

文章编号: 1000-7032(2016)11-4305-05

大失配、强极化第三代半导体材料体系生长动力学和载流子调控规律

王新强^{1*}, 黎大兵², 刘 斌³, 孙 钱⁴, 张进成⁵

- (1. 北京大学物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871;
2. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 南京大学电子科学与工程学院 江苏省光电信息功能材料重点实验室, 江苏 南京 210093;
4. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123;
5. 西安电子科技大学微电子学院 宽禁带半导体技术国防重点学科实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 高质量氮化镓(GaN)材料是发展第三代半导体光电子与微电子器件的根基。大失配、强极化和非平衡态生长是 GaN 基材料及其量子结构的固有特点, 对其生长动力学和载流子调控规律的研究具有重要的科学意义与实用价值, 受到各国科学界与产业界广泛高度重视。本文对大失配、强极化氮化物半导体材料体系外延生长动力学和载流子调控规律进行了研究, 旨在攻克蓝光发光效率限制瓶颈, 突破高 Al 和高 In 氮化物材料制备难题, 实现高发光效率量子阱和高迁移率异质结构, 制备多波段、高效率发光器件和高频率、高耐压电子器件, 实现颠覆性的技术创新和应用, 带动电子材料产业转型升级。

关 键 词: 氮化镓; 大失配; 强极化; 生长动力学; 载流子调控

中图分类号: O469; O552.6 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20163711.1305

Growth Dynamics and Carrier Control of The Third Generation Semiconductor with Large Mismatch and Strong Polarization

WANG Xin-qiang^{1*}, LI Da-bing², LIU Bin³, SUN Qian⁴, ZHANG Jin-cheng⁵

- (1. State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;
2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Photonic and Electronic Materials Science and Technology, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
4. Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;
5. School of Microelectronics, Xidian University, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense on Wide Bandgap Semiconductor Technology, Xi'an 710071, China)

* Corresponding Author, E-mail: wangshi@pku.edu.cn

Abstract: High quality GaN-based material system is the basis of developing the third generation semiconductor optoelectronic and microelectronic devices. The GaN-based materials and quantum structures have the properties of large mismatch, strong polarization, and nonequilibrium growth. The research on growth dynamics and carrier control of GaN-based material has important research significance and practical value, and is attracting the attention of scientific and industrial communities. In this paper, the growth dynamics and carrier control of GaN-based material with large

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-09-27
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0400100) 资助项目

mismatch and strong polarization is investigated, in order to get over the bottle-neck of low emitting efficiency of blue light, break through the difficulty of fabricating GaN-based material with high Al- and high In-composition, and achieve high mobility of heterostructure material and high quantum efficiency of optoelectronic devices. By the fabrication of emitting devices with high-efficiency multi-wavelength and electronic devices with high-frequency high-breakdown, the technology innovation, industrial transformation and upgrade can be realized.

Key words: GaN; large mismatch; strong polarization; growth dynamics; carrier control

1 引 言

以氮化物半导体材料为核心的第三代半导体材料,是继第一代半导体硅(Si)材料、第二代半导体砷化镓(GaAs)材料之后的新一代半导体材料。它们在半导体照明、新型显示、节能型电力电子等方面具有极其重要的应用。而高质量材料是发展第三代半导体光电子与微电子器件的根基。大失配、强极化和非平衡态生长是第三代半导体及其量子结构的固有特点,其研究具有重要的科学意义与实用价值,受到各国科学界与产业界广泛高度重视。美、日、韩及欧洲一些国家通过制定一系列国家计划,整合高校及研究机构、企业及相关政府部门的创新资源,建立国家级创新中心、产业联盟,以图全力抢占先进电子材料技术战略制高点,引领全球市场。

正是在这一背景下,面向国家的重大需求和国际研究前沿,“大失配、强极化第三代半导体材料体系生长动力学和载流子调控规律”项目获科技部战略性先进电子材料专项立项。以Ⅲ族氮化物为代表的第三代半导体材料被公认是当前国际光电信息技术领域的战略制高点,是实现高性能光电子和微电子器件的基础,各国均投入大量人力物力进行相关研发。

