

# 基于图形化蓝宝石衬底的 HB-LED 研究进展

黄成强<sup>1</sup> 陈波<sup>2</sup> 李超波<sup>1</sup> 夏洋<sup>1</sup> 汪明刚<sup>1</sup> 饶志鹏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; <sup>2</sup> 中国科学院嘉兴微电子仪器与设备工程中心, 浙江 嘉兴 314006)

**摘要** 为了制作高亮度 LED, 需要在图形化蓝宝石衬底上生长 GaN 材料。通过光刻在平坦蓝宝石衬底上制作掩膜图形, 通过刻蚀将图形转移到蓝宝石衬底, 得到图形化蓝宝石衬底。在图形化蓝宝石衬底上进行 GaN 的侧向外延生长, 并做后续处理, 就制成了基于图形化蓝宝石衬底的高亮度 LED。图形化蓝宝石衬底上 GaN 的侧向外延生长使得外延材料的位错密度从  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  降低到  $10^7 \text{ cm}^{-2}$ , 这减少了发生非辐射复合的载流子, 多量子阱发射更多的光子, LED 的内量子效率提高。此外, 图形化蓝宝石衬底能够有效散射从多量子阱射出的光线, 使得出射光射到逃离区的几率更大, 从而提高光萃取率。内量子效率和光萃取率的提高大大改善了 LED 的光电特性。

**关键词** 光学器件; HB-LED; 外延; 光电特性

中图分类号 O484.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.070007

## Research Progress of HB-LED Based on Patterned Sapphire Substrate

Huang Chengqiang<sup>1</sup> Chen Bo<sup>2</sup> Li Chaobo<sup>1</sup> Xia Yang<sup>1</sup>

Wang Minggang<sup>1</sup> Rao Zhipeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China  
<sup>2</sup> Jiaxing Engineering Center for Microelectronic Apparatus and Equipment,  
Chinese Academy of Sciences, Jiaxing, Zhejiang 314006, China

**Abstract** In order to make high-brightness LED, patterned sapphire substrate (PSS) is adopted. To make PSS, the first step is to make patterned mask on the planar sapphire substrate, and the second step is to copy the pattern of mask onto the sapphire substrate through etching. To make GaN grow on PSS by epitaxial lateral overgrowth and do subsequent processing, HB-LED based on PSS can be fabricated. The dislocation density of GaN on PSS is decreased from  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  to  $10^7 \text{ cm}^{-2}$ , compared with the density of GaN on the planar sapphire substrate. The decrease of dislocation density of GaN decreases the number of carrier which vanish through the nonradiative recombination. Therefore, more photons are emitted from the multi-quantum well (MQW), and the internal quantum efficiency of LED is increased. Furthermore, PSS can effectively scatter the beam of light from the MQW, which increases the probability of light in escaping area, so the extraction rate of LED is enhanced. The combination of the enhancement of internal quantum efficiency and extraction rate greatly improves the photoelectrical characteristic of LED.

**Key words** optical devices; HB-LED; epitaxy; photoelectric properties

**OCIS codes** 230.3670; 240.3695; 240.6700

## 1 引言

III 族氮化物广泛用于高功率、高温电子器件<sup>[1]</sup>。Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>In<sub>y</sub>N 的禁带宽度可以从 InN 的 1.9 eV 变化到 AlN 的 6.3 eV<sup>[2]</sup>, 发射光覆盖了整个发光光谱。GaN 作为重要的半导体材料被广泛应用, 因为应用该材料能够制作高性能的光发射器件。氮化镓基 LED 体积小、重量轻、寿命长、体积小、重量轻、耗电量小、平面化、响应速度快、耐震、没有污染和辐射<sup>[3,4]</sup>, 广泛用于户外显示、手机背光灯、交通信号灯、汽车前向照明、液晶显示屏的高性能背光灯、生物传感器、全彩打印和固态照明等<sup>[3~8]</sup>。高亮度白光 LED 的发光效能已超

收稿日期: 2012-01-31; 收到修改稿日期: 2012-04-03; 网络出版日期: 2012-05-08

作者简介: 黄成强(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事高亮度 LED 方面的研究。E-mail: huangchengqiang@ime.ac.cn

导师简介: 夏洋(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事超大规模集成电路方面的研究。

E-mail: xiayang@ime.ac.cn

过  $100 \text{ lm/W}^{[9]}$ 。

由于蓝宝石的热稳定性、化学稳定性和低成本,它广泛用作薄膜生长的衬底。在平坦的蓝宝石衬底上生长 GaN 外延层,衬底材料和外延材料的热膨胀系数差异和晶格失配引起的位错密度为  $10^9 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2[8,10]}$ 。位错传递到多量子阱有源层,内量子效率降低<sup>[11]</sup>。图形化蓝宝石衬底技术(PSS)是一种无掩膜、无生长打断的侧向过生长技术<sup>[10,11]</sup>。PSS 使得外延晶体的质量和光汲取效率都得到改善<sup>[12]</sup>,LED 的亮度得到提高。本文系统地介绍 PSS 技术,包括 PSS 制备、外延材料生长、PSS-LED 的光电特性和 PSS 提高 LED 亮度的原因。

## 2 基于 PSS 的 HB-LED 制作过程

### 2.1 衬底制备

制备图形化蓝宝石衬底要经过两个步骤,1)在平坦蓝宝石衬底上制作特定图形的掩膜,2)通过刻蚀将掩膜图形转移到蓝宝石衬底上。掩膜图形的形状和尺寸决定了衬底图形的形状和尺寸。采用光刻工艺制作微米级掩膜图形,采用纳米压印或自组装单层纳米球制作纳米级掩膜图形。通过刻蚀将掩膜图形转移到蓝宝石衬底,刻蚀分为湿法和干法两种。

