

激光与光电子学进展

P-I-N 型 GaN 紫外探测器的正向电流输运

李金晓, 刘震, 叶思灿, 卢澳, 华文渊, 党宁, 闫大为*

江南大学物联网工程学院电子工程系物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122

摘要 本文在自支撑衬底上制备了 P-I-N 型 GaN 紫外探测器, 测量并研究了其正向电流输运机制。结果表明, 正向电压 $V_F > 2$ V 时, 电子扩散电流才开始占主导。有效禁带宽度 $E_g \sim 2.21$ eV 远低于理想值, 这归因于可导位错引入的能带扰动; 当 1.35 V $< V_F < 2$ V 时, 理想因子 $n > 2$, 表明电子缺陷辅助隧穿电流为主要电流分量。电流具有负温度系数, 这主要是由电子被激发到能量更高的导带后其有效禁带宽度增大导致的; 在 $V_F < 0.8$ V 和 0.8 V $< V_F < 1.35$ V 区间, 电流-电压曲线为功率依赖关系, 该行为与电子空间电荷限制机制一致。功率因子分别为 8 和 4, 由特征温度可得到两种不同的有效能带宽度, 分别对应于两种指数衰减的缺陷态分布。

关键词 探测器; GaN 探测器; P-I-N 型; 缺陷辅助隧穿; 空间电荷限制电流

中图分类号 TN36

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223064

Forward Current Transport in P-I-N Type GaN Ultraviolet Detector

Li Jinxiao, Liu Zhen, Ye Sican, Lu Ao, Hua Wenyuan, Dang Ning, Yan Dawei*

Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications, Department of Electronic Engineering, School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu China

Abstract In this study, we demonstrate the preparation of P-I-N type GaN ultraviolet (UV) detectors on self-supported substrates, and then investigate their forward current transport mechanisms. The results show that the electron diffusion current starts to dominate only when the forward voltage $V_F > 2$ V. Moreover, the effective forbidden bandwidth $E_g \sim 2.21$ eV is much lower than the ideal value, which can be attributed to the energy band perturbation introduced by the conductive dislocations. An ideal factor $n > 2$ when 1.35 V $< V_F < 2$ V indicates that the electron defect-assisted tunneling current is the dominant current component. The current has a negative temperature coefficient, which is primarily caused by the increase in the effective forbidden bandwidth of the electron once it is excited to a higher energy conduction band. In the $V_F < 0.8$ V and 0.8 V $< V_F < 1.35$ V regions, the current-voltage curves are power dependent; this behavior is consistent with the electron space charge confinement mechanism. The power factors are eight and four, respectively, and two different effective energy bandwidths, corresponding to two exponentially decaying defect state distributions, are obtained from the characteristic temperature.

Key words detectors; GaN detectors; P-I-N type; defect-assisted tunneling; space-charge-limited current

1 引言

以氮化镓(GaN)为代表的直接带隙 III 族氮化物半导体具有禁带宽、电子饱和速度高和化学稳定性好等优越的物理特性, 是制作高性能紫外光电探测器的理想材料^[1]。紫外探测技术在军事和民用等重要领域都具有巨大的应用潜力, 如导弹预警与跟踪、高保密性紫外光通信、医学和生物学诊断等, 是我国重点发展的光电探测关键技术之一^[2-5]。目前, 已有多种结构的

GaN 基紫外探测器的研究, 如光电导结构、肖特基型结构、金属-半导体-金属结构、雪崩型结构和 P-I-N 型结构等^[6-10]。与其他类型探测器相比, P-I-N 型器件具有较低的暗电流密度、较高的量子效率与响应速度等突出优势, 是被集中研究的结构之一^[11]。由于探测器本身存在漏电, 在没有光照的条件下仍有较小电流的存在, 其限制了探测器对微小光信号的探测能力, 因此制备高性能 GaN 基紫外探测器的关键是如何降低反向暗电流。然而, 传统生长在异质衬底(如蓝宝石)上

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2022-12-20; 录用日期: 2022-12-24; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61504050, 11604124, 51607022)

