

基于聚焦离子束技术的可见光光子调控

蔡 玮^{1,2}, 邢 远³, 施 政¹, 袁佳磊¹, 贾志宏³, 王永进¹

(1. 南京邮电大学 Peter Grünberg 研究中心, 江苏南京 210003; 2. 南京工程学院 计算机工程学院, 江苏南京 211167;

3. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 采用晶圆级工艺, 制备了一种单片集成光源和直波导的硅基氮化镓光电集成器件, 结合聚焦离子束技术, 使用 Ga 离子束在直波导上刻蚀形成了一个布拉格反射镜 (DBR), 并对器件的光子调控功能进行研究. 特殊的 In-GaN 波导结构使得器件在制备过程中不再需要复杂的硅移除和晶片背面减薄工艺, 硅衬底可以保持完整. 实验结果表明, 作为光源的多量子阱发光二极管 (MQW-LED) 具有良好的电流-电压特性. MQW-LED 开启后部分光子耦合进直波导, 被限制在波导内向前传输, 在 DBR 处发生全反射并部分衍射到自由空间中. 由器件的电致发光光谱可知, 制备在波导上的 DBR 对波导内传输的光子进行了有效调控.

关键词: 硅基氮化镓; 多量子阱发光二极管; 波导; 布拉格反射镜

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)01-0252-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.034

Visible Light Photon Modulation Based on Focused Ion Beam Technology

CAI Wei^{1,2}, XING Yuan³, SHI Zheng¹, YUAN Jia-lei¹, JIA Zhi-hong³, WANG Yong-jin¹

(1. Grünberg Research Centre, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;

2. School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 211167, China;

3. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: On-chip photonic integration of light source and straight waveguide on the GaN-on-silicon platform is fabricated by wafer-level technique. With focused ion beam, a high reflective distributed Bragg reflector (DBR) is etched on the straight waveguide using a Ga ion beam. And the photon modulation function of the device is studied. Complicated back-side alignment and etching processes are saved and silicon substrate can be kept intact because of the particularity of InGaN waveguide structures. The experimental results show that the multiple-quantum-well light emitting diode (MQW-LED) has an excellent I-V performance. As the MQW-LED is switched on, some photons are coupled into the straight waveguide, and are transmitted forward in the waveguide, some light is total reflected at DBR, and partially diffracted into free space. According to the electroluminescence spectra of the devices, photons in the waveguide is effectively modulated by the DBR fabricated on the waveguide.

Key words: GaN-on-silicon; MQW-LED; waveguide; DBR

1 引言

作为第三代半导体, 氮化镓可以同时实现光发射、光传输和光探测三种功能, 这在可见光领域内引起了研究者的极大兴趣^[1,2]. 包含光源、波导、调制器、光电探测器和晶体管等光子器件的集成芯片也已经在不同的应用领域被成功使用^[3-6]. 文献[7]报道了一种新型的 GaN 基发光二极管 (LED) 与金属氧化物半导体场

效应晶体管 (MOSFET) 的互连与集成. 文献[8]展示了 InGaN/GaN 多量子阱发光二极管 (MQW-LED) 和垂直 MOSFET 驱动器的单片集成, 其对出射光强度的良好调制可以应用于微型显示器和可见光通信. 文献[9]报道了氮化镓发光二极管和硅光电探测器的集成, 该技术可用于开发紧凑型荧光分析系统. 随着时间的推移, 氮化镓外延生长技术的进步, 高质量缓冲层的引入, 使得高品质的 $p-n$ 结多层量子阱可以沉积在硅衬底

收稿日期: 2017-05-13; 修回日期: 2018-07-10; 责任编辑: 郭游

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61322112, No. 61531166004); 江苏省普通高校博士研究生科研创新计划 (No. KYZZ16_0258); 中国科学院跨学科创新团队计划; 南京工程学院创新基金重大项目 (No. CKJA201705, No. CKJA201708)

上^[10-12],这也使得先进的硅制造技术可以被整合使用.通过硅移除和晶圆蚀刻,已经实现高性能氮化镓波导和 MQW-LED 与多量子阱探测器(MQW-photodetector)的集成,该集成技术可用于制造单片氮化镓光子回路^[13,14].

另一方面,由于 AlGaIn 层的折射率比 InGaIn 层低,所以通过外延生长,AlGaIn 层可以作为 InGaIn 波导的光学包覆层^[15].这就在制备过程中避免了复杂的背面对准和蚀刻过程,大大简化了制备工艺.此外,结合聚焦离子束技术(FIB),使用 Ga 离子束对微纳器件的表面原子进行剥离,可以进一步完成微纳器件集成的二次加工,从而实现不同微纳器件的精密集成,以及对出射光谱的精确调控等功能.