### 2.2 外延材料生长过程

图 1 为 PSS-LED 和 UPSS-LED 生长过程<sup>[7]</sup>。在 PSS 上进行外延生长有很多优点,因为在 PSS 上进行的是无掩膜、无污染的单步生长,能减小位错和生长时间<sup>[3]</sup>。先的去离子水中将 PSS 漂洗 5 min,然后在  $50^\circ\text{C}$  下的异丙醇中清洗 1 min,最后用氮气枪吹干<sup>[13]</sup>,或者在高温下用  $\text{H}_2$  清洗<sup>[1]</sup>。三甲基镓 TMGa 为镓源<sup>[5,13~20]</sup>,三甲基铟 TMIIn 作为铟源<sup>[5,13~19]</sup>, $\text{NH}_3$  作为氮源<sup>[5,13~20]</sup>, $\text{SiH}_4$  或  $\text{Si}_2\text{H}_6$  作为 n 型掺杂源<sup>[5,14~16,18,19]</sup>,环戊二烯基镁  $\text{Cp}_2\text{Mg}$  作为 p 型掺杂源<sup>[5,14~16,18,19]</sup>,以  $\text{H}_2$  为载气<sup>[13,17]</sup>。在材料生长前通常先引进一个低温成核层,该层有两个作用:1)提供高密度的成核中心;2)降低外延材料与衬底之间的界面自由能,提高侧向生长的质量<sup>[10]</sup>。

随后生长 GaN,外延材料从刻蚀槽的顶端开始生长,形成杯状的单晶体,随着生长的进行,相邻的杯状的侧翼合并成同质晶体。在台阶处产生的线位错向外延层表面传播,向杯状单晶侧翼倾斜,但是倾斜角较小且方向相同,所以这样的线位错几乎不会与相邻的线位错合并<sup>[21]</sup>。在圆锥状图形化蓝宝石衬底的顶部,仍然存在着大量的位错,但是,在圆锥状图形化蓝宝石衬底的斜面区域,没有位错或残余应力。这是由斜面区的侧

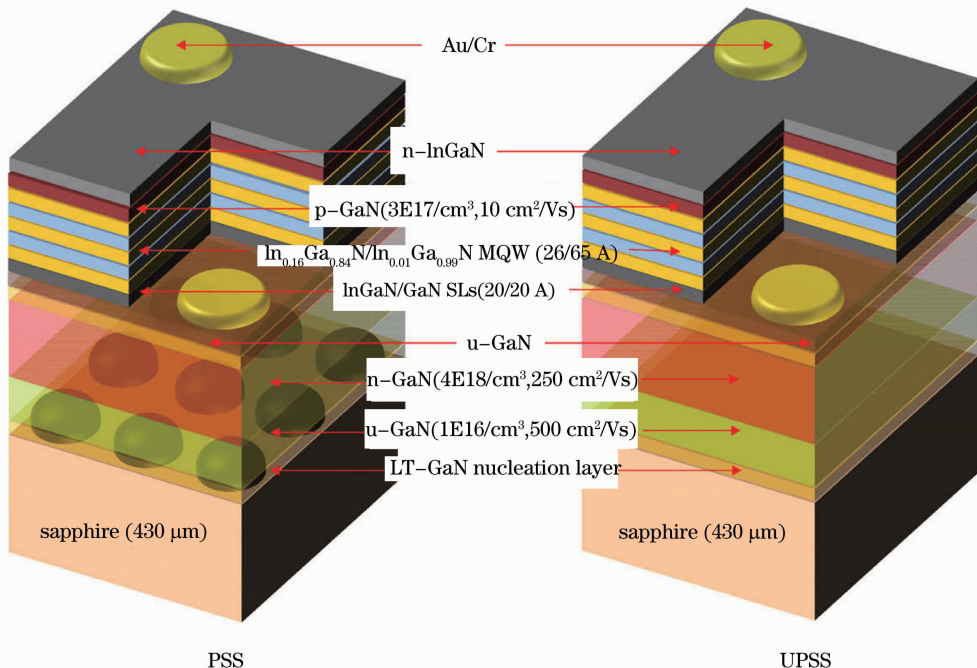


图 1 PSS-LED 与 UPSS-LED 示意图

Fig. 1 Schematic drawing of PSS-LED and UPSS-LED

面外延生长引起的,因为侧面外延生长能够减小晶格失配和两种材料的不连续。图2为PSS上外延材料侧向生长的横截面TEM图<sup>[21]</sup>。使用圆锥状图形化蓝宝石衬底,晶格位错密度从 $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 减小到 $10^7 \text{ cm}^{-2}$ <sup>[10]</sup>。随着生长时间的增加,侧向外延生长合并的程度越大,位错密度越小<sup>[1,8,17]</sup>。这样在 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 下<sup>[8,13,15]</sup>依次生长 $1.5 \sim 3.5 \text{ }\mu\text{m}$ <sup>[8,13,15,16]</sup> GaN非掺杂缓冲层和 $2.0 \sim 4.5 \text{ }\mu\text{m}$ <sup>[5,8,15,16,22]</sup>的Si掺杂n型GaN覆层、InGaN/GaN多量子阱层、InGaN为量子阱,GaN势垒层。最后生长Mg掺杂GaN接触层。