2 国内外研究进展

在 GaN 材料和光电子器件研究方面,3 位日裔科学家在利用缓冲层技术大幅度提高晶体质量的基础上,实现了 GaN 的 p 型掺杂,制备出高亮度蓝光 LED,引发了照明技术的革命,因而获得 2014 年度诺贝尔物理学奖^[1-4]。国内在 GaN 领域的研究主要包括北京大学、中科院长春光学精密机械与物理研究所、南京大学、中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所、西安电子科技大学、中科院

半导体所、清华大学、厦门大学、南昌大学、中科院微电子所、吉林大学、中山大学、中科院上海技术物理研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所、广州有色金属研究院等单位。

当前国内外的研究重点是进一步提高量子效率,降低大注入下的量子效率衰减(Efficiency droop 效应)。随着材料生长相关难题的不断攻克,目前蓝光波段量子阱结构的内量子效率达到 85%~87%,国内外水平相当^[5-6]。南昌大学外延的 515 nm 绿光量子阱结构的内量子效率达到 45.2%,处于国际先进水平^[7],如图 1 所示。

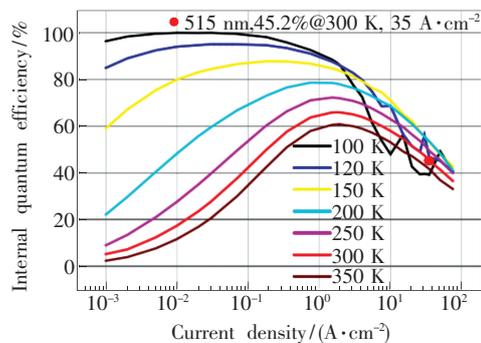


图 1 515 nm InGaN/GaN 量子阱结构的内量子效率^[7]

Fig. 1 IQE of 515 nm InGaN/GaN quantum well^[7]

在蓝光 LED 研究取得重大进展的基础上,为满足更宽波段的应用需求,氮化物半导体材料研究趋势向高 Al、高 In 方向拓展。由于 In—N 键能低, N 的饱和蒸气压高,导致生长温度较低;同时 Al—N 的键能高,表面迁移能力弱,要求生长温度高,因此高 In、高 Al 组分氮化物具有较高的缺陷密度。这也是 InGaN 和 AlGaIn 材料质量提升和量子结构发光、探测效率提升的关键所在。在 InN 外延方面,国内外处于同样水平,北京大学报道了室温电子迁移率为 $3280 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 的 InN 薄膜,迄今仍是国际上的最好结果之一,图 2 为他们制备的 InN 薄膜的迁移率随厚度(a)及温度

(b) 的变化曲线^[8]。

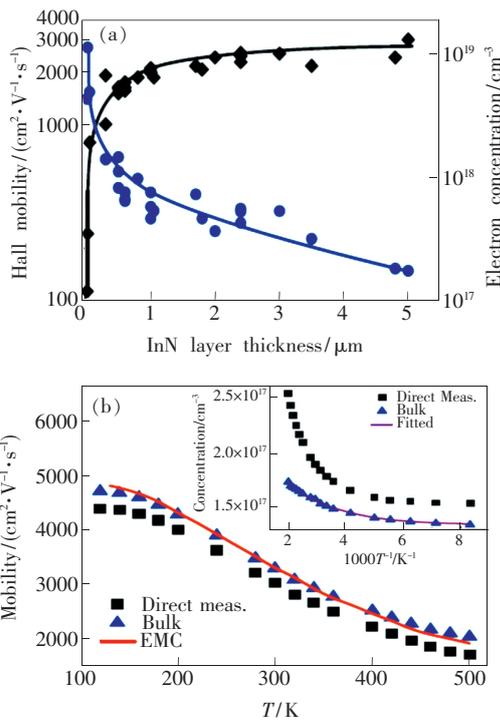


图 2 InN 迁移率随厚度 (a) 及温度 (b) 的变化曲线^[8]

Fig. 2 InN mobility dependence on thickness (a) and temperature (b)^[8]

