

文章编号:1001-5868(2001)01-0001-06

# 宽禁带 GaN 基半导体激光器进展

章 蓓

(北京大学 物理系 介观物理国家重点实验室,北京 100871)

**摘 要:** 宽禁带 III 族氮化物基半导体是 20 世纪末研究最活跃的半导体材料系,其高亮度发光二极管和激光器一出现即以惊人的速度实现了商品化。文章就 GaN 基半导体激光器的市场需求、蓝宝石基片上生长的氮化镓基激光器的研制和发展概况以及近期研究热点作了扼要介绍。

**关键词:** 半导体激光器;氮化物半导体;宽禁带半导体

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

## Recent Progress in Wide Bandgap GaN - based Semiconductor Laser Diodes

ZHANG Bei

(State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, Dept. of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The wide bandgap III - nitride - based semiconductors are the most active semiconductor material systems during the past few years of the 20th century. GaN - based superbright light emitting diodes and injection laser diodes have been commercialized since their invention with an incredible quick pace. In this paper, market demands of GaN - based semiconductor lasers is outlined, along with description of research and development on nitride - based laser grown on sapphire substrates, as well as their recent research hot spot.

**Key words:** semiconductor laser diode; semiconductor III - nitrides; wide bandgap semiconductor

### 1 引言

在刚过去的不到 10 年的时间内,大量的探索和研究使宽禁带 III 族氮化物基半导体成为 20 世纪末最活跃的半导体材料系。III 族氮化物半导体 InN、GaN 和 AlN 的能带都是直接跃迁的,在性质上相互融合,它们的三元合金的带隙从 1.9 eV(纯 InN)到 6.2 eV(纯 AlN)很宽的范围内变化,具有优异的特性,如稳定的物理和化学性质、高热导和高电子饱和速度等。因直接带隙材料的光跃迁几率比间接带隙的高一个数量级,又加上宽带隙,因此 GaN 基半导

体在短波长发光二极管、激光器和紫外探测器以及高温微电子器件方面显示出广阔的应用前景。而且这一材料系还是最“适于环境保护”的材料体系,目前某些器件已经实现商品化,如蓝、绿色发光管、紫光激光器、紫外 CCD 等等。

近年在国际性的材料、半导体物理、光电子等学术会议上,GaN 基材料和器件研究成为交流的热点。1995 年以来已举办了 3 届国际氮化物半导体会议,而不定期的地区性、专题性氮化物学术交流和研讨会更是连年不断,如已举办了 4 次欧洲氮化物年会,3 次全俄 Ga、In、Al 氮化物研讨会,到 2000 年 3 月在美国已举办 6 次宽禁带氮化物研讨会等等。美国材料研究学会创办的“MRS 氮化物半导体研究因特网杂志”为最快捷地交流氮化物半导体成果提供了

收稿日期:2000-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19774008, 69896260);集成光电子国家重点实验室开放课题

方便。这些足以说明 GaN 半导体已受到世界各国科技和产业界的广泛关注。

本文就有关 GaN 基半导体激光器的需求、发展和最新进展,特别是蓝宝石衬底上制备的 GaN 基激光器进展作一个概括介绍。

## 2 宽禁带 GaN 基半导体激光器的市场需求<sup>[1]</sup>

1999 年世界半导体激光器的总市场约 20 亿美元,并以很高的年增长率迅速增加。1999 年底据 Elsevier Advanced Technology 报道,以 GaN 宽禁带半导体为基础的材料和器件的世界市场总值 1996 年为 2.27 亿美元,预计 2001 年将突破 9.91 亿美元。半导体激光器的主要市场中一半与通信有关,近红外激光器基本满足石英光纤通信要求;而另一半市场是信息存贮和打印。信息科技的发展迫切需要中等功率但波长更短的便宜而紧凑的激光器。由于衍射作用的限制,光点最小面积的极限为波长平方,若采用短波长激光器可使现有的存贮和打印的信息容量按  $\lambda^{-2}$  关系增加。现在 GaN 基激光器主要市场需求可包括以下几方面。

