

# 图形化蓝宝石衬底技术综述

汪明刚 杨威风 胡冬冬 李超波\* 夏洋

(中国科学院微电子研究所 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

**摘要** 采用图形化蓝宝石衬底(PSS)技术可以降低 GaN 外延层材料位错密度,提高了发光二极管(LED)的内量子效率(IQE),同时使 LED 光析出率(LEE)提高。基于 PSS 技术可以制作高效 GaN 基高亮度 LED。基于已公开发表文献对用于高效 LED 制作的 PSS 技术做了综述,介绍了 PSS 技术演化、PSS 的制作方法与主要的图形结构、PSS 上 GaN 外延层生长机制以及 PSS 对 LED 性能的影响。PSS 结构对 LED 的 IQE 与 LEE 均有提高,但对二者哪个提高更为有效没有定论,最近的研究结果倾向于以为对 LEE 提高更为有效。PSS 对 LED 的 IQE 与 LEE 提高的机制目前并不是非常清楚,对公开发表的 PSS 对 LEE 的提高机制提出了不同看法。不同 PSS 结构与尺寸对 GaN 质量以及 LED 性能的影响方面的研究目前还非常缺乏。

**关键词** 材料;图形化蓝宝石衬底;发光二极管;内量子效率;GaN 外延生长;光析出率

**中图分类号** O47 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080005

## Patterned Sapphire Substrate Technique: A Review

Wang Minggang Yang Weifeng Hu Dongdong Li Chaobo Xia Yang

(Key Laboratory of Microelectronics Devices and Integrated Technology, Institute of Microelectronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** Based on patterned sapphire substrate (PSS) technique, threading dislocations density (TD) in GaN epilayer can be reduced and the internal quantum efficiency (IQE) as well as light extraction efficiency (LEE) of light emitting diode (LED) can be improved. Highly efficient LED based on GaN can be grown on patterned sapphire substrate. A review of PSS technique is given based on published papers, including the development of PSS technique, its fabrication and pattern structure, process of GaN epilayer growth and performance improvement of LED on PSS. IQE and LEE can both be improved by PSS, but it is unknown that improvement from IQE or LEE achieved by PSS is essential. The mechanism of improvement of IQE and LEE is not very clear, while arguments about the mechanism proposed by published papers are given. The effects of different PSS structures and sizes on the quality of GaN and performance of LED are not well investigated yet.

**Key words** materials; patterned sapphire substrate; light emitting diodes; internal quantum efficiency; GaN epitaxy growth; light extraction efficiency

**OCIS codes** 160.4670; 230.2090; 230.3670

## 1 引言

氮化镓(GaN)基高亮度发光二极管(HB-LED)具有广泛用途<sup>[1]</sup>,特别是因在固态照明方面的应用前景而迅速发展<sup>[2~8]</sup>。虽然 HB-LED 已经商业化,但由于 LED 内量子效率(IQE)与光析出率(LEE)限制,制作高效 HB-LED 仍然困难<sup>[9]</sup>。制约 IQE 提高的因素为 GaN 外延层与蓝宝石( $Al_2O_3$ )外延衬底之间存在约 16%的晶格失配度<sup>[10]</sup>和约 26%的热膨胀系数失配度<sup>[11]</sup>,因而平面蓝宝石衬底上 GaN 外延层内存在  $10^8 \sim$

**收稿日期**: 2012-02-28; **收到修改稿日期**: 2012-03-26; **网络出版日期**: 2012-05-21

**基金项目**: 国家科技重大专项(2009ZX02037)资助课题。

**作者简介**: 汪明刚(1987—),男,博士研究生,主要从事图形化蓝宝石衬底刻蚀设备及工艺等方面的研究。

E-mail: wangminggang@ime.ac.cn

**导师简介**: 夏洋(1963—),男,博士,研究员,主要从事微电子工艺及装备方面的研究。E-mail: xiayang@ime.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: lichaobo@ime.ac.cn

$10^{10} \text{ cm}^{-2}$  的位错密度(TD)<sup>[12]</sup>,致使 LED 的 IQE 不高。另外蓝宝石衬底、GaN 层与空气的折射率分别为 1.7、2.5<sup>[13]</sup>与 1.0,LED 有源层内光子逃逸角仅约  $23^\circ$ <sup>[14]</sup>,对于正装 LED 芯片,LEE 低于 5%<sup>[14]</sup>。低 IQE 与 LEE 限制了 LED 的外量子效率(EQE)即光效的提高<sup>[9]</sup>。

为了提高 C 面蓝宝石上 GaN 外延层材料质量,带低温缓冲层的两步法生长技术首先被引入 GaN 材料的外延生长中<sup>[15,16]</sup>,该方法在蓝宝石衬底与 GaN 外延层之间引入缓冲层,但这种方法并不能很有效地降低 GaN 中 TD<sup>[17]</sup>。1994 年,Kato 等<sup>[18]</sup>将横向外延过生长(ELOG)技术引入 GaN 外延生长。该方法首先在蓝宝石衬底上生长一层  $2\sim 3 \mu\text{m}$  的 GaN 层,随后采用  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiN}_x$  掩蔽制作图形,再次外延生长 GaN 层<sup>[15]</sup>。第二次 GaN 外延生长将以横向外延过生长方式进行,可以大大降低 GaN 层内 TD<sup>[19~21]</sup>。ELOG 属于两步生长工艺,工艺费时<sup>[22]</sup>且两次外延生长之间易引入污染<sup>[23]</sup>。在 ELOG 的基础上,Ashby 等<sup>[24]</sup>于 2000 年首次将图形化蓝宝石衬底(PSS)技术引入到 GaN 外延生长中,以单步外延实现了 GaN 的横向外延生长,克服了两步外延缺点,TD 大大降低。PSS 不但可以提高 LED 的 IQE<sup>[25]</sup>,同时还可以提高 LED 的 LEE<sup>[26~28]</sup>。

