crystals

MDPI

文章无裂纹高组分 (>35%)厚势垒 (>30 nm) AlGaN/AlN/GaN蓝宝石衬底上的高电子迁移率晶体管，具有低方块电阻 (<250 Ω/□)

Swarnav Mukhopadhyay *,Cheng Liu, Jiahao Chen, Md Tahmidul Alam, Surjava Sanyal, Ruixin Bai,Guangying Wang, Chirag Gupta and Shubhra S. Pasayat

美国威斯康星州麦迪逊市威斯康星大学麦迪逊分校电气与计算机工程系，邮编 53706；cliu634@wisc.edu (C.L.)；jchen967@wisc.edu (J.C.)；malam9@wisc.edu (M.T.A)；ssanyal2@wisc.edu (S.S.)；rbai33@wisc.edu (R.B.)；gwang265@wisc.edu (G.W.)；cgupta9@wisc.edu (C.G.)；shubhra@ece.wisc.edu (S.S.P.)* 通讯作者：swarnav.mukhopadhyay@wisc.edu

摘要： 本文报道了一种生长在蓝宝石衬底上的高组分（>35%）厚势垒层（>30 nm）AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管（高电子迁移率晶体管）结构，其片电阻率超低（<250 Ω/□）。通过优化生长条件（例如降低沉积速率）以及优化不同外延层的厚度，我们成功沉积了无裂纹的高组分厚AlGaN势垒层高电子迁移率晶体管结构。通过采用范德堡法进行霍尔测量，获得了显著高的二维电子气（二维电子气）密度1.46 × 10^{13} cm^{-2}，其室温迁移率为1710cm^2/V.s。这些先进成果表明，在蓝宝石衬底上设计高功率Ga极性高电子迁移率晶体管具有巨大潜力。

关键词： 高电子迁移率晶体管；超低方块电阻；二维电子气；金属有机化学气相沉积；电子迁移率；无裂纹AlGaN；高组分AlGaN势垒层

引用： Mukhopadhyay, S.; Liu, C.; Chen, J.; Alam, M.T.; Sanyal, S.; Bai, R.; Wang, G.; Gupta, C.; Pasayat, S.S. 蓝宝石衬底上具有低方块电阻（<250Ω/□）的无裂纹高组分（>35%）厚势垒层（>30nm）AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管。《晶体》**2023年**，*13*，x. https://doi.org/10.3390/xxxxx

学术编辑：Yangfeng Li、Zeyu Liu、Mingzeng Peng、Yang Wang、Yang Jiang、Yuanpeng Wu

收稿日期：2023年8月31日
修订日期：2023年9月21日
接受日期：2023年9月26日
发表日期：日期

版权： ©2023年由作者版权所有。根据知识共享署名（CC BY）许可的条- 款和条- 件提交，以供可能的开放获取出版，许可条款见（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）。

1. 引言

过去二十年来，III族氮化物材料的沉积技术不断进步。高电子迁移率晶体管（HEMT）的快速发展，得益于对III族氮化物材料开展的深入研究。AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管能够在高电压下工作，同时保持较低的导通电阻（R_{ON}），因此在电力电子应用中颇具吸引力。随着电力电子行业对AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管的兴趣日益浓厚，且其商业化不断推进，为使其性能超越当前最先进水平，就需要持续改进。推动AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管技术发展的最大挑战之一，是沉积无裂纹、高组分且厚的AlGaN势垒层。实现这一组合对于降低栅极漏电、提高击穿电压并同时保持较低的方块电阻[1,2]至关重要。这对高压工作尤其重要，因为漏极侧栅极边缘处的高电场往往会导致严重的栅极漏电，进而引发软击穿。除解决栅极漏电问题外，高组分AlGaN势垒层较高的临界电场也有助于提高高电子迁移率晶体管的击穿电压。沉积高组分厚AlGaN势垒层受到限制，是因为AlGaN势垒层在厚GaN缓冲层上的临界层厚度有限，这是由氮化铝与GaN之间3.5%的晶格失配造成的[3]。超过临界层厚度后，沉积在GaN基底层上的AlGaN层会因薄膜中较大的拉伸应变而趋于开裂。同时，增加AlGaN势垒层厚度会提高沟道中的极化诱导电荷，这些电荷是获得低方块电阻所必需的。另一个关键挑战是，高组分厚AlGaN势垒层会使二维电子气

波函数向界面偏移，导致合金散射增加，电子迁移率降低 [4]。此外，随着二维电子气密度增加，沟道中的载流子间散射显著增强，从而限制了高电子迁移率 [5]。因此，很难为高二维电子气密度的高电子迁移率晶体管结构生长足够厚的高铝组分 AlGaN 势垒层，同时实现功率电子器件所必需的高迁移率。此外，大多数室温方块电阻接近 250 Ω/□ 的高性能 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管均采用碳化硅衬底，而这会限制其在功率电子领域的应用 [6–8]。关于采用单层 AlGaN 势垒、方块电阻接近或低于 250 Ω/□ 的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管，相关报道寥寥无几 [6,8] ，且其中大多数采用碳化硅衬底。由于 GaN 与蓝宝石之间存在晶格失配（16%），会产生高密度缺陷和位错，因此在蓝宝石衬底上沉积的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管结构难以实现低方块电阻 [9,10]。此外，众所周知，由于强烈的光学声子散射以及界面处极化诱导电荷导致的散射，方块电阻很难低于 250 Ω/□ [11] 211 。
Ω [6] 0 68 0 32

迄今为止，SiC 上 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管所记录的最低方块电阻为 /□，由 Yamada 等人采用高铝组分 Al . Ga . N（层厚 6 nm）势垒层实现。此外，保持界面平整、陡峭对于获得高电子迁移率至关重要，而这对于高铝组分 AlGaN 势垒层而言难以实现 [4,6]。随着高铝组分 AlGaN 势垒层厚度增加，界面质量会因应变而下降，这构成了一项挑战 [4]。尽管一些文献报道了铝组分为 >30%、势垒厚度为 >20 nm、方块电阻为 >250 Ω/□ 的 AlGaN 势垒 GaN 高电子迁移率晶体管 [12–15], ，但要实现势垒厚度为 >30 nm、铝组分为 >35% 且方块电阻为 <250 Ω/□ 并非易事。因此，解决这些问题将对提升高压高电子迁移率晶体管器件的性能产生重大影响。

最近，多沟道 GaN 高电子迁移率晶体管等新型高电子迁移率晶体管设计，在实现高击穿电压（>1000 V）和低方块电阻（<150 Ω/□）方面展现出巨大潜力 [16,17]。此外，p-GaN 栅控高电子迁移率晶体管等新型栅极设计，在将栅极漏电流降低至小于 1 μA/mm、并将击穿电压提高至 >1000 V 方面表现出色 [18–20]。

此外，据报道，采用 AlGaN 背势垒和碳掺杂缓冲层的背势垒设计等不同设计技术，可将 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管的击穿电压提高至 1 KV 以上 [21–23]。然而，碳掺杂会导致材料质量下降，并因电离杂质散射而降低二维电子气迁移率 [21], ； 而 AlGaN 背势垒设计则会因晶格失配增大而使高电子迁移率晶体管结构承受更大的应变，并因引入更多位错而损害材料质量 [24]。因此，在本研究中，作者尝试通过增加势垒层的铝组分和厚度，以一种简单的方式展示实现高击穿电压和低方块电阻的途径。

在本文中，作者介绍了一种沉积-在c面蓝宝石衬底上的AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管结构，其铝组分为36%，势垒厚度为31nm，在室温下方块电阻低至249 Ω/□，并且在低温（77 K）下具有7830cm²/V.s的极高迁移率，这表明其具有尖锐且平滑的界面。为解决上述讨论的所有问题，研究人员开发了一种优化的沉积工艺，结果表明，Ga极性高电子迁移率晶体管仍需进一步发展，并且通过改进沉积技术，有可能克服AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管方块电阻的内在限制。

2. 实验方法

采用金属有机化学气相沉积（MOCVD），以三甲基镓（TMGa）、三乙基镓（TEGa）和三甲基铝（TMAl）作为金属有机前驱体，并以氨（NH_3）作为第五族前驱体，在标准铁掺杂氮化镓/蓝宝石模板上沉积了AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管。H_2 用作载气。沉积了一层厚的非故意掺杂氮化镓层