### 2.1 通信

发蓝光的 InGaN 激光器可用于短距离的塑料光纤通信。

### 2.2 存贮

激光器在光存贮方面的应用是人所共知的。1998 年 2.60 亿只激光器用于生产 CD 或 DVD 播放机,这一市场将在几年内一直保持快速增长的势头,近期的趋势是满足更高分辨率、更高功率特别是可写 DVD 的需求。目前 CD 播放机采用 AlGaAs 基激光器(780 nm),而 DVD 播放机则采用 AlGaInP 激光器(635 nm 或 650 nm)。预计 InGaN 激光器(410 nm)将很快用于高清晰度 DVD。

CD 的最小特征尺寸为 0.82  $\mu\text{m}$ ,存贮容量为 0.65 Gb。DVD 是双层基础上的双面盘。标准 DVD 和 HD-DVD 的最小特征尺寸分别为 0.4  $\mu\text{m}$  和 0.24  $\mu\text{m}$ ,其存贮容量分别可达 9.4 Gb 和 30 Gb。“读”的功率要求 5 mW 连续工作。DVD-RAM 对激光器性能要求比打印机更难,“写人”功能要求较高的功率即 35~50 mW,但不一定需要连续工作。若采用蓝光激光器,DVD-RAM 的存取时间将由现在的 50~100 ms 减小到 5~10 ms。早在 1997 年,日本的日立和东芝公司就已在积极筹划运用 GaN 基激光器的 DVD-ROM 和 DVD-RAM 升级换代产

品的上市。新加坡近年新建的数据存贮研究所也已将采用 GaN 基激光器的 DVD 作为研制的主攻项目。

### 2.3 打印和复印

印刷和复印是 InGaN 基激光器的另一应用领域。最近打印机的标准是 600 dpi(每英寸点数)每分钟打印 60 页,今后从速度、色彩、分辨率和多功能(如扫描/Fax/打印一机多能)等方面有更高的要求,发展趋势是增加到 1 200 dpi,这就要求光点大小从 35  $\mu\text{m}$  减小到 17  $\mu\text{m}$ 。采用波长为 390 nm 的 GaN 激光器和同样的光圈,可达到 1 200 dpi。美国 Xerox 研究实验室中心已于 1997 年用实验室研制的 GaN 激光器进行了演示。如果开关(上升/下降)速度在 1 ns 范围并有较好的光束质量,连续功率 5~6 mW 的单模 GaN 基激光器可使打印机每分输出 60 页。

## 3 宽禁带 GaN 基半导体材料研究的几个重大突破

为实现 GaN 基半导体器件,最基本的是生长高质量的材料和结构以及控制其电导率。由于缺乏晶格常数匹配、热胀系数接近的热稳定的衬底材料,要生长平坦而没有裂纹的高质量 GaN 外延层是非常困难的,而且非故意掺杂的 GaN 外延层一般呈电子浓度很高的 n 型,而 p 型 GaN 外延层又难以获得。因此 1985 年以前的 20 多年间,GaN 的研究进展十分缓慢。

近 10 多年来,GaN 材料研究接连取得的重大突破<sup>[2,3]</sup>,大大推动了 GaN 基器件的发展。

### 3.1 高质量 GaN 外延层的生长

1986 年 Amano 等人<sup>[4]</sup>提出利用低温生长的 AlN 或 GaN 过渡层或成核层,得到表面平坦如镜、低剩余载流子浓度、高电子迁移率和高荧光效率的高质量 GaN 外延层,1991 年首次获得 GaN 外延层室温光泵浦下的受激发射<sup>[5]</sup>。这一技术现已成为生长高质量 GaN 外延层必不可少的标准工艺。