通信作者: *daweiyang@jiangnan.edu.cn

的 GaN 薄膜通常具有较高的位错密度^[12]约为 10^9 cm^{-2} 。作为有效的漏电通道,它们导致器件存在较大的反向暗电流,限制器件的整体性能。但是,在同质衬底上生长高质量的 GaN 薄膜能够有效减小位错密度,进而明显降低器件的反向漏电流,提高光电转换的响应度和量子效率,是制备高性能 GaN 基探测器的有效解决方案之一^[13]。

与此同时,载流子输运是光电子器件的基础,为了进一步减小漏电流以提高紫外探测器的整体性能,对载流子的输运机制进行研究是十分有必要的^[14]。近年来,多种不同的电流传输机制被用来解释光电子器件的正向电流输运,包括热发射(TE)、场发射(FE)、热场发射(TFE)、缺陷辅助隧穿(TAT)和空间电荷限制电流等^[15-17]。针对这一问题,研究者多采用变温-电流-电压(T - I - V)法研究具体的电流输运机制,以经验公式推算出理想因子、势垒高度等静态电学参数,本文在此基础上还采用了电致发光技术进行研究,以结果为导向印证 T - I - V 法与缺陷相关的能带理论。

鉴于此,本文分别利用 T - I - V 法和电致发光技术研究了自支撑衬底 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的正向电流输运机制。结果表明:1) 正向大偏压下 ($V_F > 2 \text{ V}$), 经典的电子扩散机制占主导,拟合得到的 $E_g \sim 2.21 \text{ eV}$ 与电致发光谱结果一致;2) 在小偏压下 ($1.35 \text{ V} < V_F < 2 \text{ V}$), 缺陷辅助隧穿部分电流与温度的关系呈负相关性,主要是由于隧穿组分的减少以及有效禁带宽度的升高导致的;3) 在小电流注入时 ($I_F < 10^{-5} \text{ A}$), $I \propto V^2$, 电子的空间电荷限制过程为主要电流输运机制,通过拟合极小注入和小注入电流条件下的 β 值得到在导带以下存在两种指数衰减的缺陷态分布。

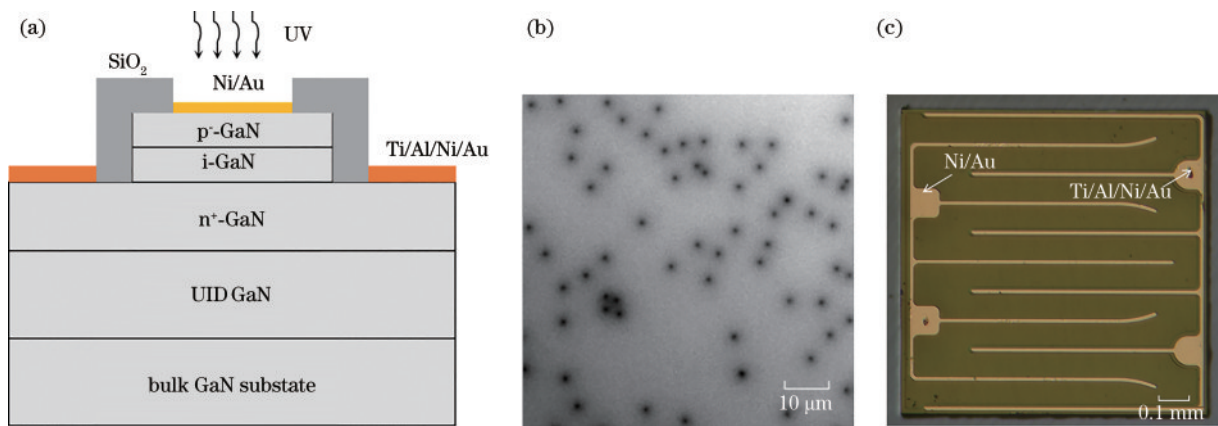


图1 P-I-N型 GaN 紫外探测器。(a)横截面结构;(b) GaN 同质外延片的阴极荧光扫描图;(c)制备器件的俯视图

Fig. 1 P-I-N type GaN ultraviolet diodes. (a) Schematic cross-sectional structure; (b) cathodoluminescence mapping image of GaN wafer used; (c) top-viewed image of fabricated diodes

本文通过变温探针台的 chuck 加热器件来获得稳定的测试环境温度;使用半导体参数分析仪(Keithley 4200A-SCS)测量器件的 I - V 特性;使用光子多通道分析仪(Hamamatsu PMA-12)对器件进行微弱光探测。

