arXiv:2601.03022v1 [cond-mat.mes-hall] 6 Jan 2026

AlYN/GaN和AlScN/GaN异质结构中二维电子气的舒布尼科夫–德哈斯振荡

Yu-Hsin Chen, [1,a)] Thai-Son Nguyen, [1,b)] Isabel Streicher, [2,3] Jimy Encomendero, [4] Stefano Leone, [2] Huili Grace Xing, [1,3,4] 和 Debdeep Jena[1,3,4,c)]
1)*Department of Materials Science and Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 14853, USA*
2)*Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF, Tullastrasse 72, 79108 Freiburg, Germany*
3)*Kavli Institute at Cornell for Nanoscale Science Cornell University Ithaca NY 14853 USA*
4)*School of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 14853, USA*

AlYN和AlScN是近来崭露头角的前景氮化物材料，可与氮化镓集成，在异质结处形成二维电子气（2DEG）。通过精心设计并优化外延生长条件，这些异质结构的电子输运性质得到了提升。在这项工作中，我们首次报道了通过金属有机化学气相沉积生长的AlYN/GaN和AlScN/GaN异质结构中二维电子气的舒布尼科夫–德哈斯（SdH）振荡。SdH振荡可直接测得费米能级处二维电子气的关键参数：（1）载流子密度；（2）电子有效质量（$m^* \approx 0.24\,m_e$适用于AlYN/GaN， $m^* \approx 0.25\,m_e$适用于AlScN/GaN）；（3）量子散射时间（AlYN/GaN为τ_q ≈68 fs，AlScN/GaN为 $\tau_q \approx$ 70fs）。这些对基本输运特性的测量，为推动新兴氮化物半导体在未来高频电子学和功率电子学中的应用提供了关键见解。

极性氮化物异质结构中二维电子气（2DEG）的形成推动了高电子迁移率晶体管（HEMT）的发展[1,2]，这些晶体管现已广泛用于商用高频射频放大器[3,4]以及高速高压开关应用[5,6]。这类器件通常基于Al(Ga)N/GaN异质结构。

最近，研究人员已在AlYN/GaN和AlScN/GaN异质结构中实现了二维电子气。与传统的Al(Ga)N势垒相比，AlYN和AlScN势垒具有更强的自发极化[7,8]，，从而产生更高的电子浓度；其更大的导带偏移进一步增强了二维电子气限制。[9,10] 此外，AlYN和AlScN可与氮化镓实现晶格匹配，从而最大限度地减少应变诱导退化。AlYN和AlScN均可具有铁电性，因此对非易失性存储器[11,12]和可重构射频器件具有吸引力。[13–15] 这些特性使AlScN/GaN和AlYN/GaN二维电子气成为下一代高速、高功率氮化镓射频晶体管的有力候选。[16–19] 值得注意的是，在30 GHz（Ka波段）AB类连续波工作条件下，通过金属有机化学气相沉积（MOCVD）生长的AlScN/GaN高电子迁移率晶体管实现了创纪录的8.4 W/mm输出功率和42.0%的功率附加效率。[20] 同样，通过MOCVD生长的AlYN/GaN高电子迁移率晶体管实现了接近玻尔兹曼极限的66.5 mV/dec亚阈值摆幅。[21]

高质量二维电子气的特征是纵向磁阻中出现舒布尼科夫–德哈斯（SdH）振荡 R_{xx}。发生 SdH 振荡的条件是回旋能量 $\hbar\omega_c$ 同时高于热能 k_bT 和朗道能级展宽$\hbar/\tau_q$，[22] 其中 $\omega_c = eB/m^*$ 为回旋频率，k_b 为玻尔兹曼常数， τ_q 为量子散射时间，m^* 为电子有效质量。简而言之， $B \times \mu_q > 1$必须满足这一条件，其中 μ_q为量子迁移率。因此，观测到 SdH 振荡通常需要强磁场、低温环境，以及散射极少的高质量二维电子气。在具有 AlGaN[23–25]、AlN[26,27]、、AlInN[28,29] 和 AlInGaN[30] 势垒的 GaN 二维电子气中，已有关于 SdH 振荡的报道。相比之下，AlScN/GaN 和 AlYN/GaN 二维电子气中尚未有 SdH 振荡的报道。

此前，金属有机化学气相沉积（MOCVD）生长的 AlScN/GaN 和 AlYN/GaN 二维电子气的电子输运性质受到势垒层/GaN沟道界面处非故意形成的渐变 AlScGaN 或 AlYGaN 层的限制，这一问题由较低的生长速率和较高的生长温度所致。通过插入名义上的 AlN 插层，限制 Al 和 Sc 反向扩散至氮化镓沟道，从而形成更清晰的界面，缓解了这一问题。[31,32] 采用蒸气压更高的新型 Sc 前驱体，提升了 AlScN 的生长速率，进一步改善了 AlScN/GaN 界面的突变性。由此降低的生长温度抑制了跨越氮化镓界面的原子扩散，并通过缩短生长时间最大限度地减少了杂质掺入。[33] 合金组分也会显著影响输运特性；含 $<$ 12% Sc 的近晶格匹配 AlScN 势垒层可实现较高的电子迁移率。[34] 这些生长创新最终使室温（RT）电子迁移率超过 1100 cm^2/Vs，并且 AlScN/GaN[35] 和 AlYN/GaN[32] 2二维电子气的电子浓度均高于$1.2\times10^{13} cm^{-2}$，使其适用于量子输运研究。

a)电子邮箱： yc794@cornell.edu b)电子邮箱： tn354@cornell.edu c)电子邮箱： djena@cornell.edu

在本研究中，我们首次报告了 AlYN/GaN 和 AlScN/GaN 二维电子气中清晰分辨的 SdH 振荡 R_{xx}，这些振荡在低温下观测到

并且在最高达 14 T 的磁场下观测到。对这些量子振荡的分析得出：(1) 载流子密度，(2) 电子有效质量，以及 (3) 量子散射时间，从而直接评估 AlYN/GaN 和 AlScN/GaN 二维电子气的输运特性。