（厚度 t_1）最初在标准的蓝宝石衬底上铁掺杂半绝缘氮化镓模板上沉积，使用 90 μmol/min 的三甲基镓和 283 mmol/min 的 NH_3。随后使用三乙基镓沉积 40 nm 的 GaN沟道，接着沉积一层薄的 AlN层（厚度 t_2）以及一层厚的 $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$ 层（厚度 t_3）；沉积这些层期间，温度始终为 1210°C，V/III比为 3800。三甲基铝流量为 4 6 μ 15 。

μ
mol/min，三乙基镓流量为 mol/min。

为获得具有低方块电阻（<250 Ω/□）的厚层、高铝组分 AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管，我们开展了一系列实验，以优化沉积条件并了解不同沉积参数对二维电子气迁移率的影响。首先考察了三种不同的沉积温度（1100 °C、1210 °C 和 1270 °C），以确定GaN沟道的最优沉积条件。我们改变了多个结构参数——中间非故意掺杂GaN层的厚度 t_1（以了解沟道与铁掺杂半绝缘氮化镓模板沉积表面之间距离的影响）、氮化铝层的厚度 t_2（以考察合金散射的影响），以及 AlGaN层的厚度 t_3（以研究其对沟道电阻的影响）。最终的外延结构设计采用了通过改变上述所有参数而确定的最优沉积条件。外延层结构如图 1 所示。为获得增强的极化诱导二维电子气电荷密度，在不同外延层中，势垒层的铝组分始终保持恒定（36%）。沉积厚势垒层时，AlGaN势垒层的铝组分保持为 36%，以尽量降低方块电阻并避免形成裂纹。在弛豫 GaN 上沉积的 AlGaN层中，应变会随着铝组分和厚度的增加而持续增大，从而提高裂纹形成的概率 [25]；因此，本研究中的铝组分未超过 36%。此外，据报道，铝组分大于或等于 38% 会降低低温（77 K）下的二维电子气迁移率，这表明沟道中的界面粗糙度散射有所增强 [26,27]。沉积参数列于表 1。选择非故意掺杂 GaN 的厚度（t_1），是为了减小来自铁掺杂半绝缘 GaN 模板的非故意铁掺杂对非故意掺杂氮化镓层的影响，这种现象称为氮化镓中的铁记忆效应 [28,29]。因此，我们选取了两种不同厚度的非故意掺杂 GaN层，即 200 nm 和 1000 nm，以观察半绝缘模板带来的非故意铁掺杂的影响。设计高铝组分 AlGaN势垒层和 AlN中间层的厚度，旨在提高二维电子气迁移率并尽量降低沟道的方块电阻。AlN 厚度选为 0.7 nm 和 1.2 nm，因为厚度低于 0.7 nm 时，AlN 无法显著降低合金无序散射。此外，AlN 厚度超过 1.2 nm 会因应变增大而导致势垒层出现微裂纹。AlGaN 厚度选为 21 nm 和 31 nm，以确定电荷密度的增幅及其对二维电子气迁移率的影响。我们还沉积了厚度为 25 nm 的中等厚度 AlGaN，但由于沉积条件发生漂移，AlGaN层中的铝组分发生了变化，因此无法将其二维电子气电荷密度和迁移率值与其他样品进行比较。

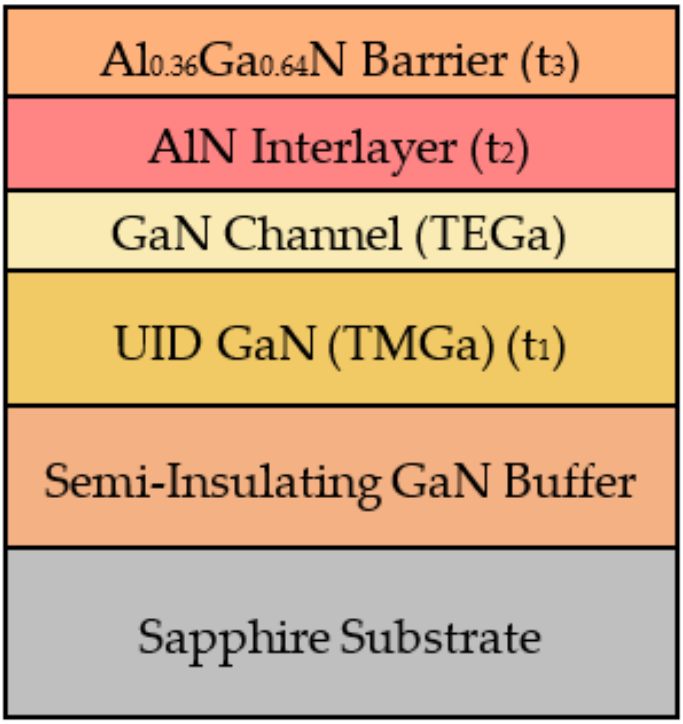


图1。 AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管结构的外延层。

表 1。不同 AlGaN/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管样品的沉积参数。

样品编号	UID-GaN 厚度（nm）（t_1）	氮化铝厚度（纳米）（t_2）	$Al_{0.36}Ga_{0.64}N$ 厚度 (nm) (t_3)	沉积温度 (°C)
1	200	0.7	21	
2	200	1.2	21	
3	1000	0.7	21	1210
4	1000	0.7	31	
5	1000	1.2	31	

已知在 ≥1000 °C 下使用三乙基镓沉积的 GaN，与使用三甲基镓沉积相比，其 X射线衍射 ω 摇摆曲线的半高全宽低 20–40%，电子迁移率则提高 30% 以上 [30–32]。此外，由于三乙基镓前驱体的蒸气压比三甲基镓低 10–50 倍，使用该前驱体可将沉积速率精确控制在低于 1 Å/s [33]。Yamada 等人已证明，使用三乙基镓可控沉积高铝组分（>35%）AlGaN 势垒层和 GaN沟道，能够将高电子迁移率晶体管中的二维电子气迁移率提高至 2000 cm^2/V.s [6], ，尽管使用三乙基镓沉积 GaN 的速率远低于三甲基镓。这可能使 GaN 高电子迁移率晶体管的沉积时间增加近 10 倍。因此，本研究结合了三甲基镓和三乙基镓的优点：使用三甲基镓沉积厚 GaN 缓冲层，并使用三乙基镓沉积薄 GaN沟道（40 nm）及 AlGaN势垒层，以获得更优异的晶体质量 [32]。

沉积后，使用范德堡法通过霍尔测量对方块电阻、迁移率和电荷进行了测量。还使用汞CV仪器进行了电容–电压（CV）测量，以确定AlGaN/AlN/GaN异质结构中的电荷控制。使用Bruker IconAFM在轻敲模式下进行原子力显微镜（AFM）测量，分析了表面形貌。为分析AlGaN势垒层和AlN中间层的成分和厚度，在校准

使用高分辨率X射线衍射仪 Panalytical Empyrean 表征结构。使用 Panalytical Empyrean 进行XRR测量，以测定AlGaN势垒层的厚度。

3. 结果与讨论

首先，研究了三种不同的三乙基镓GaN沟道沉积温度：1100 °C、1210 °C和1270 °C，同时将采用三甲基镓沉积非故意掺杂GaN的温度维持在1210 °C。三乙基镓GaN沟道厚度保持为70 nm，以便利用Laytec EpiTT通过原位反射率测量获得沉积速率。结果发现，随着温度从1100 °C升至1270 °C，GaN沉积速率持续下降，从0.097 nm/s降至0.013 nm/s（图2a）。在1210 °C至1270 °C之间，沉积速率从0.083 nm/s急剧降至0.013 nm/s，表明1270 °C时沉积处于解吸受限区间。这可能影响总体产率并增加制造成本。与1210 °C相比，1100 °C和1270 °C时的表面粗糙度分别增加了近38%和102%（图2b）。然而，1100 °C和1270 °C沉积温度下表面粗糙度的表现有所不同。1100 °C时台阶聚集非常严重，但表面起伏较小；而1270 °C时表面起伏较大，但台阶聚集极少（图2b）。不同类型表面粗糙度的成因很可能主要与沉积动力学有关。1100 °C时，镓在GaN中的掺入量较高（图2a），但由于温度较低，吸附原子的横向扩散受到影响，导致台阶聚集。相反，1270 °C时镓的掺入量极低（图2a）（沉积几乎受解吸限制），但较高的热能会减少台阶聚集。此外，表面起伏增大表明1270 °C时GaN沉积不均匀。最终确定，最优沉积温度为1210 °C，此时表面粗糙度最低，沉积速率适中。

