

# 自组织 GaN 小岛的 InGaN/GaN 量子阱白光发射

杨晓东

(厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005)

**摘要** 成功地控制了自组织三维 GaN 小岛的侧延生长,在其上面可形成多个非极性小面侧壁。以此作为一个理想的基底,在非极性小面上设计制备了 InGaN/GaN 多量子阱发光有层结构。通过透射电子显微镜(TEM)制样和微观结构分析,确定了 GaN 小岛的侧生长特性和小面形成特性,并利用阴极荧光光谱对 InGaN/GaN 多量子阱的发光特性进行比较和讨论。结果表明,单一小岛可有效实现混合白色发光(蓝色、绿色和红色),经过确认发现,半极性小面上的 InGaN/GaN 量子阱结构为明亮多色发光的主要区域。进一步小面构成的量子阱结构控制,可有效地调整白光质量,并对新一代白光照明提供新的方向。

**关键词** 材料;GaN 岛;量子阱;微观结构;发光特性;白光

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0406002

## Semi-Polar Faceted InGaN/GaN Quantum Wells in Self-Organized GaN Islands for White Light Emission

Yang Xiaodong

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University,  
Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract** The controllable growth of self-organized 3D semi-polar faceted GaN islands is reported, which performs as an ideal template for the fabrication of semi-polar InGaN/GaN light-emitting quantum wells on the sidewalls. Special transmission electron microscope (TEM) sample preparation is employed to analyse the microstructure and growth mechanism of the multi quantum wells on the sidewall facets. Together with cathodoluminescence, the results show that the mixed white light (blue, green and red) emission in a single island can be achieved and the semi-polar faceted InGaN/GaN quantum wells act as the main region for the bright multi-color light emitting. Further optimization of the facet structure will improve the flexibility of light emission and provide a new method for the next generation of white lighting.

**Key words** materials; GaN islands; quantum wells; microstructure; luminescence property; white light

**OCIS codes** 230.5590; 250.5590

## 1 引 言

在宽禁带直接带半导体中,GaN 基半导体最具开发潜力和发展前景,它凭借着宽广的带隙[0.64 eV (InN)、3.4 eV(GaN)、6.2 eV(AlN)]<sup>[1]</sup>和优越的性能(热稳定、化学稳定和导热等)<sup>[2]</sup>,已经成为近年来光电子材料和器件研究的热点和重点。一般来说,功能性异质结构,例如,多重量子阱(QW)和超晶格,由于其低阈值电流密度、低非辐射复合率、低温度的

敏感性等突出优点,已被广泛地应用于发光器件设计制造中<sup>[3~5]</sup>。传统的白光 LED 主要采用紫外/紫色/蓝色的 LED 来激发黄色或多色荧光粉,由此获得混合的白光;也有部分研究采用多种颜色的 LED 来实现混合白光<sup>[6~8]</sup>。而单芯片白色无荧光粉的光发射研究,主要是通过横向分布的蓝色和绿色的 InGaN/GaN 多量子阱<sup>[9]</sup>或通过级联组成的 InGaInP 和 AlGaInP 的多量子阱<sup>[10]</sup>来实现。其难度较大,而

收稿日期:2012-12-03;收到修改稿日期:2012-12-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61076091)资助课题。

作者简介:杨晓东(1979—),男,硕士,工程师,主要从事扫描/透射电镜的纳米材料表征与分析方面的研究。

E-mail: yxd01@xmu.edu.cn

且各色的发光效率难以匹配,成为单芯片白光研究的主要难题。

对于普通照明应用,影响发光效率问题最主要的两个影响因素是强极化场和高钢 InGaN 结晶品质差,这是导致绿色极性 LED 内部量子效率难以提高的主要原因。因为极化场主要产生并存在于极性生长方向[(0002)c 轴方向],为了克服极化场影响,沿非极性和半极性生长方向生长外延层<sup>[11]</sup>以减少自发和压电极化场强度,成为近年来一个研究热点。但是单一的非极性或半极性面的晶圆片生长,在晶体质量等方面又带来了新的问题。最近,在 GaN 自组织小岛的形及其形状变化的研究中,发现了各种不同的非极性、半极性小面,这与其生长阶段早期的外延条件有着密切的关系,引起了广泛的研究兴趣<sup>[12~15]</sup>。能否利用自组织生长的 GaN 三维岛的半极性方向来实现弱极化场 LED,成为了新的挑战。

