



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

氮化镓基柔性电子器件的研究

作者姓名: 朱纪元

指导教师: 胡卫国 研究员

国家纳米科学中心

学位类别: 理学硕士

学科专业: 凝聚态物理

培养单位: 国家纳米科学中心

2020 年 6 月

Research on GaN-Based Flexible Electronic Devices

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Natural Science
in Condensed Matter Physics**

By

Zhu Jiyan

Supervisor: Professor Hu Weiguo

**National Center for Nanoscience and Technology, Chinese
Academy of Sciences**

June 2020

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：朱纪元

日期：2020年5月

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：朱纪元

日期：2020年5月

导师签名：胡卫国

日期：2020年5月

摘 要

基于 AlGaIn/GaN 异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 器件具有优异的电学性能, 能够应用于通信、雷达、电力电子等领域。新一代电子设备对便携性和柔性化提出了要求, 由于传统刚性衬底上的 GaN 基 HEMT 器件在受到形变时容易导致器件性能失效, 而柔性电子器件能够提供更高的灵活性, 可以拓宽电子器件的使用范围, 所以 GaN 基柔性 HEMT 器件受到了持续关注, 具有很重要的应用价值。压电电子学效应是压电特性和半导体特性之间的耦合, 通过利用应变诱导产生的压电极化电荷来调制界面处或结区的载流子的输运性质。具备非中心对称结构的 GaN 是压电半导体材料, 当 GaN 基柔性电子器件受到机械形变时, 所施加的形变会诱导产生压电极化, 进而影响器件中载流子的输运特性, 因此利用压电电子学效应可以分析机械形变与电子器件性能之间的关系。通过研究压电电子学效应调制 GaN 基柔性 HEMT 器件, 不仅为柔性电子器件和周围环境中的激励信号间自适应式的交互起到很好的桥梁作用, 而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的思路。本论文的主要研究内容及成果如下:

(1) AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备与柔性化

通过微纳加工工艺制备了 Si 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 并开发了一种简便易行的衬底转移技术制备出 GaN 基柔性 HEMT 阵列。半导体材料与器件的形貌测试表明, 刚性衬底上大规模且排列良好的 HEMT 阵列已完全转移到柔性衬底上, 而且柔性 HEMT 器件的电极依然保持完整。研究结果表明使用的衬底转移技术能够实现大尺寸、排列完整的阵列化转移, 可以为实现 GaN 基电子器件的柔性化提供新的解决办法, 同时也为后续针对柔性电子器件开展研究奠定了基础。

(2) 压电电子学效应调制 GaN 基柔性器件

氮化物材料特性的分析表明, 衬底去除会导致材料内部的缺陷密度增多, 应力状态改变, 引起异质结处二维电子气面密度降低, 进而影响柔性 HEMT 器件的电学性能。研究探索了压电电子学效应对 GaN 基柔性 HEMT 器件性能的调制, 并通过异质结能带的自洽计算深入理解了压电电子学效应调制的机理。实验结果

证明压电电子学效应可以有效地调节柔性 HEMT 器件的电学性能, 能够实现电子器件与外部刺激之间有效的相互作用, 而且研究还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的见解。

关键词: AlGaIn/GaN HEMT 器件, 柔性电子器件, 压电电子学, 二维电子气

Abstract

High electron mobility transistor (HEMT) devices based on AlGaIn/GaN heterojunction have excellent electrical properties and can be used in communications, radar, power electronics, and other fields. The new generation of electronic equipment has put forward requirements for portability and flexibility. GaN-based electronic devices on traditional rigid substrates are likely to cause the performance of devices to fail when subjected to deformations, but the flexible electronic devices can provide higher flexibility and expand the application fields of electronic devices, so GaN-based flexible HEMT devices have received continuous attention and have very important application value. The piezotronic effect is the coupling between piezoelectric and semiconductor characteristics, by using piezoelectric charge induced by strain to modulate the transport characteristics of carriers at the interface or junction. GaN with a non-centrosymmetric structure is a piezoelectric semiconductor material, when a GaN-based flexible electronic device is subjected to mechanical deformation, the applied mechanical deformation will induce piezoelectric polarization, which will affect the carrier transport characteristics. Therefore, the piezotronic effect can be used to analyze the relationship between mechanical deformation and electronic device performance. By studying the performance of flexible HEMT devices modulated by piezotronic effect, it not only serves as a good bridge for the seamless interaction between flexible electronic devices and the excitation signals in the surrounding environment, but also provides new ideas for the potential applications of piezotronics in flexible electronic devices. The main research contents and results of this paper are as follows:

(1) Preparation and flexibility of AlGaIn/GaN HEMT devices

The AlGaIn/GaN HEMT devices on Si substrates were fabricated by micro-nano processing technology, and a simple and easy substrate transfer technology was developed to prepare GaN-based flexible HEMT arrays. The morphology testes of

semiconductor materials and devices show that the large-scale and well-arranged HEMT arrays on the rigid substrate have been completely transferred to the flexible substrate, and the electrodes of the flexible HEMT devices remain intact. The results show that the substrate transfer technology can achieve large-size, complete arrays transfer, which provides a new solution for the flexibility of GaN-based electronic devices, and also lays the foundation for subsequent research on flexible electronic devices.

(2) The piezotronic effect modulated GaN-based flexible devices

The analysis of the properties of nitride materials shows that the removal of the substrate increases the defect density inside the material and changes the stress state, resulting in a reduction in the sheet density of the two-dimensional electron gas at the heterojunction, which affects the electrical performance of the flexible HEMT device. The modulation of piezotronic effect on flexible HEMT devices is explored, and the mechanism of piezotronic effect modulation is deeply understood through self-consistent calculation of heterojunction energy band. The results show that the piezotronic effect can effectively adjust the electrical performance of the flexible HEMT, and can achieve an effective interaction between electronic devices and external stimuli. And the research can also provide new insights into the potential applications of piezotronics in flexible electronic devices.

Key Words: AlGaIn/GaN HEMT device, flexible electronic device, piezotronics, two-dimensional electron gas

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 GaN 材料与器件的研究背景.....	1
1.1.1 GaN 材料的基本特性.....	1
1.1.2 GaN 基电子器件.....	4
1.2 压电电子学概论.....	6
1.2.1 压电电子学的发展.....	6
1.2.2 压电电子学器件的应用.....	10
1.3 柔性电子器件的现状.....	14
1.4 选题依据和研究内容.....	16
第二章 实验材料与方法.....	19
2.1 实验材料与仪器设备.....	19
2.1.1 材料与化学试剂.....	19
2.1.2 实验仪器和设备.....	19
2.2 材料表征方法.....	20
2.2.1 扫描电子显微镜.....	20
2.2.2 原子力显微镜.....	21
2.2.3 高分辨 X 射线衍射.....	22
2.2.4 共焦显微拉曼.....	22
2.3 电学性能测试.....	23
2.3.1 欧姆接触性能测试.....	23
2.3.2 电容-电压测试.....	25
2.3.3 半导体器件电学性能测试.....	25
第三章 AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备与柔性化.....	27
3.1 引言.....	27
3.2 AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备工艺.....	27
3.2.1 光刻工艺.....	30
3.2.2 器件隔离工艺.....	31

3.2.3 欧姆接触电极制备.....	31
3.2.4 肖特基接触电极制备.....	31
3.3 AlGaIn/GaN HEMT 器件的柔性化.....	32
3.4 本章小结.....	34
第四章 压电电子学效应调制 GaN 基柔性器件.....	35
4.1 引言.....	35
4.2 衬底转移前后半导体材料表征.....	35
4.2.1 共焦显微拉曼表征.....	35
4.2.2 高分辨 X 射线衍射表征.....	37
4.3 不同衬底器件电学性能分析.....	38
4.3.1 电容-电压分析.....	38
4.3.2 HEMT 器件电学性能分析.....	39
4.4 压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件.....	43
4.5 本章小结.....	47
第五章 结论与展望.....	49
5.1 结论.....	49
5.2 展望.....	50
参考文献.....	51
致谢.....	63
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	65

图目录

图 1.1 GaN 材料的晶体结构 (a) 纤锌矿结构; (b) 闪锌矿结构	2
图 1.2 不同极性的纤锌矿结构 GaN	3
图 1.3 Ga 面 AlGaIn/GaN 异质结中的极化效应	3
图 1.4 不同半导体器件的应用频率和输出功率	4
图 1.5 AlGaIn/GaN 异质结的能带图	5
图 1.6 AlGaIn/GaN HEMT 结构示意图	6
图 1.7 压电电子学的应用前景	7
图 1.8 纤锌矿晶体中的压电势。(a) 纤锌矿结构 ZnO 的原子模型; (b) 轴向应变下 ZnO 纳米线中压电势的数值计算分布情况, 纳米线的生长方向是 c 轴	8
图 1.9 能带分布示意图, 说明了压电势对 p-n 同质结的调制特性。施加应变后, 在结界面附近感应出压电极化离子电荷。(a) 和 (b) 中的颜色梯度表示压电势的分布, 红色表示正压电势, 蓝色表示负压电势。红色实线和黑色虚线分别显示了有和没有压电电子学效应 p-n 结的能带图	9
图 1.10 压电电子学效应对 AlGaIn/AlN/GaN 异质结微米线中异质结电子气的调制作用 (a) AlGaIn/AlN/GaN 异质结原子结构和能带图; (b) 应变作用下的源极-漏极电流; (c) 应变条件下局限在势阱中的异质结电子气片密度	10
图 1.11 单个 ZnO 纳米线应变门控晶体管 (SGT) (a) ZnO SGT 器件的 $I_{DS}-V_{DS}$ 输出特性, 其应变从 $\epsilon_g = -0.53\%$ 到 1.31% 的步幅为 0.2% ; (b) 同一 ZnO SGT 器件在三种不同的 V_{DS} 偏置值下的 $I_{DS}-\epsilon_g$ 传输特性: 分别为 1 V 、 0.75 V 和 0.5 V ; (c) ZnO 纳米线 SGT 在不同条件下的能带结构。纳米线的晶体学 c 轴从漏极指向源极	12
图 1.12 ZnO 纳米线葡萄糖传感器的示意图及其性能。(a) 用 GOx 修饰的未应变和应变的单根 ZnO 纳米线; (b) 合成的 ZnO 纳米线的 SEM 图像, 插图是单根纳米线的放大图。在 (c) -0.33% 和 (d) -0.79% 应变下随时间添加葡萄糖时, ZnO 纳米线的 $I-t$ 特性曲线	13
图 1.13 柔性电子器件的应用领域	14
图 1.14 柔性 HEMT (a) 3M 柔性胶带上的器件的光学照片; (b) 柔性 AlGaIn/GaN HEMT 的 I_D-V_{DS} 特性曲线	15
图 1.15 (a) GaN HEMT 材料叠层的横截面 TEM 图像; (b) 柔性 GaN 器件的	