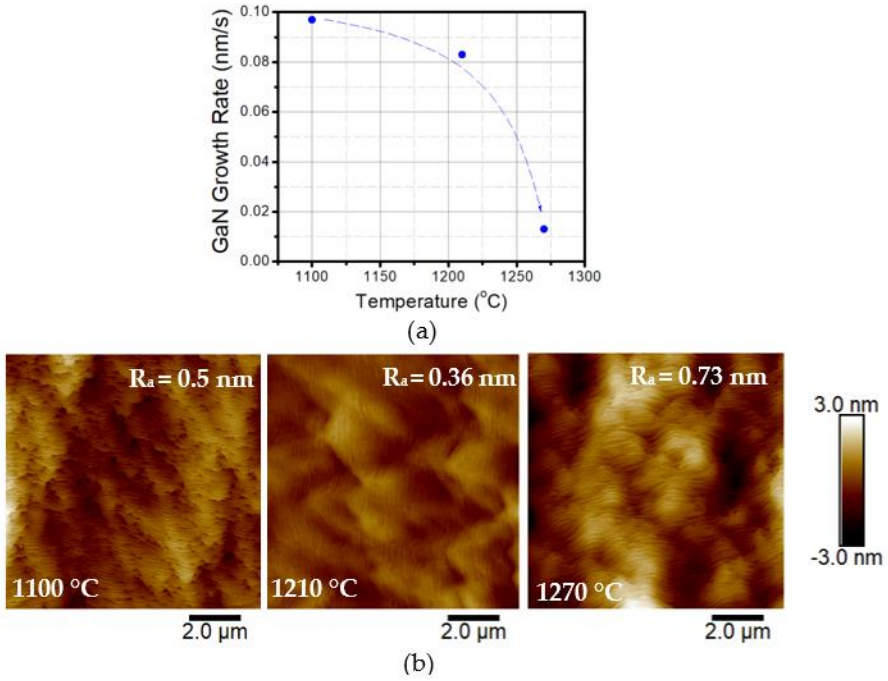
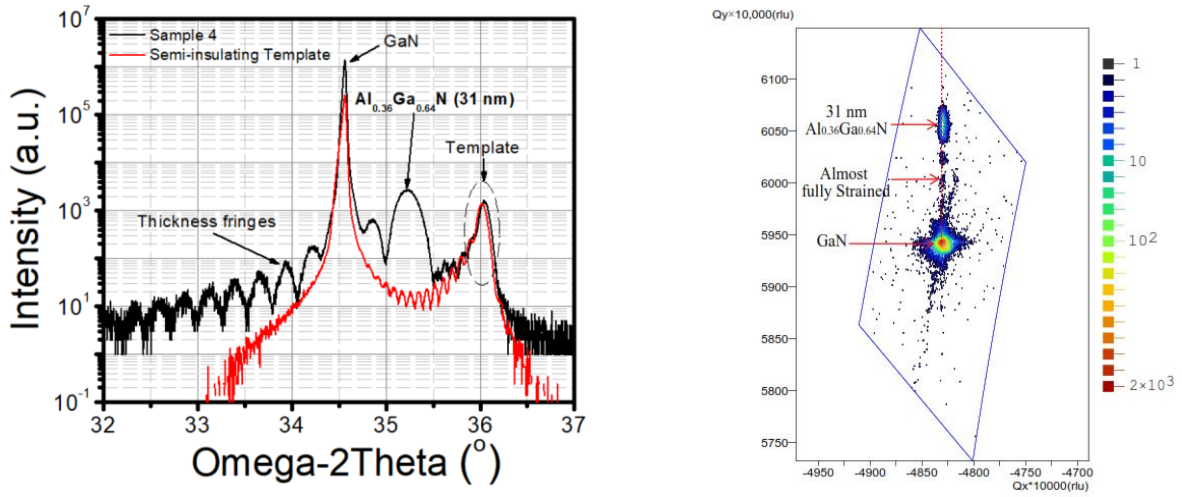


图2. (a) 不同沉积温度下的沉积速率（蓝色圆点为实验测得的数据，蓝色虚线为视觉参考线）、ω摇摆曲线的半高全宽，以及 GaN沟道的表面粗糙度（**b**）。。

采用ω–2θ扫描测量AlGaN厚度（图3a），并通过倒易空间映射（RSM）技术确定AlGaN层的组分（图3b）。为校准AlGaN组分和厚度，采用不同的TMAl流量和固定的三乙基镓流量（15μmol/min），沉积了AlGaN/GaN超晶格结构（重复周期数为5–10），其中AlGaN厚度为2–4 nm，GaN厚度为2–5 nm。GaN沉积速率根据厚层（>100 nm）GaN沉积期间，通过原位反射率监测系统获得的反射率数据确定，且使用相同的三乙基镓流量。随后，使用X射线衍射仪（XRD）对AlGaN/GaN超晶格层进行ω–2θ测量，并使用Panalytical X'pert Epitaxy软件拟合，以获得厚度和组分。使用三种不同TMAl流量、固定三乙基镓流量的三种独立超晶格结构，建立了AlGaN组分、厚度与TMAl流量之间的线性关系。之后，选择特定的TMAl流量（4.6 μmol/min），以三乙基镓流量15 μmol/min获得36%的AlGaN组分。随后通过XRR和RSM测量分别进一步验证厚度和组分值。XRR和RSM测量的数据分别使用Panalytical AMASS 1.0 [34] 和X'pert Epitaxy 4.5a [35] 软件进行拟合。测得AlGaN层的沉积速率约为0.14 nm/s。对GaN（–1–14）衍射峰进行的RSM显示，沉积在GaN上的31 nm厚AlGaN（36%）势垒层几乎完全受应变，且含有0.7 nm厚的氮化铝中间层。这也表明AlGaN峰展宽非常小，说明材料质量很高。氮化铝层在相同沉积条件下，使用TMAl和NH_3 沉积。氮化铝层的厚度（沉积速率为0.05 nm/s）采用与上述类似的校准方法确定。

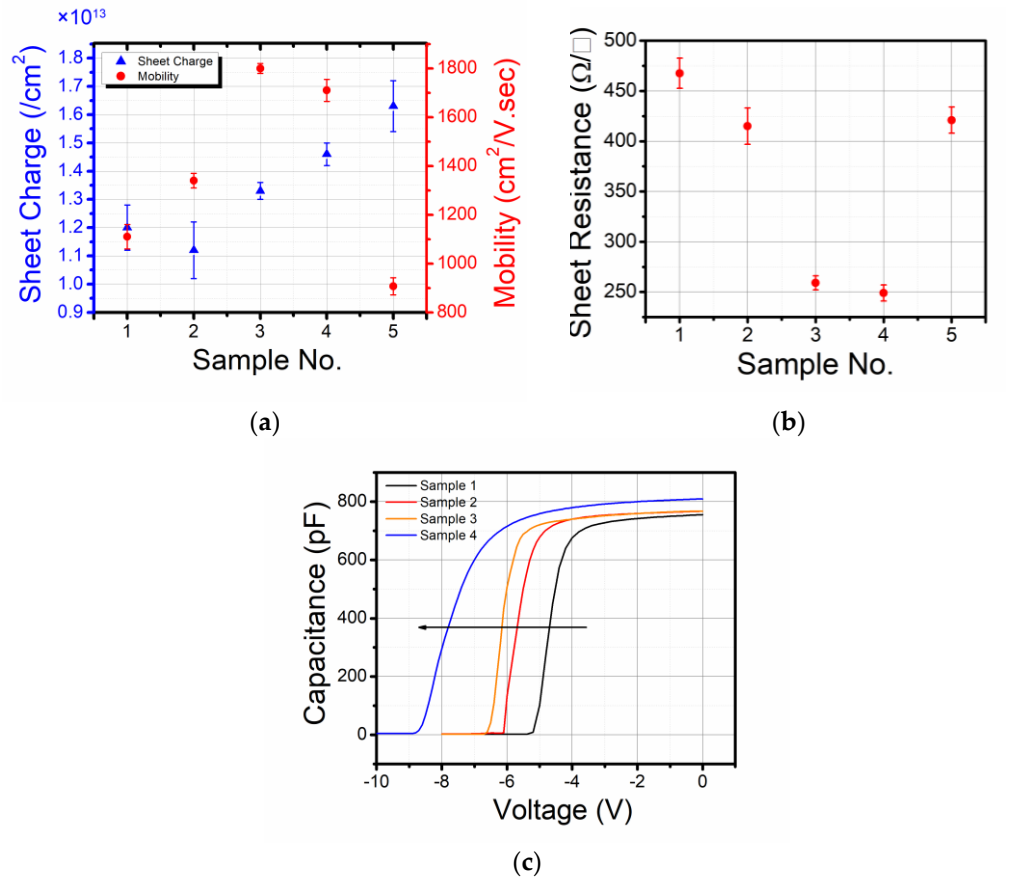


(**a**) (**b**)

图3。 **(a)** Omega–2theta，以及样品4在GaN (–1–14)衍射峰处测得的**(b)** 倒易空间映射扫描，测量使用了 ng 高分辨率X射线衍射.