本文通过控制了自组织形成的包含了非极性小面侧壁的三维 GaN 小岛的外延生长,设计并制备非极性小面上 InGaN/GaN 多量子阱发光有层结构。对透射电子显微镜(TEM)截面样品的制备技术进行适当的改进,观察 GaN 小岛的半极性小面的微观结构,从而确定了小岛的半极性生长特性和小面的晶向。继而,利用荧光光谱测量 InGaN/GaN 多量子阱的发光特性,并进行比较以确定单一小岛的发光光谱和混合光色。辨认混合白光的来源并分析其机理。

## 2 样品制备和表征方法

利用金属有机气相外延(MOCVD)技术,在蓝宝石衬底生长原位自组织的三维 GaN 小岛,则是外延生长的 InGaN/GaN 多量子阱结构。生长采用了托马斯喷淋头 MOCVD 系统进行。先在蓝宝石衬底表面进行高温(1060 ℃)热清洗 8 min,去除表面氧化层;接着在 550 ℃下用氨气氮化 4 min。生长 GaN 小岛结构之前,先生长一层原位地 SiN<sub>x</sub> 掩膜层,然后在 535 ℃下进行低温 GaN 成核层生长(500 Torr)(1 Torr=133.322 Pa)。然后通过退火工艺,升温至 1035 ℃<sup>[16]</sup>,形成自组织的小岛。小岛生长首先在低 V/III 比、高压强下进行,然后调节生长参数使岛体增大。多量子阱的生长回到较低的生长温度(720 ℃~738 ℃和 827 ℃)进行,在中温垒层和低温阱层的切换过程中,引入了 GaN 阱保护薄层,以防止 In 向垒层的扩散<sup>[17]</sup>。生长过程中,使用三甲基镓,三甲基镉和高纯度氨作为反应源气,硅烷

作为 n 型掺杂源。除了在多量子阱生长过程中采用氮气作为金属有机源载气之外,主要采用氢气作为载气。

半导体性质主要有形貌、结构、组成、力学、电学和光学等,TEM 技术是常用的观测方法之一,能在分子和原子尺度直接观察材料的内部结构,可方便地研究材料内部的相组成、分布以及晶体中的位错、层错和晶界等缺陷<sup>[18]</sup>。在各种附件的配合下,还能同时兼有分析微相、观察图像、测定成分和鉴定结构等功能。TEM 与扫描电子显微镜(SEM)技术不同的是,它主要通过电磁透镜把电子束聚焦到试样上,利用穿过试样的弹性散射电子波的衍射效应,在屏幕、感光胶片或者 CCD 上得到样品的放大像。

由于电子束能量高(100~1000 keV)、波长短,空间分辨率高,在聚焦很好的情况下,TEM 能清晰地观察到试样晶格衍射图,是强有力的薄膜、纳米材料结构的观察方法。此外,高能电子束还将激发出二次电子、原子的特征 X 射线等粒子,通过探测这些粒子,TEM 系统还可以得到扫描透射电子显微镜(STEM)图像和能谱仪(EDX)谱像,从而了解试样结构与组成的对应关系。本文所采用的透射电子显微镜(TECNAI-F30)就具备高分辨、STEM 和 EDX 等功能,在 300 keV 的条件下用来表征 GaN 样品的横截面。

半导体材料样品的制备技术在 TEM 研究中具有重要地位,可以说样品制备是 TEM 观测和分析成功的关键。为了使电子束得以透过试样,衍射成像,要求试样厚度薄至纳米量级。对于半导体外延试样,尽管外延层很薄(通常几百纳米),但加上衬底的厚度,电子束仍无法正面透过。晶片的解理难于制备纳米量级的窄条,剖面观察也需进行平面减薄、圆片凹坑、离子刻蚀和清洁等数道制备工艺。制样设备如图 1 所示。