### 3.2 低阻 p-GaN 的获得

1989 年 Amano 等人<sup>[6]</sup>利用低能电子辐照实现了 Mg 掺杂低阻 p 型 GaN。1991 年 Nakamura 等人<sup>[7]</sup>在 700  $^{\circ}\text{C}$  以上无氢的氮气中退火,也获得了低阻 p-GaN,解决了近 20 年的难题,现在几乎所有的 p-GaN 都是采用上述方法得到的。

### 3.3 高质量 InGaN 外延层的生长

InGaN 是 III 族氮化物三元合金中应用最广泛的

材料系,是所有氮化物基紫光到红光发光二极管和激光器的有源层。但 InGaN 在高温时很不稳定,易分解,由于 InN 的相分离,有形成团簇的倾向。由于这种 InN 团簇很小,有利于形成三维的量子限制而增强载流子限制和提高复合效率,提供比一维限制时更多的量子态,因此这种 InN 团簇化对发光很有利。已证明有源层内由 In 组分涨落引起的深局域化能态是发光二极管高效发光的关键,只有掺有 In 的 GaN 有源层才可能得到室温带间跃迁。

上述三个突破,大大促进了 InGaN 基发光二极管和激光器的发展。1989 年制成第一个 p-n 结发光二极管,1992 年以后高质量 InGaN 外延层和量子阱结构取得进展,相继于 1994 和 1995 年研制成功蓝光 InGaN 异质结和 InGaN 量子阱发光二极管,成为 GaN 材料系第一个商品化的产品和最引人注目的应用。

#### 4 宽禁带 GaN 基半导体激光器的研制和发展概况

我们不妨对注入型 GaAs 和 GaN 基半导体激光器的发展进程作一个简单回顾和比较。第一个脉冲激射的 GaAs 激光器到实现室温连续工作,经历了 10 多年时间,此后为解决 GaAs 激光器的暗线缺陷衰变即寿命问题又经历了 10 年。

而 GaN 基激光器的发展进程则比 GaAs 激光器短得多。日本日亚公司的 Nakamura 于 1995 年 12 月实现了第一个 InGaN 多量子阱半导体激光器的室温脉冲激射。12 个月后 InGaN 多量子阱半导体激光器实现了室温连续激射,1999 年 1 月 InGaN 基紫光激光器实现了商品化。

GaN 中有很多辐射跃迁,人们对其中的激子跃迁尤其感兴趣,因为它产生窄谱线。因此 GaN 基激光器若能设计为激发自由激子的辐射复合就比较理想。但自由激子非常脆弱,仅  $1 \times 10^4$  V/cm 的电场就可破坏它。Nakamura 的高亮度蓝光发光管的缺陷高达  $1 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ ,相当于缺陷平均间距为  $1 \mu\text{m}$ ,缺陷和杂质的存在会引起带边局部涨落,这些电势涨落的变化可大于 1 V, Franz-Keldysh 效应会在这样的电场下发生,引起电子隧穿从而破坏组成激子的电子-空穴对。Nakamura 的激光器之所以能工作,其巧妙之处就在于把激子限制在比  $1 \mu\text{m}$  小得多的 InGaN 量子阱中。

而在 GaAs 激光器出现的早期,还没有实现异质结量子阱,因此在 20 世纪 60 年代大量的工作致

力于改进晶体的质量和设计巧妙的波导结构。采用量子阱有很大的优越性,但晶体质量的提高仍然是目前的迫切问题。

Nakamura 研制成功的第一个 GaN 基紫光电注入激光器是经过 100 多次试验后才得到的。有源区由 26 个周期的  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  (2.5 nm)/ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  (5.0 nm) 多量子阱组成, GaN 和 AlGaIn 分别为波导层和限制层。在第一个 AlGaIn 限制层生长前,生长  $0.1 \mu\text{m}$  的  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ ,以防止龟裂;量子阱生长后先长一层  $0.2 \mu\text{m}$  厚的 AlGaIn,以防止量子阱在高温生长 GaN 波导层时热分解。激光器镜面由氯化物反应离子刻蚀而得(镜面不平整度 50 nm),条宽  $20 \mu\text{m}$ ,接触条宽  $10 \mu\text{m}$ ,腔长  $300 \sim 1500 \mu\text{m}$ ,最大输出为 10 mW。1996 年 1 月报道,在脉冲条件下正向电流为 2.3 A (34 V) 时,器件输出高达 215 mW,单面微分量子效率 13%,阈值电流密度  $4 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 。12 个月后,这种器件实现了室温连续激射。

