice_7621781@yahoo.com.cn

导师简介: 江风益(1963—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事半导体发光材料与器件方面的研究。

E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn

团聚和相分离导致结晶质量变差^[5],从而严重影响绿光 LED 的内外量子效率、光电性能及老化性能。一些研究表明,通过优化生长参数,改良量子阱结晶质量,可以显著提高绿光 LED 的光电性能^[6,7]。代表业界一流水平的美国 Cree 公司的功率型绿光 LED,以 SiC 为衬底、垂直结构、芯片尺寸 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,在 350 mA 电流驱动下主波长为 520 nm 的光输出功率可达 115 mW ,发光功率效率达到 9.4% ^[8]。

本实验室通过优化 InGaN 量子阱生长,在 Si (111) 衬底(区别于 SiC 或蓝宝石衬底)上生长出了 InGaN/GaN 多量子阱结构绿光 LED 外延片,通过薄膜转移技术制成垂直结构,研制出芯片尺寸为 $400\text{ }\mu\text{m} \times 600\text{ }\mu\text{m}$ 的功率型绿光 LED 芯片。

2 实 验

Si 衬底 GaN 基绿光 LED 外延片在本实验室 Thomas Swan 的 MOCVD 系统上生长得到。其外延层结构为多个缓冲层, $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的 n 型 GaN,量子阱为 5 个周期的 3 nm InGaN 阱层/ 10 nm GaN 垒层, 200 nm 的 p 型 GaN。芯片制作的流程为:在 p 面 GaN 上蒸 100 nm 的 Ag 反射镜做接触层,采用外延片焊接技术把 Si 衬底生长的 GaN LED 外延膜转移到新的衬底上,化学腐蚀去掉硅衬底后获得 n 型 GaN 出光面的垂直结构,再通过化学腐蚀对 n 型层表面进行粗化,然后制作 n 型欧姆接触层,划成 $400\text{ }\mu\text{m} \times 600\text{ }\mu\text{m}$ 尺寸芯片,芯片结构如图 1 所示^[9~12]。

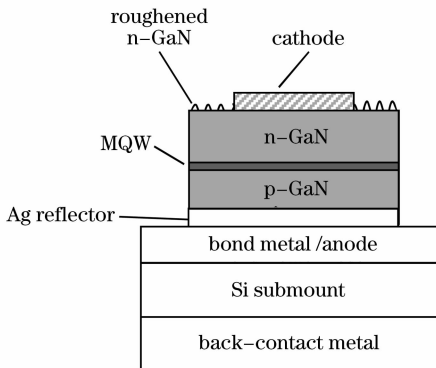


图 1 垂直结构 GaN 基绿光 LED 芯片示意图

Fig. 1 Schematic of the vertical structure of GaN-based green LED chip

芯片制好后粘于功率型支架上的反射杯内,然后采用硅胶封装^[13]。样品可靠性的测量通过对封装好的功率型 LED 进行老化后获得。加速老化实验条件为:选 5 只 LED 在室温 200 mA 下老化

216 h ,所得结果为 5 只 LED 的平均值。为了便于比较,还采用同样的功率型绿光 LED 外延片制作成同样尺寸的无反射镜的 Pt 电极的 LED 芯片,封装后,选 5 只 LED 在室温 200 mA 下加速老化 216 h 。老化前分别对两者进行测量,其中带有银反射镜的 LED 在 20 mA 的电流下正向工作电压为 3.59 V ,无反射镜的 LED 的工作电压为 3.04 V 。测量设备为 XJ4810 半导体管特性图示仪,杭州远方 PMS-50 型光谱分析仪和 CCD 荧光光谱仪。

3 结果与分析

本文功率型绿光 LED 电致发光光谱半峰宽和主波长随注入电流的变化如图 2 所示。图中显示,光谱半峰全宽(FWHM)随着电流的增大而增加,同时光谱主波长随着电流的增大而蓝移,从 5 mA 时的 520 nm 至 90 mA 时的 514.6 nm ,主波长的变化幅度为 5.4 nm 。小插图为 20 mA 下的电致发光光谱,EL 主波长为 518 nm 。