图像; (c) 柔性 GaN HEMT 的 RF 性能曲线.....	16
图 2.1 电子束与样品物质交互作用产生的物理信号.....	21
图 2.2 AFM 的工作原理图.....	21
图 2.3 布拉格定律.....	22
图 2.4 拉曼散射和瑞利散射过程.....	23
图 2.5 传输线模型测试图.....	24
图 2.6 总电阻 R 和间距 L 的关系图	25
图 3.1 HEMT 器件结构示意图	28
图 3.2 半导体材料的 AFM 形貌图.....	29
图 3.3 HEMT 器件制备流程图	29
图 3.4 曝光和显影过程示意图.....	30
图 3.5 衬底转移的流程图.....	33
图 3.6 (a) 衬底转移前后 HEMT 的光学照片; (b) 3×3 HEMT 阵列的光学图像; (c) 单个柔性 HEMT 器件的 SEM 图像	34
图 4.1 拉曼光谱法测量应力原理。观察到应变晶体的声子频率相对于无应变值 ω_0 移动.....	36
图 4.2 衬底转移前后的 GaN (002) 面的 (a) 拉曼谱图和 (b) 摇摆曲线	37
图 4.3 Si 衬底和柔性衬底上 (a) C-V 曲线; (b) 载流子浓度与耗尽深度的分布 图.....	39
图 4.4 AlGaIn/GaN HEMT 器件的理论理想输出特性	40
图 4.5 AlGaIn/GaN HEMT 器件的直流电学性能。Si 衬底上 HEMT 器件的 (a) 输出曲线和 (b) 转移曲线; 柔性衬底上 HEMT 器件的 (c) 输出曲线和 (d) 转 移曲线; (e) 和 (f) 为不同衬底上 HEMT 器件的直流电学性能对比	41
图 4.6 压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件。(a) 施加外应力的装置; (b) 外 应力作用下的柔性 HEMT 器件的电学性能; (c) 压电电子学效应调制器件示意 图.....	44
图 4.7 AlGaIn/GaN 异质结界面处的能带图 (a) 不受力; (b) 有应力.....	45
图 4.8 不同外应力条件下的柔性 HEMT 器件的 (c) 输出特性曲线和 (d) 转移 特性曲线.....	46

表目录

表 1.1	不同半导体材料的基本参数.....	1
表 2.1	实验材料与化学试剂.....	19
表 2.2	主要仪器与设备.....	19

第一章 绪论

1.1 GaN 材料与器件的研究背景

1.1.1 GaN 材料的基本特性

半导体科技是信息技术产业的基础和支柱。从 1947 年第一支晶体管问世至今,丰富多样的电子器件推动了半导体产业的快速发展以及世界信息化和工业化的深度融合。过去的几十年见证了半导体科技的飞速发展,在半导体产业发展的过程中,半导体材料一直发挥着基石般的重要作用。迄今为止,半导体材料已从基于 Si 和 Ge 的第一代半导体材料扩展到基于 GaAs 和 InP 的第二代,再到以 GaN 和 SiC 为代表的第三代半导体材料^[1-3]。基于 GaN 和 SiC 的第三代半导体材料体现出巨大的优越性,它们具有禁带宽度大、击穿场强高等优异的材料特性,满足了雷达、通信等应用对大功率、高频、高压器件的需求^[4,5]。具有典型代表性的半导体材料的基本参数如表 1.1 所示。由表可知,与第一代、第二代半导体材料相比,宽禁带半导体 GaN 材料具有卓越的材料特性,可以克服传统半导体材料的劣势,能够使电子设备在恶劣的条件下仍然能够正常工作。GaN 作为新一代半导体材料吸引了消费电子、电动汽车、5G 通信系统以及光电器件等新兴技术领域的浓厚兴趣。

表 1.1 不同半导体材料的基本参数^[6,7]

Table 1.1 Basic parameters of different semiconductor materials^[6,7]

物理参数	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
禁带宽度 (eV)	1.12	1.42	3.25	3.39
电子迁移率 [$\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$]	1400	8500	950	1000
相对介电常数	11.4	13.1	9.7	8.9
击穿场强 (MV/cm)	0.3	0.4	3.0	3.3
热导率 [$\text{W}/(\text{cm}\cdot\text{K})$]	1.5	0.5	4.9	2.0
电子饱和速度 (10^7 cm/s)	1.0	2.0	2.0	2.7
Baliga 优值	1	11	73	180

GaN 半导体材料中存在三种晶体结构：纤锌矿结构、闪锌矿结构以及岩盐矿结构。晶体的离子性在某种程度上可以决定晶体结构形成的类型，晶体的离子性越强，就越容易形成纤锌矿结构。由于氮化镓是强离子性晶体，所以在通常环境情况下，纤锌矿结构不仅是半导体材料中最常见的同时也是热力学上的稳定结构，闪锌矿结构稳定性次之，属于亚稳态结构，而岩盐矿结构一般不常见，只在极端高压情况下才存在。GaN 材料的晶体结构如图 1.1 所示^[8]。

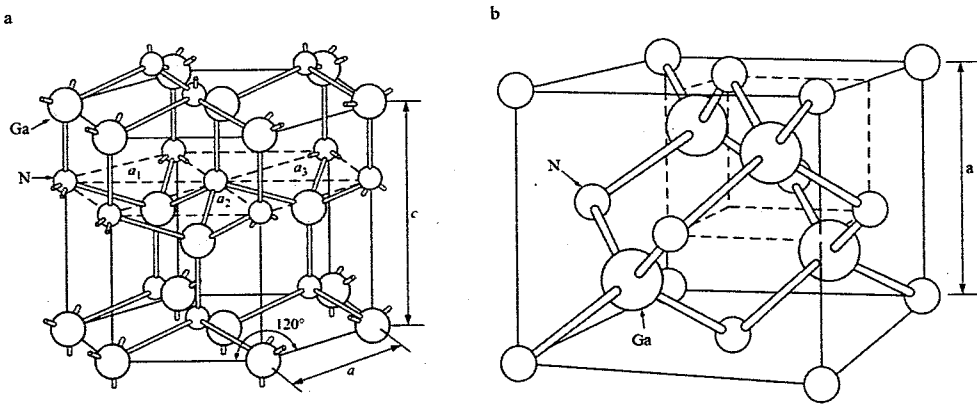
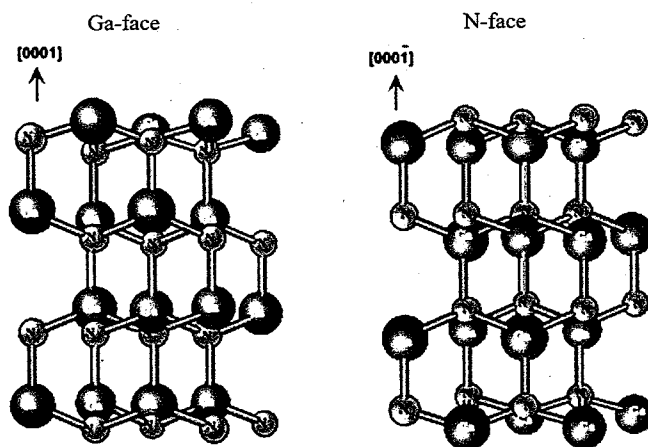


图 1.1 GaN 材料的晶体结构 (a) 纤锌矿结构; (b) 闪锌矿结构

Figure 1.1 Crystal structure of GaN material (a) wurtzite structure; (b) zincblende structure

一般而言，纤锌矿结构的 GaN 材料更稳定也更具有代表性。GaN 材料的纤锌矿结构属于 $P6_3mc$ 空间群，为六角密堆积结构，是由两个密排六方点阵沿 c 轴方向平移 $5c/8$ 长度进行套构而成。在纤锌矿 (0001) 密排面中，在 $\langle 0001 \rangle$ 方向上原子做 ABABAB 堆叠。纤锌矿结构为非中心对称晶体，存在强烈的自发极化和压电极化。对于纤锌矿结构 GaN，沿平行于极轴 c 轴的方向 Ga 原子面和 N 原子面交替排列，在 $[0001]$ 和 $[000\bar{1}]$ 方向上分别形成不同的极性面：Ga 面和 N 面。极性不同导致表面的化学性质和物理性质也有所不同^[9]。纤锌矿结构的 Ga 面或 N 面示意图如图 1.2 所示。

图 1.2 不同极性的纤锌矿结构 GaN^[10, 11]Figure 1.2 Different polarities of wurtzite GaN^[10, 11]

GaN 材料可以与Ⅲ族氮化物材料（例如 AlGaN 等）构成异质结结构。异质结是带隙、介电常数和功函数等均不相同的半导体材料之间形成的一种特殊类型的结^[12]。在 AlGaN/GaN 异质结中，由于 AlGaN 和 GaN 之间存在因晶格常数不同引起的晶格失配现象，导致 AlGaN 层中产生应变，引起压电极化效应，而 GaN 层的厚度则超过了临界应变厚度，外延层处于弛豫状态，层内只存在自发极化效应。异质结中的极化效应会在 AlGaN 层的下界面处产生正极化电荷，同时为保持结构的电中性在 GaN 层的上界面感应出负极化电荷，实际位置在异质结的界面处，集中分布于原子层量级的厚度内。AlGaN/GaN 异质结中的极化效应如图 1.3 所示，其中 P_{SP} 和 P_{PE} 分别代表自发极化强度和压电极化强度。

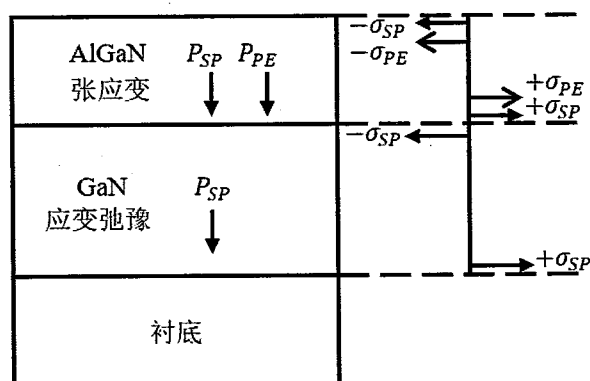


图 1.3 Ga 面 AlGaN/GaN 异质结中的极化效应

Figure 1.3 Polarization effect in Ga-face AlGaN/GaN heterojunction

1.1.2 GaN 基电子器件

GaN 基电子器件适用于通信基站、工业互联网、消费电子和人工智能等领域^[13-17]，迄今为止，已经报道了多种类型的 GaN 基半导体器件，包括异质结双极晶体管（HBT）^[18]，金属半导体场效应晶体管（MESFET）、高电子迁移率晶体管（HEMT）和结型场效应晶体管（JFET）^[19]等。其中 HEMT 器件是 GaN 基电子器件的主流结构，具有高击穿电场、低导通电阻以及优异的载流子输运特性等特点，成为高频大功率电子器件的选择^[20,21]。晶体管用在许多电子设备中，例如开关、放大器或振荡器等，HEMT 器件能够以比普通晶体管更高的频率工作，可以用于手机、卫星电视接收器和雷达设备等高频设备。HEMT 器件可以满足不断增长的高功率、高速、高效通信和电力电子器件等的需求^[22,23]。