本文基于硅基氮化镓实现了光源和波导的单片集成.光源的出射光可以很好地耦合进波导,波导对可见光的高限制性使得耦合光子能够沿着波导结构传输,并从波导端面出射到自由空间中.随后一个分布式布拉格反射镜(DBR)通过 FIB 技术被刻蚀到波导上, MQW-LED 发光区和 DBR 处的出射光谱也被进一步研究.

2 光电集成器件制备工艺

光电集成器件采用晶圆级工艺制备在一块 2 英寸的硅基氮化镓晶片上.图 1(a)是晶片的横截面示意图,晶片外延层由 38nm 厚的 Mg 掺杂 p-GaN 层,600nm 厚的 Mg 掺杂 AlGaIn 包覆层,80nm 厚的 InGaIn 波导层,120nm 厚的 InGaIn/GaN 多量子阱有源层,90nm 厚的 Si 掺杂 InGaIn 波导层,1.5 μm 厚的 Si 掺杂 AlGaIn 包覆层,3.0 μm 厚的 Si 掺杂 n-GaN 层,490nm 厚的 AlGaIn 缓冲层和 280nm 厚的 AlN 层组成. AlGaIn 包覆层和 InGaIn 波导层之间的折射率差异有助于整个高限制性 InGaIn 波导结构的形成. InGaIn/GaN 多量子阱有源层嵌套在两层 InGaIn 波导层和 AlGaIn 包覆层之间,这样的波导结构不再需要硅移除和晶片背面减薄,硅衬底可以保持完整.

图 1(b)是器件的示意图. InGaIn/GaN 多量子阱 LED 的出射光部分耦合进了直波导,光子被限制在波导内向前传输,在 DBR 处发生全反射并部分衍射到自由空间中.器件制备过程如下:(1)采用 AZ4620 光刻胶作为掩膜,使用 ICP180 感应耦合等离子刻蚀机从 p-GaN 层开始向下刻蚀,直到 n-GaN 层为止(n-GaN 层被部分刻蚀),Cl₂ 和 BCl₃ 的流速分别为 10 sccm 和 25sccm,刻蚀时间为 25 分钟,形成 P 台阶和波导,高度约为 2.5 μm ;(2)采用 AZ5214 光刻胶反转工艺制作掩膜,使用 Ei-5z 电子束蒸发台进行电极蒸镀,先蒸镀 20 nm 厚的 Ni,再蒸镀 180 nm 厚的 Au,并在快速退

火炉中进行 500 $^{\circ}\text{C}$ 、5 分钟的退火;(3)采用 AZ5214 光刻胶作为掩膜,使用 ICP180 感应耦合等离子刻蚀机去除波导上的 p-GaN 层,刻蚀时间为 4 分钟;(4)使用 ZEISS Auriga FIB/SEM 的扫描二次电子像定位到需要进行 DBR 刻蚀的波导位置,设置 Ga 离子束流为 30 KV/20 pA,通过移动样品台使得离子束和电子束同点汇聚,再调整 Ga 离子束流为 30 kV/120 pA,通过 NPVE 在波导上定义周期性布拉格反射镜结构(GaN 波导层/空气层),进而在波导上刻蚀形成一个 DBR,刻蚀深度为 1 μm .

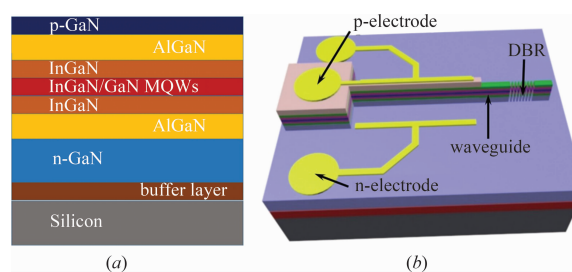


图1 (a) 外延结构横截面示意图; (b) 集成器件示意图

3 光电集成器件概述

图 2(a)是器件的扫描电镜图,整个集成器件包含 MQW-LED、直波导和 DBR 三部分. p 电极制备在波导形的台阶上,两个 n 电极分别位于 p 电极的两侧, n 电极和 p 电极所处台阶之间的间距为 5 μm , n、p 两种电极的长和宽分别为 190 μm 和 6 μm ,每个电极各有一个直径为 70 μm 引线区与之相连.波导上通过 FIB 制备了一个 DBR, DBR 由 GaN 层和空气层组成,其中 GaN 层和空气层的中部厚度分别为 134 nm 和 335 nm,由于刻蚀使用的离子束流是高斯流,所以, GaN 层的顶部厚度略窄于底部,空气层则相反.如图 2(b)所示, GaN 层和空气层交替存在,形成了良好的高反射镜结构.当 MQW-LED 开启时,通过电-光转换产生光子,部分光子耦合进入直波导并沿着波导向前传播,在 DBR 处发生全反射并部分衍射到自由空间中. DBR 结构有助于进一步将光子限制在波导内部,并使得波导内的光谐振发生改变,从而达到对光子进行调控的目的.