2 器件制备与测试

图1(a)所示为本文制备的 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的横截面结构示意图,其外延结构是利用有机化学气相沉积技术生长在低位错密度的同质 GaN 衬底上的,外延结构依次为 $2 \mu\text{m}$ 的非故意掺杂缓冲层、 $1.6 \mu\text{m}$ 的 n 型接触层 ($N_D \sim 2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、 400 nm 的本征层和 60 nm 的 p 型接触层 ($N_A \sim 6.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)。采用薄 p 型层是为了减小入射光在该层的吸收,而使更多的光子进入本征层。图1(b)所示为 GaN 同质外延片的阴极荧光扫描图谱(CL),其中暗点为非辐射复合中心,代表位错在半导体表面的终端,而白色区域表示无位错的表面辐射复合区。因此,通过统计一定面积内的暗点数能够得到位错的平均密度,约为 $1.47 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。该值远低于蓝宝石衬底的 GaN 外延片的位错密度,约为 $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,表明采用同质衬底晶体质量的确有了显著的提升。图1(c)所示为所制备探测器的俯视图,其有效面积约为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。器件的工艺步骤为:首先,采用光刻和等离子体干法刻蚀工艺对器件的台面进行定义和刻蚀,之后将样品在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温 KOH 溶液 (0.1 mol/L) 中浸泡 5 min 以减少刻蚀损伤;接着,利用标准光刻和 lift-off 工艺定义欧姆电极的图形,进而采用电子束蒸发法沉积 Ti/Al/Ni/Au [$100/600/100/500 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)] 后在 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件 N_2 环境中快速热退火 60 s 以形成良好的欧姆接触;然后,在台面顶部电子束沉积 Ni/Au ($25/25 \text{ \AA}$) 合金,并在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下空气退火 300 s 形成 p 型欧姆接触;最后,利用等离子体增强化学气相沉积法在半导体表面生长一层致密的 SiO_2 保护层。

3 结果与讨论

图2所示为 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的变温 I - V 特性曲线。可以看到,在小注入条件下 ($I < 10^{-5} \text{ A}$),

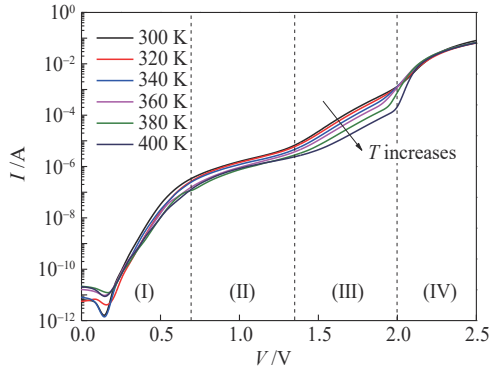


图 2 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的正向变温 I - V 特性曲线
Fig. 2 Forward temperature-dependent I - V curves of P-I-N type GaN ultraviolet (UV) diodes

随着正向偏压 V_F 的增加, 电流先快速达至 10^{-7} A 后其增长速率开始逐渐减小; 当 V_F 超过 1.35 V 后, I - V 曲线在半对数坐标中为线性依赖关系, 且斜率基本不随温度改变; 在电压开始超过 2 V 时, 电流斜率快速变大, 进入串联电阻区。根据以上行为, 可将正向电流特性划分为四个区域, 如图 2 虚线所示。下面将分别研究这些区域的电流输运过程。

对于 PN 结, I - V 关系通常可由以下经验公式^[18]描述:

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\}, \quad (1a)$$

$$I_0 \propto \exp \left(- \frac{E_g}{nkT} \right), \quad (1b)$$

式中: I_0 为反向饱和电流; q 为基本电荷; R_s 为串联电阻; k 为玻尔兹曼常数; T 为测试温度, E_g 为有效禁带宽度; n 为理想因子。理想因子的数值能够反映具体的电流输运机制: 1) $n = 1$ 时, 扩散电流占主导; 2) $1 < n < 2$ 时, 扩散和复合电流占比相近; 3) $n = 2$ 时, 复合电流占主导。

基于式 (1a), 拟合了 300~400 K 范围内的 I - V 数据。图 3 所示为 300 K 下的理论拟合结果, 表明只有在正向大偏压 ($V_F > 2$ V) 下, 实验数据才与扩散电流吻