由于激光器的工作电流比 LED 的高得多, Nakamura 指出,为提高激光器的寿命,必须采用 ELOG (侧向外延过生长) 技术<sup>[8]</sup>。在 ELOG 衬底上生长的 InGaN 多量子阱分别限制激光器结构如图 1 所示。1999 年 1 月 12 日,日亚公司宣布这种 InGaN 基的紫光激光器进入商品化。器件的发射波长 400 nm (390 ~ 420 nm),工作电流 40 mA,工作电压 5 V,输出功率 5 mW,室温寿命 10 000 小时。

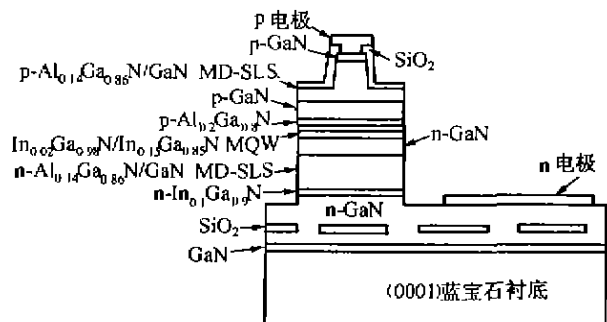


图 1 InGaN 多量子阱分别限制激光器结构<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Structure of InGaN MQW/GaN/AlGaIn SCH grown on ELOG substrate<sup>[8]</sup>

在蓝宝石衬底上生长的多量子阱 GaN/AlGaIn 分别限制紫光激光器,带解理镜面的 LD 室温连续工作输出功率可高达 40 mW,始终为稳定的基横模。在  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 、10 mW 输出功率情况下估计寿命大于 2 000 h,这已接近光存贮和打印的要求。现在,这种器件的最大输出功率可达 420 mW,阈值电流密度低至  $1.2 \text{ kA}/\text{cm}^2$ ,转变电压 4.3 V,在线形区的量子效率 39%。最近,又制成波长 450 nm 的 GaN

基蓝光激光器<sup>[9]</sup>, 450 nm InGaN 单量子阱蓝光激光器 5 mW 下室温连续工作寿命达 200 h, 阈值电流密度低至 4.6 kA/cm<sup>2</sup>, 工作电压 6.1 V。

至今, 已有一批公司和研究小组如 Cree, Xerox, Fujitsu 等演示了电注入的 InGaN 激光器, 某些已实现室温连续工作, 工作寿命从几秒到几小时。

## 5 宽禁带 GaN 基半导体激光器的难点和近期研究热点

InGaN 基紫光/蓝光边发射激光器虽以异乎寻常的速度实现了商品化, 但人们对它的了解还是很不夠的。一方面, 目前 GaN 基半导体激光器都是在大晶格失配的衬底如蓝宝石 (高达 15%) 或 SiC 上制备的, InGaN 有源层位错密度高达  $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>, 即使如此, InGaN 发光二极管和激光器的发光效率却远高于传统的 III-V 族化合物半导体 (AlGaAs 和 AlInGaP) 的器件; 而另一方面, 其阈值电流密度仍高于传统的半导体激光器, 而且阈值电流随激射波长急剧增大, 因此其发光机制需深入探讨。同时, 解决其缺陷密度高、p 型掺杂难、解理难、刻蚀难等难点, 一直是研制 GaN 基半导体激光器的技术关键。近期与研制宽禁带 GaN 基半导体激光器相关的研究热点大体集中在以下几个方面。