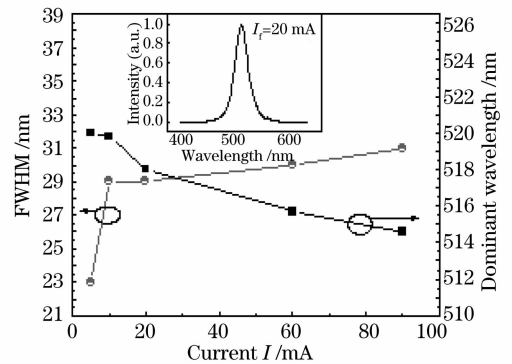


图 2 硅衬底绿光 LED($400\text{ }\mu\text{m} \times 600\text{ }\mu\text{m}$)电致发光光谱半峰全宽和主波长随注入电流的变化,插图为 20 mA 下的电致发光光谱

Fig. 2 Relationship of FWHM and dominant wavelength with current of EL spectra of green LED on Si substrate ($400\text{ }\mu\text{m} \times 600\text{ }\mu\text{m}$), Insert graph is EL spectra under 20 mA

功率型 LED 老化前后的 I-V 曲线如图 3 所示。老化后 LED 的正向电压减小,可能由于老化时芯片的热效应相当于一个退火的过程,使得 Ag 反射镜与 p 型 GaN 接触变好,从而减小了接触电阻^[14~16]。

图 4 显示了有银反射镜与无反射镜电极的功率型绿光 LED 的光输出功率随电流的变化情况。有 Ag 反射镜的 LED 在 20 mA 的电流下主波长 518 nm ,输出光功率为 7.3 mW , 90 mA 下(有效电流密度为 49 A/cm^2)达到 28.2 mW ,发光功率效

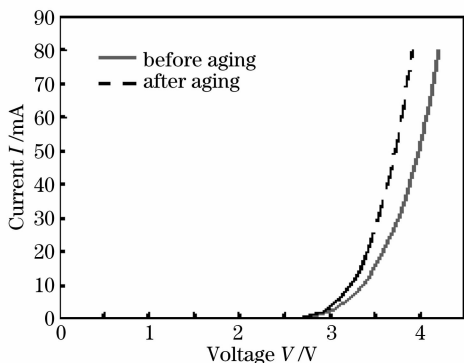


图 3 硅衬底绿光 LED(400 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$) 老化前后的 I-V 特性比较

Fig. 3 The I-V characteristics of green LED on Si substrate ($400\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$) before and after aging

率为 7.5%，这一结果接近同等电流密度下 Cree 公司 SiC 衬底功率型 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 绿光 LED(EZ1000 系列)发光功率效率 9.4%^[8]。有 Ag 反射镜的 LED 的光功率是无反射镜电极 LED 的 2 倍之多；无反射镜电极的 LED 无论老化前后在小于 90 mA 时，光功率随电流的增大而线性增加，随后增加的速率减慢，当注入电流为 500 mA 时，老化前后的光功率都趋于饱和。带 Ag 反射镜的 LED 则老化前后在小于 120 mA 时，光功率随电流的增大而线性增加，随后增加的速率减慢，当注入电流为 600 mA 时，老化前后的光功率都趋于饱和，即 Ag 反射镜的 LED 相对于无反射镜电极的 LED 不仅光输出功率增加了而且光输出饱和电流也增大了。

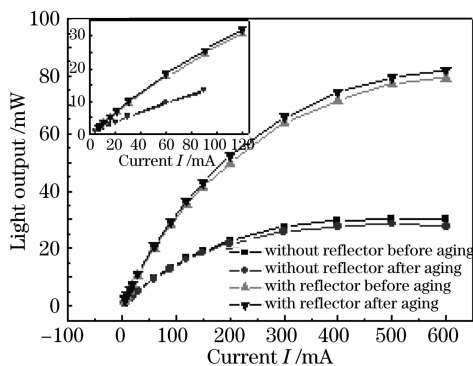


图 4 有银反射镜与无反射镜功率型绿光 LED(400 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$)在老化前后的光输出功率随电流的变化

Fig. 4 Relationship of light output with current for high power green LED ($400 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$) with and without Ag reflector before and after aging