图1（a）和1（c）展示了本研究所用 AlYN/GaN 和 AlScN/GaN 异质结构的示意横截面。AlScN/GaN 和 AlYN/GaN 样品均通过金属有机化学气相沉积生长在 4H碳化硅衬底上。在碳化硅衬底上先于高温氮化铝成核层上生长铁掺杂半绝缘氮化镓缓冲层，随后生长非故意掺杂氮化镓缓冲层和氮化镓沟道。势垒由一层薄的 0.5 nm AlN 插层构成，其上依次为 AlYN（10 nm，6% Y）或 AlScN（8 nm，9% Sc）势垒，以及一层 9 nm 厚的原位氮化硅钝化层，以防止势垒层氧化。[36–39] 所选钪和钇组分旨在实现与氮化镓近似晶格匹配。两种结构中均加入 AlN 插层，以形成更锐利的界面，从而有效提高二维电子气迁移率，这一点已有报道。[31,40] 二次离子质谱测量显示，AlYN 和 AlScN 势垒中存在氧和碳。补充材料图 S1 给出了含有这些杂质的 AlYN/GaN 和 AlScN/GaN 样品的计算能带图和电子密度分布。有关这些样品的金属有机化学气相沉积生长条件、结构特性和输运特性的更多详情，可参见先前的出版物。[31–33]

对用于舒布尼科夫–德哈斯测量的 1 cm^2 样品进行低磁场霍尔效应测量后发现，AlYN/GaN 样品在室温下的二维电子气密度为 1.19×10^{13} cm^{-2}，迁移率为 1318 cm^2/Vs；在 10 K 时，迁移率增至 3730 cm^2/Vs。用于舒布尼科夫–德哈斯测量的 1 cm^2 AlScN/GaN 样品的二维电子气密度为1.77×10^{13} cm^{-2}，在 300 K 时迁移率为 1050 cm^2/Vs。进行舒布尼科夫–德哈斯测量后，这块用于测量的 AlScN/GaN 样品意外碎裂。因此，无法对同一样品进行低温霍尔测量。取自同一晶圆的另一块 1 cm^2 样品进行了 10 K 霍尔测量；该样品的二维电子气密度为 1.89×10^{13} cm^{-2}，在 300 K 时迁移率为 1083 cm^2/Vs，在 10 K 时则增至 2032 cm^2/Vs。为更准确地反映制备这些 1 cm^2 样品所用的 100 mm 晶圆的电子输运特性，统计.....
在晶圆上 34 个点使用非接触式 Leighton仪器测得的输运特性映射结果见补充材料中的表 S1。

使用 1 cm × 1 cm 样片对两种异质结构进行了磁输运测量，并采用范德堡构型制作了铟焊欧姆接触。使用 Quantum Design 的物理性质测量系统（PPMS），在直流激励电流为100 μA、磁场 B 最高达 14 T 的条件下测量样品。图1(b) 和1(d) 显示了测得的纵向磁阻——

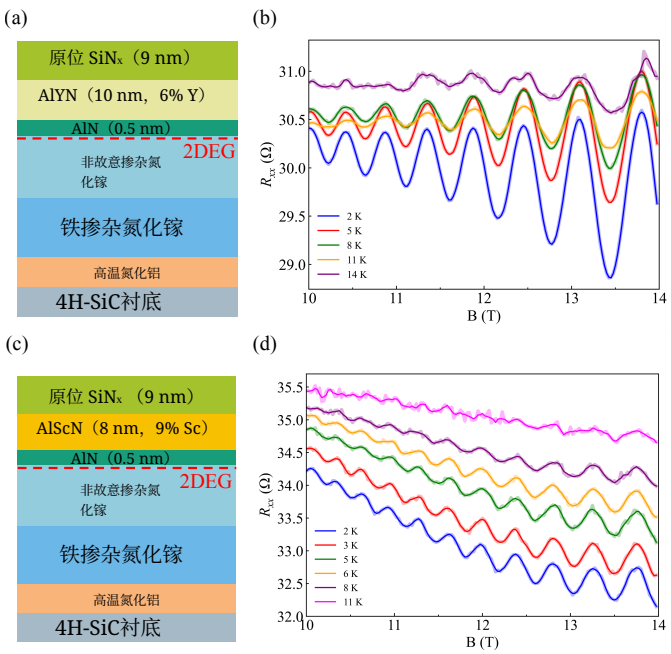

图 1. 通过金属有机化学气相沉积生长的外延 (a)AlYN/GaN 和 (c) AlScN/GaN异质结构示意图。(b) AlYN/GaN二维电子气和 (d) AlScN/GaN 二维电子气在 2 至 11 K 温度范围及 B 10 至 14 T 磁场下测得的纵向磁阻 R_{xx} 。浅色曲线显示原始 R_{xx} 数据，实线则表示经 Savitzky–Golay 滤波器处理后的数据；该滤波器可在降低噪声的同时保留峰值位置和幅度。