### 5.1 降低缺陷密度——选择性外延生长

降低缺陷密度是提高 GaN 基激光器性能和寿命的关键。在晶格失配的蓝宝石或 SiC 上生长的 GaN 薄膜是由许多尺度约 1 μm 的六方晶粒组成的柱状材料, 位错密度高达  $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$ /cm<sup>2</sup>, 若用以制备激光器, 直接影响激光器的寿命。采用选择性生长技术即侧向外延过生长技术 (Lateral epitaxial overgrowth, 简称 LEO 或 LEO) 生长 GaN 外延层<sup>[8]</sup>, GaN 的位错密度可降低至约  $1 \times 10^4$ /cm<sup>2</sup>。图 2 中比较了 ELOG 衬底和在相同条件下无 SiO<sub>2</sub> 掩模生长的 12 μm 厚 GaN 薄膜腐蚀后的表面形貌<sup>[2]</sup>。Nakamura 采用了 LEO 生长的 GaN 衬底, 使激光器的最小阈值电流密度低至 1.2 kA/cm<sup>2</sup>, 室温连续输出功率高达 420 mW, 大大提高了寿命并实现了商品化。因此近年来 LEO 生长 GaN 的技术发展非常迅速, 1999 年 8 月在阿拉斯加举行的“侧向外延过生长”专题研讨会上报道了许多有意义的进展。如在硅衬底、纳米结构 (小岛大小为 20 ~ 40 nm) 的 SOI 衬底、多孔 GaN 衬底上进行 GaN 的 LEO 生长。实验表明, 好的 GaN LEO 材料的热导率 (2 W/cm · K 量级) 显著高于 25 年前的报道值 (1.3 W/cm ·

K)。因此, 尽管 LEO 技术还很不理想, 但在当前尚无 GaN 衬底情况下是非常有用的。

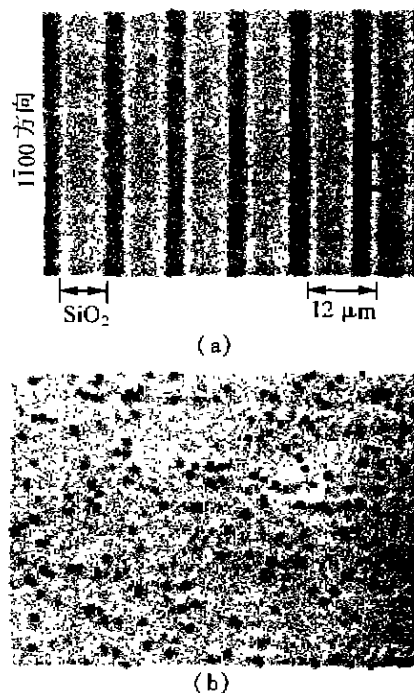


图 2 腐蚀后的 GaN 表面形貌。(a) ELOG 衬底; (b) 与 ELOG 相同条件但无 SiO<sub>2</sub> 掩模时生长的 12 μm 厚 GaN 薄膜<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Etched surface morphology. (a) ELOG substrate; (b) 12 μm thick GaN film grown under the conditions same as the ELOG substrate without SiO<sub>2</sub> mask patterns<sup>[2]</sup>

美国北卡罗来纳州立大学提出一种新的 GaN、AlGaIn 及其异质结的选择性侧向外延法, 称之为悬挂式外延 (Pendec - epitaxy, PE), 它利用有掩模的图形, 使 GaN 只在条形 GaN 的侧壁上悬空侧向生长, 然后覆盖在掩模上, 掩模用以阻止缺陷的垂直传播。这一方法可在整个表面上得到连续的低位错的 III 族氮化物外延薄膜。PE 的侧向生长速度比 LEO 快 4 ~ 5 倍, 已分别在 GaN/AlN/6H - SiC (0001) 和 GaN (0001) / AlN (0001) / 3C - SiC (111) / Si (111) 衬底上取得结果, 这也为在大面积 Si 片上生长 GaN 器件提供了一种可能的途径。