### 2.3 后续处理

图3给出了NPSS-LED的后续处理过程示意图。氮化镓外延完成之后,采用标准光刻工艺将未成形的LED器件整体切割成 $(260 \sim 390 \text{ }\mu\text{m}) \times (300 \sim 690 \text{ }\mu\text{m})$ <sup>[1,2,8,12,14,16,19,23\sim 27]</sup>。为了制作n型电极,需要将n型GaN暴露出来,先用等离子体增强化学气相淀积在蓝宝石表面生长 $300 \text{ nm}$ 厚的 $\text{SiO}_2$ 层,通过光刻技术用BOE溶液对 $\text{SiO}_2$ 进行湿法刻蚀以确定台面图形。然后在ICP-RIE系统中用 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ 刻蚀气体对台面进行刻蚀,直到暴露出n型GaN掺杂层<sup>[12,27]</sup>,在该层上淀积 $300 \text{ nm}$ 厚的氧化铟锡(ITO)透明导电薄膜<sup>[23,28]</sup>,该层能够分散电流<sup>[8]</sup>,并具有高电导率和高透明度,波长为 $460 \text{ nm}$ 的光的透明度大于 $95\%$ <sup>[12]</sup>。然后通过电子束蒸镀<sup>[24]</sup>分别淀积n型和p型接触层。制作n型接触层的材料有Ti-Al-Au<sup>[2,15]</sup>、Cr/Ni/Au<sup>[14]</sup>、Cr-Au合金<sup>[8,23]</sup>,制作p型接触层的材料有Ni/Au<sup>[14]</sup>、Ti-Al-Au<sup>[15]</sup>、Cr-Au合金层<sup>[8,23]</sup>。

## 3 PSS-LED的光电特性

### 3.1 光谱特性

#### 3.1.1 光致发光(PL)光谱

图形化蓝宝石衬底技术能够显著提高LED的发光光强,减小半峰全宽<sup>[1,8,13,16,17,29,30]</sup>。对于CSS-LED,由于GaN外延层的位错密度较大,不同能级的复合中心较多,所以复合的峰值拓展较宽,半峰全宽较大<sup>[28]</sup>。

如图4所示<sup>[1]</sup>,CSPSS-LED的带边发射光强是CSS-LED的4倍,CSS-LED的半峰全宽为 $19 \text{ nm}$ ,CSPSS-LED的为 $17 \text{ nm}$ 。CSS-LED峰值波长为 $452 \text{ nm}$ ,CSPSS-LED的峰值波长为 $454 \text{ nm}$ <sup>[1]</sup>。在CSPSS上生长的GaN的晶格常数非常接近块状GaN晶格常数,而在CSS上生长的GaN薄膜,其晶格常数偏大。晶格常数变小引起禁带宽度变小,所以CSPSS-LED存在微量红移<sup>[1]</sup>。

PSS-LED的发射光峰值强度更大,这说明PSS上的外延材料晶体质量更好,线位错密度更低<sup>[7,31]</sup>。这个改善是由于在PSS上光在棱镜间的内部反射增加<sup>[7]</sup>。

如图5所示A区的强度为其它两区的两倍多<sup>[18]</sup>,其中强度受缺陷浓度的影响较大,因为缺陷浓度越大,非辐射复合中心就越多。斜面区(B区)的梯状位错比PSS顶部(C区)的位错少,A区的侧向外延生长使得其位错基本为零。从沟槽区到凸状PSS区,NBE峰值强度红移

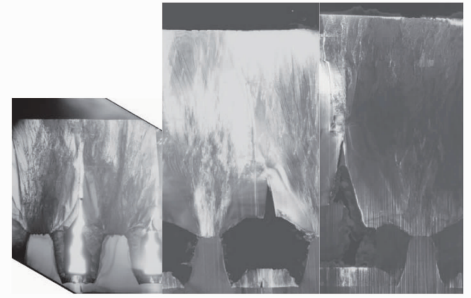


图2 PSS上的外延材料的侧向过生长的横截面TEM图  
Fig. 2 Cross-sectional TEM images of side over-growth epitaxy material on PSS

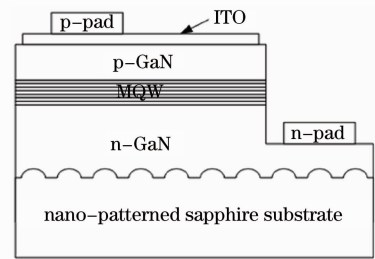


图3 NPSS-LED的示意图

Fig. 3 Schematic drawing of NPSS-LED

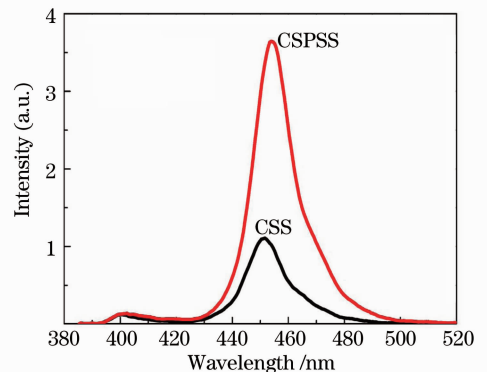


图4 在CSS和CSPSS上生长的InGaN/GaN薄膜的PL测量结果

Fig. 4 PL spectrum of InGaN/GaN films grown on a CSS and a CSPSS

了大约 10 meV, 这归因于沟槽区残余应力的释放<sup>[13,18,30]</sup>。

### 3.1.2 XRD 光谱

由图 6 可知与 CSS-LED 相比, PSS-LED 的半峰全宽更小, 发光强度更大<sup>[32]</sup>。PSS 上晶体质量提高。XRD 峰值跨度较窄, 说明由线位错密度的减小引起的晶体质量的改善<sup>[16,17,19,32]</sup>。