由于所用的 InGaN/GaN 晶片仅约 450 μm 厚,且质地较脆,难于采用直接挖孔得到直径为 3 mm 的圆形试样。所以采用一种改进的离子减薄法制备截面样品<sup>[19]</sup>:先制备层叠矩形薄片,用环氧树脂将晶片面对面粘合在一起(在温度 160 ℃的状态下固化 2 h);再用超声挖孔机切出 3 mm 直径的圆片,最后再采用凹坑研磨、抛光和离子减薄完成 TEM 样品制备,如图 2 所示。样品制备的具体操作步骤如下:首先从晶片中切出 2 片以上的 3 mm×1 mm 的长条;然后用环氧树脂和固化剂将试样面对面粘合,在温度 160 ℃的状态下固化 2 h。若宽度不够覆盖

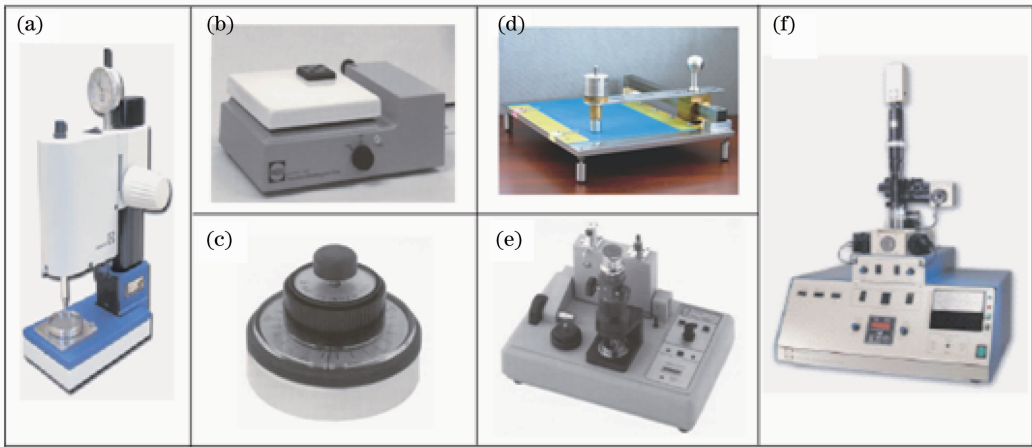


图 1 TEM 制样设备。(a)超声挖孔机；(b)加热台；(c)手动研磨器；(d)自制手动研磨台；(e)凹坑机；(f) Ar<sup>+</sup> 离子减薄仪  
Fig. 1 TEM sample preparation apparatus. (a) Ultrasound punching machine; (b) heating table; (c) manual grinding device; (d) homemade manual grinding table; (e) pit machine; (f) Ar<sup>+</sup> ion milling

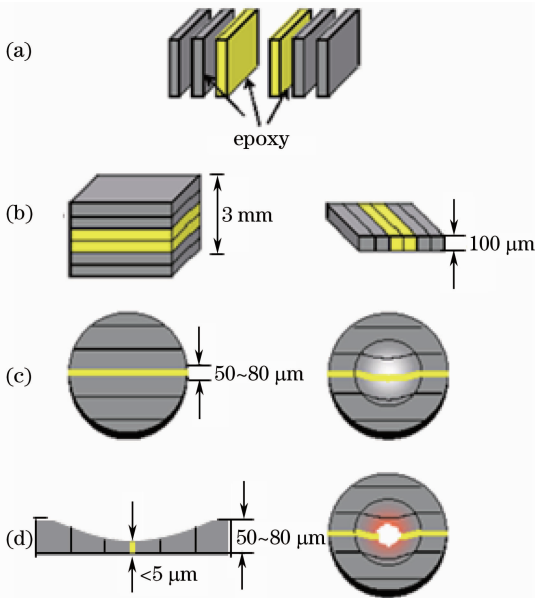


图 2 GaN 岛形量子阱结构 TEM 截面样品制备工艺过程示意图。(a)条状样品表面黏接；(b)样品切片并初步抛光；(c)圆片挖孔 3 mm；(d)减薄与穿孔

Fig. 2 TEM section sample preparation process schematic diagram of QWs on GaN island. (a) Stick slices face-to-face by epoxy resin adhesive; (b) section slices with preliminary polishing; (c) wafer with hole of 3 mm diameter; (d) ion milling and perforating