最近, Akasaki 等人采用多层低温缓冲层的 MOCVD 技术, 使 GaN 的位错密度下降了 2 ~ 3 个数量级。

### 5.2 选择新衬底

寻找更合适的衬底仍是 GaN 基技术的一个重要目标。Nakamura 采用了 LEO 生长的 GaN 衬底, 再用氢化物汽相外延 (HVPE, hydride vapor phase epitaxy) 生长 200 μm 的 GaN 后, 磨去蓝宝石衬底,

形成“无支撑”的 GaN 衬底,并研制成功室温连续的 30 mW 激光器。最近 NEC 公司采用这种“无支撑”的 GaN 衬底,制成背面接触的脊条形激光器,既便于解理又降低了阈值。此外利用剥离法,将不同晶片间的熔融键合或胶合与激光辐照或腐蚀剥离技术相结合,使 GaN 与蓝宝石衬底分离,也是 GaN 基器件技术中降低应变和便于解理的一种途径。

2000 年 5 至 6 月间在欧洲 MRS 会上,对选择新衬底展开了广泛讨论,包括代替传统的蓝宝石和 SiC 的衬底采用 LEO 准衬底、高压生长的 GaN 单晶片或 Si 衬底等。德国 Ulm 大学和波兰高压研究中心<sup>[10]</sup>在 1 600 °C 高温和 20 kbar 高压下生长的 GaN 单晶片,位错密度可降低 6 个数量级,1999 年以它为衬底制备的第一个同质外延 pn 结和 InGaN/GaN 异质结 LED 的亮度就比蓝宝石衬底的提高了一倍,p 型空穴浓度也大大提高。

以 Si 作为衬底材料是最引人注目的选择,因有可能将 GaN 基器件与 Si 器件集成。在低温(约 70 °C)时用 MBE 在硅衬底上生长 1.5 μm 厚的 GaN 没有出现裂纹,看来是一种解决办法,但原因不清。MBE 生长技术的灵活性使层状结构很容易地从平坦的薄层变为纳米柱,它对 n 型(掺 Si)和 p 型(掺 Be)掺杂的高效率和相对高的电子迁移率为今后器件应用提供了希望。

利用立方 BP 缓冲层在 Si(001)上汽相生长立方相 GaN 也是一种办法<sup>[11]</sup>。用 LP - MOCVD 在 AlAs/Si(111)或 ZnO/Si(111)和 ZnO/Si(001)衬底上已获得立方相 GaN 单晶外延层<sup>[12]</sup>。浙江大学还发展了一种新的“真空反应法”<sup>[13]</sup>,在 Si(111)衬底上成功地生长出 0.4 ~ 5 μm 厚无裂纹的 GaN 单晶外延薄膜。

### 5.3 生长量子点有源层

GaN 基激光器一开始就是以 InGaN 量子阱作为有源层的。不少研究证实,InGaN 量子阱激光器的光发射可能来源于生长时 In 组分涨落所形成的类量子点(QD)的局域态。

量子点半导体激光器比量子阱激光器更优越,这已在传统的 GaAs 基量子点激光器中得到证实。对于宽禁带 GaN 基异质结来说,用量子点代替量子阱有更多的好处。首先,QD 更容易释放应力而有可能制备出无缺陷的晶格失配大的异质结。其次,由于载流子的局域化,可增强“多体效应”,通过 Coulomb 相互作用使增益得到更大的提高。

因此,InGaN 量子点的生长及其激光器的探索近年来倍受关注。通过自组装法或直接在纳米结构

的衬底上选择生长两类方法,采用 MOCVD 或 MBE 技术都成功地获得了 InGaN 量子点。2000 年 7 月在英国举行的第四届欧洲 GaN 研讨会上,报道了不少有意义的结果。QD 的发光效率比量子阱明显提高,当温度由低温升到室温以上时,量子点结构的 PL 强度随温度的淬灭作用也比量子阱的弱很多。