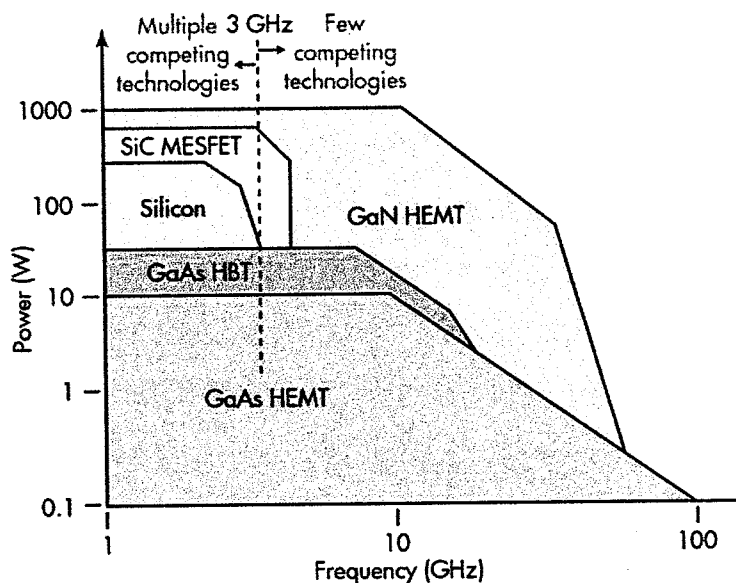


图 1.4 不同半导体器件的应用频率和输出功率^[24]

Figure 1.4 Application frequency and output power of different semiconductor devices^[24]

1993 年，Kahn 团队研制出了首款 AlGaIn/GaN HEMT 器件^[25]，三年后 GaN 基 HEMT 器件首次得到了微波功率特性^[26]。此后，GaN 基 HEMT 器件得到了快速发展，在雷达、通信、集成电路和智能电网等领域中具有广阔的应用空间。AlGaIn/GaN 异质结具有优异的材料性能，是 GaN 基 HEMT 器件的主流材料结构。AlGaIn/GaN 异质结界面处导带带阶较大，而且氮化物材料具有很强的自发极化和压电极化效应^[27]，因此在异质结界面的 GaN 侧形成深且窄的量子

阱，能够聚集高密度的电子，形成可以沿异质结界面自由运动而垂直于界面的运动受势阱限制的二维电子气（2DEG）^[28, 29]，如图 1.5 所示。即使在未掺杂情况下，异质结中也会产生高密度（达 10^{13} cm^{-2} 量级）的 2DEG，而且 2DEG 的迁移率显著高于体电子的迁移率，这使得 AlGaIn/GaN 异质结构非常适合应用于高频和大功率电子设备中^[30]。

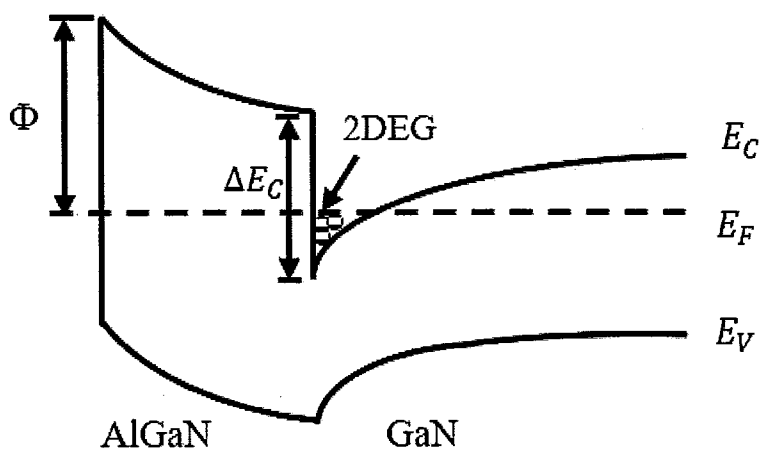


图 1.5 AlGaIn/GaN 异质结的能带图

Figure 1.5 Band diagram of AlGaIn/GaN heterojunction

典型的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的结构如图 1.6 所示。HEMT 器件是一种三端的场效应晶体管，包含源极、漏极和栅极。器件的源极和漏极与半导体材料形成欧姆接触，栅极形成肖特基接触。HEMT 器件结合两种不同半导体材料（即异质结）之间的结作为导电沟道。HEMT 器件的源漏电压在器件导电沟道中形成横向电场，令材料中的二维电子气在电场作用下沿着异质结界面输运形成输出电流。器件的栅极形成肖特基势垒，利用栅极电压的耗尽作用来调控 2DEG 的密度，调制沟道的开启或闭合。因为通常 AlGaIn/GaN 异质结在制备完成时，导电沟道中已经存在高密度的 2DEG，在未施加栅压时，HEMT 器件的沟道就处于开启状态，所以一般的 HEMT 器件是常开型器件^[31]。

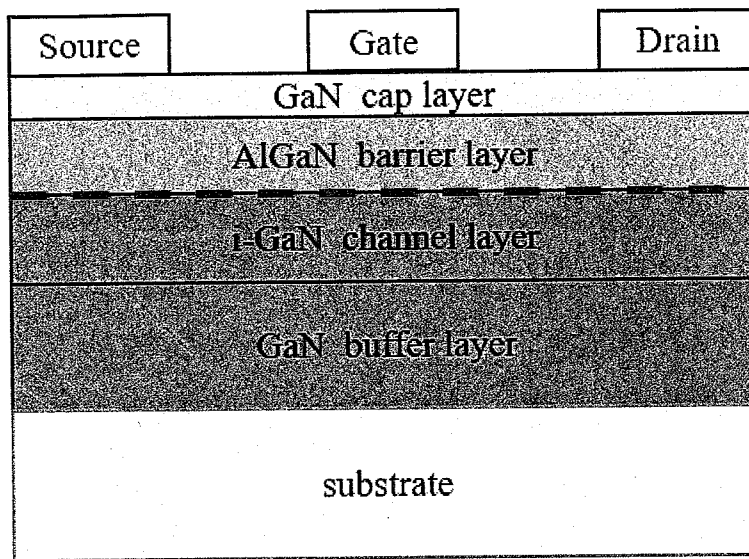


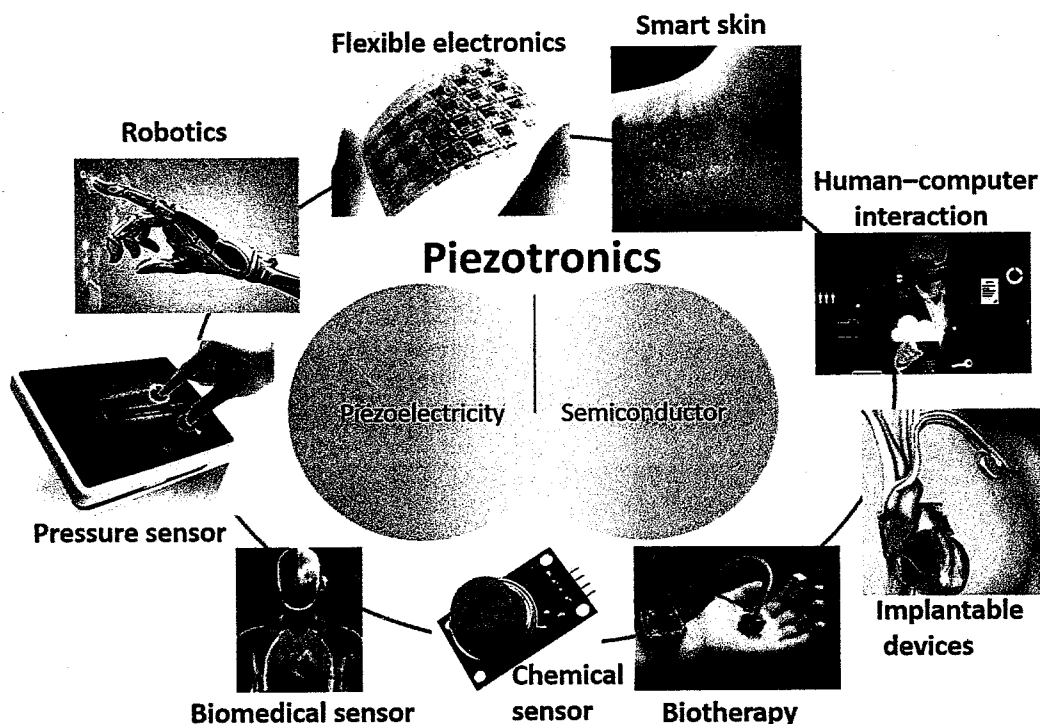
图 1.6 AlGaN/GaN HEMT 结构示意图

Figure 1.6 Schematic of AlGaN/GaN HEMT structure

1.2 压电电子学概论

1.2.1 压电电子学的发展

纤锌矿结构的半导体材料（如 GaN, ZnO, InN 等）缺乏晶格中心对称性，在施加应力时，晶体中离子发生极化在材料内产生压电势。由于压电半导体材料兼具压电特性和半导体特性，因此通过应力感应的压电势能显著调节界面处或结区的载流子传输^[32, 33]。为了系统且详细地阐述压电特性与半导体特性之间的耦合性质，王中林教授于 2007 年首次提出了压电电子学（piezotronics）的基本概念^[34, 35]。晶体内的压电势是压电电子学的物理基础^[36]。压电电子学器件是利用压电势充当“门”电压调制接触处或结区的载流子输运过程的电子器件^[37]。利用晶体中产生的压电势来调控界面处或结区的载流子传输特性的效应称为压电电子学效应（piezotronic effect）^[38, 39]。作为一种新颖的效应，压电电子学效应可以实现电子设备与外部刺激之间直接、有效、自适应和无缝的相互作用^[40]。随着新型材料、多功能微电子器件等的不断出现，压电电子学的研究和应用引起了研究人员越来越多的关注，预计将引起多功能传感系统、人机接口、微机电系统、柔性电子、智能皮肤以及其他领域的众多重大新颖应用。

图 1.7 压电电子学的应用前景^[41]Figure 1.7 Application prospects of piezotronics^[41]