钼或铜片中间的椭圆孔，两侧可用其他材料粘贴加宽。然后采用超声挖孔机切出 3 mm 直径的圆片。为了减小圆片边缘和表面在超声挖孔过程中的损坏，用石蜡将晶片粘合在玻璃衬垫上，而后再将衬垫固定在由钐/钴稀土合金制成的磁性试样架上，最后吸合在超声挖孔机的磁性底座上，以减小超声挖孔

时的振动。挖孔过程中不断加入研磨剂，并用清水吸洗以防堵塞，以控制挖孔的平均速度约  $1 \mu\text{m/s}$ 。将挖出的圆片放置于加热台融化石蜡，取下圆片。再将圆片的外延侧用石蜡转移固定在自行设计制造的手动研磨器的试样台上，通过改变试样台的砝码负荷和研磨纸的颗粒度，调整试样正压力和试样与金刚砂的研磨纸间的摩擦力。研磨过程中，不断用清水冲洗，以免脱落的大碎片或颗粒刮伤试样；同时，由大到小依次更换研磨纸的颗粒度和砝码负荷，逐渐降低研磨速度，以避免试样趋薄产生龟裂、减小试样表面的机械损伤，直至试样厚度小于  $80 \mu\text{m}$ 。将圆片取下，用中间开椭圆孔的钼或铜片胶粘试样以支撑，用凹坑机对试样中心进行磨凹减薄，不断更新粒度细研磨剂和水，直至中心厚度小于  $10 \mu\text{m}$ ；更换砂轮，并用更细更好的研磨剂进行抛光；接着采用 Ar<sup>+</sup> 离子减薄仪，在双枪双面模式下，对试样进行离子减薄，控制 Ar<sup>+</sup> 加速电压小于等于  $3.5 \text{ kV}$ 、底端和顶端之间的入射角度分别为  $3^\circ \sim 4^\circ$ ，以减小表面损伤，控制试样旋转速度为  $6 \text{ r/min}$ ，以保证试样的均匀，直至试样中心穿孔<sup>[20]</sup>。使用低加速电压大约  $2.5 \text{ kV}$ 、底端和顶端之间的入射角度分别为  $2^\circ \sim 3^\circ$ ，离子束对待观测的减薄区域清洗  $5 \text{ min}$  左右。这样 TEM 试样制备完成。

此外，利用 SEM(Sirion200 和 LEO1530)，结合阴极发光(CL, Gatan MonoCL3+)，对岛形量子阱的表面形貌和发光性能进行了表征。取电子加速电压为  $5 \text{ kV}$ ，电子束电流为几纳安，以避免辐射的伤害。光谱显示了半极性面生长的量子阱，发出包含色彩三原色的有效谱峰。

### 3 结果与讨论

通过对生长条件的控制,得到如图 3(a)所示的典型的三维六角形 GaN 小岛的 SEM 表面形貌,小岛光滑侧壁为不同方向的高指数小面,也就是半极性的小面。从图 3(b)中可以看到,小面的横向尺寸为 200~500 nm,这与小面生长速度的控制有关,研究中,发

现反应腔气压和 V/III 比为重要的控制因素。利用小面与顶面(0002)法线方向的夹角比对,可以确定小面夹角约为  $43.8^\circ$ ,基本对应于  $\{-1011\}$  半极性指数面;另一类小面夹角约为  $34.8^\circ$ ,对应于  $\{0-112\}$  半极性指数面。这两类小面的指数和夹角特性,可以在图 4(a)的 STEM 剖面图中更为准确、