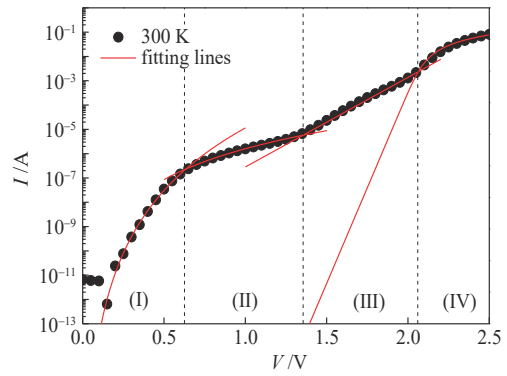


图 3 300 K 下的正向 I - V 特性与拟合曲线
Fig. 3 Forward I - V characteristic and fitting curves at 300 K

合较好。图 4 所示为不同温度下拟合获得的 n 值和 E_g 值。 n 约为 1, 基本不随温度改变, 与经典扩散机制一致。然而需注意到, 尽管 E_g 约为 2.21 eV 也是温度的弱函数, 但其数值远小于理想的 GaN 禁带宽度 (3.4 eV)。

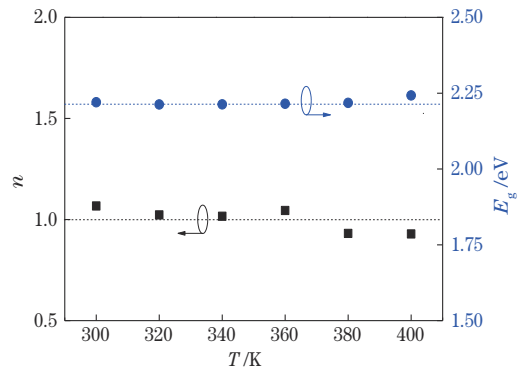


图 4 正向大偏压下 n 和 E_g 与温度的依赖关系
Fig. 4 Dependence of n and E_g on temperature at forward high voltage

为了解释有效禁带宽度的减小, 本文测量了器件在不同驱动电流下的电致发光谱。因其峰位移动现象不明显, 故选取典型 $I_F = 100$ mA (@2.45 V) 条件下的电致发光谱进行分析, 如图 5(a) 所示。可以看到, 在 567 nm 处存在一个半峰全宽约为 200 nm 的发光峰, 且偏离理想对称峰型。一般而言, 带尾态的存在会引起

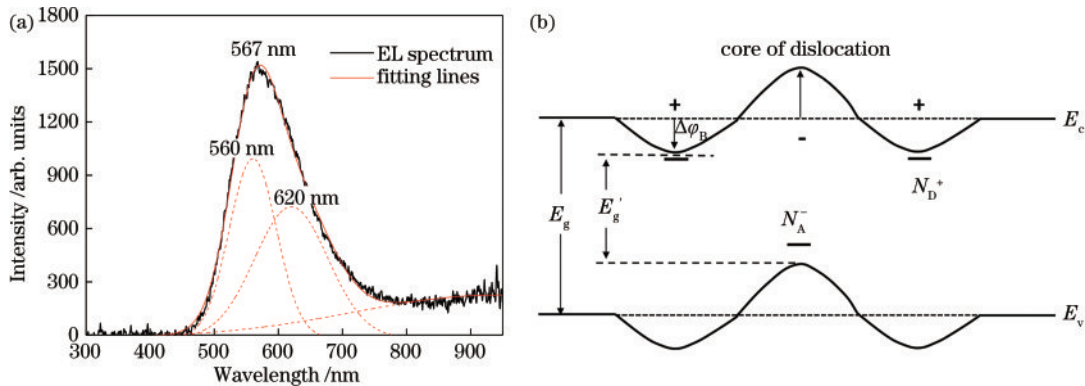


图 5 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的 (a) 正向电致发光 (EL) 曲线; (b) 可导电位错的能带结构示意图
Fig. 5 (a) Forward electroluminescence (EL) curves; (b) schematic bandgap diagram of conductive dislocations of P-I-N type GaN UV diodes