电阻 R_{xx} 随磁场 B 变化的曲线，分别对应 AlYN/GaN 二维电子气和 AlScN/GaN 二维电子气。浅色线表示原始 R_{xx} 数据，实线表示经 Savitzky–Golay 滤波器处理后的数据；该滤波器可在降低噪声的同时保留峰值位置和幅度。后续所有分析均基于滤波后的数据进行。施加了 10 至 14 T、垂直于样品表面的磁场，并在 2 至 14 K 的温度范围内重复测量。随着朗道能级间距增大且每个能级容纳的态数增加，R_{xx} 振荡幅度随磁场增强而增大。相反，温度升高会使费米能级附近的费米–狄拉克分布展宽加剧，从而导致振荡幅度减弱。两种样品的舒布尼科夫–德哈斯振荡均在约 8-9 T 时开始出现，且在较高磁场和较低温度下振荡最为显著。

振荡分量 ΔR_{xx} 由测量值减去背景电阻得到R_{xx}。对于两个样品，背景电阻通过对两组独立的四阶多项式拟合取平均值确定：一组拟合舒布尼科夫–德哈斯振荡的峰值，另一组拟合谷值[41]，，如图 S2 所示。 ΔR_{xx} 是

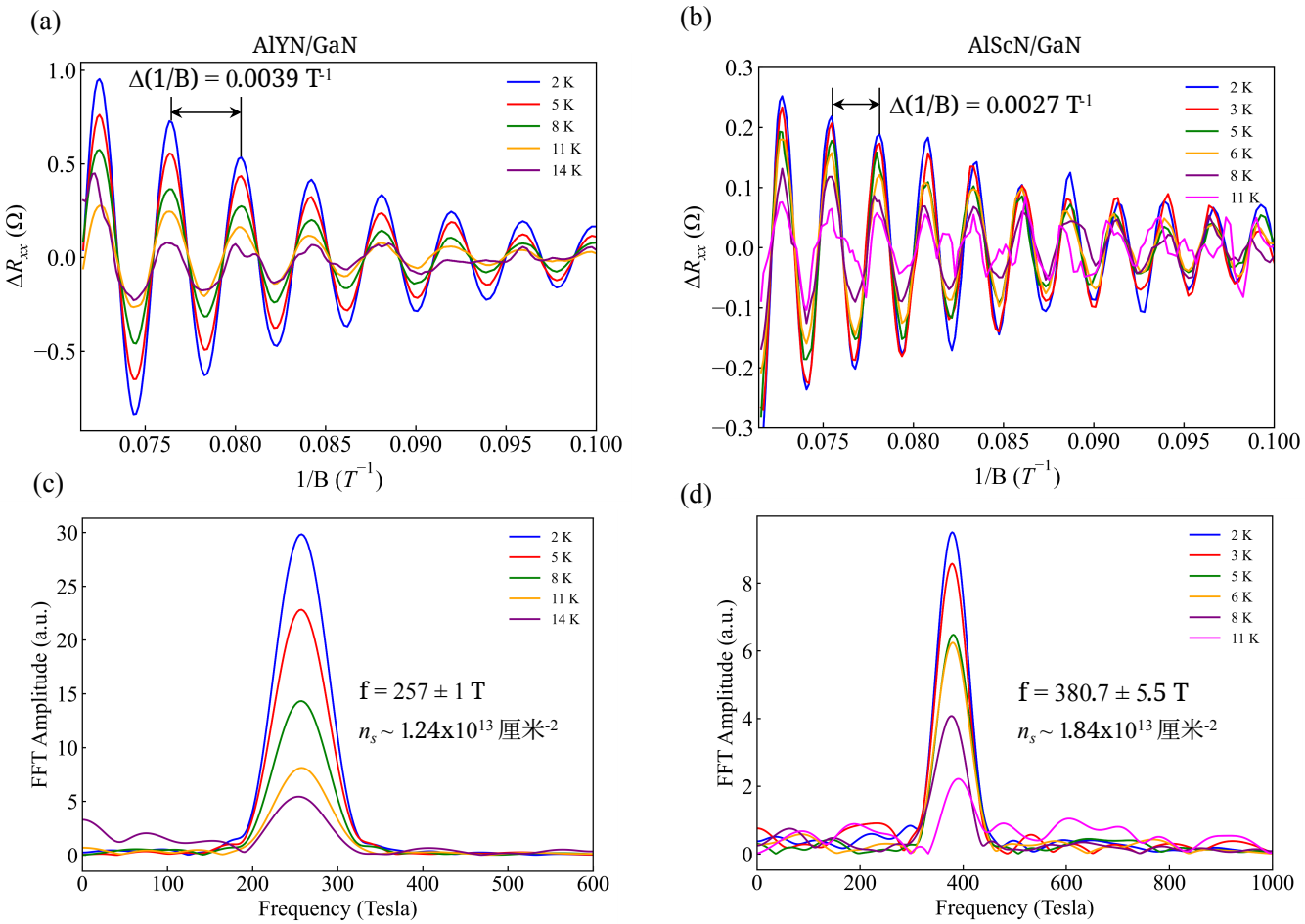

图 2. 对于 (a) AlYN/GaN 和 (b) AlScN/GaN 异质结构，振荡分量 ΔR_{xx} 随 $1/B$ 的变化。对于 AlYN/GaN，振荡周期 $\Delta(1/B) = 0.0039\,\mathrm{T}^{-1}$ 对应的二维电子气密度为 $n_s \approx 1.23\times10^{13}$ 厘米$^{-2}$。相比之下，AlScN/GaN 中较小的振荡周期 $\Delta(1/B) = 0.0027\,\mathrm{T}^{-1}$ 反映出更高的二维电子气密度 $n_s \approx 1.81\times10^{13}$ 厘米$^{-2}$。对 ΔR_{xx} 与 $1/B$ 的快速傅里叶变换（FFT）分析显示，两个样品均具有一个占主导地位的频率。根据实空间振荡周期和倒易空间FFT分析提取的二维电子气密度，与低场霍尔效应测量结果一致。

