



面向高电子迁移率晶体管的 κ -Ga₂O₃/GaN铁电/极性半导体异质结

韩根全*

西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071

*联系人, E-mail: gqhan@xidian.edu.cn

收稿日期: 2022-05-30; 接受日期: 2022-07-04; 网络出版日期: 2022-10-26

摘要 极性半导体异质结构是通过极化调控实现多功能、高性能先进电子器件的一种有效策略. 南京大学叶建东团队报道了 κ -Ga₂O₃/GaN铁电/极性半导体的II型异质结构, 基于外场调控实现了 κ -Ga₂O₃的铁电极化翻转, 并揭示了极化电荷形成的电偶极子是导致界面能带弯曲的物理起源. 基于界面能带偏移和铁电极化翻转, 有望实现界面二维电子气在积累和耗尽状态切换, 为发展基于铁电/极性半导体异质结的高电子迁移率晶体管、铁电非易失性存储器和超低功耗负电容晶体管等提供有效参考.

关键词 氧化镓, 铁电, 极化, 异质结

PACS: 73.40.Lq, 85.50.-n, 85.30.-z, 81.05.Zx

超宽禁带氧化镓(Ga₂O₃)半导体材料, 具有禁带宽度大、击穿场强高、Baliga品质因数高等优异的物理特性, 在功率电力电子器件领域具有重要的应用前景. Ga₂O₃材料存在多种晶型, 其中, 具有正交结构的 κ -Ga₂O₃因其晶体结构的反演不对称性而具有铁电极化和高介电常数等独特优点而引起关注^[1].

理论预测, κ -Ga₂O₃的自发极化系数在23–31 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 范围内, 远超过GaN (2.2 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$)和AlN (8.1 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$)等极性半导体材料^[2]. 将 κ -Ga₂O₃与其他极性半导体材料, 譬如GaN, AlN, ZnO等, 形成铁电/极性半导体异质结, 利用极化工程和能带剪裁双重调控, 理论上可在异质结界面形成面密度高达 10^{14} cm^{-2} 的强限域二维电子气(2DEG), 比AlGaN/GaN异质界面2DEG

面密度(10^{12} – 10^{13} cm^{-2})高10倍左右^[3,4]. 这可有效增强高电子迁移率晶体管(HEMT)的沟道输运能力以协同提升器件的功率密度和射频特性. 此外, 将铁电 κ -Ga₂O₃和晶格匹配的多铁氧化物有机结合, 有望开发集探测、传感和存储为一体的全氧化物(All-Oxides)新概念光电信息功能器件, 包括超低功耗负电容晶体管、铁电场效应存储器和增强型场效应晶体管等. 然而, 尽管有诸多理论预测, 但关于铁电 κ -Ga₂O₃的实验验证报道很少, 且其铁电起源机理仍不明确.

最近, 南京大学叶建东团队通过超声雾化辅助化学气相沉积(Mist-CVD)方法在p型GaN衬底上实现了高质量 κ -Ga₂O₃异质外延, 构建了具有陡峭异质界面的 κ -Ga₂O₃/GaN铁电/极性半导体异质结^[5]. 基于光电子能

引用格式: 韩根全. 面向高电子迁移率晶体管的 κ -Ga₂O₃/GaN铁电/极性半导体异质结. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 217331
Han G Q. κ -Ga₂O₃/GaN ferroelectric/polar semiconductor heterojunction for high electron mobility transistors (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 217331, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0219