### 3.1.3 电致发光(EL)光谱

图 7 给出了 CSS-LED 和 LPSS-LED 的电致发光光谱<sup>[8]</sup>。在图形化蓝宝石衬底和常规蓝宝石衬底上构造氮化物基蓝光 LED。虽然两种 LED 的 EL 峰值的位置一样, 但是在蓝宝石衬底上生长的 LED 的 EL 光强比常规蓝宝石上生长的 LED 的 EL 光强大 35%。蓝宝石衬底 LED 的最大输出功率发生在更大的注入电流处, 其可靠性也更好。这些改善都归因于在图形化蓝宝石衬底上生长的 LED 内部的位错密度更低<sup>[1,2,8]</sup>。

## 3.2 I-V 特性

图 8 为 CSS-LED 和 CPSS-LED 的 I-V 特性注入电流为 20 mA 时, CSPSS-LED 的电压为 3.15 V, CSS-LED 的电压为 3.18 V<sup>[1]</sup>。两者的 I-V 特性曲线相差不大, 电压几乎相同, 是因为两种器件使用了相同的外延层。两曲线相差不大, 说明 PSS-LED 对正向 I-V 特性的影响不大<sup>[7,8,29]</sup>。在电压为 -10 V 时, 泄漏电流 CSPSS 的 -0.23  $\mu$ A, CSS 的 -0.46 nA。CSPSS 上外延材料的线位错密度减小, 使得泄漏电流减小<sup>[1,25,29]</sup>。

## 3.3 L-I 特性

由图 9 可知<sup>[25]</sup>, 注入电流为 20 mA 时, NPSS、PSS 和 CSS-LED 的输出功率分别为 10.27, 9.27 和 7.93 mW, 外量子效率分别为 16.39%, 14.97% 和 12.59%。注入电流为 20 mA 时, NPSS-LED 的输出功率与 CSS-LED 相比, 提高了 30%, 与 PSS-LED 相比, 提高了 11%。注入电流为 100 mA 时, NPSS-LED 的输出功率达到饱和<sup>[25]</sup>。

相同的注入电流下 DS-PSS-FCLED 的输出功率最大, 在 350 mA 注入电流下, FCLED、PSS-FCLED 和 DS-PSS-FCLED 的输出功率分别为 79.3, 98.1 和 121.5 mW, 在不增加电压的情况下, 电致发光强度提高了 53%<sup>[5]</sup>。

## 3.4 可靠性

由图 10 所示<sup>[29]</sup>, 两种 LED 的输出功率随点亮时间的增加而下降, 这没有什么差别。在相同的后续工艺下, PSS-LED 的可靠性更高<sup>[19]</sup>。

室温下, 注入电流为 20 mA 时蓝光 LED 的寿命测量时间超过 1000 h 后,  $D_g = 1 \mu\text{m}$  的 PSS-LED 和 CSS-LED 的 EL 光强分别退化 22% 和 28%。这说明 PSS-LED 的线位错更小, 使得其寿命得以延长。陷阱浓度的减小和线位错诱导的非辐射复合中心的减小改善了 GaN 外延层的质量<sup>[19]</sup>。

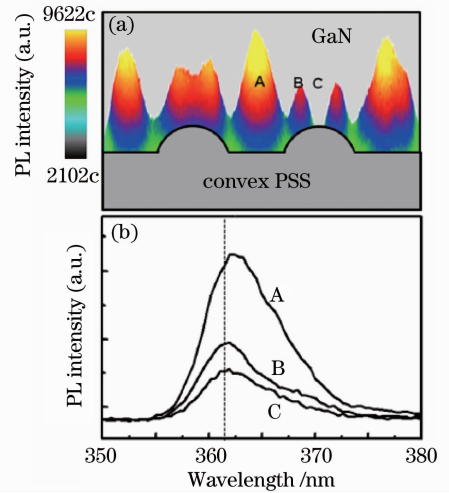


图 5 (a) CPSS 上生长的 GaN 薄膜的 PL 横截面示意图; (b) 通过 LCSM 在 A、B 和 C 记录的 GaN 薄膜的 PL 光谱(虚线代表中心峰值位置)

Fig. 5 (a) Cross sectional PL image of a GaN film grown on the CPSS; (b) PL spectra of a GaN film recorded at the A, B and C regions by LCSM (The dashed line indicates the centered peak location)

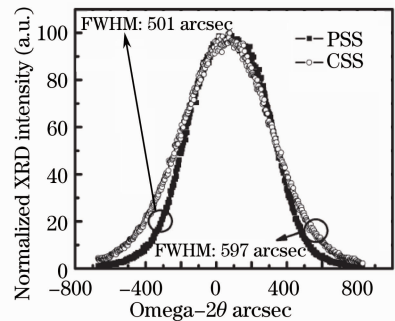


图 6 CSS-LED 与 PSS-LED 的 XRD 光谱  
Fig. 6 XRD spectrum of CSS-LED and PSS-LED

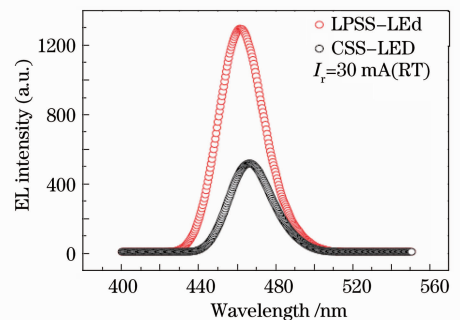


图 7 CSS-LED 与 LPSS-LED 的 EL 特性  
Fig. 7 EL characteristics of LED on LPSS and CSS