表示为[42–45]

$$\Delta R_{xx} \propto \frac{\chi}{\sinh(\chi)} e^{-\frac{\pi}{\omega_c \tau_q}} \cos\left(\frac{2\pi E_F}{\hbar\omega_c}\right), \qquad (1)$$

其中 $\chi = 2\pi^2 k_B T/(\hbar\omega_c)$ 和 $E_F = n_s\pi\hbar^2/m^*$ 是二维电子气的费米能级。 ΔR_{xx} 关于磁场的倒数呈周期性 $1/B$，其周期由公式 (1) 中的余弦项决定。ΔR_{xx} 通过 Onsager 关系 $n_s = (2q/h)\times 1/\Delta(1/B)$，可直接测量二维电子气密度。图 2(a) 和 2(b) 展示了 AlYN/GaN 和 AlScN/GaN二维电子气的 ΔR_{xx} 随 $1/B$ 的变化。AlYN/GaN二维电子气的振荡周期提取为 $\Delta(1/B) = 0.0039\mathrm{T}^{-1}$，对应的二维电子气密度为 $n_s \approx 1.23\times10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2}$。对于 AlScN/GaN二维电子气，较小的振荡周期 $\Delta(1/B) = 0.0027\mathrm{T}^{-1}$ 对应较高的二维电子气密度 $n_s \approx 1.81\times10^{13}\mathrm{cm}^{-2}$。

图 2(c) 和 2(d) 展示了快速傅里叶变换（FFT）对 ΔR_{xx} 与 $1/B$ 的关系进行的分析，涵盖两种样品。AlYN/GaN和AlScN/GaN二维电子气分别出现了显著的 $f = 257\pm1$ T和$f = 380.7\pm5.5$ T频率峰。FFT频率可通过关系式 $n_s = (2q/h)\times f$ 计算二维电子气密度，所得结果为：AlYN/GaN的 $n_s \approx 1.24\times10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2}$，AlScN/GaN的 $n_s \approx 1.84\times10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2}$。通过实空间 $\Delta(1/B)$ 和倒易空间FFT分析提取的两种二维电子气密度，均与低场霍尔效应测量结果一致。

在固定磁场 B 下测量随温度变化的 SdH 振荡，可确定费米能级处二维电子气的有效质量。图 3（a）和 3（b）显示了两种样品在不同磁场 B 下，峰值随低温升高而减弱的情况。 ΔR_{xx} 对于每个磁场 B，数据均采用公式（1）中的热阻尼因子 $\chi/\sinh(\chi)$ 进行拟合，得到电子有效质量 $m^* = (0.24\pm0.01)\,m_e$

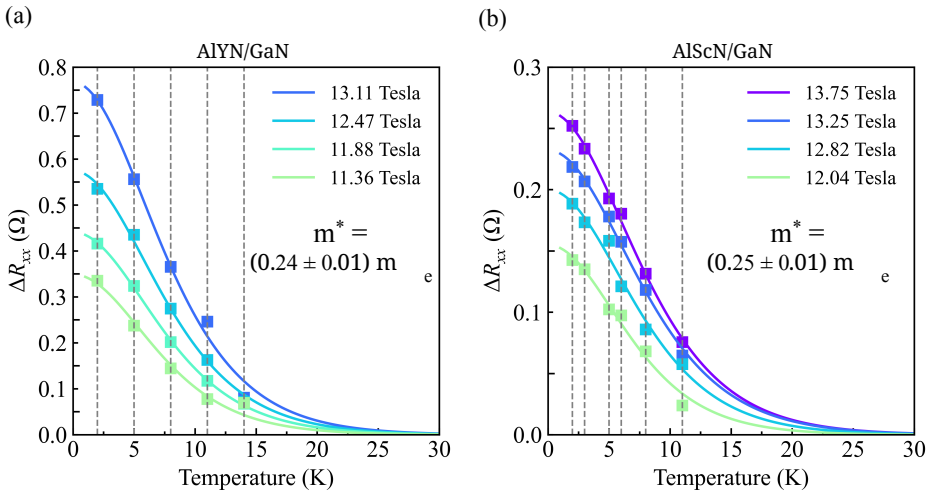

图 3. 在不同 B 磁场下，(a) AlYN/GaN 和 (b) AlScN/GaN 样品的峰值 ΔR_{xx} 随温度的变化。实线曲线表示对公式（1）中 $\chi/\sinh(\chi)$ 的拟合，用于提取电子有效质量；AlYN/GaN 二维电子气的结果为 $m^* = (0.24 \pm 0.01)\ m_e$，AlScN/GaN 二维电子气的结果为 $m^* = (0.25 \pm 0.01)\, m_e$。

AlYN/GaN二维电子气的有效质量，以及 $m^* = (0.25 \pm 0.01)\ m_e$AlScN/GaN二维电子气的有效质量，其中 m_e 为自由电子质量。与体块 GaN 相比，增大的 m^* 可能是能带非抛物性[46] 与电子-声子（极化子）耦合作用[47]共同造成的。由于 AlScN/GaN 和 AlYN/GaN 异质结构中的电子波函数主要局限在氮化镓沟道内，仅有少量延伸进入 AlN 插层 [（见图 S2], ），因此预计极化子效应与 AlGaN/GaN 中的情况相似。鉴于 AlScN/GaN 和 AlYN/GaN 界面处的二维电子气密度通常超过n_s=10^{13}cm^{-2}，电子-声子屏蔽作用很强，这表明能带非抛物性很可能是导致电子有效质量增大的主要因素。