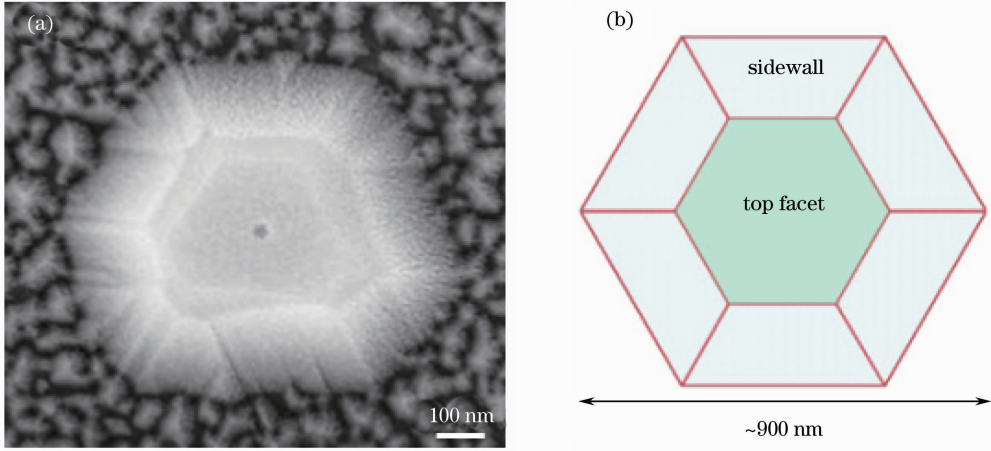


图 3 GaN 三维六角形小岛 SEM 俯视图  
Fig. 3 SEM plan view of GaN 3D hexagonal island

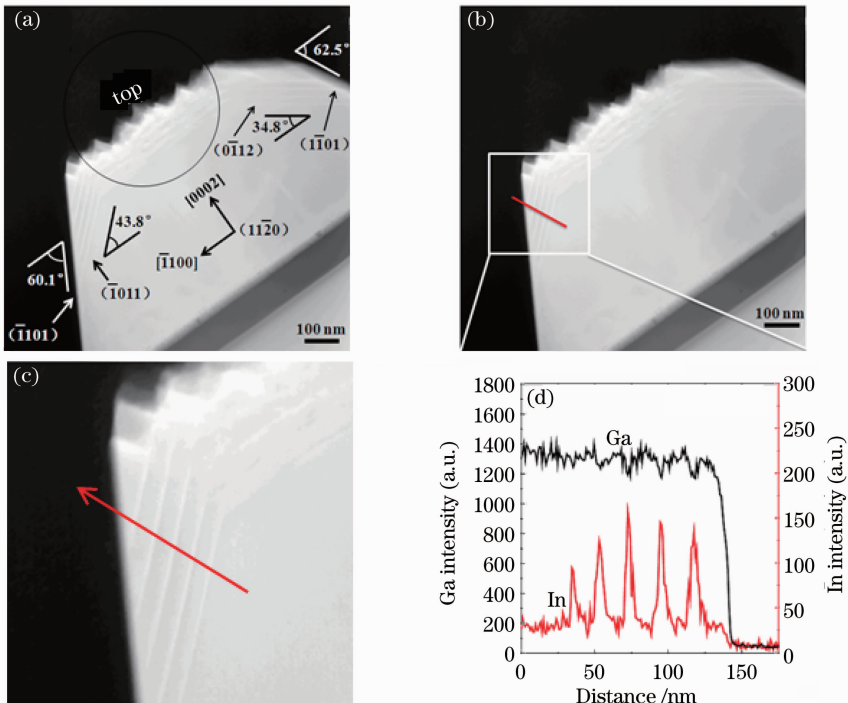


图 4 (a)三维岛状多小面 InGaN/GaN 量子阱的 STEM 截面图; (b) STEM 截面图,顶面为极性的(0002)小面,侧壁分别为半极性的 $\{-1011\}$ 及 $\{0-112\}$ 小面; (c)放大的 $\{-1011\}$ 小面 InGaN/GaN 量子阱 STEM 图像; (d)  $\{-1011\}$ 小面 InGaN/GaN 量子阱的元素线扫描分布曲线