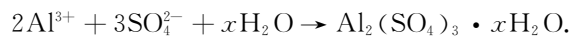
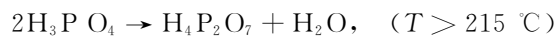
本文对用于高效 HB-LED 制作的 PSS 技术进行综述,包括 PSS 制作、PSS 图形结构、PSS 上 GaN 外延生长与 PSS 对 LED 特性的影响 4 个方面内容,最后对 PSS 技术做出展望。

## 2 PSS 制作与 PSS 图形结构

PSS 主要制作流程如图 1 所示,包括掩蔽层制作、掩蔽图形制作、掩蔽图形向蓝宝石衬底转移与掩蔽层去除四个步骤。首先在蓝宝石衬底上形成一层掩蔽层材料[图 1(a)]。PSS 主要用光刻胶(PR)<sup>[29]</sup>、 $\text{SiO}_2$ <sup>[30~34]</sup>、 $\text{SiN}_x$ <sup>[35]</sup>以及  $\text{Ni}$ <sup>[15,36,37]</sup>等材料作为掩蔽层。随后采用光刻技术在掩蔽层上形成图形[图 1(b)],如果所用掩蔽材料不是 PR,需要先在掩蔽层上涂覆一层 PR,再用光刻制作掩蔽层图形。制作完成掩蔽层图形后,采用刻蚀将掩蔽层图形转移到蓝宝石衬底上[图 1(c)]。蓝宝石刻蚀有两种:湿法刻蚀<sup>[32,34,38,39]</sup>与干法刻蚀<sup>[29,31,37,40~43]</sup>。最后去除掩蔽层[图 1(d)],PSS 结构便制作完成。上述四步中,蓝宝石刻蚀是最重要的步骤。

### 2.1 PSS 湿法刻蚀

蓝宝石衬底湿法刻蚀所用溶液为  $\text{H}_2\text{SO}_4$  与  $\text{H}_3\text{PO}_4$  的混合液,刻蚀时溶液温度在  $240^\circ\text{C}\sim 320^\circ\text{C}$  范围,因而湿法刻蚀通常采用  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$  或  $\text{Ni}$  掩蔽。湿法刻蚀主要反应方程如下<sup>[45]</sup>:



PSS 湿法刻蚀细节可参考文献[44,45]。湿法制作的 PSS 图形形貌结构主要有沟槽<sup>[39]</sup>,金字塔状<sup>[32,36]</sup>以及凹坑<sup>[38,46]</sup>,如图 2 所示。金字塔状与凹坑结构形貌在制作上的唯一不同就是掩蔽层图形互

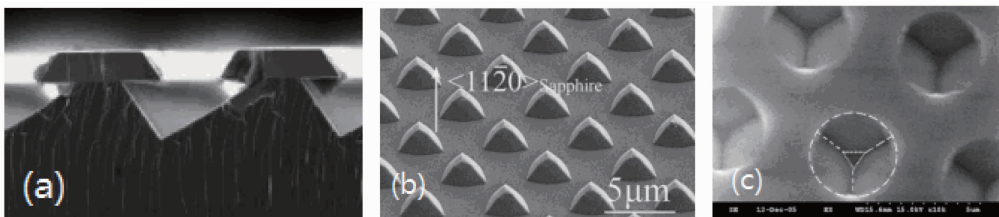


图 2 湿法制作的主要 PSS 图形形貌结构。(a) 沟槽<sup>[39]</sup>; (b) 金字塔状<sup>[32]</sup>; (c) 凹坑<sup>[46]</sup>

Fig. 2 Pattern shapes of PSS fabricated by wet etching. (a) Groove<sup>[39]</sup>; (b) pyramid-shaped<sup>[32]</sup>; (c) recess<sup>[46]</sup>

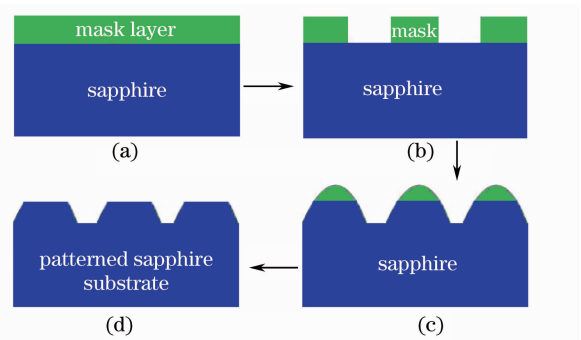


图 1 PSS 制作流程

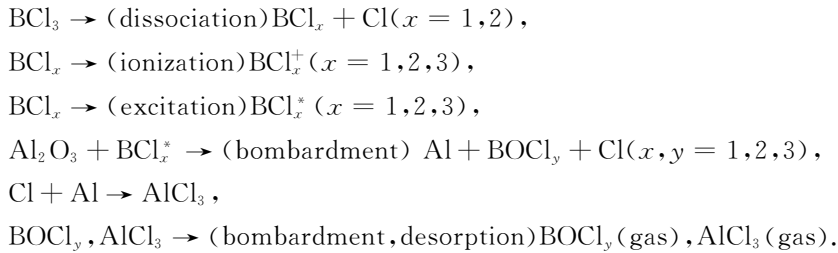
Fig. 1 PSS fabrication process

反<sup>[38]</sup>,前者掩蔽图形为圆柱,后者为圆孔。金字塔结构顶部和凹坑的底部因刻蚀时间的不同,可能会存在平台面<sup>[38]</sup>。因为蓝宝石衬底不同晶向的刻蚀速率不同,具体为  $C$  面  $> R$  面  $> M$  面  $> A$  面<sup>[47]</sup>,因而湿刻图形与蓝宝石晶向有关。与干法刻蚀相比,湿法刻蚀设备简单,但该方法的重复性较差,存在安全隐患且无法在图形表面制作出圆滑结构。因而产业界基本放弃了湿法刻蚀制作 PSS,而广泛采用干法刻蚀。