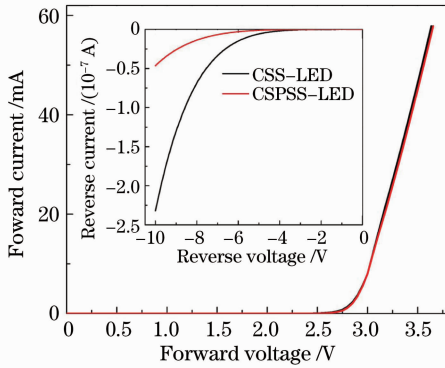


图8 CSS-LED和CSPSS-LED典型的I-V特性  
Fig. 8 Typical I-V characteristic of CSS-LED and CSPSS-LED

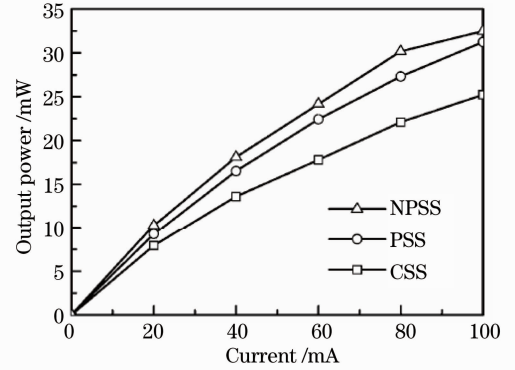


图9 NPSS-LED、PSS-LED和CSS-LED的P-I特性  
Fig. 9 P-I characteristic of NPSS-LED, PSS-LED and CSS-LED

### 3.5 寿命

寿命问题一直是限制 GaN 发光二极管应用的核心问题<sup>[37]</sup>。以输出功率衰减一半所用的时间定义寿命<sup>[32]</sup>。

图 11 给出了两种 LED 相关发光光强的寿命,先标准化到最初的读数<sup>[2]</sup>。寿命测量过程中,两种 LED 的注入电流为 50 mA,温度控制在 80 °C。如图 11 所示,在最初的 20 h 内,LED I 的 EL 光强减小 40%,LED II 的光强减小 55%。这样的结果是由 PSS 衬底上更小的位错密度引起的。因而,通过使用图形化蓝宝石衬底,的确能够减小由位错诱导的非辐射复合和热损耗<sup>[2]</sup>。

在 80 °C 下,PSS-LED 的寿命为 590 h,CSS-LED 的寿命为 305 h,室温下,PSS-LED 的寿命为 3424 h,CSS-LED 的寿命为 1984 h,PSS-LED 的结温和热阻抗都较小,这归因于 PSS 结构上位错密度的减小<sup>[32]</sup>。

注入电流为 20 mA 时,PSS 和 CSS-LED 的输出功率分别为 11.24 和 8.99 mW。寿命测量过程中,驱动电流为 50 mA,温度为 85 °C,测试结果显示:280 h 过后,PSS 和 CSS 的功率分别减小 27.5%(8.15 mW)和 41.8%(5.17 mW),PSS 和 CSS 功率损失一半的时间分别为 590 h 和 305 h。注意,缺陷和位错引起的复合为非辐射复合,这引起了热损耗。与 CSS 相比,PSS-LED 的输出功率更大,能够承受更高的输入电流,所以,CSS-LED 的寿命更短<sup>[32]</sup>。

## 4 PSS 提高 LED 亮度的原因

### 4.1 内量子效率的提高

内量子效率与材料外延生长有关<sup>[28]</sup>。界面处的线位错通过外延材料生长传递到多量子阱区域,部分线位错在禁带中央引入复合中心能级,导带电子和价带空穴在复合中心复合,因为释放能量太低,通过  $E=h\frac{1}{\lambda}$  换算成波长后,波长不在可见光的范围内,所以产生非辐射复合,非辐射复合使得内量子效率显著下降<sup>[11]</sup>。

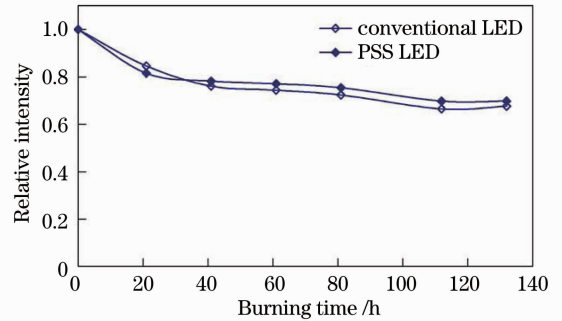


图 10 在 55 °C 下,注入电流为 50 mA 时条纹状 PSS-LED 和 CSS-LED 可靠性结果  
Fig. 10 Reliability result of stripe PSS and conventional LED under the stress-condition of 55 °C and 50 mA