在未作反射镜之前，LED 芯片里很多光子提取不出来，在芯片内部被半导体吸收，产生热，热量得不到及时疏散使得芯片温度升高，非辐射复合

增强，从而使热量进一步增加，引起内量子效率降低，光电转换效率降低，光输出功率饱和。而 Ag 反射镜的制作使得有源区发射的光子极大地被提取出来，同时由于 Ag 的热传导系数大，导热强于 Pt，所以热量能更好的疏散，降低了芯片本身的温度，因此饱和电流增大^[17]。Ag 反射镜与无反射镜 LED 芯片各层组分如图 5 所示，各层的热传导系数如表 1 所示，无反射镜 LED 芯片所用的电极为 Pt 电极，Pt 的热传导系数为 $0.716 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ，在各层中是最低的，根据瓶颈效应，决定整个芯片的热传导效应的是热传导系数最小的那一层，所以 Pt 电极在这里相当于一个热阻，不利于散热。而 Ag 的热传导系数为 $4.29 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ，远大于 Pt 的热传导系数，因此 Ag 反射镜的制作有利于散热。

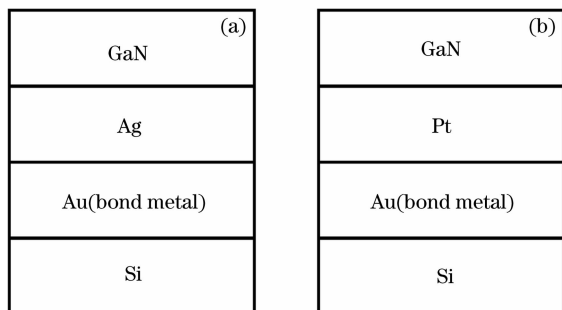


图 5 Ag 反射镜(a)与无反射镜(b) LED 芯片各层组分示意图

Fig. 5 Schematic of composition of LED with (a) and without (b) Ag reflector

表 1 各层的热传导系数

Table 1 Thermal conductivity of each composition

Composition	GaN	Pt	Ag	Au	Si
Thermal conductivity / $[\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})]$	1.3	0.716	4.29	3.17	1.48

图 6 为有 Ag 反射镜与无反射镜绿光 LED 在加速老化条件下(200 mA 电流)老化后 20 mA 测量电流下的相对光功率的变化情况。有 Ag 反射镜的 LED 光功率在开始老化的 48 h 内，光功率由最初的 7.3 mW 增加至 7.6 mW，随后开始衰减，到 216 h 光功率为 7.4 mW，老化总体光衰为 -1.4%。而无 Ag 反射镜电极 LED 光功率在开始老化时的 24 h 内光功率由 3.6 mW 衰减至 3.5 mW，随后衰减速率减慢，到 216 h 光功率为 3.4 mW，老化总体光衰为 5.6%。对比无 Ag 反射镜，有 Ag 反射镜的芯片光衰更小，本文把这一现象归结于 Ag 反射镜在提高出光效率的同时，降低了芯片本身的温度，从而降低了光衰。另外，由图 3 可知老化后有

Ag 反射镜的 LED 的正向电压减小, 光电转换效率提高, 从而产生的热量减小。

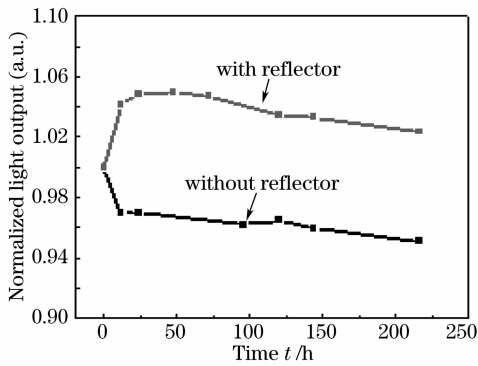


图 6 常温下 200 mA 加速老化时硅衬底绿光 LED (400 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$) 相对光功率随时间的变化

Fig. 6 Accelerated light degradation under 200 mA with time at room temperature about green LED on Si substrate (400 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$)

