【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

肖特基型 p-GaN 栅极电致发光研究

邱 然, 刘禹涵, 李百奎

深圳大学物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东深圳 518060

摘 要: 制造肖特基型 Ni/p-GaN/AlGaIn/GaN 结构的 p-GaN 栅极器件, 并研究该器件在不同温度与正向偏压下的电致发光现象. 当栅极偏压大于 4 V 时, 可以观测到源自 p-GaN 层的电致发光; 当栅极偏压大于 6 V 时, 可以观测到源自沟道层的氮化镓带边发光; 当温度升高时, 电致发光的强度增加. 电致发光光谱随偏压及温度的演变过程, 揭示了 p-GaN 栅结构中电子和空穴的非对称性注入过程, 以及 Ni/p-GaN 界面处的热致空穴注入增强效应. 研究有助于理解和提高 p-GaN 栅功率器件的稳定性和可靠性.

关键词: 光学工程; 氮化镓; 功率电子器件; 高电子迁移率场效应管; 常关型; 栅极工程; 电致发光
中图分类号: O47; O433 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.03227

Electroluminescence from a Schottky-type p-GaN gate structure

QIU Ran, LIU Yuhuan, and LI Baikui

College of Physics and Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In this paper, we fabricate a Schottky-type Ni/p-GaN/AlGaIn/GaN device, and investigate its electroluminescence characteristics under the different forward bias voltages and at different temperatures. We find that when a forward gate bias is greater than 4 V, the electroluminescence comes from the p-GaN layer, indicating that electrons are injected from the channel into the p-GaN layer. While the forward gate bias is higher than 6 V, the GaN band edge emission emerges, indicating that the holes start to be injected into the channel region. As the temperature increases, the intensity of electroluminescence increases significantly, which reveals that the hole injection at the Ni/p-GaN interface is thermally enhanced. This work is essential for comprehensive understanding and improving the stability and reliability of the p-GaN gate power devices.

Key words: optical engineering; gallium nitride (GaN); power electronic device; high electron mobility transistors (HEMTs); normally-off; gate engineering; electroluminescence

宽禁带半导体氮化镓(GaN)开关型功率电子器件具有耐高温、导通电阻小、开关频率高及抗辐射等特性, 是发展下一代低损耗、高功率密度、高可

靠性及高效电源转换系统的核心器件^[1-2]. GaN 开关型功率电子器件为基于 AlGaIn/GaN 异质结的高电子迁移率场效应管 (high electron mobility transistors,

Received: 2020-04-19; **Accepted:** 2020-05-20

Foundation: National Natural Science Foundation of China (61604098); Research Start-up Foundation of Shenzhen University (860-000002110207)

Corresponding author: Assistant professor LI Baikui. E-mail: libk@szu.edu.cn

Citation: QIU Ran, LIU Yuhuan, LI Baikui. Electroluminescence from a Schottky-type p-GaN gate structure [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(3): 227-231. (in Chinese)

HEMTs), 其电子沟道由界面处的二维电子气 (2-dimensional electron gas, 2DEG) 提供. 2DEG 的形成源于氮化物半导体的极化特性^[3]. 高浓度、高迁移率的 2DEG 沟道, 在实现低导通电阻的同时, 也决定了 AlGaN/GaN HEMTs 为常开型, 即在零栅压时, 沟道处于导通状态. 为简化驱动并保证驱动失效时的安全, 常关型器件在应用中具有更大优势. 目前, 可通过多种不同沟道耗尽技术来制造常关型 GaN 器件, 如氟离子注入^[4]、势垒层再生长^[5]、超薄势垒层^[6]、栅区势垒层移除^[7-8] 及 p-GaN 栅^[9-11] 技术等. 由于缺少理想的栅介质, 尽管可以实现较大的栅压摆幅, 基于前 4 种技术的金属绝缘体半导体 (metal insulator semiconductor, MIS) 或金属氧化物半导体 (metal oxide semiconductor, MOS) 栅常关型 GaN 功率 HEMTs 的发展受到限制. p-GaN 栅技术, 即在 AlGaN/GaN 异质结上引入 p-GaN 层形成“金属/p-GaN/AlGaN/GaN”结构的栅极, 可以有效耗尽沟道 2DEG, 是目前制造常关型 GaN 功率 HEMTs 的主流方案, 为世界各主要电子器件制造商所采用.

p-GaN 栅为金属/p-GaN/AlGaN/GaN 形成的金属半导体 (metal semiconductor, MS) 肖特基结 + 直接带隙半导体双边异质 PIN 结. 在正向栅压下, p-GaN 栅不可避免地发生电子和空穴的双向注入以及电致发光, 给器件的可靠性和稳定性带来复杂影响. 如电子由 2DEG 沟道注入到 p-GaN 层并被电子陷阱俘获时, 将导致阈值电压漂移^[12]. 空穴由 p-GaN 注入到沟道层并与 2DEG 电子复合时, 可以发射高能量的紫外光. 紫外光可以激发 GaN 缓冲层中的复合缺陷中心, 导致关态漏电的增加^[13]. 因此, 研究 p-GaN 栅极在正向栅压下电子和空穴的注入与复合过程, 以及温度对载流子注入的影响, 是全面理解 p-GaN 栅 HEMTs 工作特性的重要组成部分.