本研究中从舒布尼科夫–德哈斯振荡提取的数值与近期发表的数据吻合良好。该数据通过在 40 K 下进行太赫兹光学霍尔效应测量获得，结果显示，AlYN/GaN 的 $m^* = 0.2 - 0.23\, m_e$ 为 $n_s \sim 1 \times 10^{13}$ cm^{-2}，AlScN/GaN 的 $m^* = 0.25 - 0.27\, m_e$ 为 n_s=$2 - 2.7 \times 10^{13}$cm^{-2}。[48] 补充材料中的图 S3(a) 比较了本研究中 AlYN 和 AlScN 势垒的 m^* 实验报告值（从舒布尼科夫–德哈斯振荡中提取）随 n_s 的变化情况，以及此前报道的 AlGaN、AlN 和 AlIn(Ga)N 势垒异质结构的相应数值。

朗道能级由于与源于结构无序的散射势耦合而表现出有限展宽。这种展宽由量子散射寿命 τ_q 量化，它决定了在固定温度下， ΔR_{xx} 振幅随 1/B 增大而呈指数衰减的特性。对于给定温度，通过将与无序相关的阻尼项 $e^{-\pi/(\omega_c \tau_q)}$ 从公式（1）拟合到丁格尔图中，可以提取出τ_q ；其中，将 ln（$A^*\sinh$（χ）/χ）相对于 $1/B$ 作图，而 A^* 表示 ΔR_{xx}在谷值处的绝对值。丁格尔图线性拟合的斜率等于 $-\pi m^*/(q\tau_q)$，

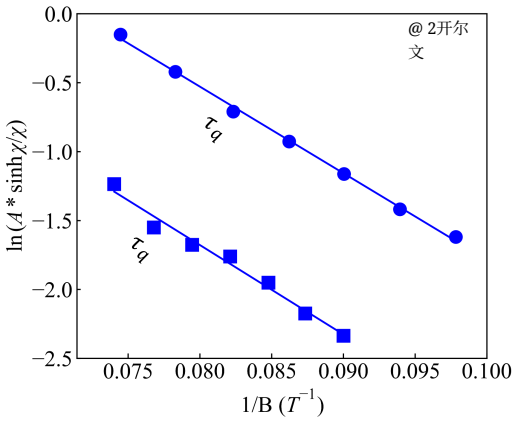

图 4. 在 2开尔文下，AlYN/GaN 和 AlScN/GaN 二维电子气的丁格尔图，即 ln（$A^*\sinh$（χ）/χ）随 $1/B$ 的变化关系，可用于提取量子散射时间 τ_q。 A^* 表示 ΔR_{xx} 谷值处的绝对值。黑色实线是根据公式（1）对无序阻尼项 $e^{-\pi/(\omega_c \tau_q)}$ 进行的拟合。

由此可以计算出 τ_q。对于两个样品，低频分量均被滤除，仅保留主要 FFT峰。随后对该 FFT峰进行逆FFT，以重构振荡信号，并将其用于 Dingle分析。如图 4所示，τ_q 被确定为 $\tau_q = 68 \pm 2$fs（对于 AlYN/GaN二维电子气）以及 $\tau_q = 70 \pm 8$fs（对于 AlScN/GaN二维电子气）。

量子散射寿命 τ_q 不依赖于散射角，而动量散射时间 τ_m 则按因子 $1/(1-\cos\theta)$ 加权，其中 θ 表示散射角。[49] 对于各向同性散射，比值 τ_m/τ_q 趋于 1，而远大于 1 的值

则表明存在各向异性散射机制。动量散射时间 τ_{m} 通过低场霍尔迁移率，利用德鲁ude关系$\mu = e\tau_{\mathrm{m}}/m^*$. 提取。在 10 K 时，霍尔效应测量得到$\tau_{\mathrm{m}} = 496$fs，适用于AlYN/GaN二维电子气，邓克尔比为 $\tau_{\mathrm{m}}/\tau_{\mathrm{q}} \sim 7.3$。对于AlScN/GaN，使用第二个 1 cm^2 样品获得的 10 K 霍尔效应测量结果为 $\tau_m = 289$ fs，邓克尔比为 $\tau_m/\tau_q \sim 4.1$。邓克尔比 > 1 表明存在长程散射势。

丁格尔值表明存在长程散射势。一个可能的候选机制是库仑散射[50], 可能源于带电位错[51],势垒中的杂质等电荷中心[24,25], 或势垒层产生的微观应变诱导缺陷，其长程应变场会延伸至沟道。[52] 由于晶格失配达3.4%，在六方4H-SiC上进行纤锌矿氮化镓的异质外延生长会导致较高的穿透位错密度，达到 10^8–10^{10} cm^{-2}。此外，在金属有机化学气相沉积生长的AlScN和AlYN势垒层中检测到了较高含量的氧和碳[35,38]，其影响反映在测得的电容–电压特性中。[34] Jena等人报告称，在库仑散射机制中，位错散射的丁格尔比显著高于杂质散射。[50] 补充材料中的图S3(b)比较了 τ_q 本文报告的结果与采用AlYN和AlScN以外势垒的二维电子气。减少库仑散射（例如由位错和势垒杂质引起的散射）可提高未来AlYN/GaN和AlScN/GaN结构中的量子散射时间。

总之，我们报道了在采用金属有机化学气相沉积法生长、具有新型 AlYN 和 AlScN 势垒的氮化镓二维电子气中观测到 SdH 振荡。振荡周期可直接测量二维电子气的密度，结果与低场霍尔效应测量一致。通过分析热阻尼，得到了电子有效质量：AlYN/GaN二维电子气为 $m^* = (0.24 \pm 0.01)\, m_{\mathrm{e}}$，AlScN/GaN二维电子气为 $m^* = (0.25 \pm 0.01)\, m_{\mathrm{e}}$。此外，丁格尔图分析揭示，AlYN/GaN二维电子气的量子散射时间为 $\tau_{\mathrm{q}} = 68 \pm 2$fs，AlScN/GaN二维电子气的量子散射时间为 $\tau_{\mathrm{q}} = 70 \pm 3$fs。这些结果展示了 AlScN/GaN 和 AlYN/GaN 异质结构中的量子输运，并为进一步研究这些新兴氮化物半导体的材料科学、基础物理和器件应用奠定了基础。