对所有样品进行了霍尔测量，以便为沉积条件优化提供反馈。各样品的面电荷密度和室温迁移率绘于图4a。与样品1相比，样品2的AlN厚度（t_2）从0.7 nm增加到1.2 nm，以研究合金散射的影响。样品2的迁移率从样品1的1110 $cm^2/V.s$提高到1340 $cm^2/V.s$。因此，迁移率提高表明随着AlN厚度增加，合金散射减弱。然而，面电荷略有下降，从 1 2 × 10^{13} ^{2} 1 12 × 。/ 10^{13} ^{2}, 2 cm降至。/cm，这一结果属于异常值。二维电子气电荷密度略有下降，可能是由于铁掺杂半绝缘GaN模板之间存在差异：用于沉积样品2的模板，其表面粗糙度比样品1所用模板高30%。这也可能是样品1到样品2的沉积均匀性略有变化所致。在样品3中，非故意掺杂GaN层厚度（t_1）从200 nm增加到1000 nm，导致迁移率从1110 cm^2/Vs（样品3）显著变化至1800 $cm^2/V.s$，电荷也从1.2 × $10^{13}/cm^2$ （样品3）增加到1.33 × $10^{13}/cm^2$。迁移率和电荷增加的可能原因，是二维电子气沟道与非故意掺杂GaN（TMGa）和半绝缘GaN模板之间界面的距离增大。半绝缘层掺有铁，会俘获GaN层中的非故意背景载流子。如果二维电子气沟道靠近铁掺杂半绝缘层，体俘获现象可能会影响电子输运[36–38]。*Dmitri S. Arteev* 等人也报道了非故意掺杂GaN缓冲层或沟道层厚度对铁掺杂GaN缓冲层AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管中二维电子气电荷和迁移率特性的影响[39]。与样品相比，样品 4 3 1 33 × 10^{13} ^{2} 3 1 46 × 10^{13} ^{2} 1800 的AlGaN厚度（t_3）从21 nm增加到31 nm，因表面耗尽减弱，面电荷从。/cm（样品）增加到。/cm；而与样品3相比，迁移率从$cm^2/V.s$降至1710 $cm^2/V.s$。最可能的原因是沟道中的应变诱导迁移率降低[4] 或载流子间散射增强[5]。最后，在样品5中，我们尝试将AlN厚度（t_2）从0.7 nm增加到1.2 nm，同时保持AlGaN厚度（t_3）为31 nm，以减弱合金散射；但迁移率从1710 $cm^2/V.s$降至907 $cm^2/V.s$。另一方面，由于AlN中间层变厚，表观导带偏移（ΔE_C）增大，面电荷密度也从1.46 × $10^{13}/cm^2$ 增加到1.63 × $10^{13}/cm^2$ 。图4b显示了不同样品的总体方块电阻。对样品1–4进行了电容-电压测量，以分析AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管结构中不同非故意掺杂GaN厚度（t_1）、AlN中间层厚度（t_2）和AlGaN势垒层厚度（t_3）下的电荷分布（图4c）。电容-电压

样品5的测量结果因存在微裂纹而失效（图4c未示出）。图4c中电容曲线的平台表明AlGaN/AlN/GaN异质结构中存在二维电子气。AlN中间层厚度（t_2）从0.7 nm（样品1）增加到1.2 nm（样品1），使夹断电压从–5.3 V移至–6.13 V，表明样品2的二维电子气面电荷密度增加。AlN中间层厚度增加后出现这一结果是预期的。然而，霍尔测量显示，与样品1相比，样品2的二维电子气电荷密度从1.2 × 10^{13}/cm^2 降至1.12 × 10^{13}/cm^2 。霍尔测量与电容-电压测量之间的差异可能与表面粗糙度和/或沉积均匀性的变化有关。此外，样品3的非故意掺杂GaN层厚度（t_1）从200 nm增加到1000 nm后，夹断电压降低了–1.35 V，表明二维电子气电荷密度增加。 二维电子气电荷增加与非故意掺杂GaN沟道中从铁掺杂GaN缓冲层非故意引入的受主型铁掺杂剂减少有关[39]。AlGaN势垒层厚度从21 nm增加到31 nm后，夹断电压进一步从–6.65 V（样品3）降至–8.85 V（样品4），表明二维电子气电荷密度提高。在低温（77 K）下，样品3和样品4的霍尔迁移率分别为8570 cm^2/V.s和7830 cm^2/V.s（表2），与厚层、高组分AlGaN势垒层高电子迁移率晶体管结构所记录的先进水平低温迁移率（>5500 cm^2/V.s、<300 Ω/□）相当[8,13,26]，这证明AlN/GaN界面极为平滑，且沟道材料质量极高（图5）。



(**a**) (**b**)

(**c**)

图4. **(a)** 二维电子气面电荷和迁移率，**(b)** 方块电阻，以及**(c)** 不同样品的电容–电压测量。

表2. 样品3、样品4和样品5之间的比较数据.

样品 No.	霍尔测量				R_a (纳米)
	n_s (厘米$^{-2}$) × 10^{13}	μ (cm^2/V.s) (300 K)	μ (cm^2/V.s) (77 K)	R_{SH} (Ω/□)	
3	1.33	1800	8570	259	0.42
4	1.46	1710	7830	249	0.27
5	1.63	907	3840	421	0.44

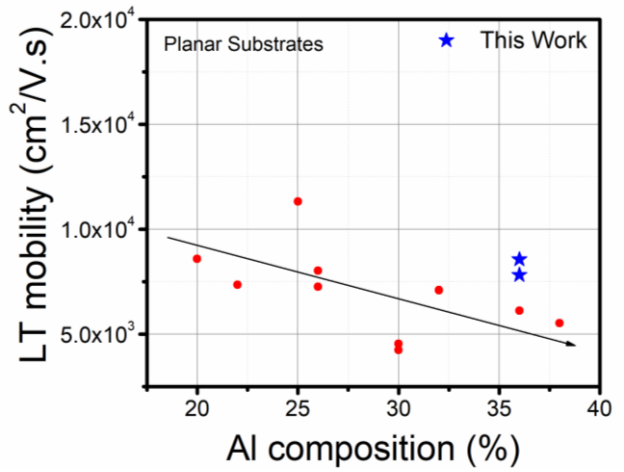


图5。平面衬底上AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管的二维电子气低温（LT）（77K）迁移率随铝组分变化的比较；参考文献 [8],[13],[15],[27],[40–44]。

对比样品4（t_2 = 0.7 nm）和样品5（t_2 = 1.2 nm），室温和低温迁移率分别从1710 cm²/V.s降至907 cm²/V.s、从7830 cm²/V.s降至3840 cm²/V.s。通过AFM扫描可以部分分析这种退化。图6a、b展示了样品4和样品5的AFM扫描图（10 μm × 10 μm）。与样品4相比，样品5的表面粗糙度增加了63%，且出现了更多台阶聚集。此外，图6c显示样品5中存在微裂纹。因此，较厚的氮化铝层（1.2 nm）与较厚的AlGaN层（t_1 = 31 nm）共同作用，使势垒层中的应变极高，足以导致样品5产生微裂纹。因此，沟道中二维电子气迁移率的退化可能是由界面粗糙度增加所致，进而导致界面质量下降[26,45,46]。从图6c可以理解样品5中二维电子气迁移率的大幅退化。微裂纹显著增加了二维电子气的散射，从而降低了迁移率。进一步优化沉积工艺确实能够提高二维电子气迁移率。