4 实验及讨论

4.1 器件电学特性

MQW-LED 的电流-电压特性曲线使用半导体参数仪(安捷伦 B1500A)表征.图 3 显示了 LED 的典型整流行为,其开启电压约为 3.0V.当加载 -4.0V 反向偏压时,器件的漏电流为 31.4 μA ,当加载 6.0V 和 8.0V 正向偏压时,测得的电流分别为 6.1mA 和 10.9mA.当加

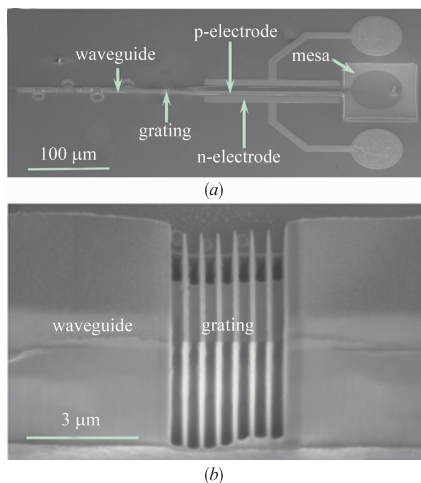


图2 (a) 集成器件的扫描电镜图; (b) 波导及DBR扫描电镜图

载的正向偏压高于器件开启电压时,器件内的电流随着外加偏压的增加迅速增加.当正向偏压达到 12.0V 时,测得的电流则高达 22.6mA. 这些数据表明, MQW-LED 具有良好的电流-电压特性.

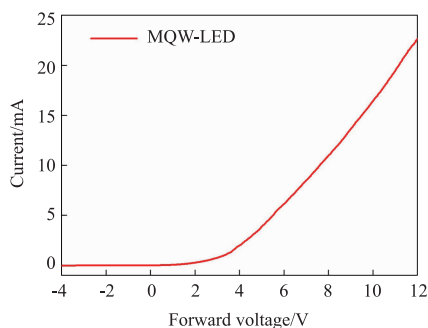


图3 MQW-LED 的电流-电压特性曲线

4.2 布拉格反射镜模拟及实测计算分析

位于直波导上的 DBR 由 GaN 层和空气层交替组成,模拟所得的 GaN 层和空气层的理想厚度分别为 123.6nm 和 334.5nm,实际刻蚀形成的 DBR 的 GaN 层和空气层的中部厚度分别为 134nm 和 335nm. 图4中红色数据是理

想的 DBR 模拟反射谱,蓝色数据是根据测得的 DBR 实际尺寸计算得到的反射谱. 模拟反射谱显示,在中心波长 446nm 处,理想 DBR 的反射率高达 99.99%. 理想反射谱顶部平坦,阻带宽度 ($\geq 99.9\%$) 为 79nm (410nm - 489nm). 由实测 GaN 层和空气层中部厚度计算所得的反射谱可知,该 DBR 的中心波长偏移到了 469nm,阻带宽度 ($\geq 99.9\%$) 为 80nm (429nm - 509nm),可以覆盖 MQW-LED 的 InGaN/GaN 量子阱结构有源层电致发光的激发光谱范围 (416nm - 499nm). 实验使用的聚焦离子束系统的空间分辨率约为 80nm,所以刻蚀形成的 GaN/空气对的实际厚度相比模拟得到的理想厚度略有偏移,这也是实测计算反射谱和模拟理想反射谱有所差异的主要原因.