致谢

本研究得到美国陆军研究办公室项目编号 W911NF2220177 的资助；同时得到 SUPREME 的支持。SUPREME 是 JUMP 2.0 的七个中心之一，而 JUMP 2.0 是由美国国防高级研究计划局资助的半导体研究公司（SRC）项目。本研究使用了康奈尔材料研究中心共享仪器设施，该设施通过美国国家科学基金会材料研究科学与工程中心计划（DMR-1719875）以及康奈尔卡夫利研究所（KIC）获得支持。

MOCVD 生长技术的开发由德国联邦教育与研究部 ProMat KMU 项目“PuSH”资助，资助编号为 03XP0387B。弗劳恩霍夫应用固体物理研究所的作者感谢 Lutz Kirste 博士和 Patrik Straˇn´ak 博士对金属有机化学气相沉积生长的异质结构进行结构表征；相关研究此前已发表[32,33]。

补充材料

有关以下内容，请参阅补充材料：(1) AlYN/GaN 和 AlScN/GaN 样品的计算能带图和电子密度分布；(2) 舒布尼科夫–德哈斯振荡的背景电阻；以及 (3) 将本研究从 AlYN 和 AlScN 势垒层中的舒布尼科夫–德哈斯振荡提取的实验报道电子有效质量m^* 和量子散射时间 τ_{q}，与先前报道的 AlGaN、AlN 和 AlIn(Ga)N 势垒异质结构中的相关数据进行比较。

作者声明

利益冲突

作者声明不存在需要披露的利益冲突。

数据可用性

支持本研究结论的数据可在合理请求后向通讯作者获取。

参考文献

[1]M. A. Khan, J. Kuznia, J. Van Hove, N. Pan, 和 J. Carter, “在低压金属有机化学气相沉积的 GaN-$Al_xGa_{1-x}N$ 异质结中观察到二维电子气”, 《应用物理快报》**60**, 3027–3029 (1992)。[2]M. Asif Khan, A. Bhattarai, J. Kuznia, 和 D. Olson, “基于 GaN-$Al_xGa_{1-x}N$ 异质结的高电子迁移率晶体管”, 《应用物理快报》**63**, 1214–1215 (1993)。[3] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, 和 Y.-F. Wu, “基于氮化镓的射频功率器件和放大器”, 《IEEE会刊》**96**, 287 305 2008– ( )。[4]U. K. Mishra, P. Parikh, 和 Y.-F. Wu, “AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管——器件工作原理与应用概述”, 《IEEE会刊》**90**, 1022–1031 (2002)。[5] H. Amano, Y. Baines, E. Beam, M. Borga, T. Bouchet, P. R. Chalker, M. Charles, K. J. Chen, N. Chowdhury, R. Chu, *et al.*, “2018年GaN功率电子路线图”, 《D辑物理学杂志：应用物理》**51**, 163001 (2018)。[6]T. J. Flack, B. N. Pushpakaran, 和 S. B. Bayne, “功率电子应用中的GaN技术：综述”, 《电子材料杂志》**45**, 2673–2682 (2016)。[7]O. Ambacher, B. Christian, M. Yassine, M. Baeumler, S. Leone, 和 R. Quay, “极化诱导的界面电荷与电子