4 结 论

对本实验室在 Si (111) 衬底上 MOCVD 生长的功率型绿光 LED 进行光电性能表征。带有银反射镜的 LED 在 20 mA 的电流下正向工作电压为 3.59 V, 主波长 518 nm, 输出光功率为 7.3 mW, 90 mA 下达到 28.2 mW, 发光功率效率 7.5%; 在 200 mA 电流下加速老化 216 h 后, 未见光衰, 光输出功率反而提高了 1.4%。本器件光输出饱和和电流高达 600 mA (芯片尺寸仅为 400 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$)。这些结果表明, 本实验室研制的功率型绿光 LED, 其发光效率已经接近目前市场 SiC 或蓝宝石衬底绿光 LED 中上水平, 其光衰、光输出饱和电流等性能好于或并不逊色于 SiC 或蓝宝石衬底绿光 LED 一流水平。综合结果预示, Si 衬底 GaN 基绿光 LED 具有良好的发展潜力。

参 考 文 献

- 1 S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa *et al.*. High-Brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**: 797~799
- 2 S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa *et al.*. Superbright green InGaN single-quantum-well-structure light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**: 1332~1335

- 3 S. Nakamura, M. Senoh. High-power GaN p-n junction blue-light-emitting diodes[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1991, **30**: 1998~2001
- 4 O. B. Shechekin, J. E. Epler, T. A. Trottier *et al.*. High performance thin-film flip-chip InGaN-GaN light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(7): 071109-1~071109-3
- 5 N. A. El-Masry, E. L. Piner, S. X. Liu. Phase separation in InGaN grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(1): 40~42
- 6 C. Wetzel, T. Salagaj, T. Detchprohm *et al.*. InGaN/GaN growth optimization for high-power green light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(6): 866~868
- 7 S. M. Ting, J. C. Ramer, D. I. Florescu *et al.*. Morphological evolution of InGaN/GaN quantum-well heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(3): 1461~1467
- 8 Cree web site <http://www.cree.com/products/ezbright.asp>
- 9 Chunlan Mo, Wenqing Fang, Yong Pu *et al.*. Growth and characterization of InGaN blue LED structure on Si (111) by MOCVD[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **285**: 312~317
- 10 Xiong Chuanbing, Jiang Fengyi, Fang Wenqing *et al.*. Characteristics of GaN blue LEDs epilayer materials on Si before and after transfer[J]. *Science in China (Series E)*, 2006, **36**(7): 733~740
- 熊传兵, 江凤益, 方文卿 等. 硅基 GaN 蓝光 LED 外延材料转移前后性能[J]. *中国科学(E 辑)*, 2006, **36**(7): 733~740
- 11 Cheng Haiying, Fang Wenqing, Mo Chunlan *et al.*. Effect of δ -doping on performance of GaN blue LED epitaxial films on Si substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1269~1273
- 程海英, 方文卿, 莫春兰 等. δ 掺杂对 Si 衬底 GaN 蓝光 LED 外延膜性能的影响研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1269~1273
- 12 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 143~145
- 邝海, 刘军林, 程海英 等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 143~145
- 13 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1777~1781
- 吴海彬, 王昌铃, 何素梅 等. 绿荧光粉的白光 LED 显色性研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1777~1781
- 14 Hyun-Gi Hong, June-o Song, Takhee Lee *et al.*. Improvement of the reverse leakage behavior of Ag-based ohmic contacts for GaN-based light-emitting diodes using MgZnO interlayer [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, **129**: 176~179
- 15 Keun-Yong Ban, Hyun-Gi Hong, Do-Young Noh *et al.*. Ir/Ag reflector for high-performance GaN-based near UV light emitting diodes[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, **133**: 26~29
- 16 Ming-Jer Jeng, Ching-Chuan Shiue, Liann-Be Chang. The reflectivity of Mo/Ag/Au ohmic contacts on p-type GaN for flip-chip light-emitting diode (FCLED) applications [J]. *Applied Surface Science*, 2008, **254**: 4479~4482
- 17 Zhang Jianming, Zou Deshu, Liu Sinan *et al.*. A novel AlGaInP thin-film light emitting diode with omni directional reflector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2905~2909
- 张剑铭, 邹德恕, 刘思南 等. 新型全方位反射铝镓磷薄膜发光二极管[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2905~2909