## 2.2 PSS 干法刻蚀

蓝宝石衬底干法刻蚀基于高密度等离子体刻蚀工艺,主要有感应耦合反应粒子刻蚀(ICP-RIE)<sup>[15,37,48,49]</sup>,电子回旋共振等离子体刻蚀(ECR)<sup>[37]</sup>以及反应离子刻蚀(RIE)<sup>[16,50]</sup>等。这几种方法的区别在于产生等离子体源的方式不同,关于等离子体源可参考文献[51]。ICP刻蚀因其具有高密度等离子体、工艺重复性好以及易于实现与控制<sup>[37]</sup>等优点而被产业界大量使用,以下将以 ICP 为主进行介绍。

PSS 干法刻蚀主要用 PR 作为掩蔽层<sup>[16,52]</sup>,此外也有用  $\text{SiO}_2$ <sup>[30,31,33]</sup>和  $\text{Ni}$ <sup>[37]</sup>掩蔽的。所采用气体主要为氯(Cl)基气体,也有用溴(Br)基与氟(F)基气体的。这些卤族元素气体与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应,主要产物为  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{AlBr}_3$  与  $\text{AlF}_3$ ,这三者的沸点分别为  $178^\circ\text{C}$ ,  $263^\circ\text{C}$  与  $1297^\circ\text{C}$ <sup>[53]</sup>。PSS 刻蚀广泛使用 Cl 基刻蚀,特别是  $\text{BCl}_3$  或  $\text{BCl}_3\text{-Cl}_2$ ,而基本不用 F 基刻蚀。工艺气体组合还有  $\text{BCl}_3\text{-HBr}$ <sup>[43]</sup>、 $\text{BCl}_3\text{-HCl}$ <sup>[41]</sup>、 $\text{BCl}_3\text{-SF}_6$ <sup>[31]</sup>、 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2\text{-Cl}_2$ <sup>[37]</sup>等,辅气有  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}_2$  等。基于 Cl 的蓝宝石刻蚀机理比较复杂,以  $\text{BCl}_3$  气体为例,蓝宝石衬底干法刻蚀基本过程如下:



上述反应中离子轰击至关重要,离子轰击将高能 Al—O 键打断同时将吸附产物解吸附,使刻蚀可以继续进行。PSS 干法刻蚀研究主要集中在趋势性研究上,尚缺乏对刻蚀机理的深入研究。

干法刻蚀的 PSS 形貌结构主要有:条纹状<sup>[15,16,37,48,49]</sup>、柱状<sup>[54]</sup>、半球状<sup>[35]</sup>、透镜结构<sup>[9,33,55]</sup>、圆锥状<sup>[56~58]</sup>以及圆孔状<sup>[59,60]</sup>,如图 3 所示,其中图 3(e)的圆锥状为我们最近得到的结果。

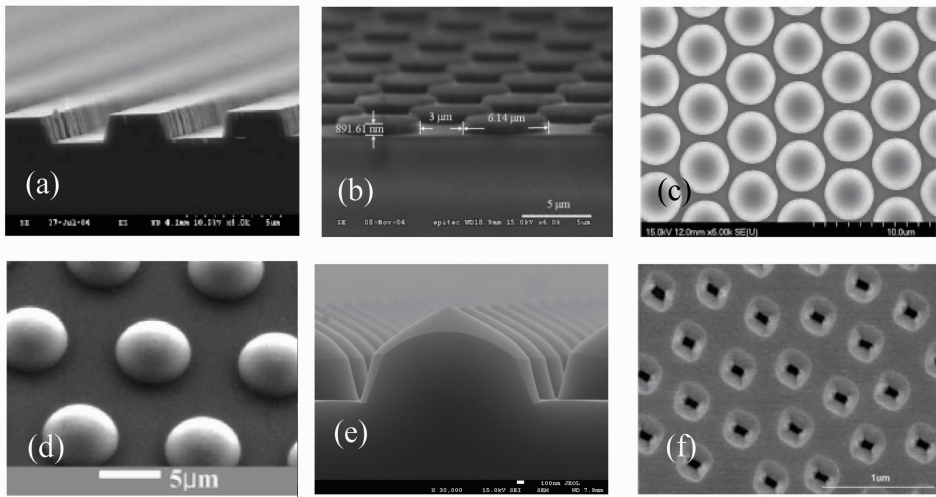


图 3 干法刻蚀制作的 PSS 形貌结构

Fig. 3 Pattern shapes of PSS fabricated by dry etching

图 2 与图 3 列出了 PSS 主要的形貌结构。如果按照图形尺寸,PSS 可以划分为微米级 PSS(MPSS)与纳米级 PSS(NPSS)。MPSS 的线条尺寸为数微米,而 NPSS 的线条尺寸为数百纳米。MPSS 与 NPSS 制作方法上的不同主要体现在掩蔽层图形制作上[图 1(b)],NPSS 掩蔽层图形制作主要有三种方法:纳米压

印<sup>[59]</sup>,自组装<sup>[32,36]</sup>与纳米球光刻<sup>[61,62]</sup>。NPSS 图形形貌结构有纳米柱<sup>[61]</sup>、金字塔<sup>[32,36]</sup>以及纳米洞<sup>[59]</sup>。理论和实验表明,NPSS 对 LED 的效率提高更有效<sup>[63,64]</sup>,关于 NPSS 对 LED 效率的提高会在第 4 部分“PSS 对 LED 特性的影响”中叙述。