片电荷：赝晶ScAlN/GaN、GaAlN/GaN、In-AlN/GaN和InAlN/InN异质结构”，《应用物理学杂志》**129**, 204501 (2021)。[8]N. Afshar, M. Yassine, 和 O. Ambacher，“氮化钇铝综述：晶体结构、生长技术、性质与应用”，《材料前沿》**12** (2025)。[9]D. Wang, S. Mondal, P. Kezer, M. Hu, J. Liu, Y. Wu, P. Zhou, T. Ma, P. Wang, D. Wang, J. T. Heron, 和 Z. Mi，“YAlN/III族氮化物异质结构的能带排列与电荷载流子输运特性”，《应用表面科学》**637**, 157893 (2023)。[10]E. N. Jin, M. T. Hardy, A. L. Mock, J. L. Lyons, A. R. Kramer, M. J. Tadjer, N. Nepal, D. S. Katzer, 和 D. J. Meyer，“$Sc_xAl_{1-x}N$/GaN异质结的能带排列”，《ACS应用材料与界面》**12**, 52192–52200 (2020)。[11]S. Fichtner, N. Wolff, F. Lofink, L. Kienle, 和 B. Wagner，“AlScN：一种基于III-V族半导体的铁电材料”，《应用物理学杂志》**125**, 114103 (2019)。[12]D. Wang, S. Mondal, J. Liu, M. Hu, P. Wang, S. Yang, D. Wang, Y. Xiao, Y. Wu, T. Ma, 和 Z. Mi，“通过分子束外延生长的铁电YAlN”，《应用物理快报》**123**, 033504 (2023)。[13]J. Casamento, K. Nomoto, T. S. Nguyen, H. Lee, C. Savant, L. Li, A. Hickman, T. Maeda, J. Encomendero, V. Gund, A. Lal, J. C. M. Hwang, H. G. Xing, 和 D. Jena，“FerroHEMT：高电流、高速全外延AlScN/GaN铁电晶体管”，载于*2022 International Electron Devices Meeting (IEDM)* 2022 11 1 1 11 1 4 ( ) pp. . . – . . . [14]D. Wang, P. Wang, M. He, J. Liu, S. Mondal, M. Hu, D. Wang, Y. Wu, T. Ma, 和 Z. Mi，“全外延单片ScAlN/AlGaN/GaN铁电高电子迁移率晶体管”，《应用物理快报》**122**, 090601 (2023)。[15]J. Y. Yang, S. Y. Oh, M. J. Yeom, S. Kim, G. Lee, K. Lee, S. Kim, 和 G. Yoo，“采用铁电AlScN栅介质的脉冲增强型/耗尽型可切换GaN高电子迁移率晶体管”，《IEEE电子器件快报》**44**, 1260–1263 (2023)。[16]A. J. Green, J. K. Gillespie, R. C. Fitch, D. E. Walker, M. Lindquist, A. Crespo, D. Brooks, E. Beam, A. Xie, V. Ku-mar, J. Jimenez, C. Lee, Y. Cao, K. D. Chabak, 和 G. H. Jessen，“电流密度达2.4 A/mm、跨导为0.67 S/mm的ScAlN/GaN高电子迁移率晶体管”，《IEEE电子器件快报》**40**, 1056–1059 (2019)。[17]M. B. Tahhan, J. A. Logan, M. T. Hardy, M. G. Ancona, B. Schultz, B. Appleton, T. Kazior, D. J. Meyer, 和 E. M. Chumbes，“ScAlN势垒毫米波高电子迁移率晶体管的钝化方案”，IEEE《电子器件汇刊》**69**, 962–967 (2022)。[18]K. Nomoto, J. Casamento, T.-S. Nguyen, L. Li, H. Lee, C. Sa-vant, A. L. Hickman, T. Maeda, J. Encomendero, V. Gund, *et al.*，“AlScN/GaN高电子迁移率晶体管的导通电流达4 A/mm，最高振荡频率为 > 130 **18**, 016506 2025 GHz”，Applied Physics Express ( )。[19]T. S. Nguyen, K. Nomoto, W. Zhao, C. Savant, H. G. Xing, 和 D. Jena，“应变平衡型AlScN/GaN高电子迁移率晶体管的fT/fMAX为 173 321 *2024 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* 2024 1 4 GHz”，载于( ) pp. – . [20]S. Krause, I. Streicher, P. Waltereit, L. Kirste, P. Bruckner, 和 S. Leone，“通过金属有机化学气相沉积生长的AlScN/GaN高电子迁移率晶体管在30 GHz下输出功率为8.4 W/mm、功率附加效率为48%”，《IEEE电子器件快报》**44**, 17–20 (2023)。[21]K. Nomoto, I. Streicher, T.-S. Nguyen, C. Savant, M. Ramesh, S. Ma, J. Encomendero, L. Kirste, P. Straň´ak, R. Quay, S. Leone, H. G. Xing, 和 D. Jena，“具有66.5 mV/decade亚阈值摆幅和 10^9 开关比的金属有机化学气相沉积AlYN/GaN高电子迁移率晶体管”，《应用物理快报》**126**, 223509 (2025)。[22]R. Sladek，“单晶和多晶砷化铟中的磁阻振荡”，《物理评论》**110**, 817 (1958)。[23]L. Wong、S. Cai、R. Li、K. Wang、H. Jiang 和 M. Chen，“AlGaN/GaN异质结构中二维电子气的磁输运研究”，《应用物理快报》73，1391–1393（1998）。[24]S. Elhamri、R. Newrock、D. Mast、M. Ahoujja、W. Mitchel、J. Redwing、M. Tischler 和 J. Flynn，“$Al_{0.15}Ga_{0.85}N$/GaN异质结构：有效质量和散射时间”，《物理评论B》57，1374（1998）。[25]E. Frayssinet、W. Knap、P. Lorenzini、N. Grandjean、J. Massies、C. Skierbiszewski、T. Suski、I. Grzegory、S. Porowski、G. Simin、*et al.*，“在体 GaN 衬底上生长的AlGaN/GaN异质结构中的高电子迁移率”，《应用物理快报》77，2551–2553（2000）。[26]Y. Cao、K. Wang、A. Orlov、H. Xing 和 D. Jena，“超薄二元 AlN/GaN异质结中二维电子气的极低方块电阻和舒布尼科夫–德哈斯振荡”，《应用物理快报》92，152112（2008）。[27]Y.-H. Chen、J. Encomendero、C. F. Chang、H. G. Xing 和 D. Jena，“体 AlN 衬底上相干应变 AlN/GaN/AlN异质结构中二维电子气的舒布尼科夫–德哈斯振荡”，《应用物理快报》126，202101（2025）。[28]L. Wang、M. Yin、A. Khan、S. Muhtadi、F. Asif、E. S. Choi 和 T. Datta，“用于高功率和高频电子学的 (Al, In)N/GaN异质结构中的散射与量子效应”，《物理评论应用》9，024006（2018）。[29]C. Karmakar、R. Kaneriya、S. Mukherjee、S. Sinha、P. P. Kumar、P. D. Babu 和 U. S. Joshi，“高迁移率 InAlN/GaN二维电子气中增强的舒布尼科夫–德哈斯振荡”，《ACS应用电子材料》6，6238–6245（2024）。[30]C. Karmakar、R. Kaneriya、M. Malasi、S. Rathod、D. Kumar、S. Chakravarty、R. Upadhyay、P. Kumar、A. Bhattacharya 和 U. Joshi，“四元 InAlGaN/GaN二维电子气中增强的量子振荡和散射效应”，《应用物理快报》122（2023）。[31]I. Streicher、S. Leone、C. Manz、L. Kirste、M. Prescher、P. Waltereit、M. Mikulla、R. Quay 和 O. Ambacher，“金属有机化学气相沉积生长的AlScN/GaN异质结构中AlN和AlGaN插层的作用”，《晶体生长与设计》23，782–791（2023）。[32]I. Streicher、P. Straˇn´ak、L. Kirste、M. Prescher、S. M¨uller 和 S. Leone，“金属有机化学气相沉积生长的AlYN/GaN异质结构中的二维电子气”，《APL材料》12，051109（2024）。[33]I. Streicher、S. Leone、M. Zhang、T. S. Tlemcani、M. Bah、P. Straˇn´ak、L. Kirste、M. Prescher、A. Yassine、D. Alquier 和 O. Ambacher，“理解AlScN/GaN异质结构中的界面”，《先进功能材料》，2403027（2024）。[34]A. Yassine、M. Yassine、I. Streicher、R. Driad、L. Kirste、P. Straˇn´ak、P. D¨oring、S. Leone 和 O. Ambacher，“基于 $SiN_y/Al_{1-x}Sc_xN$/GaN 的金属-绝缘体-半导体结构的电学性质”，《应用物理学杂志》137，194501（2025）。[35]I. Streicher、S. Leone、L. Kirste、C. Manz、P. Straˇn´ak、M. Prescher、P. Waltereit、M. Mikulla、R. Quay 和 O. Ambacher，“采用新型前驱体通过金属有机化学气相沉积生长的增强型AlScN/GaN异质结构”，《固态物理学（RRL）—快速研究快报》17，2200387（2023）。[36]C. Manz、S. Leone、L. Kirste、J. Ligl、K. Frei、T. Fuchs、M. Prescher、P. Waltereit、M. A. Verheijen、A. Graff、M. Simon-Najasek、F. Altmann、M. Fiederle 和 O. Ambacher，“通过金属有机化学气相沉积生长的改进型AlScN/GaN异质结构”，《半导体科学与技术》36，034003（2021），出版方：IOP出版社。[37]D. Wang、D. Wang、P. Zhou、M. Hu、J. Liu、S. Mondal、T. Ma、P. Wang 和 Z. Mi，“铁电 $Sc_{0.18}Al_{0.82}N$/GaN异质结构的表面氧化和能带排列”，《应用表面科学》，157337（2023）。