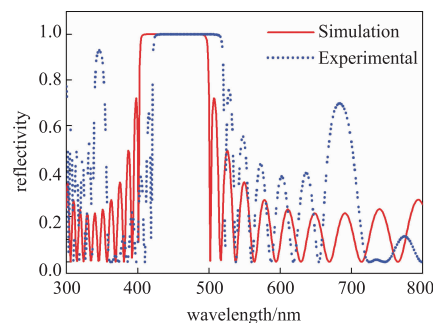


图4 布拉格反射镜模拟及实测计算反射谱

4.3 光子调控分析

器件的光学特性使用海洋光谱仪 (HR4000) 进行表征. 图 5(a) 是器件加载 9.0V - 11.0V 正向偏置电压时的电致发光光谱,可以看到主峰位于 446.4nm 处,次峰位于 441.6nm 处. 随着偏置电压的增加, MQW-LED 的发光强度随之增强,两个出射峰保持稳定. 图 5(b) 是器件分别加载 10.0V 和 11.0V 正向偏置电压时的发光图,可以看到 MQW-LED 开启后,光强随着偏置电压的增加而增强,部分光子耦合进直波导,被限制在波导内向前传输,在 DBR 处发生全反射并部分衍射到自由空间中. 图 5(c) 是器件加载相同偏置电压时,在 DBR 处

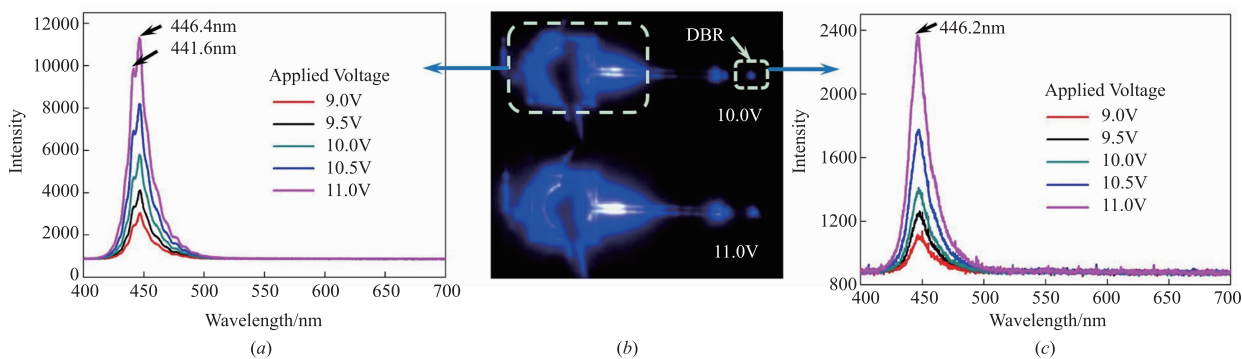


图5 (a) 多量子阱LED的电致发光光谱; (b) 器件发光图; (c) DBR处的电致发光光谱

测得的发光光谱. 由光谱可见, 次峰消失, 主峰位于 446. 2nm 处, 随着偏置电压的增加, 主峰强度增强, 峰位稳定. DBR 结构的高反特性有助于将耦合进直波导的光子进一步限制在波导内部, 特定波长的光在由波导结构形成的光学微腔中(两端的反射镜结构分别为 DBR/GaN 和 GaN/Air) 发生谐振, 进而出射, 部分光则受到抑制, 出射强度减弱. 由实验结果可知, DBR 对波导中的光子产生了明显的调控作用.

5 结束语

采用晶圆级工艺, 在单一芯片上制备了包含光源和直波导的光子集成器件, 并结合聚焦离子束技术, 使用 Ga 离子束在直波导上刻蚀形成了一个布拉格反射镜. 特殊的 InGaN 波导结构使得器件在制备过程中不再需要硅移除和晶片背面减薄, 硅衬底可以保持完整. 实验结果表明, 作为光源的 MQW-LED 具有良好的电流-电压特性. MQW-LED 开启后部分光子耦合进直波导, 波导的高限制性使得光子被限制在波导内向前传输, 在 DBR 处发生全反射并部分衍射到自由空间中. 由器件的电致发光光谱可知, 当加载 9. 0V - 11. 0V 正向偏压时, 光谱主峰和次峰分别位于 446. 4nm 和 441. 6nm 处; 而在相同偏压下, DBR 处测得的发光光谱次峰消失, 主峰移至 446. 2nm 处, 数据表明制备在波导上的 DBR 对波导内传输的光子进行了有效调控. 该实验为微纳有源器件的光子精确调控的进一步研究提供了重要研究依据, 也为未来激光器的平面光子集成奠定了扎实的基础.