在高 Al 组分 Al(Ga)N 及其低维量子结构研究领域, 美国和日本一直处于领跑地位^[9]。日本名城大学将 AlN 模板位错密度降到 $4 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, 是目前公开报道的最好水平; 日本理化研究所实现了内量子效率高达 60% 的 AlGaIn 基量子阱结构。我国在该领域也取得了较大的进展, 中国科学院半导体研究所通过外延横向过生长 (ELOG) 技术在蓝宝石纳米图形衬底 (NPSS) 上进行高温 MOCVD 多段外延生长, AlN 模板表面达到原子级平整度, (002) 和 (102) XRD 摇摆曲线 FWHM 分别达到 69.4 arcsec 和 319 arcsec, 位错密度降低到 10^8 cm^{-2} 量级, AlN 模板上外延的 283 nm 的 AlGaIn 基量子阱实现内量子效率达到 43% (图 3)^[10]。图 4 为蓝宝石纳米图形化衬底的制备流程。

在 GaN 基异质结构和微电子器件领域, 进展同样迅速。在小失配 SiC 衬底上 AlGaIn/GaN 异质结构二维电子气 (2DEG) 的迁移率达到 $2 \times 10^6 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 如图 5 所示; 28 V 工作的 GaN 微波器件和耐压 600 V 以下的 GaN 电力电子器件也已初步实现工程化应用^[11-14]。图 6 所示为 InAlN/GaN 功

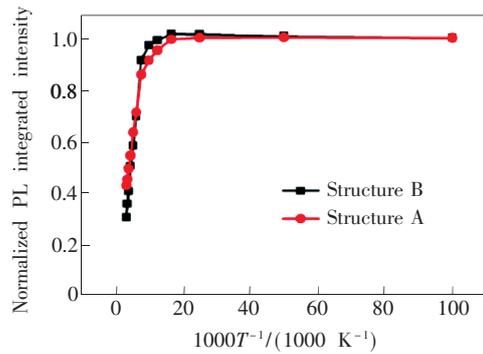


图 3 根据 PL 强度随温度变化计算的内量子效率^[10]

Fig. 3 IQE from integrated PL spectra^[10]

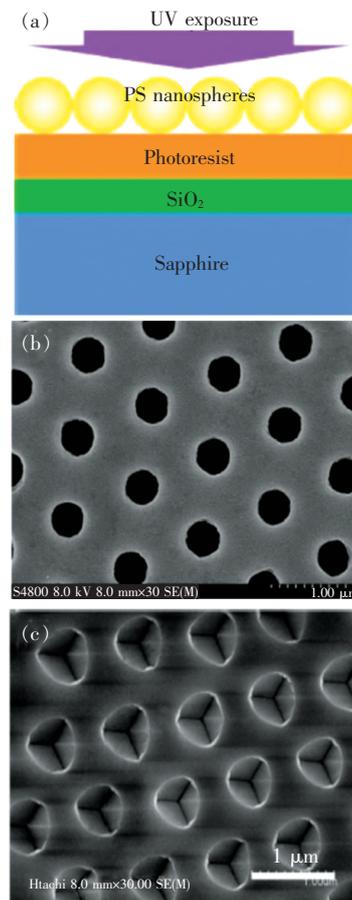


图 4 (a) 蓝宝石纳米图形化衬底的制备流程图; (b) 光刻胶图形; (c) 腐蚀图形^[10]。

Fig. 4 (a) Schematic diagram of fabricating NPSS. (b) SEM of patterned photoresist. (c) SEM of wet-etched NPSS^[10].

率放大器的主频率^[11], 图 7 为 HEMT 器件关态击穿电压随 C 浓度的变化^[12]。

低成本、大失配 Si 衬底上 GaN 的位错密度高, 2DEG 迁移率低, 高质量外延技术尚待突破。因此, 调控应力、抑制缺陷, 解决外延生长难题, 实

现低缺陷密度、高迁移率的异质结构,制备耐压达 600 ~ 1 200 V、可靠寿命超百万小时的电子器件成为当前该领域的研究热点。

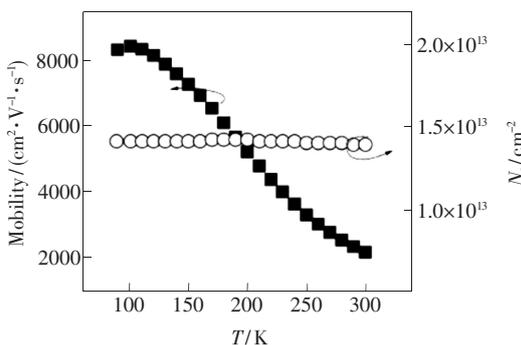


图 5 AlGaIn/GaN 二维电子气(2DEG)的迁移率和方块电阻^[13]