### 3 PSS 上 GaN 外延生长

GaN 外延层以一种横向外延方式在 PSS 上生长,这是 PSS 能够降低 GaN 外延层中 TD 的原因。Wang<sup>[65]</sup> 等对四边形与圆锥形截面 PSS 结构上 GaN 外延生长的研究可以很好地说明 GaN 与 TD 在 PSS 的生长演化过程,如图 4 所示。GaN 外延层生长起源于蓝宝石 C 面<sup>[27]</sup>且图形窗口底部要比顶部生长快得多[图 4(a1),(b1)],底部产生的 TD 会因图形侧壁上 GaN 横向生长而部分向图形的斜面弯曲并消失[图 4(a2),(b2)],使 GaN 外延层中的 TD 减少[图 4(a3),(b3)],这表明具有顶部平台结构的 PSS 可能不利于外延层内 TD 的减少。Wang 认为圆锥形图形具有更大的图形斜面,有利于 GaN 层横向生长而更有利于 TD 消除。Cheng 等<sup>[25]</sup>得到了类似的结论。他们在湿法制作的金字塔 PSS 结构上对 GaN 材料质量与金字塔图形倾角关系进行了研究,发现 GaN 的腐蚀坑密度 (EPD) 随着金字塔图形倾角减小而减小,认为 TD 与 PSS 图形的横向生长面积占总面积比率 (LGA),其值为  $1 - A_c/A_{total}$ ,  $A_c$  和  $A_{total}$  分别表示 c 面积和衬底总面积,大小有关,LGA 越大,EPD 越小。

GaN 在 PSS 上的生长还与图形晶向有关。Tadatomo 等<sup>[16,39]</sup>已报道当 V 形槽或条状结构沿  $\langle 11-20 \rangle$  向时,GaN 横向生长只发生在图形顶部平台上,斜面上没有 GaN 生长。这种生长会在 GaN 与蓝宝石之间留下空洞,如图 5 所示。其他结构的 PSS 也可能在图形边缘留下空洞<sup>[35,38,66]</sup>,这些空洞多为 GaN 在相邻图形之间横向生长联合时留下<sup>[38,66]</sup>,有利于减少外延层内的 TD,但对 LED 的电学性质有影响。

相较于平面蓝宝石衬底,PSS 上 GaN 外延层中 TD 量可降低 1 个数量级左右,如图 6 所示,图中各数据点分别表示:(1)干法刻蚀,柱状 PSS<sup>[54]</sup>;(2)干法刻蚀,条纹状 PSS<sup>[16]</sup>;(3)湿法刻蚀,金字塔状 PSS<sup>[67]</sup>;(4)干法刻蚀,纳米柱状 PSS<sup>[61]</sup>;(5)干法刻蚀,透镜状 PSS<sup>[9]</sup>;(6)干法刻蚀,透镜状 PSS<sup>[55]</sup>;(7)湿法刻蚀,孔状 PSS<sup>[68]</sup>。GaN 外延层的材料质量好坏关乎 LED 器件的 IQE 高低,因而对 PSS 上 GaN 外延层内 TD 与 PSS 结构和尺寸之间关系的研究便显得尤为重要,这对 PSS 结构优化、进一步提高 LED 器件效率有益。目前这一方面还有待进一步深入研究。

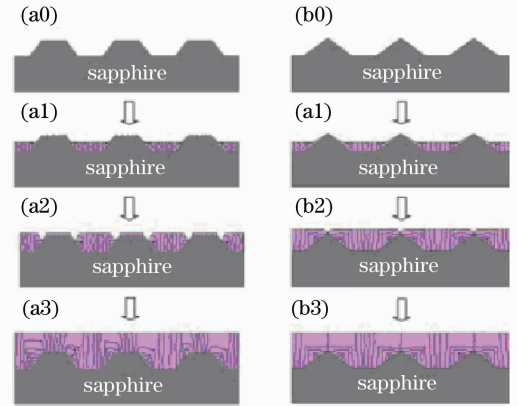


图 4 GaN 外延层与 TD 的生长演化过程。(a0)~(a3) 四边形截面 PSS 结构;(b0)~(b3) 圆锥形截面 PSS 结构<sup>[65]</sup>  
Fig. 4 Evolutions of GaN epilayer growth and propagation of TD with (a0)~(a3) trapezoid shaped PSS and (b0)~(b3) cone shaped PSS<sup>[65]</sup>

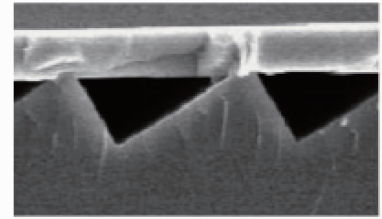


图 5 GaN 与蓝宝石之间因横向外延生长留下的空洞<sup>[39]</sup>  
Fig. 5 Voids formed between GaN and sapphire due to ELOG<sup>[39]</sup>

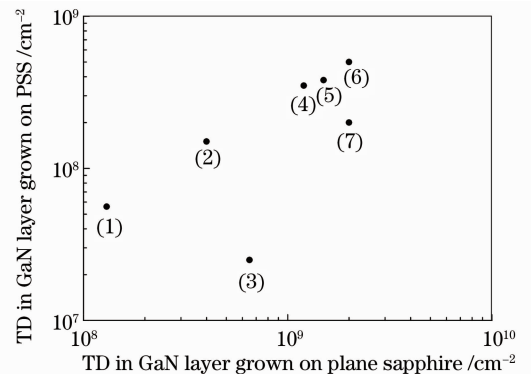


图 6 平面蓝宝石衬底与 PSS 上 GaN 外延层内的 TD, PSS 与平面蓝宝石上 GaN 样品在同一外延工艺中完成  
Fig. 6 TD in GaN layers grown on plane sapphire and PSS. Samples of GaN grown on plane sapphire and PSS are completed in the same epitaxy process