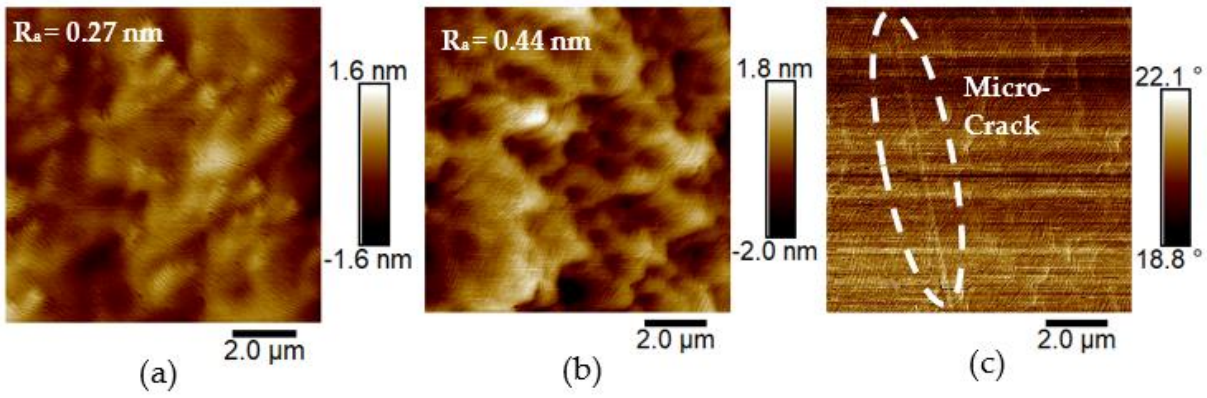
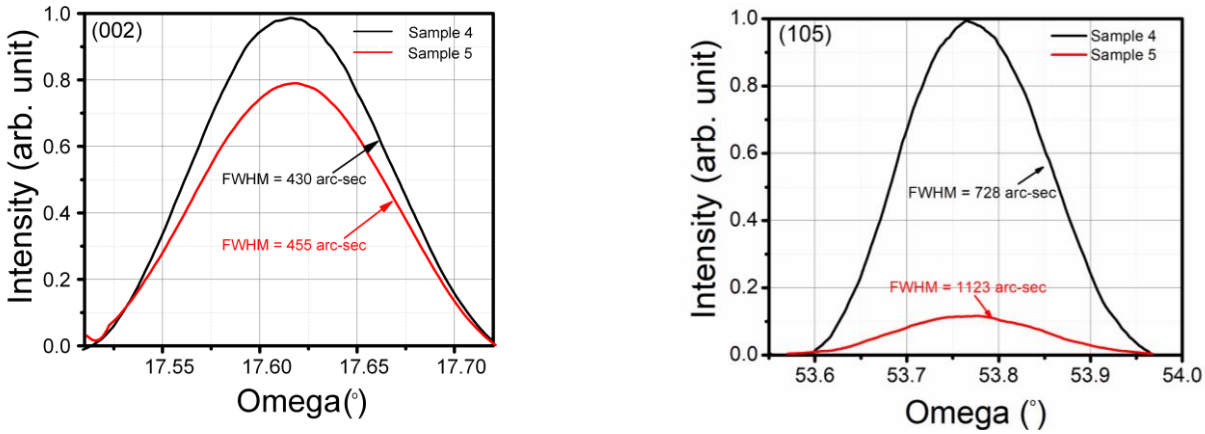


图 6. （**a**）样品 4 和（**b**）样品 5 的 AFM 高度传感器扫描图，以及（**c**）样品 5 的相位传感器扫描图，显示出微–裂纹。

对样品4和样品5进行了X射线衍射ω摇摆曲线测量，以分析AlGaN势垒层的质量。图7a、b分别展示了样品4和样品5中AlGaN（002）和（105）晶面的ω摇摆曲线。与氮化铝厚度为t_2 = 0.7 nm的样品4相比，样品5中氮化铝厚度增加至t_2 = 1.2 nm，使AlGaN层的半高全宽在（002）晶面上增加了25角秒，在（105）晶面上增加了395角秒。随着应变增大，AlGaN层中的位错密度趋于增加，从而使界面质量下降，并显著降低二维电子气迁移率。



(**a**) (**b**)

图 7. 样品 4 的 AlGaN **(a)** (002) 晶面和 **(b)** (105) 晶面的 ω 摇摆曲线，以及样品 5 的 31 nm $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管.

从上述分析可以看出，要实现具有非常低方块电阻（ /□）的厚（>30 nm）、高组分（ >35 <250 %）、无Ω裂纹AlGaN势垒层高电子迁移率晶体管，沉积工艺需要进行相当程度的优化。实验数据证明，可以在蓝宝石上生长出具有非常低方块电阻的高质量、高功率AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管结构。

图 8 显示了样品 3 的传输长度法（TLM）测量结果：方块电阻为 0.52 Ω.mm，接触电阻为 248 Ω/□；所得方块电阻与霍尔测量结果相近。霍尔测量与 TLM 测量之间的微小差异可能源于接触形成工艺不同：霍尔测量使用铟接触，而 TLM 测量则采用电子束蒸发技术沉积 Ti/Al/Ni 接触。此外，霍尔测量可能给出方块电阻的平均值，而 TLM 测量提供的是局部方块电阻。

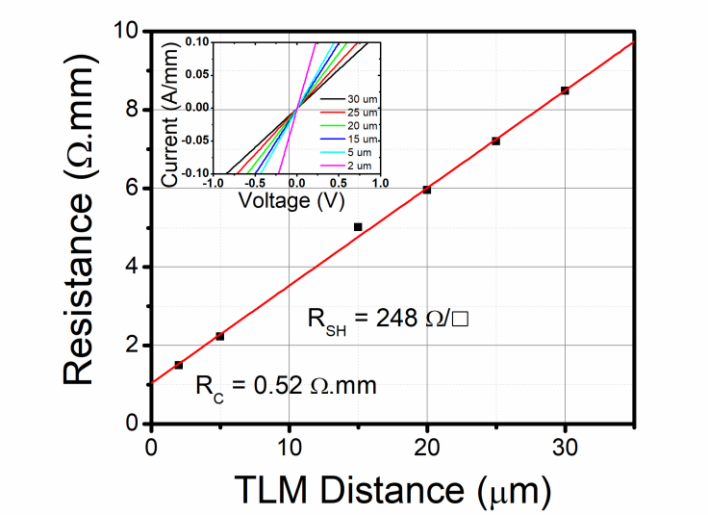
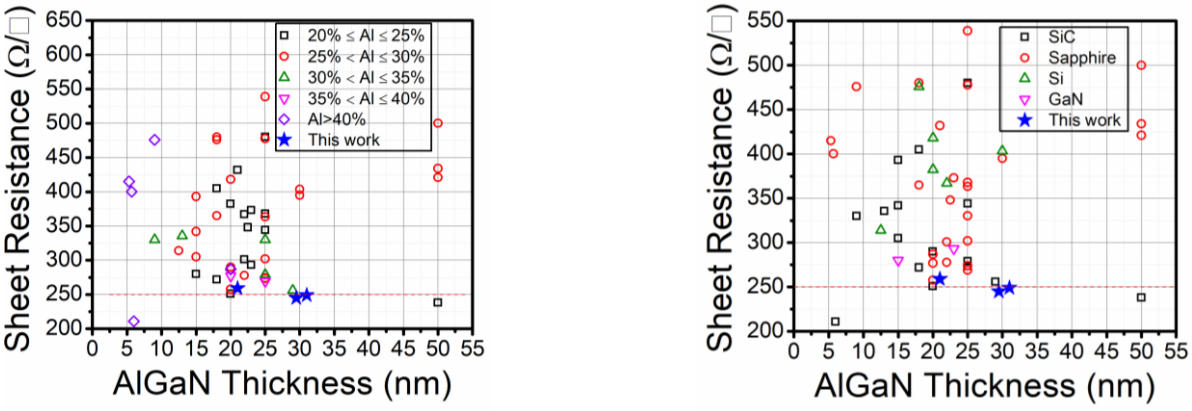


图 8。 样品 3的TLM测量，采用 21 nm $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管结构。

图9a展示了这项工作的重要性。此前报道的大多数方块电阻为~250 Ω/□或更低的AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管，要么具有较薄的势垒层（≤25 nm），要么具有较低的Al组分（≤30%）。从图9a可以清楚看出，采用更厚（>30 nm）且高组分（>35%）的AlGaN势垒层实现低方块电阻十分重要。高势垒厚度、高组分和低方块电阻的组合，将确保器件在降低栅极漏电并提高击穿性能的同时实现高功率工作。图9b显示，高性能高电子迁移率晶体管大多沉积在碳化硅衬底上。然而，在本工作中，我们展示了一种先进且简化的蓝宝石衬底上的AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管设计，其工作性能可达到沉积在碳化硅衬底或GaN衬底上的GaN高电子迁移率晶体管的相近水平，而后两种衬底的成本相对更高。



(**a**) (**b**)