发光峰的理想对称偏移,但最高发光峰的位置基本不会改变。很明显,这一点与实验结果 567 nm 相矛盾。通过对其进行高斯拟合,表明在 560 nm 和 620 nm 处分别存在两个独立的发光峰,其对应的禁带宽度分别为 2.21 eV 和 2.00 eV。除此以外,还存在一个覆盖整个可见光区的发光带,这主要是禁带内大量施主缺陷态和受主缺陷态之间的电子-空穴复合引入的黄带。很明显,这两个发光峰应来自于导带和价带之间的电子-空穴复合,表明有效禁带宽度已经被明显减小了。

大量实验表明,可导位错是 GaN 材料的主要漏电通道,严重影响 GaN 器件的电学特性。图 5(b)所示为可导位错的微观能带模型。该模型认为:1)位错中心是类受主缺陷态,周围为浅能级类施主缺陷态;2)受主态很容易从附近的施主态中捕获电子,导致位错中心的能带抬高,同时位错周围的能带降低。在热平衡状态下,位错整体呈电中性,具有较低的势能;3)由于能带扰动,位错处的有效禁带宽度将显著减少。根据该模型,当大量自由电子和空穴注入位错时,波函数重叠的部分有很大概率发生辐射复合,发射出明显小于禁带宽度的能量光子。因此,可认为 560 nm 和 620 nm 的发光峰应来自于位错对 GaN 能带的扰动。必须注意的是,扩散电流获得的有效禁带宽度 2.21 eV 正对应于 560 nm 的发光峰,这又反过来证明了位错模型的合理性。大量实验表明,在 GaN 材料中对漏电流起主

要作用的是螺旋位错和刃位错。

事实上,在线性位错处还存在大量体缺陷,它们会在禁带宽度内引入高密度的局域态,致使导带电子有更多的概率发生缺陷辅助隧穿。图 6(a)所示为 TAT 过程的示意图,首先自由电子从 n 型半导体的导带平行隧穿至 p 型半导体禁带内的缺陷态,然后再与该处的自由空穴发生复合。于是,TAT 电流^[19]为

$$I \propto n_{n0} D_x T_x p_{p0}, \quad (2)$$

式中: n_{n0} 为 n 区的电子浓度; p_{p0} 为 p 区空穴浓度; D_x 为缺陷态密度; T_x 为隧穿几率。根据经典理论,式(2)可描述为

$$I \approx \exp\left(\frac{qV - E_g}{E_0}\right), \quad (3a)$$

$$E_0 = \frac{q\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_D}{\epsilon_s m^*}}, \quad (3b)$$

式中: E_0 为特征能量; \hbar 为约化普朗克常数; N_D 为施主浓度; ϵ_s 为介电常数; m^* 为有效质量。由图 3 可知,小偏压下的电流与 TAT 拟合效果较好。通过拟合 $\ln(I)-V$ 的斜率可以得到不同温度下的特征能量 E_0 ,结果如图 6(b) 方形数据点所示。可以看到,在 300~400 K 范围内, E_0 基本不随温度变化,维持在 136 meV 附近。进一步,令 $E_0 = nkT$ 可以得到 n 从 5.14 逐渐下降到 3.79,如图 6(b) 中圆形数据点所示。 $n > 2$,表示隧穿电流应为主要电流分量,与拟合结果一致。

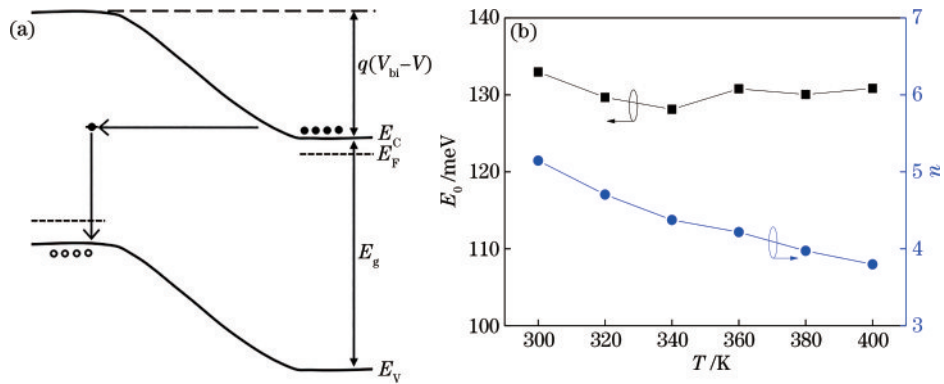


图 6 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的 (a) 缺陷辅助隧穿过程示意图; (b) E_0 和 n 与温度的依赖关系