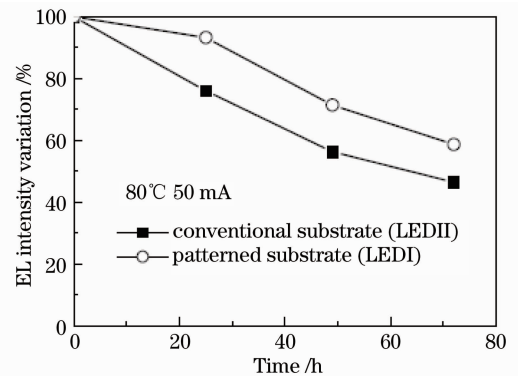


图 11 两种 LED 的与发光强度相关的寿命测量曲线  
Fig. 11 Life time related to luminous intensity measured from these two LED, normalized to their respective initial readings

外延晶体的合并机理能够减小位错<sup>[33]</sup>,用 GaN 低温成核层解决 GaN 和蓝宝石衬底之间的晶格失配及蓝宝石晶体的非极性,随后的进行大晶粒的生长,在合并之前达到 10~100 nm 的高度,晶体的内部没有位错,在晶粒的边界出现边沿位错和线位错,分别引起内部晶粒的扭转和弯曲<sup>[33]</sup>。CSPSS 有效地抑制了线位错向圆锥区域传播,因而有效地改善了 GaN 薄膜的晶体质量<sup>[1]</sup>。

分别用电致发光和光致发光的方法研究 InGaN/GaN 紫外 LED 的内量子效率。PSS-LED 的非辐射复合中心更少<sup>[22]</sup>,更多的电子-空穴对的复合转化为光子,内量子效率提高。CWE-PSS (Chemical wet-etching-patterned sapphire substrate) 将线位错密度从  $1.28 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  减小到  $3.62 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ,内量子效率提高 12.5%<sup>[11]</sup>。随着发射光波长的减小,光发射效率对非辐射复合中心更加敏感,因为高能量下要把载流子限制在辐射复合中心更难<sup>[4]</sup>。

梯状的线位错与 GaN 生长过程中的台面表面相关,线位错的减小是晶格质量改善最主要的因素<sup>[18]</sup>。CPSS 沟槽区的线位错由于侧向生长模式而弯曲。在弧形 PSS 斜面区观测到梯状的线位错。线位错阶梯状的方式向上传播,在 PSS 顶部汇聚,这有效地防止了沟槽区线位错的垂直传播<sup>[18]</sup>。

#### 4.2 光萃取率的提高

氮化镓折射率为 2.5,蓝宝石折射率为 1.78 算出关键角为  $23^\circ$ 。GaN 与蓝宝石衬底之间反射系数的差别导致光萃取率较低<sup>[4,7,31,34]</sup>。通常情况下,仅仅 4% 的光从 LED 内部萃取<sup>[28]</sup>。有源层产生的光绝大多数在一次次的反射过程中被电极吸收,逐渐消失。内部反射将光变成热<sup>[1]</sup>。

做如下模拟:

GaN 与空气折射率的差别较大,总的内部反射是由于光子限制引起的。大部分的光子在 LED 内部反射,最后被吸收或者转化成热。PSS 的倾斜面对光萃取率的影响较大<sup>[31]</sup>。圆锥状图形化蓝宝石衬底的倾斜面很容易使得光子传播方向变到垂直于 LED 顶部的方向,提高光萃取率。CSPSS-LED 的光线大部分从表面射出,这不同于 CSS-LED,在这样的 LED 内部,出射光沿着波导传播,该波导的构成为空气-GaN-蓝宝石衬底,这样的波导使得大多数光线从侧向导出(图 12)<sup>[1]</sup>。

此外,V 型 CWE-PSS 使得光子逃离 LED 的概率更大,光萃取率提高了 20%<sup>[11]</sup>。根据衍射能量的测量,CWE-PSS 对提升导向光的萃取率更优异,萃取率提高了 7.8%,与 CSS-LED 相比,CWE-PSS-LED 的光输出功率整体上提高了 45%<sup>[11]</sup>。

CSS-LED:  $a_0$  和  $b_0$  从多量子阱射出,入射角大于临界角,发生全反射,以  $a_1$  和  $b_1$  射出,之后不断被反射,能量不断被吸收,以热能的方式释放。

NPSS-LED: 图形的倾斜面能将光线重新定向,从界面射出,  $a_0$  和  $b_0$  从多量子阱射出,发生折射,以  $a_2$  和  $b_2$  射出,同时,由于图形间距减小,纳米图形能够反射更多光子,使得光子找到各自的逃离锥面 NPSS 改善了光萃取率(图 13)<sup>[2,34]</sup>。

在注入电流为 20 mA 时,NHPSS-LED (Nano-hole PSS-LED) 将 InGaN-GaN 多量子阱 LED 的光输出功率提高了 33%,电光转化效率比普通的高出 30%。PSS 能有效散射出射光,重定向从 LED 芯片内部射出的光线,让其找到逃离区,射出 LED<sup>[26]</sup>。除了 PSS 之外,光子晶体与 LED 恰当结合,可以通过光子晶体对光的衍射作用把限制在 LED 中的光释放出来<sup>[35]</sup>。

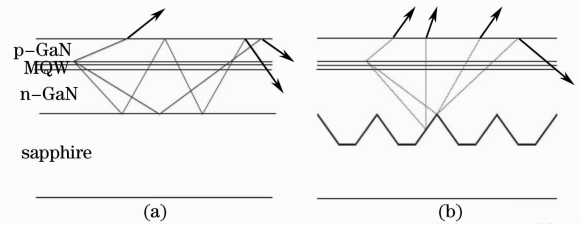


图 12 (a) CSS-LED 和 (b) CSPSS-LED 的光轨迹图  
Fig. 12 Schematic ray tracing of light for the (a) CSS-LED and (b) CSPSS-LED