图9。 不同Al组分（**a**）和不同衬底（**b**）下方块电阻随AlGaN厚度的变化；参考文献[4]、[7]、[8]、[12–15]、[26]、[27]、[40–44],[47–69]。

4. 结论

总之，借助三乙基镓和受控沉积工艺，已在蓝宝石上沉积出具有先进水平方块电阻的高质量厚势垒 $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$/氮化铝/GaN 高电子迁移率晶体管结构。在室温和 77 K 下均测得高迁移率，证明了势垒层与沟道之间的低界面粗糙度。通过采用低于 0.15 nm/s 的沉积速率，实现了厚且高组分、无裂纹的 AlGaN 势垒层高电子迁移率晶体管。采用高组分（>35%）和厚（>30 nm）的 AlGaN 势垒层，可在沟道中获得较大的自发极化和压电极化诱导电荷，有助于降低方块电阻。总之，实验

数据表明，Ga极性蓝宝石衬底上的AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管具有潜力 ，这不仅能够处理更高功率，还可以设计得更具成本效益。

作者贡献： 概念构思：S.M.、C.G.和S.S.P.；方法学：S.M.、C.G.和S.S.P.；验证：S.M.、C.G.和S.S.P.；正式分析：S.M.、C.L.、C.G.和S.S.P.；调查研究：S.M.、C.G.和S.S.P.；资源提供：C.G.和S.S.P.；数据整理：S.M.、C.L.、J.C.、M.T.A.、S.S.、R.B.和G.W.；撰写——初稿：S.M.；撰写——审阅与编辑：S.M.、C.G.和S.S.P.；可视化：S.M.、C.G.和S.S.P.；监督：C.G.和S.S.P.；项目管理：C.G.和S.S.P.；资金获取：C.G.和S.S.P.。所有作者均已阅读并同意稿件的已发表版本。

资助： 本研究由海军研究办公室资助：N00014-22-1-2267，并由 Paul Maki 负责监督。

数据可用性声明： 支持本研究结论的数据可在提出合理请求后向通讯作者获取。

利益冲突： 作者声明不存在利益冲突。

参考文献

1. Shen, L.; Palacios, T.; Poblenz, C.; Corrion, A.; Chakraborty, A.; Fichtenbaum, N.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Speck, J.S.; Mishra, U.K. 经氟等离子体表面处理的未钝化高功率深凹槽 GaN 高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2006, 27, 214–216. https://doi.org/10.1109/led.2006.871887. 2. Higashiwaki, M.; Mimura, T.; Matsui, T. 在 4H-碳化硅衬底上的 AlGaN/GaN异质结构场效应晶体管，其电流增益截止频率为 190 GHz。《应用物理快报：快报》2008, 1, 021103. https://doi.org/10.1143/apex.1.021103. 3. Wright, A.; Nelson, J.M. AlN、GaN 和 InN 一致的结构性质。《物理评论B辑》1995, 51, 7866–7869. https://doi.org/10.1103/physrevb.51.7866. 4. Polyakov, V.M.; Cimalla, V.; Lebedev, V.; Köhler, K.; Müller, S.; Waltereit, P.; Ambacher, O. Al 含量对 GaN/AlxGa1–XN/GaN异质结构中二维电子气输运性质的影响。《应用物理快报》2010, 97, 142112. https://doi.org/10.1063/1.3499656. 5. Ahmadi, E.; Keller, S.; Mishra, U.K. 用于解释 N 极性和 Ga 极性 AlGaN-GaN异质结构中二维电子气迁移率随电荷密度变化行为的模型。《应用物理学杂志》2016, 120, 115302. https://doi.org/10.1063/1.4962321. 6. Yamada, A.; Junya, Y.; Nakamura, N.; Kotani, J. 采用金属有机气相外延生长、具有应变控制高铝组分 AlGaN 势垒层的低方块电阻高电子迁移率晶体管结构。《晶体生长杂志》2021, 560, 126046. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126046. 7. Wang, X.; Hu, G.; Ma, Z.; Ran, J.; Wang, C.; Xiao, H.; Tang, J.; Li, J.; Wang, J.; Zeng, Y.; 等. 采用金属有机化学气相沉积生长的 AlGaN/AlN/GaN/碳化硅高电子迁移率晶体管结构，以高迁移率 GaN 薄层作为沟道。《晶体生长杂志》2007, 298, 835–839. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.10.219. 8. Gaska, R.; Yang, J.; Andrei, O.; Chen, Q.Y.; Ijaz Khan, M.; Orlov, A.; Snider, G.L.; Shur, M. 在 6H-碳化硅衬底上生长的 AlGaN–GaN异质结构中的电子输运。《应用物理快报》1998, 72, 707–709. https://doi.org/10.1063/1.120852. 9. Melton, W.A.; Pankove, J.I. 蓝宝石上的 GaN 生长。《晶体生长杂志》1997, 178, 168–173. https://doi.org/10.1016/s0022- 0248(97)00082-1. 10. O'Hanlon, T.J.; Zhu, T.; Fabien Massabuau; Oliver, R.A. 外延层完全并合后，对异质外延 GaN/蓝宝石并合边界处位错的研究。《超显微镜》2021, 231, 113258. https://doi.org/10.1016/j.ul- tramic.2021.113258. 11. Cao, Y.; Wang, K.; Orlov, A.O.; Huili Grace Xing; Jena, D. 超薄二元 AlN⁄GaN 异质结中二维电子气的极低方块电阻和 Shubnikov–De-Haas 振荡。《应用物理快报》2008, 92, 152112. https://doi.org/10.1063/1.2911748. 12. Palacios, T.; Suh, C.-S.; Chakraborty, A.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K. 高性能增强型 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2006, 27, 428–430. https://doi.org/10.1109/LED.2006.874761. 13. Ding, G.-J.; Guo, L.; Zhang, X.; Chen, Y.; Xu, P.; Jia, H.; Zhou, J.; Chen, H. 蓝宝石衬底上不同铝含量 AlGaN/GaN异质结构的表征。《中国科学：物理学 力学 天文学》2010, 53, 49–53. https://doi.org/10.1007/s11433-010-0083-4. 14. Palacios, T.; Chakraborty, A.; Rajan, S.; Poblenz, C.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Speck, J.S.; Mishra, U.K. 面向 Ka 波段应用的高功率 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2005, 26, 781–783. https://doi.org/10.1109/led.2005.857701. 15. Gutierrez, P.; Tomas, A. 氮化物基晶体管高频性能的优化——编号 3206406；加利福尼亚大学：美国加利福尼亚州圣巴巴拉，2006年。 16. Xiao, ~~M.; Ma, Y.; Cheng, K.; Liu, K.; Xie, A.;~~ Beam, E.; Cao, Y.; Zhang, Y. 具有 P-GaN 终端的 3.3 KV 多沟道 AlGaN/GaN 肖特基势垒二极管。《IEEE 电子器件快报》2020, 41, 1177–1180. https://doi.org/10.1109/led.2020.3005934.

