

高亮度白光 LED 用外延片的新进展*

张国义^{1 2 3 †} 陆敏³ 陈志忠^{1 2 3}

(1 北京大学物理学院; 2 人工微结构和介观物理国家重点实验室; 3 北京大学宽禁带半导体研究中心 北京 100871)

摘要 文章首先介绍了发光二极管(LED)的内量子效率、外量子效率的基本概念和提高量子效率的基本方法,接着对 LED 外延的结构和方法做了简要介绍. 文章的第三和第四部分则着重介绍了提高内、外量子效率的外延方法, 这些方法包括外延结构的优化, 侧向外延生长, SiC 和 GaN 衬底的生长, AlInGaN 四元系有源区生长, 非极性面、半极性面的外延, 表面粗化结构生长, 图形化二次外延结构. 图形化蓝宝石衬底上的外延, 提高载流子注入效率的结构和组分设计. 文章的第五部分则介绍了基于可靠性和成本考虑的其他新型外延结构, 第六部分介绍了提高 LED 可靠性的外延方法. 最后得出结论: 采用非极性面的 GaN 衬底, 生长优化的 LED 结构, 并结合光子晶体技术, 可望取得突破性进展.

关键词 发光二极管, 外延, 量子效率, 侧向外延, 非极性面, 可靠性

New Progress in wafer epitaxy technologies for high-brightness white LEDs

ZHANG Guo-Yi^{1 2 3 †} LU Min³ CHEN Zhi-Zhong^{1 2 3}

(1 School of Physics, Peking University; 2 State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics; 3 Research Center for Wide Band-gap Semiconductor, Peking University; Beijing 100871, China)

Abstract The concept of internal and external quantum efficiency of light emitting diodes (LEDs) and the basic ways to improve this are first introduced. The epitaxial structure and growth of LED wafers are then briefly described, with emphasis on the techniques to enhance the quantum efficiency. These include epitaxial structure optimization, lateral epitaxial overgrowth, growth on SiC or GaN substrates, growth of an AlInGaN active layer, epitaxy on non- or semi-polarized planes, growth of surface-roughening structures, regrowth on patterned templates, growth on patterned sapphire substrates, structural and composition designs to improve the injection efficiency into the active layer, and so on. Various novel epitaxial structures are discussed with regard to cost and reliability, and methods in growth to improve the reliability are introduced. Finally, we conclude that a breakthrough in semiconductor lighting can be achieved by a combination of non-polarized substrates, optimized epitaxial structures and photonic crystal technology.

Keywords LED, epitaxy, quantum efficiency, lateral epitaxial overgrowth, non-polarized plane, reliability

1 引言

众所周知, 固态照明是 20 世纪末发展起来的一种新技术, 现在仍然处于飞速发展阶段. 随着近几年的快速发展, 白光发光二极管(LED)的性能指标不断提高, 固态照明的实用化已经露出了曙光. 2005 年底, Cree 公司报道了他们的白光 LED 小芯片流明效率达 $100\text{lm/W}^{[1]}$. 据日本的日经 BP 社报道, 日亚

公司日前也开发出了发光效率为 100lm/W 的白色发光二极管, 2006 年 6 月开始供应样品, 计划同年 12 月投入批量生产, 从发光效率来说, 性能超过了普及型荧光灯, 可与发光效率较高的节能灯比肩^[2]. 这些发展包括了材料生长、芯片制备和封装的各个方面的成就. 尤其是在材料生长方面, 最近几

* 国家自然科学基金(批准号: 60577030)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB921607, 2007CB307004)资助项目
2006-09-05 收到初稿, 2007-02-12 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: gyzhang@pku.edu.cn

年,各种新的技术层出不穷,极大地推进了固态照明事业的发展。高亮度白光 LED 已成为新一代节能、环保的固态照明光源的研究热点。本文将从提高 LED 的内量子效率、注入效率、出光效率等角度对这些新技术进行评述,以飨读者。

在涉及本文主题之前,我们先简要描述一些基本的物理概念。内量子效率 η_i 是一个和辐射复合的微观过程密切相关的参数,它被定义为在一定的注入条件下,单位时间内辐射复合产生的光子数与单位时间内注入的载流子对数之比。对于 GaN 基 LED 的器件而言,其量子阱、异质结构载流子限制效应以及量子限制斯塔克效应(QCSE)将对内量子效率起着重要的影响。

LED 的注入效率 η_j 定义为在一定注入条件下,单位时间内注入到发光区中产生复合的载流子数与注入载流子总数之比。提高载流子注入效率 η_j 的方法主要是提高空穴的注入和降低电子的泄漏。这主要表现在提高空穴的迁移率,优化电子阻挡层(e-blocking)和增加电子隧穿势垒层(ETB),同时,优化量子阱的结构及界面,减少溢流(overflow)和表面复合,降低漏电通道。

出光效率 η_{ex} 则是指发光二极管单位时间内发出的光子数与有源区内辐射复合产生的光子数之比。有源区的光子一部分被晶体吸收,一部分在界面处被反射回到晶体内部。增加出光效率主要是减少晶体内部吸收和增加表面透光率,这基本上是通过芯片表面微结构、芯片形状以及封装来解决。在外延技术上,通过提高出射窗口的材料带隙宽度及材料质量,使用结构衬底或掩膜工艺、二次外延、制造表面微结构等,以增加出光效率。