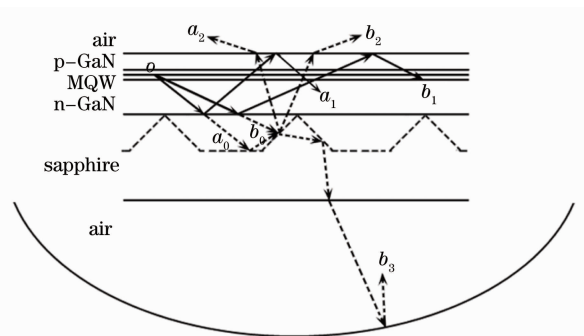


图 13 P-LED(实线)和 NPSS-LED(虚线)光传播轨迹示意图  
Fig. 13 A schematic ray-tracing of light for the P-LED (solid line) and NPSS-LED (dashed line)

## 5 结束语

本文系统地介绍了基于 PSS 的 HB-LED, 包括衬底制备、材料外延、光电特性和 PSS 改善 LED 光电特性的原因。通过在平坦蓝宝石衬底上制作掩膜并通过刻蚀将掩膜图形转移到蓝宝石衬底上, 得到图形化蓝宝石衬底。在 PSS 上依次生长低温成核层、非掺杂 GaN 层、n 型 GaN 层、多量子阱和 p 型 GaN 层, 并作后续处理得到 LED。PSS 上材料的外延测向合并减小位错密度, 提高内量子效率, PSS 对光线的散射机制提高了光萃取率。PSS 技术使得 LED 的功率提高 30%, 大功率白光 LED 更被视为第四代节能环保型的照明产品<sup>[36]</sup>。作为一种能够提高 LED 功率的新技术, PSS-LED 将广泛应用于大功率白光 LED 中。2012 年 HB-LED 产品的市场规模将达 114 亿美元, PSS 技术作为一种制作 HB-LED 的新技术, 具有优异的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 J. H. Lee, D. Y. Lee, B. W. Oh *et al.*. Comparison of InGaN-based LEDs grown on conventional sapphire and cone-shape-patterned sapphire substrate[J]. *IEEE Trans. Electron Device*, 2010, **57**(1): 157~163
- 2 S. J. Chang, Y. C. Lin, Y. K. Su *et al.*. Nitride-based LEDs fabricated on patterned sapphire substrates[J]. *Solid State Electron.*, 2003, **47**(9): 1539~1542
- 3 H. Y. Gao, F. W. Yan, Y. Zhang *et al.*. Improvement of the performance of GaN-based LEDs grown on sapphire substrates patterned by wet and ICP etching[J]. *Solid State Electron.*, 2008, **52**(6): 962~967
- 4 Cui Yusheng, Guo Weiling, Cui Bifeng. Effects of human body mode electrostatic discharge on GaN based power light emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323004  
崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰. 人体模式静电放电对 GaN 基大功率发光二极管特性的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323004
- 5 C. F. Shen, S. J. Chang, W. S. Chen *et al.*. Nitride-based high-power flip-chip LED with double-side patterned sapphire substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(10): 780~782
- 6 B. J. Kim, M. Mastro, H. Jung *et al.*. Inductively coupled plasma etching of nano-patterned sapphire for flip-chip GaN light emitting diode applications[J]. *Thin Solid Films*, 2008, **561**(21): 7744~7747
- 7 Seong-Muk Jeong, Suthan Kissinger, Dong-Wook Kim *et al.*. Characteristic enhancement of the blue LED chip by the growth and fabrication on patterned sapphire (0 0 0 1) substrate[J]. *J. Cryst. Growth*, 2010, **312**(2): 258~262
- 8 S. Kissinger, S. M. Jeong, S. H. Yun *et al.*. Enhancement in emission angle of the blue LED chip fabricated on lens patterned sapphire (0 0 0 1)[J]. *Solid State Electron.*, 2010, **54**(5): 509~515
- 9 Chen Yinliang, Lü Yijun, Gao Yulin *et al.*. Photoelectric properties of alternating current light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3586~3591  
陈莹亮, 吕毅军, 高玉琳等. 交流发光二极管光电特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3586~3591
- 10 H. Y. Shin, S. K. Kwon, Y. I. Chang *et al.*. Reducing dislocation density in GaN films using a cone-shaped patterned sapphire substrate[J]. *J. Cryst. Growth*, 2009, **311**(17): 4167~4170
- 11 Y. J. Lee, H. C. Kuo, TC Lu *et al.*. Study of GaN-based light-emitting diodes grown on chemical wet-etching-patterned sapphire substrate with V-shaped pits roughening surfaces[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(11): 1455~1463
- 12 H. W. Huang, C. H. Lin, J. K. Huang *et al.*. Investigation of GaN-based light emitting diodes with nano-hole patterned sapphire substrate (NHPSS) by nano-imprint lithography[J]. *Mater. Sci. Engng. B-Adv.*, 2009, **164**(2): 76~79
- 13 T. S. Oh, A. H. Park, H. Jeong *et al.*. Spatial stress distribution and optical properties of GaN films grown on convex shape-patterned sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *J. Alloy. Comp.*, 2011, **509**(6): 2952~2956
- 14 C. Pan, C. Hsieh, C. Lin *et al.*. Light output improvement of InGaN ultraviolet light-emitting diodes by using wet-etched stripe-patterned sapphire substrates[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(8): 084503
- 15 C. T. Chang, S. K. Hsiao, E. Y. Chang *et al.*. 460-nm InGaN-based LEDs grown on fully inclined hemisphere-shape-patterned sapphire substrate with submicrometer spacing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(19): 1366~1368
- 16 D. H. Kang, E. S. Jang, H. Song *et al.*. Growth and evaluation of GaN grown on patterned sapphire substrates[J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2008, **52**(6): 1895~1899
- 17 J. C. Song, S. H. Lee, I. H. Lee *et al.*. Characteristics comparison between GaN epilayers grown on patterned and unpatterned sapphire substrate (0 0 0 1) [J]. *J. Cryst. Growth*, 2007, **308**(2): 321~324
- 18 T. S. Oh, H. Jeong, Y. S. Lee *et al.*. Defect structure originating from threading dislocations within the GaN film grown