17. Nela, L.; Erine, C.; Ma, J.; Yildirim, H.K.; van Erp, R.; Peng, X.; Cheng, K.; Matioli, E. 高性能增强型 AlGaN/GaN 多沟道功率晶体管。载于：2021年第33届国际功率半导体器件与集成电路研讨会（ISPSD）论文集，日本名古屋，2021年5月30日–6月3日；第143–146页。https://doi.org/10.23919/ispsd50666.2021.9452238. 18. Jiang, H.; Zhu, R.; Lyu, Q.; Lau, K.M. 栅极击穿后仍具关断态阻断能力的高压 P-GaN 高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2019, 40, 530–533. https://doi.org/10.1109/led.2019.2897694. 19. Jiang, H.; Lyu, Q.; Zhu, R.; Xiang, P.; Cheng, K.; Lau, K.M. 在硅衬底上制备的 1300 v 常关型 P-GaN 栅高电子迁移率晶体管，具有高导通态漏极电流。《IEEE 电子器件汇刊》2021, 68, 653–657. https://doi.org/10.1109/TED.2020.3043213. 20. Posthuma, N.; You, S.; Stoffels, S.; Wellekens, D.; Liang, H.; Zhao, M.; De Jaeger, B.; Geens, K.; Ronchi, N.; Decoutere, S.; 等. 可用于工业生产的 200 mm P-GaN 增强型 GaN-on-Si 功率技术。载于：2018年 IEEE 第30届国际功率半导体器件与集成电路研讨会（ISPSD）论文集，美国伊利诺伊州芝加哥，2018年5月13–17日。https://doi.org/10.1109/ispsd.2018.8393658. 21. Lee, J.-H.; J G.; K 势垒的高优值（V^2_{BR}/R_{ON}）AlGaN/GaN 功率高电子迁移率晶体管。《IEEE电子器件学会期刊》2018, 6, 1179–1186. https://doi.org/10.1109/jeds.2018.2872975. 22. Bahat-Treidel, E.; Brunner, F.; Hilt, O.; Cho, E.J.; Würfl, J.; Tränkle, G. 具有超过 1 kV 击穿电压和低 R_{ON} × A 的 AlGaN/GaN/GaN:C 背势垒异质结场效应晶体管。《IEEE 电子器件汇刊》2010, 57, 3050–3058. https://doi.org/10.1109/TED.2010.2069566. 23. Hao, J.; Xing, Y.; Fu, K.; Zhang, P.; Song, L.; Chen, F.; Yang, T.; Deng, X.; Zhang, S.; Zhang, B. 沟道/背势垒厚度对 AlGaN/GaN MIS 高电子迁移率晶体管击穿特性的影响。《半导体学报》2018, 39, 094003. https://doi.org/10.1088/1674- 4926/39/9/094003. 24. Wang, H.Y.; Chiu, H.C.; Hsu, W.C.; Liu, C.M.; Chuang, C.Y.; Liu, J.Z.; Huang, Y.L. $Al_xGa_{1-x}N$ 背势垒对 MCZ 硅衬底上六英寸 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管的影响。《涂料》2020, 10, 570. https://doi.org/10.3390/coatings10060570. 25. Einfeldt, S.; Kirchner, V.; Heinke, H.; Dießelberg, M.; Figge, S.; Vogeler, K.; Hommel, D. 拉伸平面应力下 AlGaN 的应变弛豫。《应用物理学杂志》2000, 88, 7029–7036. https://doi.org/10.1063/1.1326852. 26. Wang, C.; Wang, X.; Hu, G.; Wang, J.; Xiao, H.; Li, J. AlN 生长时间对 $Al_{0.38}Ga_{0.62}N$/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管结构电学性质的影响。《晶体生长杂志》2006, 289, 415–418. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.11.118. 27. Wang, C.; Wang, X.; Hu, G.; Wang, J.; Li, J.; Wang, Z. AlN 界面层对高铝含量 $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$/GaN 高电子迁移率晶体管结构电学性质的影响。《表面科学与技术》2006, 253, 762–765. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.01.017. 28. Heikman, S.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K. 通过金属有机化学气相沉积生长铁掺杂半绝缘 GaN。《应用物理快报》2002, 81, 439–441. https://doi.org/10.1063/1.1490396. 29. Heikman, S.; Keller, S.; Mates, T.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K. 铁掺杂 GaN 的生长与特性。《晶体生长杂志》2003, 248, 513–517. https://doi.org/10.1016/s0022-0248(02)01926-7. 30. Saxler, A.; Walker, D.; Kung, P.; Zhang, X.; Manijeh, R.; Solomon, J.S.; Mitchel, W.C.; Vydyanath, H.R. 三甲基镓和三乙基镓用于 GaN 生长的比较。《应用物理快报》1997, 71, 3272–3274. https://doi.org/10.1063/1.120310. 31. Kwang, H.S.; Dong, J.K.; Moon, Y.-T.; Park, S.-J. 使用三甲基镓和三乙基镓通过金属有机化学气相沉积生长的 GaN 特性。《晶体生长杂志》2001, 233, 439–445. https://doi.org/10.1016/s0022-0248(01)01605-0. 32. Hospodková, A.; František, H.; Tomáš, H.; Zuzana, G.; Hubik, P.; Hývl, M.; Pangrác, J.; Dominec, F.; Košutová, T. 通过在 AlGaN/GaN 界面形成 V 形坑改善高电子迁移率晶体管结构中的电子输运性质。《ACS应用材料与界面》2023, 15, 19646–19652. https://doi.org/10.1021/acsami.3c00799. 33. Stringfellow, G.B. 有机金属气相外延的新型前驱体。《晶体生长杂志》1993, 128, 503–510. https://doi.org/10.1016/0022-0248(93)90376-8. 34. Panalytical AMASS，1.0，Malvern Panalytical B.V.，荷兰阿尔默洛，2018年。 35. Panalytical X'pert Epitaxy，4.5a，Malvern Panalytical B.V.，荷兰阿尔默洛，2018年。 36. Li, X.; Bergsten, J.; Nilsson, D.; Örjan, D.; Pedersen, H.; Niklas, R.; Janzén, E.; Forsberg, U. 用丙烷生长用于高电子迁移率晶体管应用的碳掺杂 GaN 缓冲层：生长与器件结果。《应用物理快报》2015, 107, 262105 10 1063 1 4937575 . https://doi.org/ . / . . 37. Zanato, D.; Gokden, S.; Balkan, N.; Ridley, B.K.; Schaff, W.J. 界面粗糙度和位错散射对 GaN/AlGaN 中二维电子气低温迁移率的影响。《半导体科学与技术》2004, 19, 427–432. https://doi.org/10.1088/0268-1242/19/3/024. 38. Liu, J.P.; Ryou, J.-H.; Yoo, D.; Zhang, Y.; Limb, J.; Horne, C.A.; Shen, S.-C.; Dupuis, R.D.; Hanser, A.; Preble, E.A.; 等. 在半绝缘 GaN 衬底上生长、无需再生长界面电荷的 III 族氮化物异质结构场效应晶体管。《应用物理快报》2008, 92, 133513. https://doi.org/10.1063/1.2906372. 39. Arteev, D.S.; Sakharov, A.V.; Lundin, W.V.; Zavarin, E.E.; Nikolaev, A.E.; Tsatsulnikov, A.F.; Ustinov, V.M. 具有铁掺杂 GaN 缓冲层的 AlGaN/AlN/GaN异质结构散射分析。《材料》2022, 15, 8945–8945. https://doi.org/10.3390/ma15248945.