Fig. 6 (a) Schematic diagram of defect-assisted tunneling process; (b) dependence of E_0 and n on temperature of P-I-N type GaN UV diodes

拟合表明,在 $V_F < 1.35$ V 时, $I-V$ 曲线遵循功率关系^[20]:

$$I \propto V^\beta, \quad (4)$$

式中, β 为功率因子。图 7 所示分别为极低电压 ($V_F < 0.8$ V) 和低电压 (0.8 V $< V_F < 1.35$ V) 下的功率因子与温度的关系。可见,其值分别为 8.55 (β_1) 和 4.22 (β_2),且基本不随温度变化。根据 Mott-Gurney 方程^[21],可以得出:1) $\beta=1$ 表示欧姆态,电流和电压呈线性关系;2) $\beta=2$ 表示完全充满的陷阱态,电流和电压遵循 Child 定律;3) $\beta > 2$ 则表示部分占据的缺陷态,电流和电压呈功率关系。显然, β_1 和 β_2 的数值都远大于 2,表明在导带以下存在指数衰减的缺陷态分布^[22]:

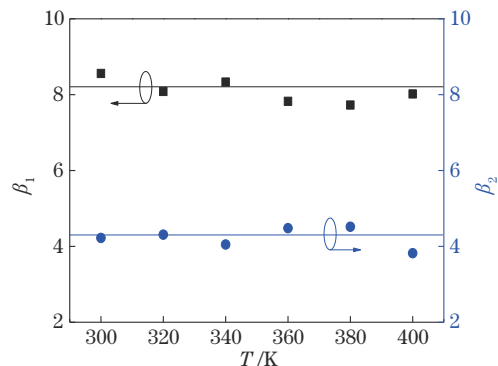


图 7 $V_F < 1.35$ V 时 β_1 和 β_2 与温度的依赖关系

Fig. 7 Dependence of β_1 and β_2 on temperature for $V_F < 1.35$ V

$$n_1 \propto e^{\frac{-E}{kT_c}}, \quad (5)$$

式中: E 表示缺陷态与导带底部的能量差; T_c 为特征温度; kT_c 表示缺陷态分布的有效能带宽度。进一步, 式(4)可写为

$$I \propto V^{\left(\frac{T_c}{T}\right)+1}. \quad (6)$$

由式(6), $T=300$ K 条件下, β_1 和 β_2 对应的特征温度分别为 $T_{c1}=2265$ K 和 $T_{c2}=966$ K, 其有效缺陷能带宽度分别为 200 meV 和 80 meV。以上表明, 在导带以下分别存在深能级缺陷态与浅能级缺陷态, 且前者在深能级区密度较高, 后者在浅能级区密度较高。当注入电流较小时, 电子应先占据深能级缺陷态, 故在极低偏压下空间限制电流的功率因子和特征温度较高。当注入电流较大时, 电子开始注入浅能级缺陷态, 故在低偏压下空间限制电流的功率因子和特征温度较低。

4 结 论

本文利用 T - I - V 法和电致发光技术对 P-I-N 型 GaN 紫外探测器的正向电流输运机制展开了研究。通过对正向电流数据进行分析, 结合电流输运机制在不同偏压下的表象, 得到以下三点结论: 1) 在正向大偏压下 ($V_F > 2$ V), 经典的电子扩散机制占主导, 且得到的有效禁带宽度减小的结论与电致发光谱结果一致; 2) 在小偏压下 (1.35 V $< V_F < 2$ V), 缺陷辅助隧穿占主导, 且隧穿组分的减少是导致电流与温度呈负相关性的主要原因; 3) 在小电流注入时 ($I_F < 10^{-5}$ A), 空间电荷限制过程占主导, 由此可推断出在导带以下应存在两种指数衰减的缺陷态分布。