Fig. 4 (a) Cross-section STEM image of InGaN/GaN QWs on 3D faceted islands; (b) cross-section STEM image, the top (0002) facet, the sidewall  $\{-1011\}$  facet and  $\{0-112\}$  facet; (c) enlarged cross-section STEM image of the sidewall  $\{-1011\}$  facet on InGaN/GaN QWs; (d) element lines scanning distribution curve of the sidewall  $\{-1011\}$  facet on InGaN/GaN QWs



清晰地看到。根据晶体小面生长的特性,通常生长速度较快的小面其面积和尺寸将逐渐减小,而最终被生长速度较慢的相邻小面所吞没。因此,(0002)顶面与侧壁的 $\{-1011\}$ 及 $\{0-112\}$ 半极性小面存在着明显的竞争关系,顶面面积和侧壁面积在不同的生长速度之下将此消彼长,利用调整小岛生长条件可以进行纵向加速和侧向加速生长的控制,从而可以获得各种类型和不同形态的小岛。这些小岛具有不同大小的半极性小面面积,为后续小面量子阱结构的尺寸调节,提供了可控的技术。

在获得一定尺度的 n 型 GaN 小岛的基础上,利用交替通入 In 源和 Ga 源的方式,设计并制备高质量的 InGaN/GaN 多量子阱结构。为了研究侧壁小面多量子结构的特性,针对性地制备了岛形量子阱样品的 TEM 截面样品,并对其进行详细观察。如图 4(a)所示,在(0002)顶面及侧壁 $\{-1011\}$ 及 $\{0-112\}$ 半极性小面上都均匀地形成了 5 个周期的 InGaN/GaN 多量子阱,说明了量子阱的构造。通过 STEM 图象观测,可以明显地发现,不同小面上的量子阱厚度和长度并不相同。一个方面,量子阱的长度与岛上小面初始的尺寸有关,(0002)顶面上的量子阱长度约为 500 nm,并且随着生长进行,各周期的量子阱长度基本保持相对稳定。但是, $\{-1011\}$ 及 $\{0-112\}$ 半极性小面的量子阱长度,则由于 $\{-1101\}$ 侧壁的较慢生长速度下的包裹作用而依次变短。也就是说,这两个半极性小面上的量子阱面积与 $\{-1101\}$ 侧壁的生长速度有着密切的关系,如果通过调整 $\{-1101\}$ 侧壁的生长速度则可改变相应量子阱有层层的尺寸。另一方面,量子阱的厚度与小面生长速度以及 III 族源气的有效供应量相关。可以看到, $\{0-112\}$ 小面的量子阱最厚,(0002)顶面的厚度次之,而 $\{-1011\}$ 小面的厚度最薄,单个 InGaN/GaN 量子阱周期的厚度分别约为 22、24、25 nm。这就说明, $\{-1011\}$ 小面上所获得的 Ga 源供应量较小,而且生长速度也略慢,其结果是得到较薄的 InGaN/GaN 量子阱和垒层,阱垒厚度及其比例将导致量子阱发光的波长和效率不同。

为了更具体地研究 InGaN/GaN 量子阱的厚度及组分,对放大的局部 $\{-1011\}$ 小面进行垂直量子阱的元素线扫描,并得到 In 和 Ga 元素的线分布曲线如图 4(d)所示。经过特殊的 InGaN/GaN 界面的防 In 扩散层处理,可以发现,得到的 InGaN 阱层与 GaN 垒层分界清晰,In 元素主要集中在阱层内,而且垒层中 In 含量极低,说明量子阱的势阱构造比较成功。利用

In 分布曲线,可确定 InGaN 阱层厚度约为 2.2 nm。同样的可以确定,(0002)顶面及 $\{0-112\}$ 小面所生长的量子阱层厚度分别为 2.4 nm 和 2.9 nm。对于量子阱结构的光学性质,其发光的波长通常与量子阱的半导体材料的禁带宽度以及阱厚有直接的定量关系,在 InGaN 量子阱中,InN 的混晶组份就决定了  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  的有效禁带宽度。这样,控制及调节量子阱层 In 组分和宽度即可相对准确地调整不同小面量子阱的发光波长。