压电电子学领域的建立是基于使用缺乏反转对称性的半导体材料。非中心对称的纤锌矿结构材料，例如 ZnO ， GaN ， InN 和 ZnS 等，同时具有压电和半导体特性。以生长的 ZnO 纳米线为例^[32]，如图 1.8 所示。纤锌矿晶体具有六边形结构，在 c 轴方向上和垂直于 c 轴的方向上具有大的各向异性。在正常状态下， ZnO 具有非中心对称的纤锌矿晶体结构，其中 Zn^{2+} 阳离子和 O^{2-} 阴离子在晶格内是四面体配位。通过沿 ZnO 纳米线的 c 轴施加应力，可以使正电荷和负电荷的中心相对于彼此有效地位移以形成偶极矩。晶体中全部单元产生的偶极矩的累加会产生一个压电场，导致沿晶体应变方向的宏观电势下降，称为应变电势的压电势^[42]。压电势是一种应变感应的内部电场，源自非中心对称的晶体结构，因此当沿 ZnO 纳米线的 c 轴施加拉伸或压缩应变时，会在界面处诱导出压电极化电荷。压电势可以充当控制载流子传输的虚拟“门”电压，对压电材料和器件的传输过程具有重大影响。

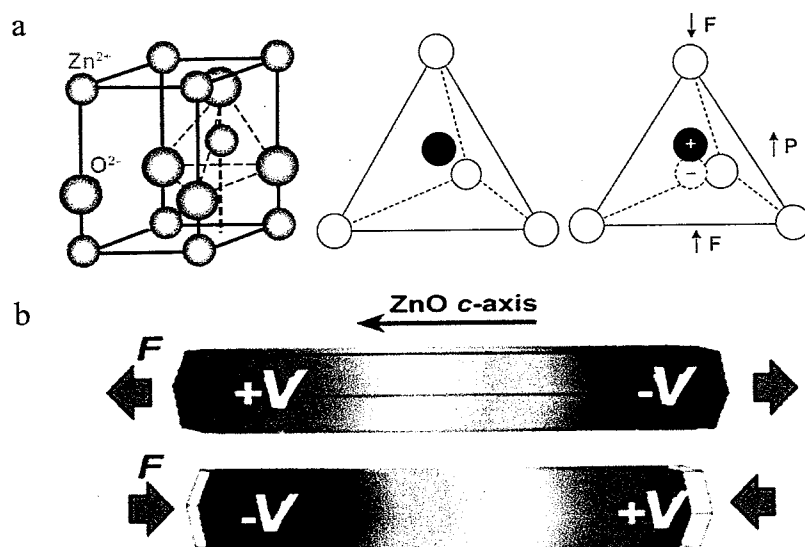


图 1.8 纤锌矿晶体中的压电势。(a) 纤锌矿结构 ZnO 的原子模型；(b) 轴向应变下 ZnO 纳米线中压电势的数值计算分布情况，纳米线的生长方向是 c 轴。^[32]

Figure 1.8 Piezopotential in wurtzite crystal. (a) Atomic model of the wurtzite-structured ZnO; (b) Numerical calculated distribution of piezoelectric potential along a ZnO nanowire under axial strain, the growth direction of the nanowire is c-axis.^[32]

PN 结由两个具有相反掺杂类型的半导体区域组成，是 LED、光电探测器和太阳能电池等器件的核心结构。当 p 型和 n 型半导体形成结时，p 型侧的空穴和 n 型侧的电子倾向于重新分布，以平衡局部电势，电子和空穴在结区中的相互扩散和复合形成电荷耗尽区。电荷耗尽区的存在可以显著增强压电电子学效应，因为大部分的压电电荷将得到保留，而不会被局部残留的自由载流子屏蔽^[38]。为简单起见，以 p-n 同质结为例（如图 1.9），p 型和 n 型材料的带隙相同，但是只有 n 型材料是压电材料。压电电子学效应是利用机械变形引起的压电势作为“门”电压来调制金属-半导体触点或 p-n 结区域的载流子传输。当在 n 型半导体材料中施加拉伸应变时，在靠近结界面的 n 型区域中感应出的正压电极化电荷会引起正压电势，将电子吸引向界面，导致相邻电子俘获或积累到界面处，从而导致局部能带分布下降（如图 1.9 a）。反之，当施加压缩应变后，在 n 型区域中产生的负压电势会排斥电子离开界面，导致图 1.9 b 中的局部能带分布向上弯曲。类似可以相应地讨论涉及 p-n 异质结的更复杂的情况，也可以

扩展到包括 p 型压电半导体材料的情况，在这里不做赘述。

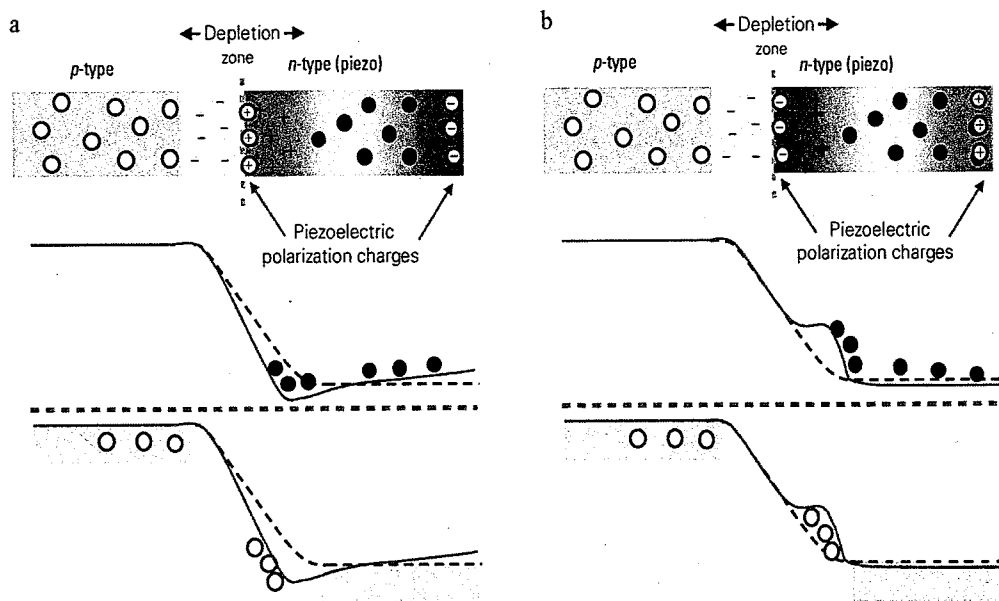


图 1.9 能带分布示意图，说明了压电势对 p-n 同质结的调制特性。施加应变后，在结界面附近感应出压电极化离子电荷。(a) 和 (b) 中的颜色梯度表示压电势的分布，红色表示正压电势，蓝色表示负压电势。红色实线和黑色虚线分别显示了有和没有压电电子学效应 p-n 结的能带图。^[38]

Figure 1.9 Schematic of energy diagram illustrating the effect of piezopotential on modulating characteristics of the p-n homojunction. With strain applied, the piezoelectric polarization ionic charges are induced near the junction interface. The color gradients in (a) and (b) indicate the distribution of piezopotential, with red representing positive piezopotential and blue representing negative piezopotential. The band diagrams for the p-n junction with and without the presence of piezotronic effect are shown using the red solid and black dashed curves, respectively.^[38]

在形成异质结电子气 (HEG) 方面，AlGaIn/GaN 异质结的性能要优于其他 III 族氮化物异质结。利用压电电子学效应来调制 HEG 的物理性能，有望获得一种简便有效和低成本的调制方法。合成的横向 AlGaIn/AlN/GaN 异质结微米线如图 1.10 所示^[43]。在这种结构中，载流子位于界面处的势阱中并与大量电离的杂质在空间上隔开，形成高密度 HEG^[44, 45]。在外部应变作用下，系统地研究了压电电子学效应对 AlGaIn/AlN/GaN 异质结微米线电传输特性的调制。电学测量

的结果表明压电电子学效应可以有效地调整源极-漏极电流（图 1.10 b），这归因于由外部应变感应的压电电荷提升/加深了界面处的势阱，从而降低/增加了载流子密度（图 1.10 c），表明压电电子学效应可以有效调节 AlGaN/AlN/GaN 异质结的 HEG 和电传输性能。这项研究为理解压电电子学效应对异质结微米材料中低维电子气的调制提供了新的见解，使其在 HEMT 和 MEMS 中具有巨大的潜在应用价值。

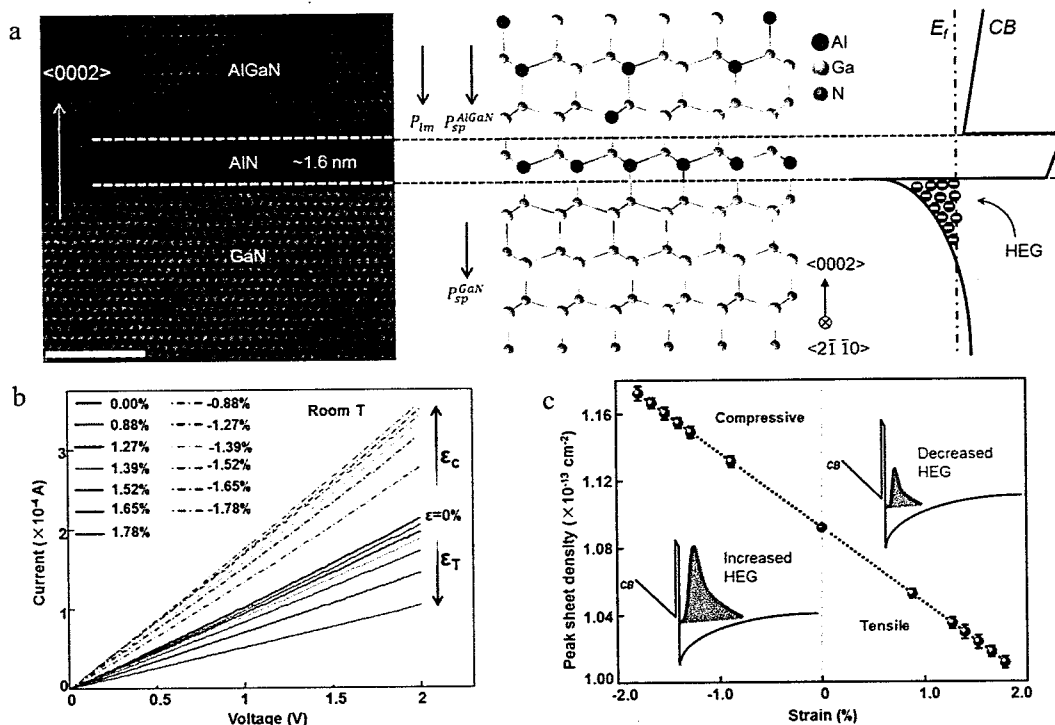


图 1.10 压电电子学效应对 AlGaN/AlN/GaN 异质结微米线中异质结电子气的调制作用
(a) AlGaN/AlN/GaN 异质结原子结构和能带图；(b) 应变作用下的源极-漏极电流；(c) 应变条件下局限在势阱中的异质结电子气片密度^[43]