## 4 PSS对LED特性的影响

### 4.1 PSS对LED效率的提高

相较于平面蓝宝石衬底LED(P-LED),PSS-LED的输出光效/光强有大幅提升,如对绿光LED,光致发光(PL)强度可以提升100%<sup>[69]</sup>;对蓝光LED,输出光强可以提高144%(40 mA注入电流)<sup>[9]</sup>;对紫外光(UV)LED,输出光功率可以提升87%(20 mA注入电流)<sup>[27]</sup>。PSS对LED输出光效/光强的提高归因于PSS对LED的IQE与LEE均有提高。

PSS结构对IQE的提高得益于LED有源层中TD的减少。TD在有源层中引入非辐射复合中心,这些非辐射复合中心与辐射复合竞争载流子复合路径<sup>[70,71]</sup>,致使LED的IQE降低,这点可以从Tsao<sup>[72]</sup>总结的发光效率与材料中TD的关系看得更为直观,如图7所示。由于LED的EQE可以表示为IQE与LEE的乘积,对于相同结构的LED,如果将LEE看做常量,则图7可以看成是IQE与TD之间的关系。PSS结构的引入使得GaN材料中的TD量降低了一个数量级左右,GaN-LED中的非辐射复合中心减少,IQE得以提高。

PSS对LEE的提高被解释为PSS结构增加了光子在GaN与蓝宝石界面处的反射次数,使光子逸出LED有源区的几率增加,从而LEE得以提高<sup>[33,34,36,46]</sup>。该解释可以用图8<sup>[34]</sup>示意说明。由于GaN中光子逃逸到空气中的逃逸角约为 $23^\circ$ ,对于P-LED而言,图8中光线 $a_0, b_0$ 与 $c_0$ 将被空气、GaN与蓝宝石构成的波导结构限制,成为限制模式波。对于PSS-LED, $a_0, b_0$ 与 $c_0$ 会因PSS结构的反射而成为非限制模式波出射到空气中。

但该解释缺少两点考虑:1)对于在平面蓝宝石上经过GaN与蓝宝石界面一次反射便出射的光线,经过PSS结构反射后成为限制模式波而出不去,如光线 $d_0$ ;2)光子在LED结构中多次反射,光子能量会受到有源层的吸收<sup>[73]</sup>而增加光子能量的损失,这对输出光功率或光效的提高并不利。目前可查到的公开文献均采用了这种解释,但显然PSS对LED的LEE的提高需要从其他方面入手解释。

以前一般认为PSS对IQE提高更为有效<sup>[67]</sup>,这也是PSS出现的最初目的。但越来越多的研究认为PSS对LEE提升更有效<sup>[60,66,69]</sup>。可能的原因有两条:

1)相较于IQE,LEE的提升空间更大。2000年时,GaN基蓝光LED的IQE已经做到70%,IQE向上提升的空间已经很小<sup>[14]</sup>。但由于平面蓝宝石LED(没有封装)的LEE小于5%,其提升的空间相当大<sup>[14]</sup>,因而PSS对LEE提升更为有效。

2)PSS结构使GaN材料中的TD只降低了一个数量级左右,对GaN外延层内的TD降低有限,从而对IQE提升有限。江洋等<sup>[74]</sup>通过实验认为GaN体材料晶体质量在一定范围内对LED器件IQE影响十分有限。

有文献指出PSS几何尺寸缩小到纳米量级即NPSS可以更有效地提高LED的IQE与LEE<sup>[59,63,64]</sup>,从而提高LED效率或光功率。相较于MPSS,NPSS结构上GaN材料质量会变差<sup>[22]</sup>,NPSS对LED的EQE提升更主要的还是来自对LEE的提升<sup>[22,59]</sup>。NPSS是PSS技术未来发展的一个方向。

对于PSS对IQE还是LEE提升更为有效,需要更有力的实验数据来说明,这对弄清楚PSS提高EQE的机制以及PSS结构优化有益。

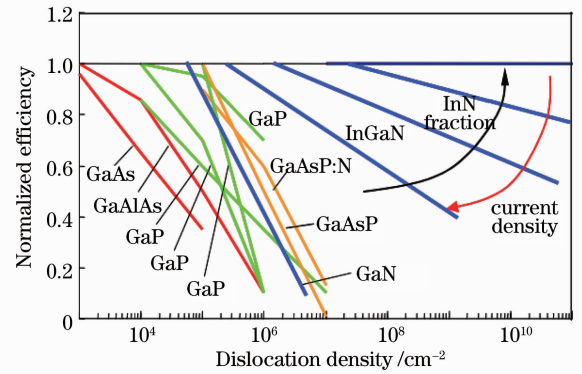


图7 各种半导体材料发光效率与TD之间的关系<sup>[72]</sup>  
Fig. 7 Dependence of luminescence efficiency of various compound semiconductor materials on dislocation density<sup>[72]</sup>

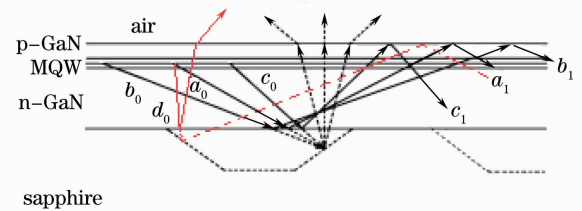


图8 PSS对LEE提高的解释。实线表示P-LED中光线的路径,虚线表示PSS-LED中光线经过的路径<sup>[34]</sup>  
Fig. 8 An explanation for LEE enhancement of PSS-LED, including raytracing of P-LED (solid) and PSS-LED (dashed)<sup>[34]</sup>