图 5 中利用在 SEM 下测量光谱获得了单个岛形多量子阱结构的整体发光特性。有趣的是,该光谱与普通薄膜外延层量子阱结构的单一波长光谱特性不同,它呈现出一个在可见光波段内的多波长分布。通过简单的高斯拟合分解,可区分出谱峰由红、绿、蓝三原色所构成,其发射波长分别在 450、500、560 nm。根据基础色度学混色律原理,三原色的比例混合,将可以得到各种色彩以及白光。也就是说,岛形复合多量子阱结构,提供了单一微纳结构中的白光混合光谱特性。利用红绿蓝三个波长的空间分布扫描结果,可清楚地得出,其中的 450 nm 蓝光部分主要来自于 $\{-1011\}$ 小面多量子阱的光发射,500 nm 绿光部分则主要来自于 $\{0-112\}$ 小面多量子阱的光发射,长波部分的 560 nm 光发射部分来自(0002)顶面量子阱结构以及其他两个半极性小面的缺陷发光贡献。在(0002)极性方向上,本征及压电极化场对于量子阱存在着难以克服的量子限制斯塔克效应,其结果是造成量子阱中电子空穴的空间分离,而使得其复合发光效率无法有效提升。相对的,在半极性方向,由于极化场作用大为削弱,复合发光效率自然也就较为强烈。这一优势,在光谱中也得到明显的体现,半极性小面量子阱所对应的蓝、绿光发光峰

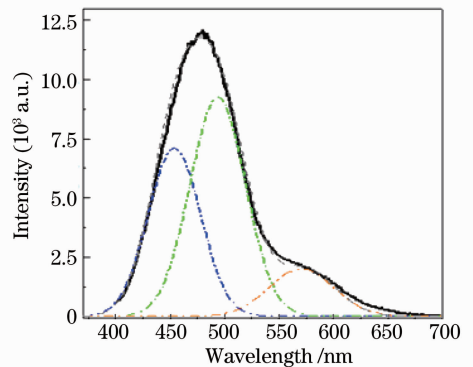


图 5 单一岛状 InGaN/GaN 多量子阱的 CL 光谱  
Fig. 5 CL spectrum of InGaN/GaN multiple QW on a single island

明显强于来自(0002)极性的红光发射强度。这说明岛状半极性小面量子阱发光的光发射效率提升的特性和潜能。可进一步通过调整半极性小面量子阱的In组份和阱宽,实现部分红光增强效应,则各种色温的白光的获得将更为灵活可控。

## 4 结 论

利用MOCVD技术控制自组织三维Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N小岛的外延生长,形成六角形包含极性、半极性小面侧壁的多发射面结构。并根据这一特殊纳米结构,在非极性小面上设计生长了InGa<sub>0.5</sub>N/GaN多量子阱复合发光有源层。通过优化的TEM样品制备技术,对生长特性和小面特性进行了确认,发现侧壁主要由半极性的{-1011}和{0-112}小面构成,其小面尺寸可通过小面生长速度控制调节。利用CL研究InGa<sub>0.5</sub>N/GaN多量子阱的发光特性表明,单一岛状多小面量子阱可发射包含450、500、560 nm三基色波长的混合白色,证明了该单一结构的白光发射。同时,半极性小面上量子阱结构的发光效率得到明显提升,克服了极性面极化场效应的限制,从而获得明亮的不同颜色发光的主要区域。该技术和结构,可应用于高效单芯片白光LED的研发和高质量白光调节技术,并对新一代半导体普通照明提供新的方向。

## 参 考 文 献

- 1 S. M. Sze. Physics of Semiconductor Devices[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981
- 2 C. H. Su, W. Palosz, S. Zhu *et al.*. Energy gap in GaN bulk single crystal between 293 and 1237 K[J]. *J. Cryst. Growth*, 2002, **235**(1): 111~114
- 3 Wang Huaiming, Xiong Chuanbing, Wang Guangxu *et al.*. Study on aging characterization of 1 W epitaxy on Si substrate blue LED based on different substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1749~1754  
王怀明,熊传兵,王光绪等.不同基板1 W硅衬底蓝光LED老化性能研究[J].*光学学报*,2010,**30**(6):1749~1754
- 4 Cui Miao, Zhou Taofei, Zhang Jinping *et al.*. Influence of In fraction on the optical properties of InGa<sub>0.5</sub>N/GaN blue light-emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1016004  
崔苗,周桃飞,张锦平等.In组份对InGa<sub>0.5</sub>N/GaN蓝光LED的发光性质的影响[J].*光学学报*,2011,**31**(10):1016004
- 5 Du Xiaoqing, Chang Benkang, Qian Yunsheng *et al.*. Experimental investigation of high-low-temperature two-step