参考文献

- [1] Li X, Zhu G, Gao X, et al. Suspended p-n junction InGaN/GaN multiple-quantum-well device with selectable functionality[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1 - 7.
- [2] Mikulics M, Marso M, Javorka P, et al. Ultrafast metal-semiconductor-metal photodetectors on low-temperature-grown GaN [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(21): 211110.
- [3] Tchernycheva M, Messanvi A, de Luna Bugallo A, et al. Integrated photonic platform based on InGaN/GaN nanowire emitters and detectors[J]. Nano Letters, 2014, 14(6): 3515 - 3520.
- [4] Liu Z J, Huang T, Ma J, et al. Monolithic integration of AlGaIn/GaN HEMT on LED by MOCVD[J]. IEEE Electron Device Letters, 2014, 35(3): 330 - 332.
- [5] Brubaker M D, Blanchard P T, Schlager J B, et al. On-chip optical interconnects made with gallium nitride nanowires [J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 374 - 377.
- [6] Liu Z, Ma J, Huang T, et al. Selective epitaxial growth of monolithically integrated GaN-based light emitting diodes with AlGaIn/GaN driving transistors [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(9): 091103.
- [7] Lu X, Liu C, Jiang H, et al. Monolithic integration of enhancement-mode vertical driving transistor on a standard InGaIn/GaN light emitting diode structure [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(5): 053504.
- [8] Lee Y J, Yang Z P, Chen P G, et al. Monolithic integration of GaN-based light-emitting diodes and metal-oxide-semiconductor field-effect transistors [J]. Optics Express, 2014, 22(106): A1589 - A1595.
- [9] Nakazato H, Kawaguchi H, Iwabuchi A, et al. Micro fluorescent analysis system integrating GaN-light-emitting-diode on a silicon platform [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(18): 3419 - 3425.
- [10] Wei J, Zhang B, Wang G. Current spreading effects in vertical GaN-based light-emitting diode on Si (111) substrate [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(4): 672 - 677.
- [11] 张超宇, 熊传兵, 汤英文, 等. 图形硅衬底 GaN 基发光二极管薄膜去除衬底及 AlN 缓冲层后单个图形内微区发光及应力变化的研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(18): 187801 - 187801.
Zhang C, Xiong C, Tang Y, et al. Changes of micro zone luminescent properties and stress of GaN-based light emitting diode film grown on patterned silicon substrate, induced by the removal of the substrate and AlN buffer layer [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 187801 - 187801 (in Chinese).
- [12] Triviño N V, Butte R, Carlin J F, et al. Continuous wave blue lasing in III-nitride nanobeam cavity on silicon [J]. Nano Letters, 2015, 15(2): 1259 - 1263.
- [13] Wang Y, Zhu G, Cai W, et al. On-chip photonic system using suspended pn junction InGaIn/GaN multiple quantum wells device and multiple waveguides [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(16): 162102.
- [14] Cai W, Yang Y, Gao X, et al. On-chip integration of suspended InGaIn/GaN multiple-quantum-well devices with versatile functionalities [J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6004 - 6010.
- [15] Czystanowski T, Stańczyk S, Kafar A, et al. Optical optimization of InGaIn/GaN edge-emitting lasers with reduced AlGaIn cladding thickness [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(3): 032701.

作者简介



蔡 玮 男,1981 年出生于江苏南通,现于南京邮电大学通信与信息工程学院攻读博士学位,副教授,专业方向为微纳器件与信息系

统. 在 Optics Express、Applied Physics Express、Applied Physics Letters 等期刊上发表 SCI 论文 6 篇,发表于 Applied Physics Express 的论文 Integrated p-n junction InGaN/GaN multiple-quantum-well devices with diverse functionalities 于 2016 年 5 月,被 Semiconductor Today 杂志重点报道,该杂志在国际半导体领域最具知名度,在半导体产业界和学术界具有广泛影响.



邢 远 男,1991 年出生于四川营山,现于重庆大学材料科学与工程学院攻读博士学位,专业方向为材料科学与工程,发表 SCI 论文 5 篇.



施 政 男,1987 年出生于江苏如东,南京邮电大学通信与信息工程学院讲师,专业方向为微纳器件与信息系,发表 SCI 论文 10 篇.



袁佳磊 男,1993 年出生于江苏张家港,现于南京邮电大学通信与信息工程学院攻读硕士学位,专业方向为微纳器件与信息系,发表 SCI 论文 2 篇.



贾志宏 男,1974 年出生于内蒙古包头,重庆大学材料科学与工程学院教授,专业方向为材料科学与工程,发表 SCI 论文数十篇.



王永进(通信作者) 男,1977 年出生于江苏徐州,南京邮电大学通信与信息工程学院教授,专业方向为微纳器件与信息系,发表 SCI 论文数十篇.

E-mail: wangyj@njupt.edu.cn