## 4.2 PSS-LED的 I-V 特性与大注入电流特性

P-LED 与 PSS-LED 的正向开启电压几乎没有差别<sup>[9,22,33,46,56,61]</sup>,说明 PSS 结构不会对 GaN 外延层造成损伤<sup>[46]</sup>,但 P-LED 与 PSS-LED 正向  $I-V$  特性曲线会有差别,即在相同正向电压下<sup>[9,22,33]</sup>,PSS-LED 具有更大注入电流,这归因于 PSS 结构上 GaN 外延层材料质量的提高。但 P-LED 与 PSS-LED 反向  $I-V$  特性曲线有相当大的差别:PSS-LED 的反向漏电流要远远小于 P-LED<sup>[22,48,61]</sup>,因为 P-LED 的 GaN 层中的 TD 要多于 PSS-LED,这些高密度 TD 充当了漏电流通道,从而使反向电流大大增加。

随着注入电流的增大,LED 会因散热问题严重而出现输出光功率饱和并随之衰减的现象。由于 PSS 可以降低 GaN 外延层内 TD 密度,使 LED 散热问题得以缓解,因而 PSS-LED 输出功率饱和点对应的注入电流比 P-LED 的更大<sup>[32,34]</sup>。但当 GaN 与 PSS 之间存在空洞时,PSS-LED 输出功率饱和点对应的注入电流反而比 P-LED 的小<sup>[22,61]</sup>,因为这些空洞使散热问题变得严重<sup>[61]</sup>。

## 5 结束语

为了制作高效 GaN 基 LED,PSS 技术被提出并得到了广泛的研究与发展,并已成为产业化制作 HB-LED 的技术。本文全面综述了用于高效 LED 制作的 PSS 技术,包括 PSS 技术的由来、PSS 制作方法、PSS 上 GaN 外延生长与 PSS 对 LED 性能的影响。

PSS 刻蚀主要有湿法与干法两种,基于 ICP 技术的干法刻蚀因其重复性好、易于控制而被产业界广泛用于 PSS 刻蚀。基于不同刻蚀方法与掩蔽图形可以制作出图形结构各异的 PSS。GaN 外延层在 PSS 上通过横向外延生长可以减少 TD,从而提高 LED 的 IQE,同时还可以提高 LEE。针对 PSS 对 LED 的 IQE 与 LEE 提高机制做了详细介绍,并对 PSS 对 IEQ 与 LEE 哪一个提高更为有效做了讨论。PSS 对 LED 的  $I-V$  与  $L-I$  特性同样有影响,这种影响仍来自 PSS 对 GaN 外延层材料质量的提高。

考虑到节能环保,PSS 作为制作 HB-LED 的新技术具有广阔的前景。

## 参 考 文 献

- 1 E. F. Schubert, J. K. Kim. Solid-state light sources getting smart[J]. *Science*, 2005, **308**(5726): 1274~1278
- 2 S. Nakamura, G. Fasol, S. J. Pearton. The Blue Laser Diode; the Complete Story[M]. Berlin: Springer Verlag, 2000
- 3 Y. Narukawa, J. Narita, T. Sakamoto *et al.*. Ultra-high efficiency white light emitting diodes[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(37-41): L1084~L1086
- 4 Liu Cuiping, Yu Jia, Li Xuyan *et al.*. Colorimetric research on LED displaying color holograms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 218~221  
刘翠萍, 于 佳, 黎旭艳 等. LED 用于彩色全息图照明的色度研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(2): 218~221
- 5 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222002  
李 林, 王光珍, 王丽莉 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0222002
- 6 Lin Huichuan, Tao Hua, He Meng *et al.*. Spatial coherence of high-power single-color LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0323003  
林慧川, 陶 华, 贺 盟 等. 大功率单色 LED 的空间相干特性[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0323003
- 7 Xiao Si, Li Lin. A designing of LED stage lighting for long distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(S1): s100307  
肖 思, 李 林. 大功率 LED 舞台灯的照明设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(S1): s100307
- 8 Huang Hongyong, Guo Zhiyou, Ye Guoguang *et al.*. Influence of patterned substrate parameters on luminous efficiency of LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(S1): s100416  
黄鸿勇, 郭志友, 叶国光 等. 图形衬底参数对 LED 发光效率的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(S1): s100416
- 9 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 (0001) substrate[J]. *J. Cryst. Growth*, 2010, **312**(2): 258~262
- 10 Yi-Jung Liu, Tsung-Yuan Tsai, Chih-Hung Yen *et al.*. Performance investigation of GaN-based light-emitting diodes with tiny misorientation of sapphire substrates[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2729~2742
- 11 Pekka Törmä. Approaches for Optimizing Light Emitting Diode Structures Based on III-N Materials[D]. Espoo: Aalto University, 2011. 7~8