外量子效率 η_e 被定义为每注入一对载流子在 LED 外发出的光子数,它是内量子效率 η_i 、载流子注入效率 η_j 和光出射效率 η_{ex} 的乘积:

$$\eta_e = \eta_i \eta_j \eta_{ex} \quad (1)$$

一般情况下,LED 外延片的内量子效率可以用光致发光谱(PL)等光谱手段来表征,但是由于激发区域与发射区域不完全重合,而且受器件结构影响较大,所以用 PL 谱做量子效率的测量需要做许多经验修正。

2 GaN 基 LED 的基本结构

常规高亮度蓝光 LED 外延片采用金属有机源化学气相淀积(MOCVD)系统生长,N 源和 Ga 源分

别为高纯 NH_3 和三甲基镓(TMGa),高纯 H_2 为载气,(0001)面蓝宝石为衬底。图 1 是常规高亮度蓝光 LED 外延片的结构示意图。首先,在蓝宝石衬底上,在 $550^\circ C$ 低温下生长约 $25nm$ 的 GaN 缓冲层。然后,将衬底温度升高到 $1120^\circ C$,生长约 $2\mu m$ 左右的非掺杂 GaN 缓冲层和 $2-4\mu m$ 的 Si 掺杂 n 型 GaN 层。随后,衬底温度降低到 $800^\circ C$,并改成高纯 N_2 为载气,生长 3—10 个周期的 InGaN/GaN 多量子阱(MQW)作为 LED 的有源区。在多量子阱生长结束后,升温至 $1070^\circ C$,再改成 H_2 生长约 $30nm$ 的 p 型 AlGaIn 电子阻挡层和 $200nm$ 的 Mg 掺杂 p 型 GaN。现在一般商业化的蓝光 LED,波长为 $450nm$,注入电流为 $20mA$ 时,输出功率为 $10mW$ 左右,外量子效率为 15% 左右,其对应的白光 LED 流明效率达 $50lm/W$ 左右。但是,这与半导体白光 LED 照明的 $200lm/W$ 预期目标相距甚远,下面将就内量子效率、注入效率和光出射效率等方面,综述高亮度蓝光 LED 外延片生长的最新进展和未来发展趋势。

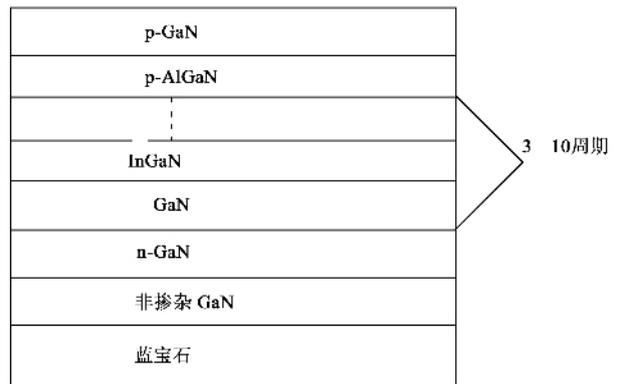


图 1 常规高亮度蓝光 LED 外延片的结构示意图

3 基于内量子效率提高的高亮度蓝光 LED 外延片进展

对于 GaN 基多量子阱结构的 LED,内量子效率的提高决定于阱内载流子辐射复合效率的提高。降低材料的缺陷密度以及 InGaIn 量子阱内的压电极化是减少非辐射复合、增加辐射复合几率的有效手段。目前常用的手段包括小失配的衬底使用、All-GaN 四元系有源区生长、非极性面生长等。

3.1 SiC 衬底^[3,4]

SiC 衬底与 GaN 间的晶格失配比蓝宝石小,结合一定的生长技术,可以得到结晶品质更好的外延片,

更适宜于制备紫光或更短波长的发光器件. 另外, SiC 良好的导电性和热导性有利于制备具有上下电极的高功率器件(见图 2). 它的 LED 外延片和器件结构基本与蓝宝石衬底相同. 在波长为 460nm、注入电流为 20mA 时,正向电压为 3.5V 左右,输出功率 1998 年达 1mW 左右,2000 年达 7mW 左右,其对应的白光 LED 流明效率达 1lm/W 左右. 现在已报道的 SiC 衬底白光 LED 最高流明效率达 130lm/W.

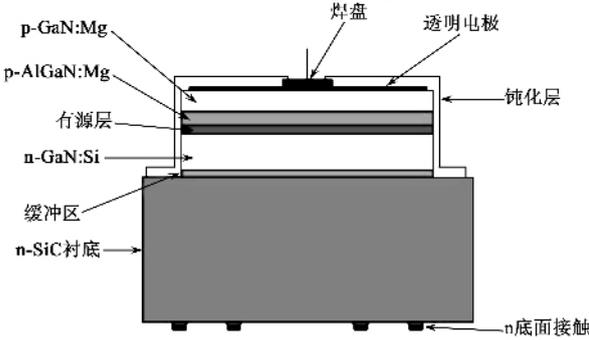


图 2 SiC 衬底上 LED 器件结构示意图

3.2 GaN 衬底

在无支撑 GaN 衬底上生长的 LED 外延片相对于常规的 C 面蓝宝石衬底,其器件性能将得到明显的改善^[5-7]. 首先外延片中的位错密度将大大降低,从而导致反向电流下降 6 个数量级左右,而且均匀性很好. 图 3 为光功率 L 和电流 I 的关系曲线. 实验证实, V 型缺陷和与之相关联的螺旋位错及混合位错是漏电流的主要路径,紫光(波长为 405nm)在注入电流为 20mA 的情况下内量子效率提高了一倍,而蓝光(波长为 465nm)没有什么变化,而在高注入电流的情况下,蓝光或紫光的内量子效率和发光功率都将大大提高,这是由于散热和电流扩展特性大大改善造成的.