本研究制造了肖特基型的 p-GaN 栅器件, 即肖特基金属/p-GaN/AlGaN/GaN 器件, 并测试了该器件在不同偏压下的电致发光光谱. 结果表明, 在正向栅压下, 电子首先被注入到 p-GaN 层中. 当栅压超过 6 V 时, 空穴可以被注入到沟道层与 2DEG 电子复合. 在固定偏压下, 当温度升高时, p-GaN 栅极的电致发光强度增加.

1 晶圆结构、器件制造及表征

实验所用晶圆为利用金属有机物化学气相沉积法 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)

在直径 15 cm (111) 硅衬底上生长的 p-GaN/AlGaN/GaN-on-Si 结构, 具体包括厚度为 70 nm 的 p-GaN 层、厚度为 15 nm 的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 势垒层、厚度为 300 nm 的 GaN 沟道层以及厚度为 4 μm 的缓冲层. 其中, p-GaN 层中 Mg 的掺杂密度约为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

器件制造采用标准的光刻方法, 主要流程包括: ① 利用氯基感应耦合反应离子 (inductively coupled plasma - reactive ion etching, ICP-RIE) 刻蚀传输区的 p-GaN 层; ② 利用电子束蒸发在 AlGaN 表面蒸镀 Ti/Al/Ni/Au 金属, 然后经过 850 $^{\circ}\text{C}$ 高温快速退火 30 s, 形成 2DEG 沟道的欧姆接触电极; ③ 在 p-GaN 表面利用电子束蒸镀 Ni/Cr (厚度为 5 nm/6 nm) 的半透明电极; ④ 利用等离子体增强化学气相沉积 (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 方法在器件表面沉积厚度为 50 nm 的 SiN 作为钝化层, 沉积温度为 300 $^{\circ}\text{C}$. 器件之间的绝缘隔离利用氟离子注入实现^[14]; ⑤ 用氟基 ICP-RIE 将电极上部分区域的 SiN 刻蚀并蒸镀 Ni/Au (厚度为 50 nm/150 nm) 金属作为引线电极. 器件结构如图 1.

图 1 p-GaN 栅结构示意图

Fig. 1 (Color online) Schematic cross section of a metal/p-GaN/AlGaN/GaN device

采用半导体参数测试仪 (型号为 Keysight1505) 表征器件的电流-电压曲线, 并将其用作测量电致发光光谱时的恒定电压源. 电致发光光谱由光谱仪 (型号为 Andor550) 和电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 探测器 (型号为 Newton920) 采集. 器件放置于小型冷热台 (型号为 Linkam420) 中, 以实现室温到高温的电致发光测试.

2 不同偏压下的电致发光光谱

在正向栅压下, p-GaN 栅结构中的 PIN 结, 即

p-GaN/AlGaIn/GaN (2DEG) 为正向偏置. 电子可以由 2DEG 沟道越过 AlGaIn 势垒层注入到 p-GaN 层. 而 p-GaN 栅结构中的肖特基结, 即金属/p-GaN 结为反向偏置. 尽管该肖特基结的势垒高度大于 1 eV, 但 p-GaN 上的肖特基结一般具有较大的反向漏电流^[15-16], 在较大偏压下, 该肖特基界面也存在空穴注入. 图 2 为肖特基型 p-GaN 栅结构的电流电压曲线.

图 2 正向偏置肖特基型 p-GaN 栅在室温下的电流电压曲线

Fig. 2 Current-voltage curve of the metal/p-GaN/AlGaIn/GaN diode under forward bias measured at room temperature

GaN 为直接带隙半导体, 电子空穴双向注入时, 将发生电致发光. GaN 的发光特征与掺杂情况密切相关^[17]. Mg 掺杂的 p-GaN 发光谱主要为峰值在 2.8 eV 的蓝光峰和在 1.8 eV 的红光, 其中, 红光的光强相对较弱. 非有意掺杂的 GaN 发光谱包括峰值在 3.4 eV 的带边峰和峰值在 2.2 eV 的黄光峰. 低激发功率或低注入电流时, 低光子能量的发光峰占主导. 随着激发功率或注入电流的增加, 高光子能量发光峰的强度增加^[17]. 因此, 通过不同偏压下的电致发光光谱, 可以分析电子和空穴的注入过程.