- 12 X. A. Cao, J. A. Teetsov, F. Shahedipour-Sandvik *et al.*. Microstructural origin of leakage current in GaN/InGaN light-emitting diodes[J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, **264**(1-3): 172~177
- 13 A. Billeb, W. Grieshaber, D. Stocker *et al.*. Microcavity effects in GaN epitaxial films and in Ag/GaN/sapphire structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(21): 2790~2792
- 14 T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma *et al.*. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(6): 855~857
- 15 S. J. Chang, Y. C. Lin, Y. K. Su *et al.*. Nitride-based LEDs fabricated on patterned sapphire substrates[J]. *Solid-State Electronics*, 2003, **47**(9): 1539~1542
- 16 Kazuyuki Tadatomo, Hiroaki Okagawa, Youichiro Ohuchi *et al.*. High output power near-ultraviolet and violet light-emitting diodes fabricated on patterned sapphire substrates using metalorganic vapor phase epitaxy[J]. *J. Light & Vis. Env.*, 2003, **27**(3): 140~145
- 17 Peng Dongsheng, Feng Yuchun, Niu Hanben. Lateral epitaxial overgrowth GaN thin film with MOCVD[J]. *Electronic Components and Materials*, 2009, **28**(2): 66~69  
彭冬生, 冯玉春, 牛憨笨. MOCVD法横向外延生长 GaN 薄膜[J]. *电子元件与材料*, 2009, **28**(2): 66~69
- 18 Yoshiki Kato, Shota Kitamura, Kazumasa Hiramatsu *et al.*. Selective growth of wurtzite GaN and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  on GaN/sapphire substrates by metalorganic vapor phase epitaxy[J]. *J. Cryst. Growth*, 1994, **144**(3-4): 133~140
- 19 A. Sakai, H. Sunakawa, A. Usui. Defect structure in selectively grown GaN films with low threading dislocation density [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(16): 2259~2261
- 20 Ok-Hyun Nam, Michael D. Bremser, Tsvetanka S. Zheleva *et al.*. Lateral epitaxy of low defect density GaN layers via organometallic vapor[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(18): 2638~2640
- 21 Kazumasa Hiramatsu, Katsuya Nishiyama, Masaru Onishi *et al.*. Fabrication and characterization of low defect density GaN using facet-controlled epitaxial lateral overgrowth (FACELO)[J]. *J. Cryst. Growth*, 2000, **221**(1-4): 316~326
- 22 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
- 23 Ok-Hyun Nam, Tsvetanka S. Zheleva, Michael D. Bremser *et al.*. Lateral epitaxial overgrowth of GaN films on  $\text{SiO}_2$  areas via metalorganic vapor phase epitaxy[J]. *J. Electron. Mater.*, 1998, **27**(4): 233~237
- 24 Carol I. H. Ashby, Christine C. Mitchell, Jung Han *et al.*. Low-dislocation-density GaN from a single growth on a textured substrate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(20): 3233~3235
- 25 Ji-Hao Cheng, Yew Chung Sermon Wu, Wei-Chih Liao *et al.*. Improved crystal quality and performance of GaN-based light-emitting diodes by decreasing the slanted angle of patterned sapphire[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051109
- 26 Eun-Hyun Park, Jin Jang, Shalini Gupta *et al.*. Air-voids embedded high efficiency InGaN-light emitting diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(19): 191103
- 27 Chang-Chi Pan, Chi-Hsun Hsieh, Chih-Wei 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
- 28 Tae Sun Kim, Sang-Mook Kim, Yun Hee Jang *et al.*. Increase of light extraction from GaN based light emitting diodes incorporating patterned structure by colloidal lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(17): 171114
- 29 D. W. Kim, C. H. Jeong, K. N. Kim *et al.*. High rate sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) etching in inductively coupled plasmas using axial external magnetic field[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **435**(1-2): 242~246
- 30 Z. H. Feng, Y. D. Qi, Z. D. Lu *et al.*. GaN-based blue light-emitting diodes grown and fabricated on patterned sapphire substrates by metalorganic vapor-phase epitaxy[J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, **272**(1-4): 327~332
- 31 Xue Xiao-lin, Han Yan-jun, Zhang Xian-peng *et al.*. Smooth etching of sapphire wafers using  $\text{BCl}_3$  inductively coupled plasmas[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(9): 1078~1081  
薛小琳, 韩彦军, 张贤鹏等. 基于  $\text{BCl}_3$  感应耦合等离子体的蓝宝石光滑表面刻蚀[J]. *光电子学•激光*, 2007, **18**(9): 1078~1081
- 32 Haiyong Gao, Fawang Yan, Yang Zhang *et al.*. Enhancement of the light output power of InGaN/GaN light-emitting diodes grown on pyramidal patterned sapphire substrates in the micro- and nanoscale[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(1): 014314
- 33 Suthan Kissinger, Seong-Muk Jeong, Seok-Hyo Yun *et al.*. Enhancement in emission angle of the blue LED chip fabricated on lens patterned sapphire (0001)[J]. *Solid-State Electronics*, 2010, **54**(5): 509~515
- 34 Haiyong Gao, Fawang Yan, Yang Zhang *et al.*. Improvement of the performance of GaN-based LEDs grown on sapphire substrates patterned by wet and ICP etching[J]. *Solid-State Electronics*, 2008, **52**(6): 962~967