- on a convex patterned sapphire substrate[J]. *Thin Solid Films*, 2011, **519**(8): 2398~2401
- 19 W. K. Wang, D. S. Wu, S. H. Lin *et al.*. Growth and characterization of InGaN-based light-emitting diodes on patterned sapphire substrates[J]. *J. Phys. Chem. Solid.*, 2008, **69**(2-3): 714~718
- 20 Y. Q. Sun, Z. H. Wu, J. Yin *et al.*. High quality a-plane GaN films grown on cone-shaped patterned r-plane sapphire substrates[J]. *Thin Solid Films*, 2011, **519**(8): 2508~2512
- 21 N. Kuwano, Y. Kugiyama, Y. Nishikouri *et al.*. Electron microscopy analysis of dislocation behavior in HVPE-AlGaIn layer grown on a stripe-patterned (0 0 01) sapphire substrate[J]. *J. Cryst. Growth*, 2009, **311**(10): 3085~3088
- 22 C. H. Wang, C. C. Ke, C. H. Chiu *et al.*. Study of the internal quantum efficiency of InGaN/GaN UV LEDs on patterned sapphire substrate using the electroluminescence method[J]. *J. Cryst. Growth*, 2011, **315**(1): 242~245
- 23 Y. J. Lee, J. M. Hwang, T. C. Hsu *et al.*. Enhancing the output power of GaN-based LEDs grown on wet-etched patterned sapphire substrates[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(10): 1152~1154
- 24 D. S. Han, J. Y. Kim, S. I. Na *et al.*. Improvement of light extraction efficiency of flip-chip light-emitting diode by texturing the bottom side surface of sapphire substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13): 1406~1408
- 25 J. J. Chen, Y. K. Su, C. L. Lin *et al.*. Enhanced output power of GaN-based LEDs with nano-patterned sapphire substrates[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13): 1193~1195
- 26 Y. K. Su, J. J. Chen, C. L. Lin *et al.*. Pattern-size dependence of characteristics of nitride-based LEDs grown on patterned sapphire substrates[J]. *J. Cryst. Growth*, 2009, **311**(10): 2973~2976
- 27 H. W. Huang, J. K. Huang, S. Y. Kuo *et al.*. High extraction efficiency GaN-based light-emitting diodes on embedded SiO<sub>2</sub> nanorod array and nanoscale patterned sapphire substrate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(26): 263115
- 28 Y. J. Lee, C. H. Chiu, C. C. Ke *et al.*. Study of the excitation power dependent internal quantum efficiency in InGaN/GaN LEDs grown on patterned sapphire substrate[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant.*, 2009, **15**(4): 1137~1143
- 29 Y. J. Lee, T. C. Hsu, H. C. Kuo *et al.*. Improvement in light-output efficiency of near-ultraviolet InGaIn-GaN LEDs fabricated on stripe patterned sapphire substrates[J]. *Mater. Sci. Engng. B-Adv.*, 2005, **122**(3): 184~187
- 30 R. H. Hornga, W. K. Wang, S. C. Huang *et al.*. Growth and characterization of 380-nm InGaIn/AlGaIn LEDs grown on patterned sapphire substrates[J]. *J. Cryst. Growth*, 2007, **298**(1): 219~222
- 31 T. V. Cuong, H. S. Cheong, H. G. Kim *et al.*. Enhanced light output from aligned micropit InGaIn-based light emitting diodes using wet-etch sapphire patterning[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(13): 131107
- 32 P. C. Tsai, R. W. Chuang, Y. K. Su *et al.*. Lifetime tests and junction-temperature measurement of InGaIn light-emitting diodes using patterned sapphire substrates[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(2): 591~596
- 33 M. A. Mastro, B. J. Kim, Y. Jung *et al.*. Gallium nitride light emitter on a patterned sapphire substrate for improved defectivity and light extraction efficiency[J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2011, **11**(3): 682~686
- 34 H. Y. Gao, F. W. Yan, Y. Zhang *et al.*. Fabrication of nano-patterned sapphire substrates and their application to the improvement of the performance of GaN-based LEDs[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**(11): 1~5
- 35 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 233~236  
陈 健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 233~236
- 36 De Qiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540  
德 强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 37 Yu Fei, Jin Lei. Mathematical model of aging and the life test method for GaN LED[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 238~242  
余 菲, 金 雷. GaN 发光二极管的老化数学模型及寿命测试方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 238~242