Figure 1.10 Piezotronic effect modulated heterojunction electron gas in an AlGaN/AlN/GaN heterostructure microwire. (a) AlGaN/AlN/GaN heterojunction atomic structure and energy band diagram; (b) Source-drain current under the strain; (c) The sheet density of HEG confined in the potential well under strain.^[43]

1.2.2 压电电子学器件的应用

自从王中林教授于 2007 年首次提出压电电子学以来，该领域得到了快速发展和广泛应用，目前已报道了一系列新颖的高性能压电电子学器件，例如纳米

发电机^[46], 压电电子学晶体管^[47, 48], 应变门控晶体管^[49], 逻辑设备^[50, 51], 有源柔性电子与人机交互^[52]等。这些器件在人机界面、机器人技术、智能皮肤、环境监控和机械能收集等方面具有巨大应用潜力。在这里简单介绍一些典型的压电电子学器件。

ZnO 材料兼具压电特性和半导体特性, 其纳米线内部在应变下产生的压电势可以有效地调谐电荷载流子的传输过程, 以此为基础制造了应变门控晶体管 (SGT) ^[50]。如图 1.11 所示, SGT 由单个 ZnO 纳米线制成, 其两端 (源极和漏极) 通过聚合物衬底上的金属接触固定。整个结构的机械性能由基板决定, 一旦基板发生弯曲, 在 ZnO 纳米线中会产生拉伸/压缩应变。纳米线 SGT 输入的是外部施加的应变而不是电信号, 获得单个 ZnO 纳米线 SGT 的 I_{DS} - V_{DS} 特性, 作为 SGT 中产生的应变的函数 (图 1.11 a)。固定 V_{DS} 时的 I_{DS} - ϵ_g 曲线表明 I_{DS} 随着栅极应变 ϵ_g 的增加而增加, 并且阈值栅极应变 ϵ_T 约为 0.08% (图 1.11 b)。无应变的 ZnO 纳米线的源极和漏极具有肖特基接触, 势垒高度分别为 Φ_S 和 Φ_D (图 1.11 c)。当漏极施加正向偏置时, 源极 ($E_{F,S}$) 和漏极 ($E_{F,D}$) 的准费米能级因 eV_{bias} 的值而不同。沿轴向施加的机械应变 (ϵ_g) 会导致纳米线内部从 V^+ 到 V^- 的压电势下降, 这会对漏极和源极处的肖特基势垒高度 (SBH) 的变化产生不对称影响。对于拉伸应变的 SGT, 源侧的 SBH 降低, 引起 I_{DS} 增加, 反之, 压缩应变下源侧的 SBH 增加, 导致 I_{DS} 降低。因此, 随着应变 ϵ_g 从压缩区域扫向拉伸区域, I_{DS} 电流可以有效地从“关闭”变为“开启”, 这是 SGT 的基本工作原理。应变门控晶体管可以在人机接口、逻辑器件以及生物医学诊断等方面具有应用前景。

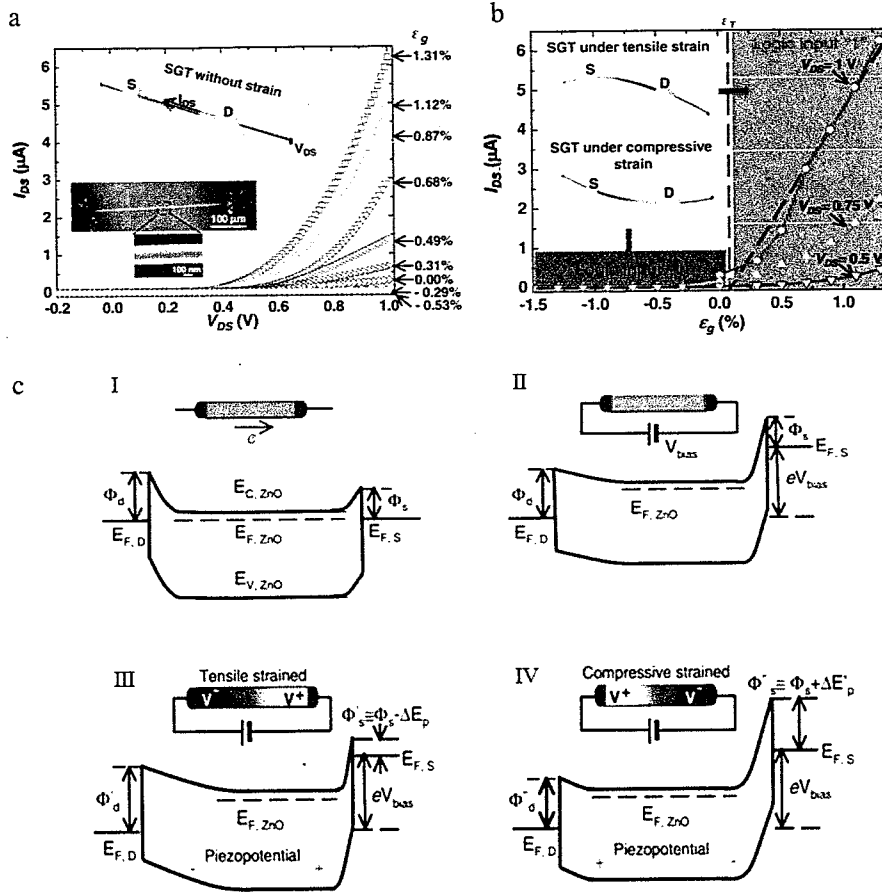


图 1.11 单个 ZnO 纳米线应变门控晶体管 (SGT) (a) ZnO SGT 器件的 I_{DS} - V_{DS} 输出特性, 其应变从 $\epsilon_g = -0.53\%$ 到 1.31% 的步幅为 0.2% ; (b) 同一 ZnO SGT 器件在三种不同的 V_{DS} 偏置值下的 I_{DS} - ϵ_g 传输特性: 分别为 1 V 、 0.75 V 和 0.5 V ; (c) ZnO 纳米线 SGT 在不同条件下的能带结构。[50]

Figure 1.11 Single ZnO nanowire strain-gated transistor (SGT). (a) I_{DS} - V_{DS} output characteristic for a ZnO SGT device with strain sweeping from $\epsilon_g = -0.53\%$ to 1.31% at a step of 0.2% ; (b) I_{DS} - ϵ_g transfer characteristic for the same ZnO SGT device under three different V_{DS} bias values: 1 V , 0.75 V and 0.5 V , respectively; (c) The band structures of the ZnO nanowire SGT under different conditions.[50]

纳米技术和传感器技术的发展催生的纳米线传感器, 在工业生产和人们日常生活中起着日益重要的作用。对于具有非中心对称性的 ZnO、GaN 等半导体材料, 压电电子学效应实现了仅通过外加应力的调整即可达到对纳米线中载流子的输运行为进行影响的目的。半导体纳米线具有大的比表面积和可被功能化

以检测特定生物分子的能力，有望成为生物传感领域应用的潜在选择。基于该想法，有研究^[53]构建了一种基于表面修饰的 ZnO 纳米线的压电电子学效应增强型葡萄糖传感器，如图 1.12 所示。通过使用银浆夹住 ZnO 纳米线的两端可以形成肖特基接触，并通过外加应力使 ZnO 纳米线内部产生压电电场，进而调节肖特基接触势垒高度，使这些传感器在探测葡萄糖分子的浓度时，器件检测信号能提升数个量级。通过对纳米线表面进行葡萄糖氧化酶功能化修饰，该传感器对葡萄糖具有极高的检测灵敏度。当对这种葡萄糖传感器施以-0.79%的压缩应变时，压电电子学效应会提高葡萄糖传感器的性能，传感器输出信号的幅度会增加 200%以上，而且感应分辨率和灵敏度分别提高了 200%和 300%。这项研究展示了一种有前景的方法，可以提高传感器的灵敏度和感应分辨率，增强葡萄糖传感器的性能，有望成为生物传感领域应用的潜在选择。

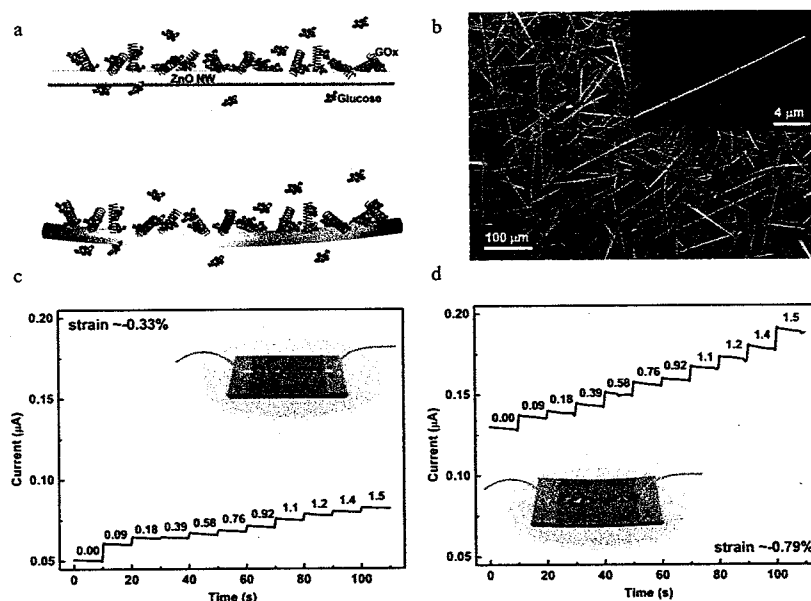


图 1.12 ZnO 纳米线葡萄糖传感器的示意图及其性能。(a) 用 GOx 修饰的未应变和应变的单根 ZnO 纳米线；(b) ZnO 纳米线的 SEM 图像，插图是单根纳米线的放大图。在 (c) -0.33% 和 (d) -0.79% 应变下随时间添加葡萄糖时，ZnO 纳米线的 I-t 特性曲线。^[53]

Figure 1.12 Schematic of the ZnO nanowire glucose sensor and its performance. (a) Unstrained and strained single ZnO nanowire decorated with GOx; (b) SEM image of the morphology of the ZnO nanowire. Inset image is a magnified view of a single wire; I-t characteristics curve of the ZnO nanowire as glucose is added over time under (c) -0.33% and (d) -0.79% compressive strain.^[53]

1.3 柔性电子器件的现状

随着物联网的发展和可穿戴电子设备等领域的应用，柔性电子器件受到了越来越多的关注^[54-56]，呈现出迅速发展的趋势。和传统的电子器件相比，柔性电子器件能够承受弯曲、拉伸等机械变形，在形变下仍能保持正常工作，可以实现传统刚性电子器件无法达到的目标，在医疗、能源存储、信息以及柔性显示等领域具有巨大的应用潜力。迄今为止，已经开发出多种功能各异的柔性电子器件，并且得到了大规模应用，例如电子皮肤^[57]，生物传感器^[58]，光伏设备^[59]，可穿戴医疗设备^[60]，柔性电池^[61]，以及晶体管^[62]等。多功能性和多样性是未来信息技术的一个发展方向，柔性电子器件的产生改变了我们的生活方式，是电子器件研究和应用的新趋势。随着器件结构和性能的不断优化以及电子技术的飞速发展，柔性电子器件会使许多目前不能实现的应用在可预见的将来成为可能，在未来的生活中会发挥出更大的作用（如图 1.13）。