3.3 四元系的有源区设计^[8,9]

采用四元 AlInGaIn 作为量子阱垒层材料,可以得到有源区晶格匹配的结构,从而提高有源区的晶体质量(减少应力和缺陷,提高界面平整度等),实验证实,此种有源区的发光机理不是局域态或量子点发光,而是带到带的跃迁发光. 因此,此种有源区尤其适合制备宽量子阱的高功率 LED. 当电流低于 120mA 时,发光功率不如常规结构好,但电流高于 120mA 时,发光功率将高于常规结构,并且电流越高,这种优势越明显,而且线性很好,也不易饱和(见图 4).

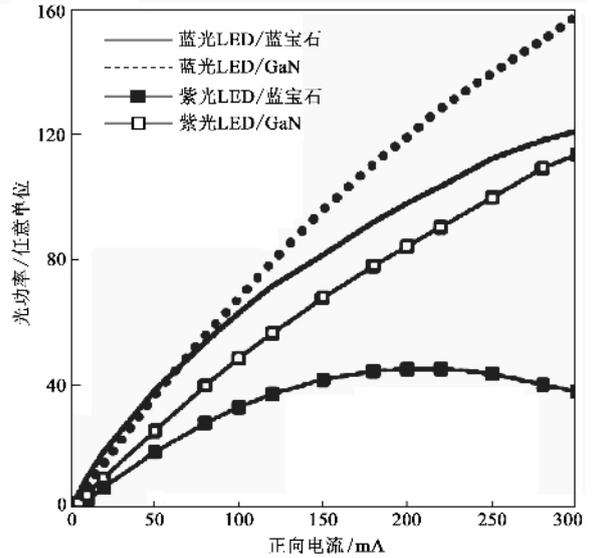


图 3 GaN 衬底和蓝宝石衬底上 LED 蓝光和紫光的 $L-I$ 曲线

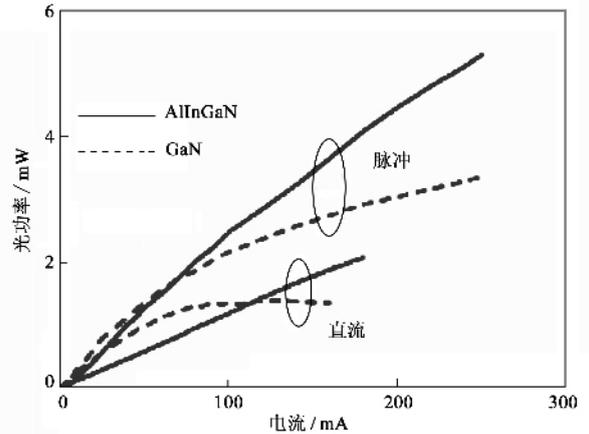


图 4 AlInGaIn 和 GaIn 作为量子阱垒层材料的 LED 在不同电注入方式下的 $L-I$ 曲线

3.4 非极性或半极性外延片^[10-14]

目前, GaN 基器件大都在蓝宝石衬底的 C 面上生长. 但 C 面蓝宝石衬底上生长的 GaN 薄膜是有极性的, 主要有自发极化和压电极化, 自发极化起因于 GaN 薄膜结构中 Ga 原子集合和 N 原子集合的质心不重合($c/a = 1.633$ 时, Ga, N 原子集合的质心重合)从而形成电偶极子, 产生自发极化场. 而在 In-GaN/GaN 量子阱结构中, 起主要作用的是压电极化场. 压电极化是由晶格失配和热失配而导致的应力产生的. 拉伸应变时, 对于 Ga 面系材料, 自发极化 P_{sp} 和压电极化 P_{pe} 的方向相同, 压缩应变时, 则相反. 一般在薄膜中形成很强的极化场(达 MV/cm 量级), 极化场将阻止发光器件中载流子的注入, 由极化场引起的 QCSE 效应将使发光器件的辐射复合效率降低和发光峰红移, 因此随着注入电流的增加, 发光峰将出现显

著的蓝移,这些发光波长的不稳定性和发光效率低是C面蓝宝石衬底上生长的GaN极性薄膜所不可避免的,这大大限制了GaN基光电器件的大功率化,尤其是在GaN基白光照明革命上形成了很大的障碍.而在一些非C面蓝宝石衬底(如R面或M面)和其他一些特殊衬底(如LiAlO₂)上生长的GaN薄膜是非极性和半极性的,上述由极化场引起的在发光器件中产生的负面效应将得到部分甚至完全的改善.现今研究的非极性或半极性GaN主要包括R面蓝宝石上的非极性A面GaN,M面蓝宝石上的半极性(10 $\bar{1}$ 3)或(1122)面GaN(100)面 γ -LiAlO₂上的非极性M面GaN(100)面MgAl₂O₄上的半极性(10 $\bar{1}$ 1)面GaN和(110)面MgAl₂O₄上的半极性(10 $\bar{1}$ 3)面GaN等.常规外延获得的非极性或半极性GaN存在表面粗糙、缺陷多和不稳定等缺点,因此要改善这些必须采用侧向外延、氢化物气相外延(HVPE)技术和优化外延生长参数.由中村修二(Shuji Nakamura)领导的研究团队在这些方面已取得重大突破,研究团队验证了该技术的多种优势,如高发射效率、宽范围颜色发射、偏振光发射、高迁移率、p型GaN器件和较低功耗,他们已成功地生长了室温最高空穴密度达 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的A面p-GaN(这要比C面p-GaN高很多);他们还生长了堆垛层错密度达 $3 \times 10^3/\text{cm}$ 、位错密度达 $5 \times 10^6/\text{cm}^2$ 的光滑表面的M面GaN,并在其上生长蓝光(450nm)LED外延片,在20mA和300mA电注入下测量发光功率,得到的值分别达 $240\mu\text{W}$ 和 2.95mW ,封装后,在20mA连续电注入和1A脉冲电注入(占空比为0.25%)下测量发光功率分别达 0.6mW 和 23.5mW (见图5),在高电流下没有饱和迹象,并且波长稳定性很好,开启电压3—4V.GaN半极性(10 $\bar{1}$ 3)面是N面极性,在其上生长的蓝光(439nm)LED在20mA和250mA电注入下测量发光功率分别达 $19.3\mu\text{W}$ 和 1.53mW ,开启电压3—4V.(10 $\bar{1}$ 3)面绿光(525nm)LED在20mA和250mA电注入下测量发光功率分别达 $19.3\mu\text{W}$ 和 $264\mu\text{W}$,开启电压3.2V.以上文献报道的发光效率还相对低于常规的C面极性结构,这可能有多方面的原因,如非极性衬底的晶体质量、多量子阱(MQW)的界面平整度、MQW中的压电极化问题和MQW的优化设计和电流有效注入的设计问题等,一旦这些问题得到解决,非极性LED的优越性将显露无疑.最新消息据称非极性LED能使白光的发光效率提高两倍,将达到 $200\text{lm}/\text{W}$.