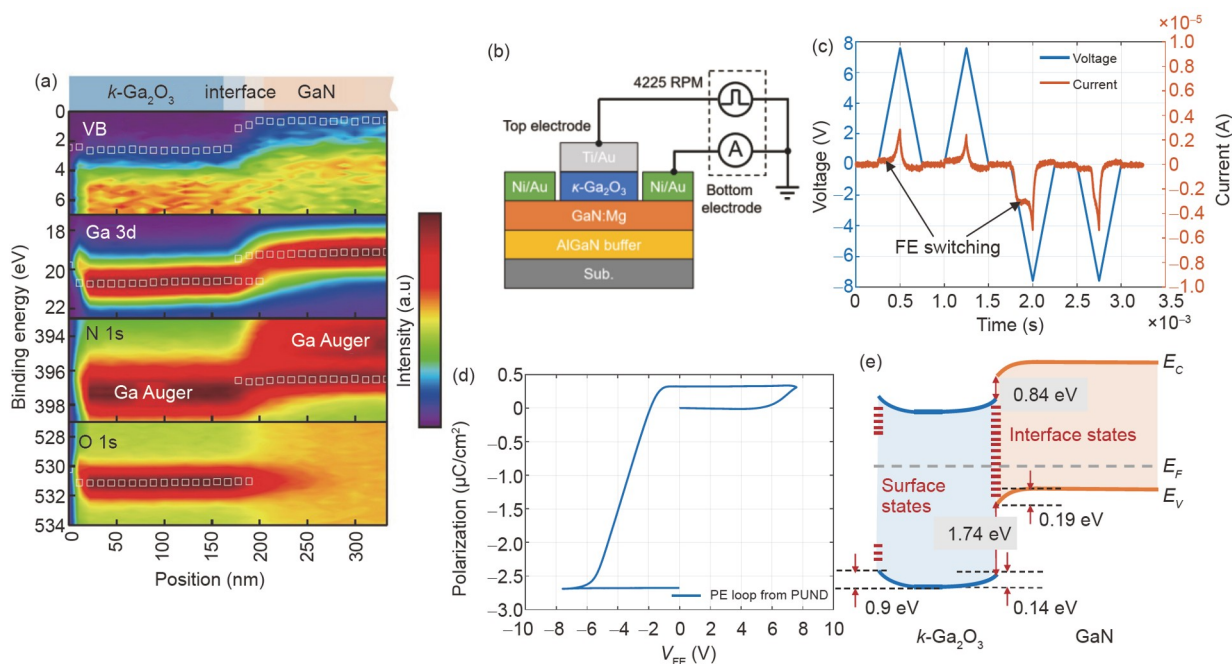


图 1 (网络版彩图) κ -Ga₂O₃/GaN 异质结的 (a) XPS 深度剖析图谱, (b) Au/Ti/ κ -Ga₂O₃/GaN MFS 结构 PUND 测试示意图, (c) 铁电极化转化, (d) 铁电极化-电压回滞曲线, (e) 热平衡状态下的能带图示意图 [5]

Figure 1 (Color online) (a) XPS depth profiling of the κ -Ga₂O₃/GaN heterojunction; (b) MFS structure of Au/Ti/ κ -Ga₂O₃/GaN for the PUND test; (c) polarization switching; (d) polarization-voltage loop; (e) schematic energy band diagram with band-bending in thermal equilibrium of the κ -Ga₂O₃/GaN heterojunction [5].

谱(XPS)剖面深度分析, 在实验上确定 κ -Ga₂O₃/GaN 异质结具有典型的II型能带排列特征, 其价带偏移和导带偏移分别为 (-1.74 ± 0.1) eV 和 (0.84 ± 0.1) eV, 如图1(a)所示. 较大的能带偏移可有效地将载流子限制在异质界面处. 在此基础上, 对构建的Au/Ti/ κ -Ga₂O₃/GaN 金属-铁电-半导体结构进行了铁电极化测试(图1(b)–(d)). 研究显示, 该异质结表现出明显的铁电回滞行为, 剩余极化强度为 $2.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 和理论预测的极化系数有较大差距, 其内在物理机制仍需要进一步研究. κ -Ga₂O₃的铁电极化特性意味着可通过外部电场激

励实现极化反转, 进而调控异质界面载流子的输运特性. 此外, 研究显示 κ -Ga₂O₃/GaN 异质界面能带弯曲主要是由界面自发极化不连续引起的电偶极子导致的, 并由此揭示了 κ -Ga₂O₃/GaN 铁电/极性半导体异质结的能带结构, 如图1(e)所示.

综上所述, 该研究在实验上验证了 κ -Ga₂O₃的铁电极化特性, 并对 κ -Ga₂O₃/GaN 的能带结构进行了深入分析. 该工作为发展高电子迁移率晶体管、铁电非易失性存储器等器件提供了有效参考, 将在一定程度上拓展氧化镓材料在新型电子器件中的应用.

参考文献

- Mezzadri F, Calestani G, Boschi F, et al. Crystal structure and ferroelectric properties of ε -Ga₂O₃ films grown on (0001)-sapphire. *Inorg Chem*, 2016, 55: 12079–12084
- Shimada K. First-principles study of crystal structure, elastic stiffness constants, piezoelectric constants, and spontaneous polarization of orthorhombic $Pna2_1$ -M₂O₃ (M = Al, Ga, In, Sc, Y). *Mater Res Express*, 2018, 5: 036502
- Ranga P, Cho S B, Mishra R, et al. Highly tunable, polarization-engineered two-dimensional electron gas in ε -AlGaO₃/ ε -Ga₂O₃ heterostructures. *Appl Phys Express*, 2020, 13: 061009
- Wang J, Guo H, Zhu C, et al. ε -Ga₂O₃: A promising candidate for high-electron-mobility transistors. *IEEE Electron Device Lett*, 2020, 41: 1052–1055

- 5 Chen Y, Ning H, Kuang Y, et al. Band alignment and polarization engineering in κ -Ga₂O₃/GaN ferroelectric heterojunction. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2022, 65: 277311

κ -Ga₂O₃/GaN ferroelectric/polar semiconductor heterojunction for high electron mobility transistors

HAN GenQuan^{*}

School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

Polar semiconductor heterostructures offer an alternative strategy to manipulate polarization towards advanced devices with engineered functionality and improved performance. Recently, Prof. Jiandong Ye's group from Nanjing University reported on a novel κ -Ga₂O₃/GaN ferroelectric/polar heterojunction with switchable polarization under external electric field. A type-II band alignment is determined at the κ -Ga₂O₃/GaN polar hetero-interface, with charge dipoles induced by spontaneous polarization leading to the observed band bending. Benefiting from the large band discontinuity and ferroelectric manipulation, it is expected to realize the switching of the interfacial two-dimensional electron gas between accumulation and depletion states, which allows the rational design of κ -Ga₂O₃ ferroelectric/polar heterojunctions for the application of high electron mobility transistors, ferroelectric non-volatile memories and even ultra-low loss negative capacitance transistors.

gallium oxide, ferroelectric, polarization, heterojunction

PACS: 73.40.Lq, 85.50.-n, 85.30.-z, 81.05.Zx

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0219](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0219)