Fig.5 Mobility and sheet resistance of AlGaIn/GaN 2DEG^[13]

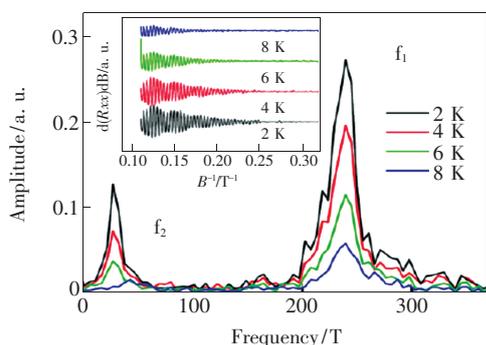


图 6 InAlIn/GaN 功率放大器的主频率^[11]

Fig.6 Two main frequencies of InAlIn/GaN amplifier^[11]

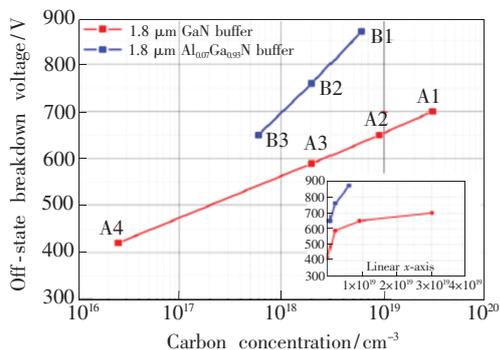


图 7 HEMT 器件关态击穿电压随 C 浓度的变化^[12]

Fig.7 Off-state breakdown voltage of HEMT device varying with carbon concentration^[12]

3 结果与讨论

尽管以Ⅲ族氮化物为代表的第三代半导体研究取得了突破性的进展,仍然存在诸多问题亟待解决。本课题组开展氮化物半导体大失配低维量子结构材料的外延生长动力学规律、应力/缺陷控

制规律、异质结构和量子阱中载流子输运/复合/跃迁及其调控规律的研究,旨在提出新结构和新方法,创造自主知识产权,为进一步推动高性能氮化物半导体器件的科学研究、加快产业化进程提供技术支撑,实现我国第三代半导体材料在基础研究和前沿技术上的突破,掌握国际竞争主导权。通过研究,解决非平衡条件下 AlN/高 Al 组分 AlGaIn、InN/高 In 组分 InGaIn 及其量子结构的外延生长动力学、缺陷形成机理和调控规律,强极化氮化物复合量子结构中载流子运动规律、高效发光和光提取机制及其调控方法,大失配异质结构中载流子输运性质、杂质/缺陷的局域态特性与电子器件击穿和动态特性的关联规律,大注入、强电场条件下 GaN 基发光器件与电子器件特性退化机理与可靠性提升技术等关键科学问题。基于“中间攻关、两边突破”的思路,攻克蓝光发光效率限制瓶颈,突破高 Al 和高 In 氮化物材料制备难题,实现高发光效率量子阱和高迁移率异质结构。重点研究非平衡条件下 AlGaIn 基量子结构的外延生长和深紫外发光规律, GaN 基超高效率复合量子结构的制备和耦合诱导蓝光发光机制,大失配、弱分凝 InGaIn 外延生长和高发光效率绿光量子阱,大失配衬底上 GaN 基异质结构中应力与缺陷调控及多物理场下的载流子输运性质,基于极化诱导能带工程的 GaN 基电子器件新结构、新工艺和可靠性等。