东京大学 Y. Arakawa 小组报道了第一个光泵浦的室温激射的 InGaN 量子点激光器<sup>[14]</sup>。他们用 MOCVD 生长了 10 层堆垛的自组装  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  量子点结构,镶嵌在激光器的有源区内。InGaN QD 平均直径和高度分别为 19.5 nm 和 4.5 nm,激光器尺寸为 10 μm × 540 μm,用 RIE 刻蚀镜面,阈值激发能量为 6 μJ。他们还在具有 2 μm 方形窗口图形的  $\text{SiO}_2/\text{GaN}/\text{蓝宝石}$  基片上用 MOCVD 选择生长得到六方金字塔形 InGaN 多量子阱<sup>[15]</sup>,在金字塔顶部自然形成了量子点,证实室温下很强的荧光就是从塔顶的量子点产生的。

分别镶嵌在 AlN 和 GaN 中的 GaN 和 InGaN 自组织量子点也可在 Si 或蓝宝石衬底上用 MBE 生长而成<sup>[16]</sup>,室温下有较强的可见光波段的发射,这是由于 QD 中存在较大的电场引起量子限制 Stark 效应,使 PL 谱发生红移。改变量子点的大小可在整个可见光范围调谐发射波长,这将是制备白光 LED 的一种办法。

对 MBE 生长六方和立方的 AlN/GaN 量子点的比较表明,立方量子点由于振子强度不受任何极化场减小的影响而具有较强的 PL。

### 5.4 采用不同的腔结构

除了 Nakamura 和大多数研究小组采用传统的 F - P 腔结构研制 InGaN 基激光器外,Xerox 研制成功电注入的三级 Bragg 光栅紫光 DFB 激光器,室温光泵浦的一级和二级光栅 DFB 激光器也已分别演示成功。

微腔型激光器结构避免了制备相互平行的解理面的技术困难。由选择生长自然形成的 GaN 微型六方金字塔结构及自然腔面,在室温光泵浦下也达到了受激发射。InGaN 量子阱垂直腔面发射激光器(VCSEL)采用底部 43 个周期  $\text{GaN}/\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{N}$  氮化物 DBR 和顶部 15 个周期的  $\text{ZrO}/\text{SiO}_2$  DBR,在光泵浦下实现了室温脉冲激射。另外,利用激光辐照剥离技术,将剥离的 InGaN 量子阱结构夹在氧化物 DBR 镜面间制成 InGaN 紫光垂直腔面发射激光器,在光泵浦下实现了准连续发射。这不仅为研制短波长氮化物 VCSEL,而且为研究氮化物微腔及腔内激子和光相互作用创造了条件。

### 5.5 研究激光机制和模式

纤锌矿结构的宽禁带Ⅲ族氮化物的光学性质与人们熟悉的Ⅲ-V族半导体 GaAs 或 InP 不同,这带来激光机制的独特性,有待深入探讨。

GaN 基量子阱中内部电场和量子限制 Stark 等效效应使激光机制复杂化,很多问题有待解决。比如 InGaN 激光器阈值随波长的增加急剧加大,目前最好的 InGaN 激光器的阈值电流密度比传统的 GaAs/AlGaAs 和 II-VI 族 ZnCdSe QW 激光器高一个数量级。一方面氮化物半导体激光器明显地可允许在材料缺陷比其他激光器高得多的情况下工作,另一方面,由有源 InGaN 量子阱中 InGaN 组分的不均匀性引起的晶格无序化对微观的光增益起重要影响。激光器的阈值取决于光增益。In 组分涨落形成了局域化激子,有可能增大激光器的增益,有利于激光器工作;但合金成分的不规则涨落又会造成自发发射和增益谱的加宽,导致增益峰值的下降而加大阈值电流密度;另外在阱内非常大的电场又进一步提供了附加的电场。因此带边电子态的性质提供的光增益,局域态和光增益的关系是 InGaN 基激光器研究中的重要问题。美国布朗大学的 Nurmikko 小组发现,InGaN 多量子阱分别限制激光器的增益/吸收谱和 GaAs、ZnCdSe QW 的有明显的不同,其增益在激光峰值能量以下扩展到很宽的光谱范围,增益峰随注入的大小发生蓝移,须考虑多体效应的影响。增益谱的结果证实,InGaN QW 的辐射复合过程在很大程度上受局域化的电子-空穴对的影响。