40. Bergsten, J.; Chen, J.-T.; Gustafsson, S.; Malmros, A.; Forsberg, U.; Thorsell, M.; Janzén, E.; Rorsman, N. 采用优化的 AlGaN/GaN界面生长工艺，在不使用 AlN排除层的情况下提升微波GaN高电子迁移率晶体管的性能。《IEEE 电子器件汇刊》2016, 63, 333–338. https://doi.org/10.1109/ted.2015.2501838. 41. Hu, W.; Ma, B.; Li, D.; Narukawa, M.; Miyake, H.; Hiramatsu, K. 利用偏切 (0 0 0 1) 蓝宝石提升 MOVPE 生长的 AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管结构中二维电子气的迁移率。《超晶格与微结构》2009, 46, 812–816. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2009.09.008. 42. Aggerstam, T.; Lourdudoss, S.; Radamson, H.H.; Sjödin, M.; Lorenzini, P.; Look, D.C. 对蓝宝石上 MOVPE 生长的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管（HEMT）结构界面性质的研究。《薄固体薄膜》. 2006, 515, 705 707 10 1016 2006 04 052 – . https://doi.org/ . /j.tsf. . . . 43. Miyoshi, M.; Egawa, T.; Ishikawa, H. 利用薄 AlN界面层提升 MOVPE 生长的 AlGaN/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管结构中迁移率的研究。《固态电子学》2006, 50, 1515–1521. https://doi.org/10.1016/j.sse.2006.07.016. 44. Wang, X.L.; Wang, C.M.; Hu, G.X.; Wang, J.X.; Chen, T.S.; Jiao, G.; Li, J.P.; Zeng, Y.P.; Li, J.M. 在蓝宝石衬底上通过金属有机化学气相沉积生长的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管的直流和射频性能得到改善。《固态电子学》2005, 49, 1387–1390. https://doi.org/10.1016/j.sse.2005.06.022. 45. Elsass, C.R.; Poblenz, C.; Heying, B.; Fini, P.; Petroff, P.M.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K.; Speck, J.S.; Saxler, A.; Elhamrib, S.; et al. 生长温度和 AlGaN盖层厚度对等离子体辅助分子束外延生长的 AlGaN/GaN异质结构中电子输运的影响。《日本应用物理学杂志》2001, 40, 6235–6235. https://doi.org/10.1143/jjap.40.6235. 46. Keller, S.L.; Parish, G.; Fini, P.T.; Sten Heikman; Chen, C.; Zhang, N.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K.; Wu, Y. 高迁移率 AlGaN/GaN 异质结构的金属有机化学气相沉积。《应用物理学杂志》1999, 86, 5850–5857. https://doi.org/10.1063/1.371602. 47. Gustafsson, S.; Chen, T., Jr.; Bergsten, J.; Forsberg, U.; Thorsell, M.; Janzen, E.; Rorsman, N. 采用碳掺杂缓冲层的微波 AlGaN/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管中的色散效应。《IEEE 电子器件汇刊》2015, 62, 2162–2169. https://doi.org/10.1109/ted.2015.2428613. 48. Kumar, V.; Lu, W.; Schwindt, R.; Kuliev, A.; Simin, G.; Yang, J.; Khan, M.A.; Adesida, I. 碳化硅衬底上的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管，其 F/Sub T/ 超过 120 GHz。《IEEE 电子器件快报》2002, 23, 455–457. https://doi.org/10.1109/led.2002.801303. 49. Yuen, Y.W.; Chiu, Y.-S.; Luong, T.-T.; Lin, T.-M.; Yen, T.H.; Lin, Y.C.; Chang, E.Y. 碳化硅衬底上 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管的生长与制备。载于：第10届 IEEE国际半导体电子学会议（ICSE）论文集，马来西亚吉隆坡，2012年9月19日至21日；第 729–732 页。https://doi.org/10.1109/smelec.2012.6417246. 50. Hao, Y.; Yang, L.; Ma, X.; Ma, J.; Cao, M.; Pan, C.; Wang, C.; Zhang, J. 具有 73% 功率附加效率的高性能微波凹槽栅 AlGaN/AlN/GaN MOS-HEMT。《IEEE 电子器件快报》2011, 32, 626–628. https://doi.org/10.1109/led.2011.2118736. 51. Shen, L.; Heikman, S.; Moran, B.; Coffie, R.; Zhang, N.-Q.; Buttari, D.; Smorchkova, I.P.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K. AlGaN/AlN/GaN高功率微波高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2001, 22, 457–459. https://doi.org/10.1109/55.954910. 52. Yusuke, K.; Ozaki, S.; Okamoto, N.; Hara, N.; Takao, O. 通过引入周期性微结构，为 AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管实现低电阻、低热预算欧姆接触。《IEEE 电子器件汇刊》2022, 69, 3073–3078. https://doi.org/10.1109/ted.2022.3169728. 53. Palacios, T.; Chakraborty, A.; Heikman, S.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K. 具有 InGaN背势垒的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2006, 27, 13–15. https://doi.org/10.1109/led.2005.860882. 54. Gong, J.-M.; Wang, Q.; Yan, J.-D.; Liu, F.-Q.; Feng, C.; Wang, X.-L.; Wang, Z.-G. 蓝宝石上生长的 GaN/AlGaN/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管中铁调制掺杂与非故意掺杂 GaN缓冲层的比较：材料生长与器件制备。《中国物理快报》2016, 33, 117303. https://doi.org/10.1088/0256-307x/33/11/117303. 55. Zhang, H.; Sun, Y.; Song, K.; Xing, C.; Yang, L.; Wang, D.; Yu, H.; Xiang, X.; Gao, N.; Xu, G.; et al. 展示了在大偏切角蓝宝石衬底上制备的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管。《应用物理快报》2021, 119, 072104. https://doi.org/10.1063/5.0056285. 56. Isra Mahaboob; Yakimov, M.M.; Hogan, K.; Rocco, E.; Tozier, S.; Shahedipour-Sandvik, F. 通过采用基于P-GaN体二极管的背栅，动态控制 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管的特性。《IEEE电子器件学会期刊》2019, 7, 581–588. https://doi.org/10.1109/jeds.2019.2915097. 57. Wang, X.; Wang, C.; Hu, G.; Wang, J.; Li, J. 蓝宝石衬底上通过金属有机化学气相沉积生长的 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$/AlN/GaN异质结构，其室温迁移率超过 2100 cm^2/vs。《固体物理学现状C辑》2006, 3, 607–610. https://doi.org/10.1002/pssc.200564130. 58. Miyoshi, M.; Imanishi, A.; Egawa, T.; Ishikawa, H.; Asai, K.; Shibata, T.; Tanaka, M.; Oda, O. 在 AlN/蓝宝石模板上生长的高质量AlGaN/AlN/GaN高电子迁移率晶体管的直流特性。《日本应用物理学杂志》2005, 44, 6490–6494. https://doi.org/10.1143/jjap.44.6490. 59. Cai, Y.; Zhou, Y.; Chen, K.J.; Lau, K.M. 采用氟化物基等离子体处理的高性能增强型 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管。《IEEE 电子器件快报》2005, 26, 435–437. https://doi.org/10.1109/led.2005.851122. 60. Li, H.; Keller, S.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K. 采用薄GaN盖层的高铝组分 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管结构的性能得到改善。《日本应用物理学杂志》2014, 53, 095504. https://doi.org/10.7567/jjap.53.095504.

61. Zhang, K.; Chen, X.; Mi, M.; Zhao, S.; Chen, Y.; Zhang, J.; Ma, X.; Hao, Y. 采用 O_2 等离子体注入的薄高铝组分势垒层增强型 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管。《固体物理学报 A 辑》2014, 212, 1081–1085. https://doi.org/10.1002/pssa.201431585. 62. Cheng, J.; Yang, X.; Sang, L.; Guo, L.; Hu, A.; Xu, F.; Tang, N.; Wang, X.; Shen, B. 采用大晶格失配诱导应力控制技术在硅衬底上生长的高迁移率 AlGaN/GaN 异质结构。《应用物理快报》2015, 106, 142106. https://doi.org/10.1063/1.4917504. 63. Ubukata, A.; Yano, Y.; Shimamura, H.; Yamaguchi, A.; Tabuchi, T.; Matsumoto, K. 用于 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管的高速率 AlGaN 缓冲层生长，以及在 6 英寸直径硅衬底金属有机气相外延系统中常压生长低碳 GaN。《晶体生长杂志》2013, 370, 269–272. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.10.023. 64. Zhang, J.; He, L.; Li, L.; Ni, Y.; Que, T.; Liu, Z.; Wang, W.; Zheng, J.; Huang, Y.; Chen, J.; et al. 采用无损伤凹槽栅结构的高迁移率常关型 Al_2O_3/AlGaN/GaN MISFET。《IEEE 电子器件快报》2018, 39, 1720–1723. https://doi.org/10.1109/led.2018.2872637. 65. Bouzid-Driad, S.; Maher, H.; Defrance, N.; Hoel, V.; De Jaeger, J.-C.; Renvoise, M.; Frijlink, P. 硅衬底上的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管，F_{Max} 达 206 GHz。《IEEE 电子器件快报》2013, 34, 36–38. https://doi.org/10.1109/led.2012.2224313. 66. Latrach, S.; Frayssinet, E.; Defrance, N.; Chenot, S.; Cordier, Y.; Gaquière, C.; Maaref, H. AlGaN/AlN/GaN 和 InAlN/AlN/GaN 高电子迁移率晶体管中的陷阱态分析。《当代应用物理》2017, 17, 1601–1608. https://doi.org/10.1016/j.cap.2017.09.003. 67. Xu, X.; Zhong, J.; So, H.; Norvilas, A.; Sommerhalter, C.; Senesky, D.G.; Tang, M. 晶圆级金属有机化学气相沉积生长硅上 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管结构，实现超高室温二维电子气迁移率。《AIP 进展》2016, 6, 115016. https://doi.org/10.1063/1.4967816. 68. Chu, J.; Wang, Q.; Jiang, L.; Feng, C.; Li, W.; Liu, H.; Xiao, H.; Wang, X. 在 GaN 衬底上生长的 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管中，室温二维电子气迁移率超过 2350 $cm^2/V{\cdot}s$。《电子材料杂志》2021, 50, 2630–2636. https://doi.org/10.1007/s11664-021-08778-y. 69. Yu, H.; Alian, A.; Peralagu, U.; Zhao, M.; Waldron, N.; Parvais, B.; Collaert, N. 通过静态平衡静电学提取的 AlGaN/AlN/GaN 表面态谱。《IEEE 电子器件汇刊》2021, 68, 5559–5564. https://doi.org/10.1109/ted.2021.3115086.

免责声明／出版者说明：所有出版物中所载的陈述、观点和数据均仅代表个别作者和撰稿人的意见，并非 MDPI 和／或编辑的意见。对于因内容中提及的任何观点、方法、说明或产品而对人身或财产造成的任何伤害，MDPI 和／或编辑概不负责。