图 3 为室温下肖特基金属/p-GaN/AlGaIn/GaN 器件在不同偏压的电致发光光谱. 可见, 在 4.5 V 的偏置电压下, 电致发光谱中仅有峰值在 1.8 eV 的红光峰, 表明电子首先由 2DEG 沟道注入到了 p-GaN 层. 在 p-GaN 层中, 电子弛豫到深施主能级, 空穴弛豫到深受主能级, 然后复合发出红光. 当偏置电压大于 5 V 时, 电致发光光谱中出现了峰值在 2.2 eV 的黄光峰, 表明空穴由 p-GaN 层中被注入到沟道层. 在非有意掺杂的沟道层中, 空穴首先弛豫到深受主能级, 然后与沟道电子复合发出黄光. 当

图 3 室温下肖特基型 p-GaN 栅极在不同正向栅压的电致发光光谱

Fig. 3 (Color online) Electroluminescence spectra of a metal/p-GaN/AlGaIn/GaN diode under different forward bias voltages measured at room temperature

偏置电压继续增加时, 更多电子被注入到 p-GaN 中, 随着深施主-深受主复合中心饱和, 导带电子和深受主能级上的空穴复合, 发出峰值在 2.8 eV 的蓝光; 更多的空穴被注入到沟道层, 随着深施主能级的饱和, 空穴和电子发生带边复合, 发射 GaN 带边 3.4 eV 的紫外光. 随着偏置电压的进一步增加, 3.4 eV 的带边发光强度继续增强. 电致发光光谱中的强度震荡来自电致发光在样品上表面和下面反射所导致的干涉现象.

电致发光光谱揭示了 p-GaN 栅结构在正向栅压下的电子和空穴注入顺序, 这有助于研究 p-GaN 栅 HEMT 的阈值电压漂移机制. 当“开”态栅压较低时, 电子被注入到 p-GaN, 有可能被电子陷阱俘获, 从而导致阈值电压正向漂移. 而当“开”态栅压大于 6 V 时, 大量空穴被注入到沟道层并与 2DEG 电子复合发射带边紫外光. 高光子能量的紫外光可以激发电子陷阱, 抑制阈值电压漂移. 同时, 这些高能量光子也可以激发沟道层或缓冲层中的扩展缺陷中心, 产生持续光电导效应, 从而导致“关”态的漏电流增加, 影响器件的可靠性.

3 变温电致发光光谱

开关型 p-GaN 栅功率 HEMTs 工作时, 由于存在导通损耗和开关损耗, 器件温度可达 150 °C 以上^[18]. 因此, 研究高温下的电致发光光谱和载流子注入过程, 对于 p-GaN 栅 HEMTs 的应用具有重要意义.

图 4 为 p-GaN 栅极在不同温度下的电致发光光谱, 正向栅压为 8 V. p-GaN 中的复合效率远低于非有意掺杂沟道层中的复合效率^[17]. 在 8 V 栅压下, p-GaN 栅极的电致发光光谱主要表现为源自沟道层的黄光峰和带边紫外发光峰. 当温度升高时, GaN 中的辐射复合效率下降^[17], 这是导致 LED 在高温下发光强度降低的主要原因. 而在 p-GaN 栅极中, 当温度从 0 °C 升高到 200 °C 时, 8 V 栅压下的电致发光强度增加了 2 个数量级, 如图 4, 表明随着温度增加, 更多空穴被注入到了沟道层.

图 4 栅压为 8 V 时, p-GaN 栅极在不同温度下的电致发光光谱

Fig. 4 (Color online) Electroluminescence spectra of a metal/p-GaN/AlGaIn/GaN diode with 8 V bias voltage measured at different temperatures

正向栅压下, 金属/p-GaN 肖特基结处于反偏状态. 空穴在反偏肖特基界面的注入机制包括: ①从金属费米能级到 p-GaN 导带的热致激发; ②直接隧穿注入或通过 p-GaN 层中的缺陷态隧穿注入. 当温度升高时, 空穴的热动能增加, 通过热致激发可以使更多空穴注入到 p-GaN 中. 另外, 由于 p-GaN 层中 Mg 中心的激活能为 170 meV^[19], 室温下仅有 10% 左右的 Mg 掺杂中心被激活. 随着温度升高, Mg 中心的激活效率增加, p-GaN 中的空穴浓度增加. 当半导体中的载流子浓度增加时, 肖特基结的耗尽区变窄^[20], 有助于空穴直接隧穿或者通过缺陷态隧穿注入. 因此, 当温度升高时, 金属/p-GaN 肖特基界面处的热致空穴注入增强, 更多空穴被注入到沟道区中, 从而导致高温下的电致发光增强.