理论和实验研究表明,GaN 中激子的振子强度比 GaAs 的大一个数量级,因此提出另一个新的设想,即如果将这类低维增益介质和新型微型谐振腔的设计和激发方式相结合,能否实现高效、低电流和实际可行的紫光/蓝光相干光源,即新型氮化物微腔激光器,这也是一个有意义的课题。

#### 参考文献:

- [1] Duboz J Y. GaN as seen by the industry[J]. Phys. Stat. Sol. (a), 1999, 176: 5-14.
- [2] Nakamura S. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes[J]. Science, 1998, 281: 956-961.
- [3] Nakamura S. Current status and future prospects of InGaN-based laser diodes[J]. AAPPS Bulletin, 2000, 10(1): 2-10.
- [4] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, et al. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layers[J]. Appl. Phys. Lett., 1986, 48: 353.
- [5] Amano H, Asahi T, Akasaki I. Stimulated emission near ultraviolet at room temperature from a GaN film grown on sapphire by MOVPE using an AlN buffer layer[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1990, 29: L205.
- [6] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1989, 28: L2112-L2114.
- [7] Nakamura S, Iwata N, Senoh M, et al. Hole compensation mechanism of p-type GaN films[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1992, 31: 1258.
- [8] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S, et al. Violet InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes with an output power of 420 mW[J]. Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 - Lett., 1998, 37(6A): L627-L629.
- [9] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S, et al. Blue InGaIn-based laser diodes with an emission wavelength of 450 nm[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76(1): 22-24.
- [10] Kamp M, Kirchner C, Schwegler V, et al. GaN homoepitaxy for device applications[J]. MRS Internet J. Nitride Semicond. Res., 1999, 4S1, G10.2.
- [11] Nishimura S, Terashima K. Growth of GaN on Si substrates using BP thin layer as a buffer[J]. Materials Science and Engineering, 2000, B75: 207-209.
- [12] Strittmatter A, Krost A, Turck V, et al. LP-MOCVD growth of GaN on silicon substrates-comparison between AlAs and ZnO nucleation layers[J]. Materials Science and Engineering, 1999, B59: 29-32.
- [13] Zhang Haoxiang, Ye Zhizhen, Zhao Binghui. Investigation of preparation and properties of epitaxial growth GaN film on Si(111) substrate[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 210: 511-515.
- [14] Tachibana K, Someya T, Arakawa Y, et al. MOCVD growth of a stacked InGaIn quantum dot structure and its lasing oscillation at room temperature[J]. Physica E, 2000, 7: 944-948.
- [15] Tachibana K, Someya T, Ishida S, et al. Selective growth of InGaIn quantum dot structures and their microphotoluminescence at room temperature[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76(22): 3212-3214.
- [16] Damilano B, Grandjean N, Massies J, et al. GaN and GaInN quantum dots: an efficient way to get luminescence in the visible spectrum range[J]. Applied Surface Science, 2000, 164: 241-245.

#### 作者简介:



章 蓓(1939-),女,教授,博士生导师。1962年毕业于北京大学物理系,长期从事半导体物理和光电子器件物理的研究。近年主要研究方向为光学微腔物理、宽禁带 GaN 基半导体等微腔与微结构发光材料与器件。