3.5 LED外延片结构的优化设计

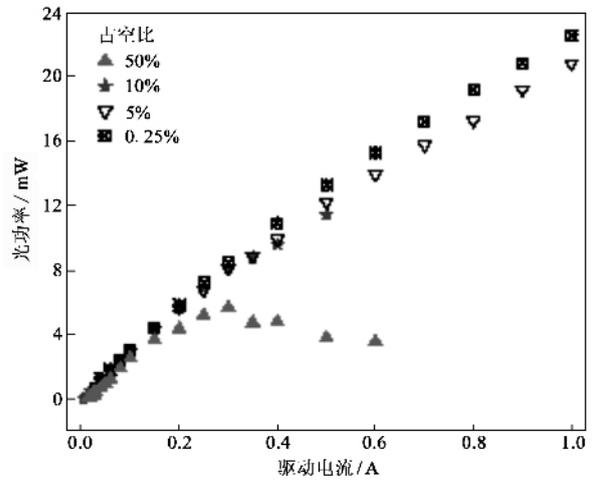


图5 M面Ga_N上LED在不同电注入方式下的L-I曲线

LED外延片结构优化设计中首要的是有源区的优化设计,采用梯形量子阱结构比常规的矩形量子阱结构(见图6)综合性能要优越^[15,16],相对矩形量子阱结构,梯形量子阱结构的PL峰值波长和强度都要小很多,但EL强度却强很多,这归因于梯形量子阱结构中量子点密度大(透射电镜观察结果),并且LED的发光均匀性要优越,这归因于梯形量子阱结构中量子点尺度小而分布较均匀(透射电镜观察结果).因此梯形量子阱结构是高亮度蓝光LED外延片的优选结构.

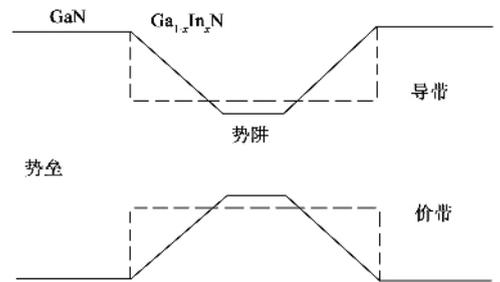


图6 梯形量子阱结构和常规的矩形量子阱结构能带图

有源区中应力引起的压电极化场将产生QCSE效应,这会使LED的辐射复合效率降低,但当量子阱垒层中Si掺杂浓度逐渐增加时,量子阱界面特性逐渐变好,Stokes位移变小,辐射复合寿命减小,浓度达 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 时,将可以完全屏蔽掉压电极化场的影响^[17,18].n-GaN的厚度也会对LED的电学和光学性能产生影响,当n-GaN的厚度从 $2\mu\text{m}$ 变化到 $6\mu\text{m}$ 的过程中,PL峰位和强度逐渐增加,EL峰位也逐渐红移,但强度却逐渐降低,正向电压略有下降而漏电流却不断上升(见图7).透射电镜观测结果显示,随着n-GaN的厚度的增加,虽然有源区中压应力逐渐得到释放,但紧邻有源区的下放堆垛层错

逐渐增加,这可能就是发光效率下降的原因^[19,20].在生长发光区前,插入一层 InGaN 应力释放层,可以有效地释放发光区中的应力,使得发光区中的位错密度减少,界面质量提高,从而使 PL 谱发光强度提高 1 倍左右^[21].

4 基于外量子效率提高的高亮度蓝光 LED 外延片进展

内量子效率 η_i 的提高必定带来外量子效率 η_e 的提高,因此,此处讨论的外量子效率 η_e 的提高主要是针对载流子注入效率 η_j 和光出射效率 η_{ex} 的提高.外量子效率提高的常规途径是在外延片长好后在器件制备过程中作一系列的优化设计,如表面粗化、光子晶体、特殊封装材料、倒装焊技术等,这些都是基于光出射效率 η_{ex} 的提高.基于 LED 外延片生长过程中的外量子效率提高的途径主要有:采用表面粗化生长技术;在图形化 GaN 基底上二次生长 LED 外延片;在图形化蓝宝石衬底即所谓的结构衬底上生长 LED 外延片等.