更多的空穴注入和更强的紫外光辐射, 有利于抑制电子陷阱对 p-GaN 栅 HEMTs 稳定性的影响,

如阈值电压漂移或电流坍塌等. 更强的紫外光增加了复合缺陷中心被激发的概率. 但当温度升高时, 复合缺陷中心在平衡态下被电子占据的概率降低, 恢复时间更短. 因此, 需要进一步研究评估高温下栅极电致发光增强对 p-GaN 栅 HEMTs 稳定性和可靠性的影响.

结 语

通过研究 p-GaN 栅极的电致发光光谱, 揭示了 p-GaN 栅极在正向偏压下的电子和空穴双向注入过程. 当栅压较低时, 电子首先由沟道注入到 p-GaN 层中; 栅压增加时, 空穴由 p-GaN 注入到沟道层. 当温度升高时, 固定栅压下的电致发光强度显著增加, 揭示了在金属/p-GaN 界面处的热致空穴注入增强现象.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61604098); 深圳大学科研启动基金资助项目 (860-000002110207)

作者简介: 邱 然 (1996—), 深圳大学硕士研究生. 研究方向: 氮化物半导体的光电性质. E-mail: 690597281@qq.com

引 文: 邱 然, 刘禹涵, 李百奎. 肖特基型 p-GaN 栅极电致发光研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(3): 227-231.

参考文献 / References:

- [1] AMANO H, BAINES Y, BEAM E, et al. The 2018 GaN power electronics roadmap [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(16): 163001.
- [2] CHEN K J, HABERLEN O, LIDOW A, et al. GaN-on-Si power technology: devices and applications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 779-795.
- [3] AMBACHER O, SMART J, SHEALY J R, et al. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(6): 3222-3233.
- [4] CAI Yong, ZHOU Yugang, CHEN K J, et al. High-performance enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs using fluoride-based plasma treatment [J]. IEEE Electron Device Letters, 2005, 26(7): 435-437.
- [5] WEN Yuhua, HE Zhiyuan, LI Jialin, et al. Enhancement-mode AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors fabricated by selective area growth technique [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(7): 072108.
- [6] KHAN M A, CHEN Q, SUN C J, et al. Enhancement

- and depletion mode GaN/AlGaN heterostructure field effect transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(4): 514-516.
- [7] KUMAR V, KULIEV A, TANAKA T, et al. High transconductance enhancement-mode AlGaN/GaN HEMTs on SiC substrate [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(24): 1758-1760.
- [8] WANG Ye, WANG Maojun, XIE Bing, et al. High-performance normally-off $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOSFET using a wet etching-based gaterecess technique [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(11): 1370-1372.
- [9] HU Xuhong, SIMIN G, YANG Juncheng, et al. Enhancement mode AlGaN/GaN HFET with selectively grown pn junction gate [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(8): 753-754.
- [10] UEMOTO Y, HIKITA M, UENO H, et al. Gate injection transistor (GIT) - a normally-off AlGaN/GaN power transistor using conductivity modulation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, 54(12): 3393-3399.
- [11] HILT O, KNAUER A, BRUNNER F, et al. Normally-off AlGaN/GaN HFET with p-type GaN gate and AlGaN buffer [C]// *International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's*. Hiroshima, Japan: IEEE, 2010: 347-350.
- [12] TANG Xi, LI Baikui, MOGHADAM H A, et al. Mechanism of threshold voltage shift in p-GaN gate AlGaN/GaN transistors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(8): 1145-1148.
- [13] TANG Xi, LI Baikui, MOGHADAM H A, et al. Effect of hole-injection on leakage degradation in a p-GaN gate AlGaN/GaN power transistor [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(8): 1203-1206.
- [14] TANG Zhikai, JIANG Qimeng, LU Yunyou, et al. 600 V normally off $\text{SiN}_x/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ MIS-HEMT with large gate swing and low current collapse [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(11): 1373-1375.
- [15] YU L S, JIA L, QIAO D, et al. The origins of leaky characteristics of Schottky diodes on p-GaN [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(2): 292-296.
- [16] SHIOJIMA K, SUGAHARA T, SAKAI S. Current transport mechanism of p-GaN Schottky contacts [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(26): 4353-4355.
- [17] RESHCHIKOV M A, MORKOC H. Luminescence properties of defects in GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(6): 061301.
- [18] MOCANU M, UNGER C, PFOST M, et al. Thermal stability and failure mechanism of Schottky gate AlGaN/GaN HEMTs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(3): 848-855.
- [19] KOZODOY P, XING H, DENBAARS S, et al. Heavy doping effects in Mg-doped GaN [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(4): 1832-1835.
- [20] EFTHYMIU L, LONGOBARDI G, CAMUSO G, et al. On the physical operation and optimization of the p-GaN gate in normally-off GaN HEMT devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(12): 123502.

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 溯 心】