参 考 文 献

- [1] Guo D Y, Su Y L, Shi H Z, et al. Self-powered ultraviolet photodetector with superhigh photoresponsivity (3.05 A/W) based on the GaN/Sn: Ga₂O₃ pn junction[J]. ACS Nano, 2018, 12(12): 12827-12835.
- [2] Huang H J, Yan D W, Wang G S, et al. GaN-based p-i-n ultraviolet photodetectors with a thin p-type GaN layer on patterned sapphire substrates[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(9): 092301.
- [3] Zhao Z H, Wu D, Guo J W, et al. Synthesis of large-area 2D WS₂ films and fabrication of a heterostructure for self-powered ultraviolet photodetection and imaging applications[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(39): 12121-12126.
- [4] Wang Y C, Wu C, Guo D Y, et al. All-oxide NiO/Ga₂O₃ p-n junction for self-powered UV photodetector[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2020, 2(7): 2032-2038.
- [5] Dai Z C, Liu Y S, Yang G F, et al. Carrier transport and photoconductive gain mechanisms of AlGaIn MSM photodetectors with high Al Content[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(8): 082504.
- [6] Chen H Y, Chen R S, Chang F C, et al. Size-dependent photoconductivity and dark conductivity of m-axial GaN nanowires with small critical diameter[J]. Applied Physics

Letters, 2009, 95(14): 143123.

- [7] Xu T, Jiang M M, Wan P, et al. Bifunctional ultraviolet light-emitting/detecting device based on a SnO₂ microwire/p-GaN heterojunction[J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2475-2485.
- [8] Wang J X, Chu C S, Tian K K, et al. Polarization assisted self-powered GaN-based UV photodetector with high responsivity[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 734-740.
- [9] 曹子坤, 刘宗顺, 江德生, 等. 高增益 GaN 基 PIN 雪崩二极管的制备及 p-GaN 层载流子浓度的估算[J]. 发光学报, 2020, 41(6): 707-713.
- [10] Cao Z K, Liu Z S, Jiang D S, et al. Fabrication of high gain GaN based PIN avalanche diode and estimation of p-GaN layer carrier concentration[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(6): 707-713.
- [11] Kalra A, Rathkanthiwar S, Muralidharan R, et al. Material-to-device performance correlation for AlGaIn-based solar-blind p-i-n photodiodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(3): 035001.
- [12] Butun B, Tut T, Ulker E, et al. High-performance visible-blind GaN-based p-i-n photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(3): 033507.
- [13] Wang G S, Lu H, Chen D J, et al. High quantum efficiency GaN-based p-i-n ultraviolet photodetectors prepared on patterned sapphire substrates[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(7): 652-654.
- [14] Xie F, Yang G F, Wang J, et al. Metal-semiconductor-metal Ultraviolet Photodiodes Fabricated on Bulk GaN Substrate[J]. Advanced Materials Research, 2014, 986/987: 160-163.
- [15] 尤坤, 宋航, 黎大兵, 等. GaN 基 MIS 紫外探测器的电学及光电特性[J]. 发光学报, 2012, 33(1): 55-60.
- [16] You K, Song H, Li D B, et al. Electrical and optoelectronics characteristics of GaN based MIS photo-detectors[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(1): 55-60.
- [17] Zhao L N, Chen L L, Yu G H, et al. Tunneling-hopping transport model for reverse leakage current in InGaIn/GaN blue light-emitting diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(17): 1447-1450.
- [18] Chen L L, Jin N, Yan D W, et al. Charge transport in vertical GaN Schottky barrier diodes: a refined physical model for conductive dislocations[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(3): 841-846.
- [19] 闫大为, 田葵葵, 闫晓红, 等. GaN 肖特基二极管的正向电流输运和低频噪声行为[J]. 物理学报, 2021, 70(8): 362-368.
- [20] Yan D W, Tian K K, Yan X H, et al. Forward current transport and noise behavior of GaN Schottky diodes[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(8): 362-368.
- [21] Yan D W, Lu H, Chen D J, et al. Forward tunneling current in GaN-based blue light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(8): 083504.
- [22] Sze S M, Ng K K. Physics of semiconductor devices[M]. 3rd ed. Canada: Wiley, 2007: 176-429.
- [23] Park J H, Kim J K, Cho J. Observation of space-charge-limited current in AlGaIn/GaN ultraviolet light-emitting diodes[J]. Materials Letters, 2018, 214: 217-219.
- [24] Mott N F. RW gurney electronic processes in ionic crystals[M]. New York: Oxford University Press, 1940.
- [25] Rose A. Space-charge-limited currents in solids[J]. Physical Review, 1955, 97(6): 1538-1544.