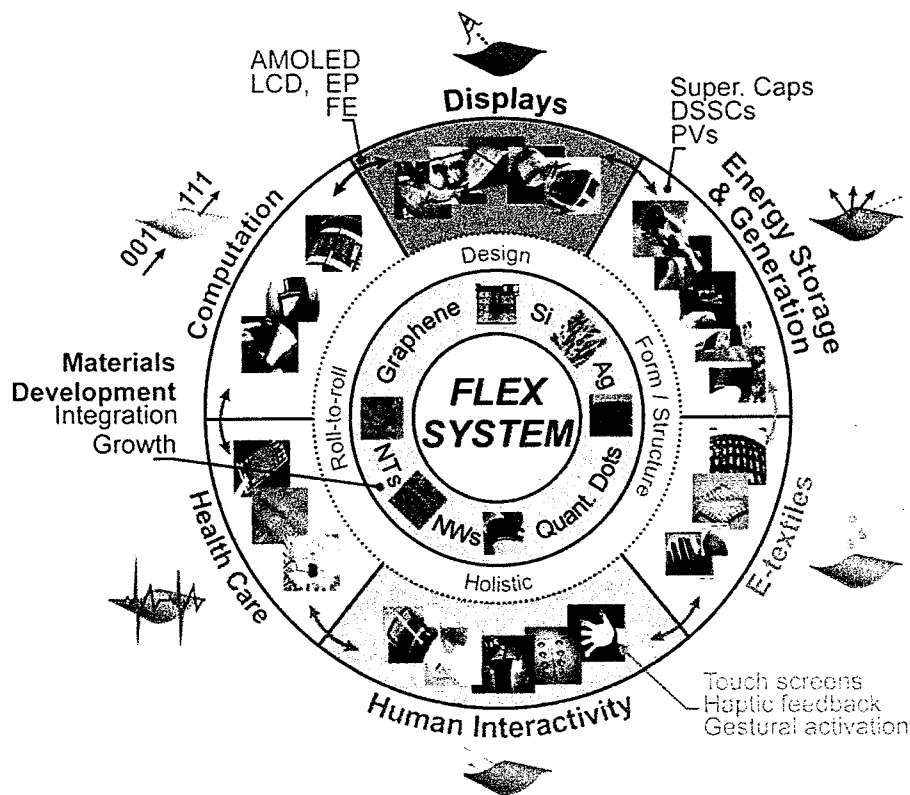


图 1.13 柔性电子器件的应用领域^[63]

Figure 1.13 Application fields of flexible electronic devices^[63]

在常规应用中，对更高频率、更高功率器件等的需求加速了 AlGaIn/GaN

HEMT 器件的快速发展。随着通信技术等领域的需求不断增长和迅速扩大,对柔性微波电子产品的需求也急剧增加, GaN 基柔性 HEMT 器件受到了研究人员越来越多的关注。由于生长动力学的限制, GaN 材料一般是生长在蓝宝石、碳化硅和 Si 刚性衬底上^[64, 65], 而传统的刚性衬底 GaN 基电子器件只能用于平面环境中, 在受到形变时容易导致电子器件的结构遭受破坏, 引起器件的性能失效, 使其在应用上受到很大限制。GaN 基柔性电子器件为系统集成安装在要求苛刻的环境中提供了更高的灵活性, 在可穿戴电子器件、人机交互、非平面设备、雷达天线等前沿技术领域有巨大的应用前景, 因此实现 GaN 基电子器件的柔性化是未来的发展趋势, 具有很重要的应用价值。

为了获得 GaN 基柔性器件就必须将其从刚性衬底中转移出来, 将 GaN 外延层转移到柔性衬底上, 从而使其能够在独特的平台上实现功能。针对如何实现 HEMT 器件的柔性化已有相关研究, Sarra Mhedhbi 等人^[66]通过研究获得了柔性 AlGaIn/GaN HEMT 器件。该制备工艺需要两个主要步骤: 移除硅衬底并将变薄的器件转移到柔性胶带上。首先使用化学机械研磨将硅衬底减薄, 紧接着使用二氟化氙 (XeF_2) 进行选择性的干法刻蚀去除残留的硅衬底, 最后将去除衬底的 HEMT 器件转移粘合到柔性胶带上。对得到的柔性晶体管进行性能测试可知, 柔性 AlGaIn/GaN HEMT 器件具有良好电学特性。该转移方法利用了 GaN 技术在硅衬底上的成熟工艺, 在特定的胶带上通过层转移工艺获得柔性晶体管, 可以在非平面上使用。

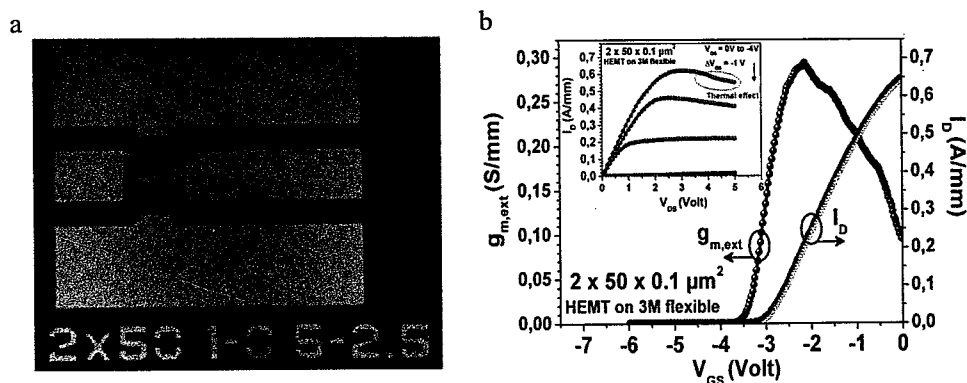


图 1.14 柔性 HEMT 器件 (a) 器件光学照片; (b) 柔性 HEMT 的 I_D - V_{DS} 特性曲线^[66]

Figure 1.14 Flexible HEMT device. (a) Optical images of the device; (b) I_D - V_{DS}

characteristics for flexible HEMT^[66]

2017 年, Nicholas R. Glavin 等人^[67]报道了一种通过引入二维氮化硼(BN)材料作为牺牲层的外延剥离工艺, 并成功制备了柔性 HEMT 器件。该研究中的二维 BN 材料不仅提供了薄弱的范德瓦尔斯界面以进行薄膜剥离和去除, 还充当了 GaN 层生长的外延模板。转移到柔性衬底上的 AlGaIn/GaN 异质结构可以承受一定的应变, 并且柔性 HEMT 器件显示出了优越的电学性能。此外, 这项研究在应力下对 GaN 基 HEMT 器件的射频性能进行了评估。高性能的柔性 GaN 基器件可以使未来的应变和共形器件能够在远距离传输信号, 还可以显著提高系统的传输效率, 从而为实现更有效、灵活、高速的通信系统奠定基础, 为新器件及其商业化也提供了可能。

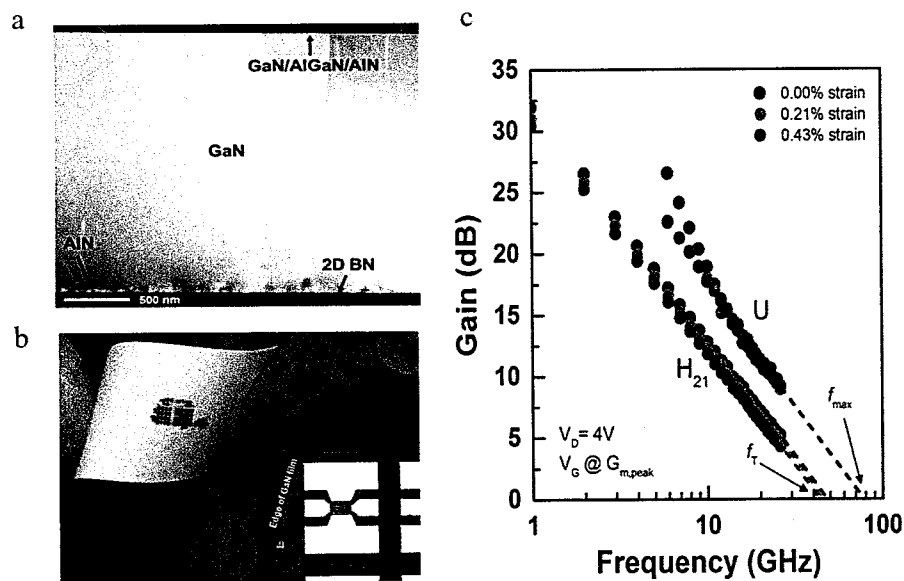


图 1.15 (a) GaN HEMT 材料叠层的横截面 TEM 图像; (b) 柔性 GaN 器件的图像;
(c) 柔性 GaN HEMT 的 RF 性能曲线^[67]

Figure 1.15 (a) Cross-sectional TEM image of GaN HEMT material stack; (b) image of flexible GaN devices; (c) RF performance of the flexible GaN HEMT^[67]

1.4 选题依据和研究内容

宽禁带半导体 GaN 材料具有优越的材料特性, 基于 AlGaIn/GaN 异质结材料的 HEMT 器件能够以比普通晶体管更高的频率工作, 可以满足雷达、通信等应用对大功率、高频器件的需求。随着通信技术等领域的需求不断增长和迅速扩大, 对柔性微波电子产品的需求也急剧增加, GaN 基柔性 HEMT 器件受到了

越来越多的关注。传统刚性衬底上的 GaN 基电子器件在受到形变时容易导致电子器件性能失效，而 GaN 基柔性电子器件可以为系统集成安装在要求苛刻的环境中提供更高的灵活性，因此实现 GaN 基电子器件的柔性化是未来的发展趋势，具有很重要的应用价值。压电电子学效应是压电特性和半导体特性之间的双向耦合，通过利用应变诱导产生的压电极化电荷来调制界面处或结区的载流子的输运特性。非中心对称的 GaN 材料同时具备半导体特性和压电特性，当 GaN 基柔性电子器件受到机械形变时，所施加的机械形变会引起压电极化，进而影响器件中载流子的输运特性，因此利用压电电子学效应可以细致地分析形变与电子器件性能之间的关系。本论文通过研究压电电子学效应调制 GaN 基柔性 HEMT 器件，不仅可以为柔性电子器件和周围环境中的激励信号间自适应式的交互起到桥梁作用，而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的见解。本论文的主要研究内容如下：