- 35 Chia-Ta Chang, Shih-Kuang Hsiao, Edward Yi 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
- 36 Haiyong Gao, Fawang Yan, Yang 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): 115106
- 37 Y. P. Hsu, S. J. Chang, Y. K. Su *et al.*. ICP etching of sapphire substrates[J]. *Opt. Mater.*, 2005, **27**(6): 1171~1174
- 38 Dong-Sing Wu, Hsueh-Wei Wu, Shih-Ting Chen *et al.*. Defect reduction of laterally regrown GaN on GaN/patterned sapphire substrates[J]. *J. Cryst. Growth*, 2009, **311**(10): 3063~3066
- 39 Jing Wang, L. W. Guo, H. Q. Jia *et al.*. Investigation of characteristics of laterally overgrown GaN on stripe sapphire substrates patterned by wet chemical etching[J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, **290**(2): 398~404
- 40 C. H. Jeong, D. W. Kim, J. W. Bae *et al.*. Dry etching of sapphire substrate for device separation in chlorine-based inductively coupled plasmas[J]. *Mater. Sci. Engng. B*, 2002, **93**(1-3): 60~63
- 41 Chang Hyun Jeong, Dong Woo Kim, Kyong Nam Kim *et al.*. A study of sapphire etching characteristics using BCl<sub>3</sub>-based inductively coupled plasmas[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(10): 6206~6208
- 42 Seong-Mo Koo, Dong-Pyo Kim, Kyoung-Tae Kim *et al.*. The etching properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films in N<sub>2</sub>/Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> and Ar/Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub> gas chemistry[J]. *Mater. Sci. Engng. B*, 2005, **118**(1-3): 201~204
- 43 C. H. Jeong, D. W. Kim, H. Y. Lee *et al.*. Sapphire etching with BCl<sub>3</sub>/HBr/Ar plasma[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2003, **171**(1-3): 280~284
- 44 L. A. Marasina, V. V. Malinovsky, I. G. Pichugin *et al.*. Chemical etching of sapphire[J]. *Cryst. Res. Technol.*, 1982, **17**(3): 365~371
- 45 F. Dwikusuma, D. Saulys, T. F. Kuecha. Study on sapphire surface preparation for III-nitride heteroepitaxial growth by chemical treatments[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2002, **149**(11): G603~G608
- 46 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
- 47 S. J. Kim. Vertical electrode GaN-based light-emitting diode fabricated by selective wet etching technique[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(1): 2921~2924
- 48 Y. J. Lee, T. C. Hsu, H. C. Kuo *et al.*. Improvement in light-output efficiency of near-ultraviolet InGaN-GaN LEDs fabricated on stripe patterned sapphire substrates[J]. *Mater. Sci. Engng. B*, 2005, **122**(3): 184~187
- 49 Y. P. Hsu, S. J. Chang, Y. K. Su *et al.*. Lateral epitaxial patterned sapphire InGaN/GaN MQW LEDs[J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, **261**(4): 466~470
- 50 J. W. Kim, Y. C. Kim, W. J. Lee *et al.*. Reactive ion etching mechanism of plasma enhanced chemically vapor deposited aluminum oxide film in CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> plasma[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(3): 2045~2049
- 51 Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing(Second Edition) [M]. Pu Yikang Transl.. Beijing: Science Press, 2007. 291~435  
迈克尔·A. 力伯曼,阿伦·J. 里登伯格. 等离子体放电原理与材料处理[M]. 蒲以康译. 北京:科学出版社, 2007. 291~435
- 52 A. Bell, R. Liu, F. A. Ponce *et al.*. Light emission and microstructure of Mg-doped AlGaN grown on patterned sapphire [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 349~351
- 53 C. Cardinaud, M. C. Peignon, P. Y. Tessier. Plasma etching: principles, mechanisms, application to micro- and nano-technologies[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2002, **164**(1-4): 72~83
- 54 P. C. Tsai, R. W. Chuang, Y. K. Su. Lifetime tests and junction-temperature measurement of InGaN light-emitting diodes using patterned sapphire substrates[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(2): 591~596
- 55 J. C. Song, S. H. Lee, I. H. Lee *et al.*. Characteristics comparison between GaN epilayers grown on patterned and unpatterned sapphire substrate (0001)[J]. *J. Cryst. Growth*, 2007, **308**(2): 321~324
- 56 H. W. Huang, J. K. Huang, C. H. Lin *et al.*. Efficiency improvement of GaN-based LEDs with a SiO<sub>2</sub> nanorod array and a patterned sapphire substrate[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2010, **31**(6): 582~584
- 57 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
- 58 K. S. Lee, H. S. Kwack, J. S. Hwang *et al.*. Spatial correlation between optical properties and defect formation in GaN thin films laterally overgrown on cone-shaped patterned sapphire substrates[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(10): 103506
- 59 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. Eng. B*, 2009, **164**(2): 76~79
- 60 D. S. Wu, W. K. Wang, W. C. Shih *et al.*. Enhanced output power of near-ultraviolet InGaN-GaN LEDs grown on patterned sapphire substrates[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 288~290
- 61 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
- 62 Y. K. Su, J. J. Chen, C. L. Lin *et al.*. GaN-based light-emitting diodes grown on photonic crystal-patterned sapphire substrates by nanosphere lithography[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(8): 6706~6708
- 63 K. Y. Zang, Y. D. Wang, S. J. Chua *et al.*. Nanoscale lateral epitaxial overgrowth of GaN on Si(111)[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(19): 193106
- 64 Y. D. Wang, K. Y. Zang, S. J. Chua *et al.*. Improvement of microstructural and optical properties of GaN layer on sapphire by nanoscale lateral epitaxial overgrowth[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(21): 211908
- 65 M. T. Wang, K. Y. Liao, Y. L. Li. Growth mechanism and strain variation of GaN material grown on patterned sapphire substrates with various pattern designs[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(14): 962~964
- 66 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. Solids*, 2008, **69**(2): 714~718
- 67 T. V. Cuong, H. S. Cheong, H. G. Kim *et al.*. Enhanced light output from aligned micropit InGaN-based light emitting diodes using wet-etch sapphire patterning[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(13): 131107
- 68 D. S. Wu, W. K. Wang, K. S. Wen *et al.*. Defect reduction and efficiency improvement of near-ultraviolet emitters via laterally overgrown GaN on a GaN/patterned sapphire template[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(16): 161105
- 69 Pei Xiaojiang, Guo Liwei, Wang Xiaohui *et al.*. Enhanced photoluminescence of InGaN/GaN green light-emitting diodes grown on patterned sapphire substrate[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(2): 028101
- 70 S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford *et al.*. High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(10): 1249~1251
- 71 Q. Dai, M. F. Schubert, M. H. Kim *et al.*. Internal quantum efficiency and nonradiative recombination coefficient of GaInN/GaN multiple quantum wells with different dislocation densities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(11): 111109
- 72 Jeff Y. Tsao. Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination; an OIDA Technology Roadmap Update 2002 [M]. Washington D. C.: Optoelectronics Industry Development Association, 2002. 34
- 73 Tsung-Xian Lee, Ko-Fon Gao, Wei-Ting Chien *et al.*. Light extraction analysis of GaN-based light-emitting diodes with surface texture and/or patterned substrate[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6670~6676
- 74 Jiang Yang, Luo Yi, Wang Lai *et al.*. Influence of pillar- and hole-patterned sapphire substrates on MOVPE grown GaN bulk and LED structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3468~3473
- 江 洋, 罗 毅, 汪 莱 等. 柱状与孔状图形衬底对 MOVPE 生长 GaN 体材料及 LED 器件的影响[J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3468~3473