4.1 表面粗化生长技术^[22,23]

在常规 LED 外延片上制作一个无光刻的随机 SiO 掩膜,通过控制 MOCVD 生长条件,二次外延可以形成可控尺度和密度的 p-GaN 微型小丘,此粗糙表面破坏了 LED 的表面对称性,从而提高光出射效率 η_{ex} ,使得 LED 外量子效率 η_e 提高约 60%(见图 8).而且这种表面粗化技术比其他后工艺表面粗化技术(如光化学刻蚀、增强耦合等离子体(ICP)刻蚀等方法)可以更好地控制漏电流问题.可以设想,在一次外延生长的最后,改变生长条件,直接形成一具有微型小丘的薄层 p-GaN,这样就进一步简化了工艺,值得探索和研究.

4.2 图形化 GaN 基底上的二次外延^[24,25]

在 2 μm 左右的 GaN 外延片上,采用光刻和等

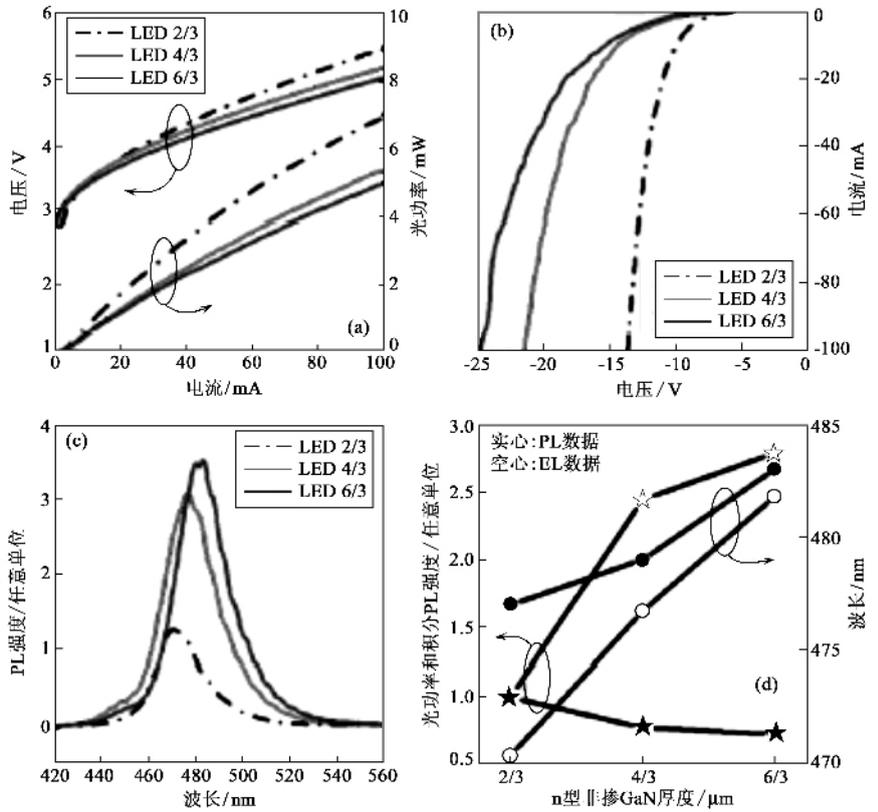


图 7 n-GaN (2 μm 4 μm 6 μm) / 非掺 GaN (3 μm) 外延片 LED 的 (a) 正向 $I-V$ 曲线 (b) 反向 $I-V$ 曲线 (c) PL 光谱 (d) EL 和 PL 波长和强度比较

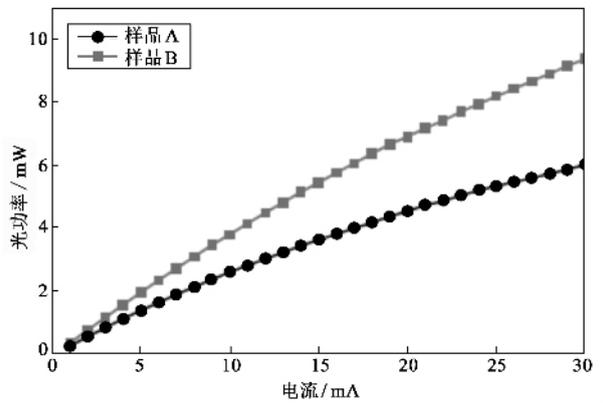


图 8 有无表面粗化生长技术所得 LED 的 $L-I$ 曲线(样品 A 无 样品 B 有)

离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术,可以获得以 SiO_2 为掩膜的周期性结构图形(如正六边形或长方形),图形的边沿 $11\bar{2}0$ 方向,图形尺度在 300—350 μm 左右,间距在 50 μm 左右.然后在 HVPE 系统中选区生长,得到厚度约为 50 μm 左右具有光滑表面的一个一个岛状结构,最后在 MOCVD 系统中生长 LED 结构.在这些孤立的岛状结构上直接制备 LED 器件(见图 9).相对于常规结构的 LED,此种岛

状结构的 LED 发光波长平均红移 15—30nm(归因于 HVPE 外延获得较大晶格常数和较窄能带的 GaN),发光功率增加 1 倍(蓝光)和 6 倍左右(紫光),发光功率增加的主要原因有 HVPE 外延厚膜中位错密度降低导致内量子效率提高,由于紫光对位错更敏感,所以变化更大;岛状结构导致光出射效率 η_{ex} 提高,正向压降略有变化。