[38]S. Leone、I. Streicher、M. Prescher、P. Straˇn´ak 和 L. Kirste，“氮化铝钇的金属有机化学气相沉积”，《固态物理学（RRL）—快速研究快报》**17**，2300091（2023）。[39]I. Streicher、N. Wolff、T. Duarte、O. Rehm、P. Straˇn´ak、L. Kirste、M. Prescher、X. Guo、V. Nicolosi、L. Baumgarten、M. M¨uller、L. Kienle 和 S. Leone，“通过金属有机化学气相沉积推进在AlScN和AlYN上生长氮化镓”，Advanced Physics Research，e2500035。[40]J. Casamento、T.-S. Nguyen、Y. Cho、C. Savant、T. Vasen、S. Afroz、D. Hannan、H. G. Xing 和 D. Jena，“外延AlScN/GaN异质结中极化诱导二维电子气的输运特性”，《应用物理快报》**121**，192101（2022）。[41]A. Okazaki、S. Wiedmann、S. Pezzini、M. Peres、P. Rappl 和 E. Abramof，“拓扑晶体绝缘体碲化锡 (111) 外延薄膜中的舒布尼科夫–德哈斯振荡”，《物理评论B》**98**，195136（2018）。[42]R. Kubo、H. Hasegawa 和 N. Hashitsume，“磁电效应量子理论 I：基本考虑”，日本物理学会志**14**，56–74（1959）。[43]R. Dingle，“金属的某些磁性质 II：碰撞对大型系统磁行为的影响”，《伦敦皇家学会会刊 A辑：数学与物理科学》**211**，517–525（1952）。[44]T. Ihn，*Semiconductor Nanostructures: Quantum states and electronic transport* 2009

（牛津大学出版社，）。[45]D. Jena，*Quantum physics of semiconductor materials and devices* 2022

（牛津大学出版社，）。[46]S. Syed, J. Heroux, Y. Wang, M. Manfra, R. Molnar, and H. Stormer，《纤锌矿氮化镓导带的非抛物性》，《应用物理快报》**83**，4553–4555（2003）。[47]X. Wu and F. Peeters，《GaN/Al x Ga 1-x N异质结构中二维电子的回旋共振质量》，《物理评论B》**55**，15438（1997）。[48]V. Stanishev, I. Streicher, A. Papamichail, V. Rindert, P. P. Paskov, S. Leone, and V. Darakchieva，《通过太赫兹光学霍尔效应确定AlScN/GaN和AlYN/GaN高电子迁移率晶体管的二维电子气特性》，Frontiers in Electronic Materials **5**，1622176（2025）。[49]J. Harrang, R. Higgins, R. Goodall, P. Jay, M. Laviron, and P. Delescluse，《利用量子迁移率与经典迁移率确定砷化铝镓/砷化镓异质结二维电子气中的主导散射机制》，《物理评论B》**32**，8126（1985）。[50]D. Jena and U. K. Mishra，《杂质电子气中带电位错引起的量子与经典散射时间》，《物理评论B》**66**，241307（2002）。[51]D. Jena, A. C. Gossard, and U. K. Mishra，《二维电子气中的位错散射》，《应用物理快报》**76**，1707–1709（2000）。[52]M. S umiya, Y. Imanaka, and Y. Nakano，《氮化镓沟道中的应变诱导缺陷对AlGaN/GaN异质结构二维载流子输运的影响》，《应用物理快报》**127**，101602（2025）。