（1）AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备与柔性化

以异质外延生长的半导体材料为基础，通过微纳加工工艺制备 Si 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件，并对电子器件的柔性化进行了探索。研究中开发了一种简便易行的衬底转移技术制备了柔性 HEMT 器件。研究结合 AFM、SEM 等测试手段对半导体材料与器件进行表征与分析，为实现 GaN 基电子器件的柔性化提供了新的解决办法，也为后续针对柔性器件开展研究奠定了基础。

（2）压电电子学效应调制 GaN 基柔性器件

在制备出 GaN 基柔性器件的基础上，通过 HRXRD、Raman、半导体测试分析仪等对位于刚性衬底和柔性衬底上的半导体材料和 HEMT 器件进行测试，分析半导体材料内部缺陷、应力状态以及器件电学性能在柔性化过程中的变化情况。实验探究了压电电子学效应对柔性 HEMT 器件的调制。通过研究压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件，不仅为柔性电子器件和外部刺激之间直接且无缝的交互起到桥梁作用，而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的思路。

第二章 实验材料与方法

2.1 实验材料与仪器设备

2.1.1 材料与化学试剂

本实验所用到的材料与化学试剂如表 2.1 所示。

表 2.1 实验材料与化学试剂

Table 2.1 Experimental materials and chemical reagents

名称	规格	生产厂家
丙酮	500 ml, AR	北京化工厂
乙醇	500 ml, AR	北京化工厂
盐酸	500 ml, AR	北京化工厂
正性光刻胶	AZ4620	潍坊星泰克微电子材料有限公司
负性光刻胶	SUN-9i	潍坊星泰克微电子材料有限公司
显影液	SUN-238D	潍坊星泰克微电子材料有限公司
Apizeo 蜡	APIZEO Wax	北京飞斯科科技有限公司
硝酸	500 ml, AR	北京化工厂
氢氟酸	500 ml, AR	北京化工厂
冰醋酸	500 ml, AR	北京化工厂
三氯甲烷	500 ml, AR	北京化工厂

2.1.2 实验仪器和设备

本实验所用到的相关仪器设备如表 2.2 所示。

表 2.2 主要仪器与设备

Table 2.2 Main instruments and equipment

名称	型号	生产厂家
场发射扫描电子显微镜	Nova 450	捷克 FEI
电感耦合等离子体刻蚀机	SI 500	德国 SENTECH

表 2.2 主要仪器与设备 (续表)

Table 2.2 Main instruments and equipment (Continued)

名称	型号	生产厂家
紫外曝光机	MA6	德国 SUSS
超高真空电子束蒸发镀膜仪	Explore 14	美国 Denton Vacuum
共焦显微拉曼光谱仪	LabRAM HR Evolution	法国 HORIBA
原子力显微镜	MFP-3D-SA-DV	美国 Asylum Research
金属有机化学气相沉积系统	CCS 3×2 MOCVD	英国 Aixtron
傅里叶变换红外光谱仪	VERTEX80v	德国 Bruker
高分辨 X 射线衍射仪	D8 DISCOVER	德国 Bruker
半导体电学性能测试系统	B1500	美国 Keysight
等离子体清洗机	IoN 40	美国 PVA TePla

2.2 材料表征方法

2.2.1 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜 (SEM) 是一种微观形貌分析工具, 因具有制样简单、景深大、连续可调以及分辨率高等特点, 在材料、化学、生物和半导体技术等领域已得到广泛应用。SEM 利用聚焦的电子束扫描样品表面, 以逐点成像的方式把样品表面不同的微区形貌特征转换为图像显示出来^[68]。与样品接触后, 聚焦的电子束会在与样品的相互作用区内产生多种电子信号, 这些物理信号包括二次电子、背散射电子和俄歇电子等等 (如图 2.1 所示)。在标准成像模式下, SEM 主要收集二次电子和背散射电子的信号, 其图像的形成主要与从电子信号和扫描样品之间的相互作用中接收到的检测信号相关。本论文通过使用捷克 FEI Nava 450 型肖特基场发射扫描电子显微镜对氮化镓材料的表面形貌进行表征与分析。

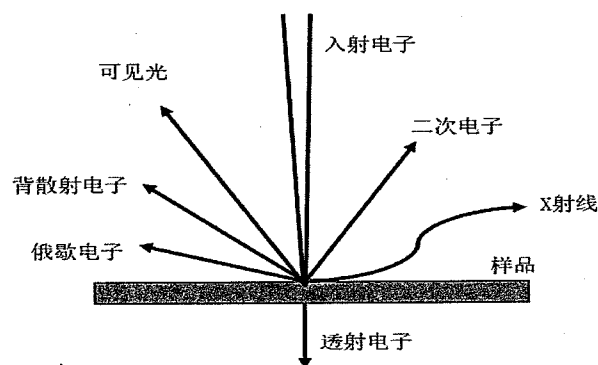


图 2.1 电子束与样品物质交互作用产生的物理信号

Figure 2.1 The diagram of the generated physical signal

2.2.2 原子力显微镜

原子力显微镜 (AFM) 是一种用来研究材料表面原子级微观形貌的显微技术^[69]。AFM 表征的是样品表面的三维图像, 所得图像的对比度高、景深大, 除此之外, AFM 对样品的导电性没有要求。AFM 使用装有探针的悬臂结构来检测样品的表面性质。当 AFM 用悬臂的尖端探测样品表面时, 尖端和样品之间会产生相互作用力 (吸引力或排斥力), 导致悬臂发生形变, 进而引起指向悬臂的激光束发生偏转。反馈系统中的探测器通过测量激光束偏转, 可以将悬臂的形变信号转换成光电信号, 从而获得样品表面的形貌图像。AFM 的工作原理如图 2.2 所示。目前, AFM 显微技术已在生物、物理和材料等领域有广泛的适用性^[70]。

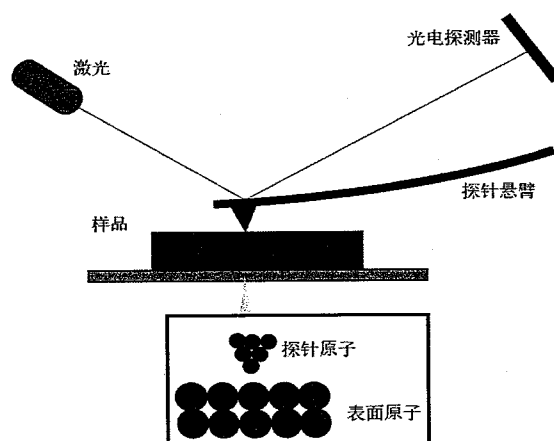


图 2.2 AFM 的工作原理图

Figure 2.2 Working principle of the AFM

2.2.3 高分辨 X 射线衍射

高分辨 X 射线衍射 (HRXRD) 是材料研究领域常用的非破坏性测试表征技术。HRXRD 通过晶体对 X 射线的衍射来检测材料内部的应力、组份、点阵类型、晶体质量以及缺陷等材料信息^[71]。X 射线衍射测量法以布拉格定律为基本原理, 具有精度高、无损伤的优点。布拉格定律公式如式 2.1 所示^[72]:

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (2.1)$$

式中 d 是相邻晶面的间距, θ 为入射角 (或反射角) 与晶面的夹角, 称为布拉格角, n 称为反射级数, 为整数值, λ 为 X 射线的波长。

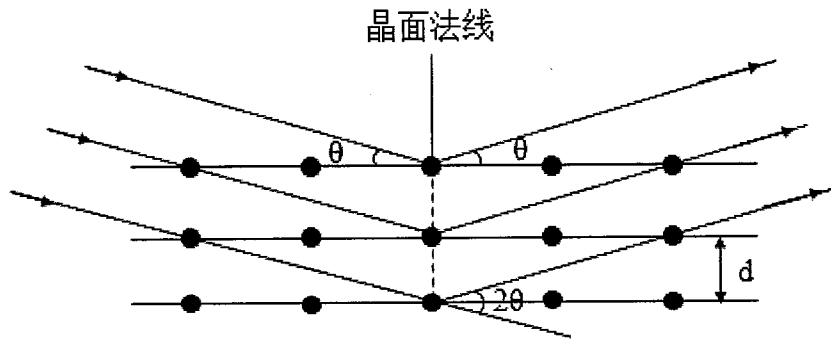


图 2.3 布拉格定律

Figure 2.3 The diagram of Bragg'law

本论文使用的是德国 Bruker D8 DISCOVER 型 X 射线衍射设备, 在进行测量时其主要扫描方式有 2θ - ω 扫描和 ω 扫描两种。在 2θ - ω 扫描模式中, 2θ 圆以 ω 圆角速度的两倍旋转, 当满足布拉格衍射条件时会出现相应的衍射峰。 2θ - ω 扫描模式主要用来检测外延材料中各元素的含量、应力和多层结构等信息。在 ω 扫描模式下, 固定探测器位置并旋转样品, 从而获得晶体衍射信息, 得到的曲线称为摇摆曲线。根据研究可知, ω 扫描模式中的摇摆曲线对位错非常敏感, 能够用来衡量材料的结晶质量, 通过其半高宽 (FWHM) 可以计算材料的位错密度, 反映薄膜的结晶质量。

2.2.4 共焦显微拉曼

拉曼光谱 (Raman) 是一种非常有用且功能强大的技术, 具有无损伤、高灵敏度和便捷等特点^[73]。拉曼光谱分析的理论基础是当一束单色光照射到透光

的样品上时，一部分光透过样品，另一部分光被介质向各个方向散射。散射有两种类型，一种是入射光的方向改变而能量不变的弹性散射，称为瑞利

(Rayleigh) 散射；另一种是入射光的方向和能量均发生变化的非弹性散射，称为拉曼 (Raman) 散射。拉曼散射中散射光频率低于入射光频率的称为斯托克斯线 (Stokes)，而高于入射光频率的称为反斯托克斯线 (Anti Stokes)。图 2.4 所示为拉曼散射和瑞利散射过程。