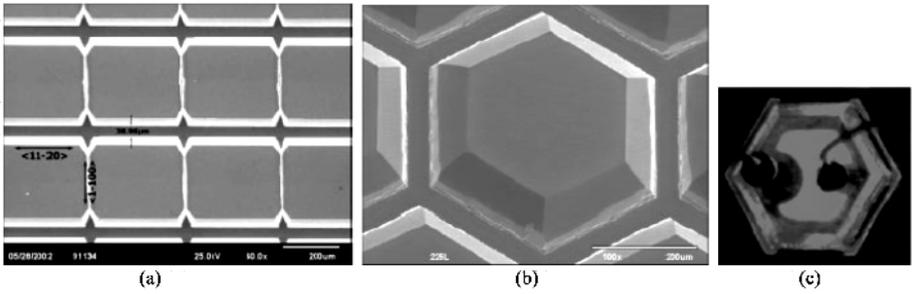


图9 (a)长方形图形化 GaN 基底上的二次外延的 LED 外延片表面 SEM 图 (b)正六边形图形化 GaN 基底上的二次外延的 LED 外延片表面 SEM 图 (c)正六边形图形化 GaN 基底上的二次外延的 LED 发光时的光显图

4.3 图形化蓝宝石衬底^[26—30]

开槽蓝宝石衬底(grooved sapphire substrates)^[26-27]在 C 面蓝宝石衬底刻出沿 10 $\bar{1}0$ 或 11 $\bar{2}0$ 方向的条宽为 2—3 μm 左右、间距 4—8 μm 左右、深度 60nm—1.4 μm 左右的周期性结构,然后在其上生长常规结构的 LED 外延片.相对无结构的蓝宝石衬底的 LED 外延片,此开槽蓝宝石衬底所生长的 LED 外延片侧向外延,使得位错密度降低,从而提高了外延片的晶体品质,相应的光学、电学性能也得到改善,实验证实,阴极荧光谱(CL 谱)和电致发光谱(EL 谱)强度都有增强,EL(波长为 465nm)强度增加 25%—35% 左右(见图 10),饱和电流高,器件稳定性好。

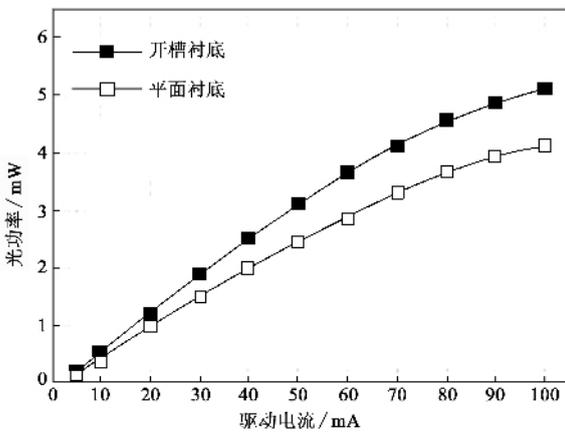


图 10 平面和开槽蓝宝石衬底上外延的 LED 的 L-I 曲线

非条形的图形化蓝宝石衬底就是在蓝宝石衬底上采用不同的光刻技术,形成周期性的尺度在 10 μm 之内的图形结构(如圆形、六边形和长方形等)^[28—30].一方面,图形化蓝宝石衬底可以引入侧向外延的外延特性,从而降低位错密度,使得内量子效率提高;另一方面,在器件采用倒装结构时,蓝宝

石衬底中的周期性图形有微透镜的作用而将增加光出射效率 η_{ex} . 在间距和尺度都在 3 μm 左右的圆形图形化蓝宝石衬底上生长 LED 外延片(见图 11),采用激光剥离转移到 Cu 热沉上,倒装器件结构,在波长为 409nm,350mA 下,发光功率比常规衬底上相同结构的 LED 提高 39%. 在六边形图形化蓝宝石衬底上生长 LED 外延片,在波长为 400nm,20mA 下,发光功率和外量子效率分别为 22.0 mW 和 35.5% ;在波长为 460nm,20mA 下,发光功率和外量子效率分别为 18.8 mW 和 34.9% .

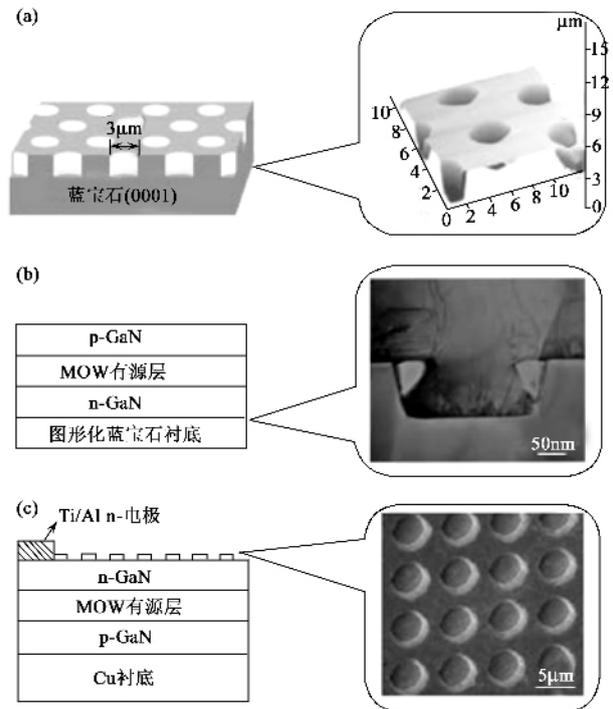


图 11 圆形图形化蓝宝石衬底的 (a) 示意图和 AFM 图 (b) LED 外延结构示意图和剖面透射电镜观测图 (c) LED 器件示意图和器件表面扫描电镜观测图