通过合作研究和协同攻关,系统掌握氮化物半导体大失配低维量子结构材料的外延生长动力学规律、应力/缺陷控制规律、异质结构和量子阱中载流子输运/复合/跃迁及其调控规律,为 GaN 基发光器件、电力电子器件、射频电子器件的研制提供材料基础、科学指导和解决方案。GaN 基异质结构、蓝光量子阱材料质量大幅提升,高 Al 和高 In 组分氮化物半导体紫外、绿光量子结构材料质量实现突破,进入国际先进水平。培育和凝聚一支具有国际水平的研究队伍,为战略性电子材料专项方向——“第三代半导体材料与半导体照明”的其他任务奠定理论和技术基础,有助于实现颠覆性的技术创新和应用,实现第三代半导体在国际上的技术优势,带动我国的电子材料产业转型升级,提升国家在节能环保、信息技术等领域的研发水平,支撑“中国制造 2025”、“互联网 +”等国家重大战略目标。

参 考 文 献:

- [1] AMANO H , SAWAKI N , AKASAKI I , *et al.* . Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer [J]. *Appl. Phys. Lett.* ,1986 ,48:353-355.
- [2] NAKAMURA S , MUKAI S , SENOH S , *et al.* . *In situ* monitoring and Hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers [J]. *J. Appl. Phys.* ,1992 ,71: 5543-5549.
- [3] AMANO H , SAWAKI N , AKASAKI I , *et al.* . p-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* ,1989 ,28: L2112-L2114.
- [4] NAKAMURA S , IWASA N , SENOH M , *et al.* . Hole compensation mechanism of p-type GaN films [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* ,1992 ,31: 1258-1266.
- [5] LI Y , ZHANG R , LIU B , *et al.* . Effect of the band structure of InGaN/GaN quantum well on the surface plasmon enhanced light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.* ,2014 ,116: 013101.
- [6] LIU Z Q , YI X Y , LI J M , *et al.* . Impurity resonant states p-type doping in wide-band-gap nitrides [J]. *Sci. Rep.* , 2016 ,6: 19537.
- [7] 毛清华. 高光效硅衬底 GaN 基大功率绿光 LED 研制 [D]. 江西: 南昌大学 ,2015.
MAO H Q. *Development of High Power Green Light-emitting Diodes on Silicon Substrate* [D]. Nanchang: Nanchang University ,2015. (in Chinese)
- [8] WANG X Q , LIU S T , SHEN B , *et al.* . High-electron-mobility InN layers grown by boundary-temperature-controlled epitaxy [J]. *Appl. Phys. Express* ,2012 ,5: 015502.
- [9] SHATALOV M , SUN W H , JAIN R , *et al.* . High power AlGaN ultraviolet light emitters [J]. *Semicond. Sci. Technol.* , 2014 ,29: 08007.
- [10] DONG P , LI J M , ZHANG Y , *et al.* . AlGaN-based deep ultraviolet light-emitting diodes grown on nano-patterned sapphire substrates with significant improvement in internal quantum efficiency [J]. *J. Cryst. Growth* ,2014 ,395: 9-13.
- [11] FANG Y L , FENG Z H , YIN J Y , *et al.* . Ultrathin InAlN/GaN heterostructures with high electron mobility [J]. *Phys. Stat. Sol. (b)* ,2015 ,252: 1006.
- [12] LI S M , ZHOU Y , GAO H W , *et al.* . Off-state electrical breakdown of AlGaN/GaN/Ga(Al) N HEMT hetero-structure [J]. *AIP Advances* ,2016 ,6: 035308.
- [13] MENG F N , ZHANG J C , ZHOU H , *et al.* . Transport characteristics of AlGaN/GaN/AlGaN double heterostructures with high electron mobility [J]. *J. Appl. Phys.* ,2012 ,112: 023707.
- [14] YUE Y Z , XING H L , GUO J , *et al.* . Ultrascaled InAlN/GaN high electron mobility transistors with cut off frequency of 400 GHz [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* ,2013 ,52(8S) :08JN14.



王新强(1975 -) ,男 ,江苏赣榆人 ,
博士 ,教授 ,2002 年于吉林大学获
得博士学位 ,主要从事宽禁带氮化
物半导体的外延生长和物性的
研究。

E-mail: wangshi@ pku. edu. cn