- preparation of GaN UV photocathode material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1734~1738  
杜晓晴,常本康,钱芸生等.GaN紫外光阴极材料的高低温两步制备实验研究[J].*光学学报*,2010,**30**(6):1734~1738
- 6 E. F. Schubert, J. K. Kim. Solid-state light sources getting smart[J]. *Science*, 2005, **308**(5726): 1274~1278
- 7 E. F. Schubert, J. K. Kim, H. Luo *et al.*. Solid-state lighting—a benevolent technology[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2006, **69**(42): 3069~3099
- 8 C. J. Humphreys. Solid-state lighting[J]. *MRS Bull.*, 2006, **33**: 459~470
- 9 C. H. Chen, S. J. Chang, Y. K. Su *et al.*. Nitride-based cascade near white light-emitting diodes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(7): 908~910
- 10 I. K. Park, J. Y. Kim, M. K. Kwon *et al.*. Phosphor-free white light emitting diodes composed of InGa<sub>0.5</sub>N multilayer quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(9): 091110
- 11 D. F. Fezell, M. C. Schmidt, S. P. Denbaars *et al.*. Development of nonpolar and semipolar InGa<sub>0.5</sub>N/GaN visible light-emitting diodes[J]. *MRS Bull.*, 2009, **34**(5): 318~323
- 12 Z. Y. Zhang, M. G. Lagally. Atomistic processes in the early stages of thin-film growth [J]. *Science*, 1997, **276** (5311): 377~383
- 13 S. Kodambaka, S. V. Khare, I. Petrov *et al.*. Two-dimensional island dynamics: role of step energy anisotropy[J]. *Surf. Sci. Rep.*, 2006, **60**(5): 55~77
- 14 Fang Zhilai, Kang Junyong. Self-organization of 3D triangular Gallium Nitride nanoislands and the shape variation to hexagonal [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, **111**: 7889~7892
- 15 Fang Zhilai, Kang Junyong *et al.*. Silicon-induced strain relaxation and enhanced Gallium surfactant effects on GaN island shaping[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, **112**: 4925~4931
- 16 Fang Zhilai, Li Shuping, Kang Junyong *et al.*. GaN on Si-rich SiN<sub>x</sub>-coated sapphire at different growth stages: the surface morphologies and optical properties[J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**(18): 6344~6352
- 17 Fang Zhilai, Kang Junyong *et al.*. Interface modification of the InGa<sub>0.5</sub>N/GaN quantum wells: the strain pre-relief effect [J]. *Nanotechnology*, 2009, **20**(23): 235401
- 18 Zhang Kele, Zhang Lehui. Crystal Growth Science and Technology Part II [M]. Beijing: Science Press, 1997. 506  
张克乐,张乐惠.晶体生长科学与技术 下册[M].北京:科学出版社,1997. 506
- 19 Wang Yanfei. Transmission electron microscope sample preparation test technology and method of brittle materials section [J]. *Physical and Chemical Inspection-Physical*, 2011, **47**(11): 225~228  
王燕飞.脆性材料截面透射电镜样品的制备试验技术与方法[J].*理化检验-物理分册*,2011,**47**(11):225~228
- 20 Chen Chunhuan, Ren Ruiming. Transmission electron microscope sample preparation of nanometer material cross-section[J]. *Physical and Chemical Inspection-Physical*, 2009, **45**(11): 680~683  
陈春焕,任瑞铭.表面纳米化材料横截面透射电镜试样的制备[J].*理化检验-物理分册*,2009,**45**(11):680~683