4.4 提高载流子注入效率 η_i 的方法

由于空穴的迁移率和扩散长度远远小于电子,

因此提高载流子注入效率 η_j 的方法主要是提高空穴的注入和降低电子的泄漏. 具体方法有: 优化 p-GaN 的生长; 在 MQW 前插入电子隧穿势垒层 ETB; 在 MQW 的量子势垒层中, 加入适量 Al 并优化电子阻挡层的设计. 优化 p-GaN 的生长主要是提高空穴的迁移率, 使得空穴能够有效地注入到更多的量子阱中参与发光; 电子隧穿层 ETB 一般为 n-Al-GaN, 当注入的电子穿过 ETB 势垒层时, 可以降低注入电子的能量, 从而减少注入电子的泄漏^[31]; MQW 的量子势垒层中加入适量 Al 可以提高量子势垒的高度, 从而可以更好地限制住注入的电子; 优化电子阻挡层一方面可以很好地限制电子, 另一方面又不增加太大的串联电阻, 但整体上可以提高发光效率.

5 新型的外延结构

现今国际上为了不同的用途(主要是白光照明), 探索和尝试不同于常规的新型 LED 结构, 如垂直结构、微芯片阵列、大管芯、微腔结构、共振腔 LED 和深紫外 LED 等. 基于不同的新结构在外延方面都有不同的特殊设计和考虑. 下面主要针对白光照明用途, 特别是对研究较多的垂直结构作一些具体的讨论. 垂直结构就是上下电极结构, 区别于两电极都在一面的常规结构, 制造这种结构主要有三种途径: 第一种途径是在导电性能好的衬底如 Si, SiC 等上生长. Si 衬底由于晶格失配严重, 其发光效率不可能太高, 因此其不可能成为主流和高端的白光照明 LED; SiC 衬底虽然晶格失配很小, 发光效率可以很高, 但其昂贵的价格让人望而却步. 第二种途径是在蓝宝石衬底上生长, 然后通过激光剥离技术将 LED 薄膜转移到导电的支撑物上(如 Si, Cu 等), 其在结构上的主要问题是 N 面的电流扩展问题, 解决的方法主要有叉指型电极、ITO 薄膜和外延生长中在 MQW 前加入电流阻挡层和电流扩展层. 电流阻挡层一般为相对高阻的非掺 GaN 或 AlGaIn, 电流扩展层一般为相对低阻的高掺 GaN(Si), 或者利用 GaN/AlGaIn SLs(SLs 为应变层超晶格)的载流子输运的各向异性, 即横向电导远远高于纵向电导, GaN/AlGaIn SLs 同时具有电流阻挡和电流扩展的作用. 不过器件制备过程中涉及激光剥离、键合等工艺, 较复杂, 而且激光剥离的成品率问题一直是个难题. 对于激光剥离的成品率问题, 可以采用选区外延, 选区的尺度可以根据大小管芯的要求设计成不同大小的光刻图形, 然后一个一个管芯逐个剥离, 这

样有望提高激光剥离的成品率. 第三种途径是在 GaN 衬底上生长, 类似第一种途径, 可以直接形成上下电极结构, GaN 衬底上属于同质外延, 一定可以获得最高的发光效率. 另外, HVPE 生长 GaN 厚膜技术发展迅速, 而且激光剥离技术也相当成熟, 因此获得低价格的 GaN 衬底指日可待.

6 LED 可靠性对于外延片的要求

LED 可靠性是指它们对热、电、机械、射线等的承受能力, 可靠性好坏的评价主要是由 LED 在给定工作条件下寿命的长短来决定, 而寿命一般指 LED 的光输出下降到初始值的一半的时间. LED 可靠性涉及的问题很多, 包括芯片制备和封装的各个工艺, 如光刻、刻蚀、镀膜、合金、磨片、划片、键合、灌封等, 以及各个工艺中所使用的材料等有关.

LED 光输出下降主要与它的老化或失效有关, 而老化或失效的机理很复杂, 其中热效应是个主要因素, 热效应使得 p-n 结温度增加, 导致 MQW 中位错间的相互作用而非辐射复合几率的上升和发光机理的变化, 导致发光效率的降低和发光波长的不稳定, 最终引致 LED 的失效. 而热效应主要与漏电流和管芯的散热有关, 而漏电流主要与外延片中的位错等缺陷密度有关.

常规侧向外延生长技术(laterally epitaxial overgrowth)^[32-34]在 C 面蓝宝石衬底上生长 $2\mu\text{m}$ 左右的 GaN 外延膜, 在上面制作 SiO_2 掩膜周期性结构, 然后侧向外延生长 $15\mu\text{m}$ 左右, 得到光滑表面的 GaN, 最后在上面生长 LED 外延结构. 相对常规 LED 外延片, 侧向外延生长所得的 LED 外延片中的位错密度大概下降 2 个数量级左右, 由于位错是有效的漏电流路径, 因此漏电流下降 2 个数量级左右(见图 12), 但是光学性能几乎没有变.

采用同质外延的 GaN 衬底肯定可以获得最少的缺陷, GaN 的热导率要高于蓝宝石, 因此采用 GaN 衬底是提高 LED 可靠性的极佳选择. 另外, 由压电极化引起的 QCSE 效应会使 LED 发光波长产生明显的红移现象, 但在增加电流的情况下, 由于压电极化场被屏蔽又会使 LED 发光波长产生明显的蓝移现象, 这对 LED 在不同工作电流的使用是个很大的障碍, 不同波长的光对对荧光粉的激发效率是不一样的, 因此 QCSE 效应对白光 LED 也是很不利, 因此采用非极性的 GaN 衬底是彻底解决这一问题最佳途径.

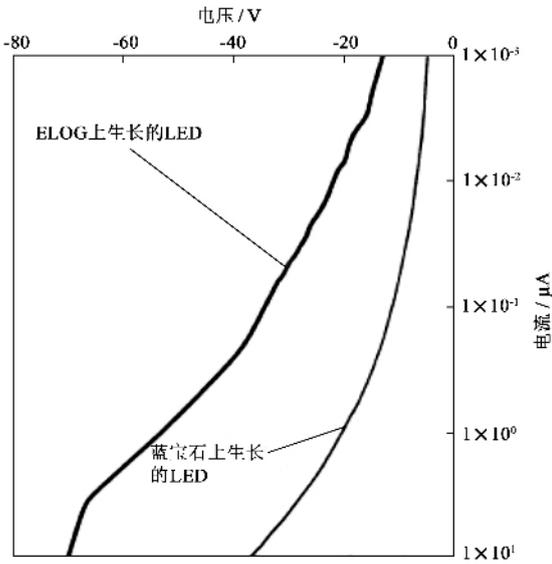


图 12 在 ELOG 和蓝宝石衬底上 LED 的反向 $I-V$ 曲线

7 结束语

综上所述,影响 LED 内量子效率的主要因素是:如何降低外延片的位错密度,减少非辐射复合中心,限制注入载流子泄漏,提高注入比;减少压电效应和自建场的影响,增加辐射复合效率。影响外量子效率的主要因素在于如何减少全反射,提高出光效率,优化电极结构,减少再吸收损失。根据以上诸因素和可靠性的综合考虑,大幅度提高 LED 发光效率的最佳方案在于采用非极性面的 GaN 衬底,或采用带有结构的非极性面的 GaN 衬底,生长优化的 LED 结构,结合光子晶体等技术,可望取得突破性进展。

参 考 文 献

[1] Alan M. III - Vs Review ,2006 ,19 25
 [2] 蓝光 LED 之父又有斩获 ,GaN 器件研发呈现新进展. 中国半导体照明网 2006
 [3] Zehnder U , Weimar A , Strauss U *et al.* Journal of Cryst. Growth ,2001 ,230 :497
 [4] Ha V , Hiller N , Kugler S *et al.* , Materials Science and Engineering B ,1999 ,61 -62 :310
 [5] Cao X A , LeBoeuf S F , D' Evelyn M P *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2004 ,84 :4313
 [6] Yasan A , McClintock R , Mayes K *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 ,81 2151
 [7] Cao X A , Arthur S D. Appl. Phys. Lett. ,2004 ,85 3971
 [8] Shatalov M , Chitnis A , Adivarahan V *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2001 ,78 :817
 [9] Zhang J P , Yang J , Simin G *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 , 77 2668

[10] Ke X , Jun X , Peizhen D *et al.* J. Cryst. Growth ,1998 ,193 : 127
 [11] Craven M D , Lim S H , Wu F *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2002 , 81 :201
 [12] Sun Y , Brandt O , Ploog K H. J. Vac. Sci. Technol. B , 2003 ,21 :350
 [13] Maruska H P , Hill D W , Chou M C *et al.* Opto - Electron. Rev. ,2003 ,11 7
 [14] Haskell B A , Baker T J , McLaurin M B *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2005 ,86 :11917
 [15] Cheong M G. Choi R J , Suh E K *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 ,82 625
 [16] Shim H W , Choi R J , Jeong S M *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 ,81 :3552
 [17] Franssen G , Suski A T , Perlin P. Appl. Phys. Lett. ,2005 , 87 :041109
 [18] Deguchi T , Shikanai A , Torii K *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1998 ,72 :3329
 [19] Kim C S , Kim H G , Hong C H. Appl. Phys. Lett. ,2005 , 87 :013502
 [20] Shikanai A , Azuhata T , Sotab T *et al.* J. Appl. Phys. ,1997 , 81 :417
 [21] Niu N H , Wang H B , Liu J P *et al.* Journal of Crystal Growth , 2006 ,286 :209
 [22] Fujii T , Gao Y , Sharma R *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2004 , 84 :855
 [23] Lee C L , Lee S C , Lee W I. Jpn. J. Appl. Phys. ,2006 , 45 :L4
 [24] Hsu J T , Tsay J D , Guo Y D *et al.* phys. stat. sol. (b) , 2004 ,241 2713
 [25] Liu H P , Tsay J D , Liu W Y *et al.* J. Cryst. Growth ,2004 , 260 79
 [26] Chichibu S , Azuhata T , Sota T Appl. Phys. Lett. ,1996 ,69 : 418
 [27] Wang J , Guo L W , Jia H Q *et al.* Journal of Crystal Growth , 2006 ,290 :398
 [28] Yamada M , Narukawa Y , Mukai T. Jpn. J. Appl. Phys. , 2002 ,41 :246
 [29] Wang W K , Wu D S , Shin W C *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , Part 1 ,2005 ,44 2512.
 [30] Wang W K , Huang S Y , Huang S H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 ,88 :181113
 [31] Kim T G , Kim K C , Kim D H *et al.* Journal of Crystal Growth , 2004 ,272 264
 [32] Nakamura S. Journal of Crystal Growth ,1999 ,201/202 290
 [33] Usui A , Sunakawa H , Sakai A *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 1997 ,36 :1899
 [34] Nam O H , Bremser M D , Zheleva T *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1997 ,71 :2638