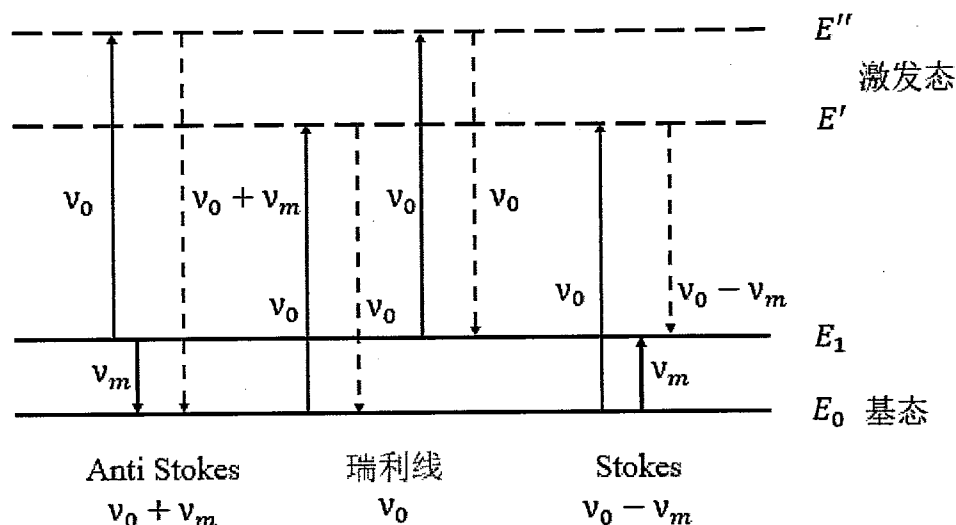


图 2.4 拉曼散射和瑞利散射过程

Figure 2.4 Raman and Rayleigh scattering processes

在半导体异质结外延薄膜中，由于外延层与衬底材料存在晶格失配，在外延层中会产生内应力。拉曼散射是一种非破坏性的测试方法，材料内部的残余应力会使原子间距发生改变，声子振动频率也会随之发生变化。当入射光照射到样品时，声子振动的频率会增加或减小，散射谱图上的峰位会发生蓝移或者红移^[74]。

2.3 电学性能测试

2.3.1 欧姆接触性能测试

当金属与半导体材料接触时能够形成欧姆接触，对 AlGaIn/GaN HEMT 器件来说，欧姆接触主要是用于形成器件的源极和漏极金属电极。形成表面形貌以及稳定可靠的欧姆接触是 AlGaIn/GaN HEMT 技术的重要组成部分。良好的

欧姆接触电极可使器件的通态电阻低、输出电流大，具有更高的稳定性。在文献报道的接触金属化方案中，常用的金属材料 Ti 和 Al 的金属功函数较低，适合与 GaN 形成欧姆接触。但是由于 Ti/Al 金属容易在高温下被氧化，导致器件性能不可靠，所以 AlGaIn/GaN 异质结上的欧姆接触需要多层金属^[75]。除此之外，还需要采用快速热退火（RTA）工艺在 AlGaIn/GaN 表面上形成功函数低的金属间合金来降低接触电阻形成欧姆接触。

比接触电阻率 ρ_C 是衡量欧姆接触性能的参数，主要通过传输线模型（TLM）来进行测量^[76]。TLM 测量欧姆接触需要制作特定的图案。如图 2.5 所示的图案，W 和 d 分别为电极的长和宽，L 是相邻两极的间距。

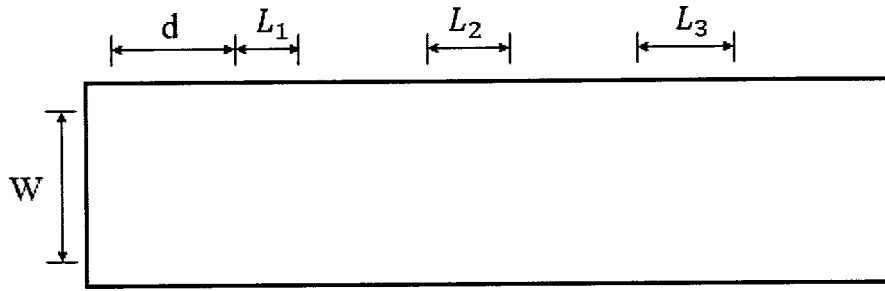


图 2.5 传输线模型测试图

Figure 2.5 Test chart of transmission line model

相邻两电极之间的总电阻 R 可以表示为

$$R = 2R_C + \frac{R_{SH}}{W} \cdot L \quad (2.2)$$

式中 R_C 为电极的接触电阻， R_{SH} 为材料的方块电阻，W 为图形的宽度。

定义传输长度 $L_T = \sqrt{\rho_C / R_{SH}}$ ，当 $d \gg L_T$ 时， $\coth(d/L_T) \rightarrow 1$ ，则有

$$R = 2 \frac{R_{SH} L_T}{W} + \frac{R_{SH}}{W} \cdot L \quad (2.3)$$

通过 TLM 测量两电极之间的总电阻 R 随着间距 L 的变化而变化，可以绘制 R-L 关系图（如图 2.6 所示），由关系图可以获得直线的斜率（ R_{SH}/W ）与截距（ $2R_C$ ）的数值，再由传输长度 L_T 可以得到比接触电阻率 ρ_C ：

$$\rho_C = R_C^2 \cdot \frac{W^2}{R_{SH}} \quad (2.4)$$

传输线模型（TLM）方法计算得到的比接触电阻率常用的单位是 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，而当比接触电阻率小于或接近 $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时，TLM 测试方法所得结果就不

够准确了，这种情况下就需要考虑到金属区域的电阻。

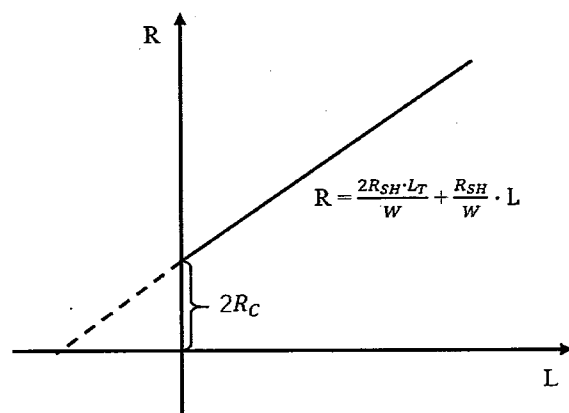


图 2.6 总电阻 R 和间距 L 的关系图

Figure 2.6 R-L diagram

2.3.2 电容-电压测试

宽禁带氮化物半导体作为微波通信、电力和高速电子领域中的新型半导体材料受到广泛关注。HEMT 器件具有很高的击穿电压和良好的功率传输能力，为了更好的利用该特性的异质结结构器件，需要确定在氮化物异质结结构的界面处出现的极化电荷。对于肖特基势垒结构，空间电荷区的密度和电荷数量随结上外加电压的变化而变化，即表示势垒电容 C 和外加电压 V 有关。电容-电压 (C - V) 测试法就是利用这一特性来研究半导体异质结结构界面处载流子的浓度和分布。 C - V 测量是一种方便快捷的表征技术手段，广泛地应用于测量 AlGaIn/GaN 异质结构中的极化电荷。通过 C - V 测试可以获得异质结材料的 2DEG 的分布情况和载流子面密度等相关的电学性质^[77, 78]。

2.3.3 半导体器件电学性能测试

在本论文中主要使用 Keysight B1500 半导体器件分析仪对 AlGaIn/GaN HEMT 器件的基本电学性能进行测量。AlGaIn/GaN HEMT 器件直流特性的表征主要包括输出特性和转移特性。器件的输出特性曲线表征了栅极电压对输出电流的调制效果，主要分析器件的膝点电压和饱和电流密度等特性。测试方法一般为源极接地，漏极偏压从零开始以一定的步长增加，测试至器件的饱和区，同时栅极偏压从小于阈值电压的数值开始按一定的步长逐渐增加，测试在不同的栅极偏压下源漏电流随漏极偏压的变化情况。根据器件的输出特性可以获得

最大饱和输出电流密度的数值。器件的转移特性曲线主要是用来分析器件的跨导和阈值电压等特性。转移特性曲线的测试方法一般是源极接地，在固定的源漏极偏压下（高于膝点电压），栅极电压从阈值电压以下按照一定步长逐渐增加，测试到正向偏压，主要测试分析器件的源漏电流和跨导随栅极偏压的变化情况。通过转移曲线，可以得到器件跨导。跨导是 HEMT 器件的重要参数，它反映了栅极-源极电压对漏极电流的调控作用，此外也可以通过转移特性曲线获取器件的阈值电压值。

第三章 AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备与柔性化

3.1 引言

宽禁带半导体 GaN 材料具有诸如大禁带宽带、高电子饱和速度和高击穿场强等卓越的材料特性。即使在未掺杂情况下, AlGaIn/GaN 异质结结构中也会产生高密度的 2DEG, 而且 2DEG 的迁移率显著高于体电子的迁移率, 这使得 AlGaIn/GaN 异质结结构非常适合高频和大功率等电子设备中的应用^[79]。HEMT 器件具有优异的载流子输运特性等特点, 能够以比普通晶体管更高的频率工作, 可以用于手机、卫星电视接收器和雷达设备等高频设备。HEMT 器件可以满足不断增长的高功率、高效通信和电力电子的需求, 具有广阔的应用前景。

随着通信需求的不断增长和迅速扩大, 对柔性微波电子产品的需求急剧增加, 柔性 GaN 基 HEMT 器件受到了越来越多的关注。然而由于生长动力学的限制, 传统的 GaN 基电子器件一般位于刚性衬底材料上, 很难进行弯曲或拉伸, 在受到形变时容易导致电子器件的结构遭受破坏, 引起器件的性能失效。GaN 基柔性电子器件可以为系统集成安装在要求苛刻的环境中提供更高的灵活性, 实现 GaN 基电子器件的柔性化是未来的发展趋势, 具有很重要的应用价值。为了获得 GaN 基柔性器件就必须将其从刚性生长衬底中转移出来, 然后将 GaN 外延层转移到柔性衬底上, 从而使其能够在独特的平台上实现功能。

基于以上分析, 在本章节中我们对 GaN 基 HEMT 器件的微纳加工工艺进行了简要介绍和分析, 然后以异质外延生长的半导体材料为基础, 制备 Si 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件。对如何实现电子器件的柔性化进行了探索, 实验开发了一种简便易行、阵列化的衬底转移技术制备了柔性 HEMT 器件。研究中还结合 AFM、SEM 等测试手段对半导体材料与器件进行了表征与分析, 为后续的研究工作提供了支持。

3.2 AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备工艺

对于氮化物半导体材料来说, 其具有高熔点和强化学键, 导致氮化物材料的体单晶材料很难生长, 因此 GaN 半导体材料及其异质结构需要在不同衬底上

通过异质外延方式生长^[80, 81]。GaN 及其异质结材料经常采用的外延生长技术有金属氧化物化学气相沉积 (MOCVD)、氢化物气相外延 (HVPE) 和分子束外延 (MBE) 等。相比之下, MOCVD 具有生成速率较高、工艺重复性好、成本适中和晶体质量好等优势, 成为 GaN 及其异质结材料生长所采用的普遍方法。衬底材料的质量会对器件的性能产生较大影响。目前 GaN 异质外延使用最广泛的衬底材料是蓝宝石、碳化硅和 Si。其中蓝宝石衬底和 GaN 材料的晶格失配较大, 而且导热性不佳; 碳化硅衬底价格昂贵, 制作器件的成本高; Si 衬底由于成本低廉、大面积可用性以及工艺成熟等特点, 成为氮化物外延生长的主流选择^[82, 83]。

本论文中所使用的 GaN 半导体材料即是通过 MOCVD 生长在 (111) 面的 Si 衬底上的。在实际应用中, 往往会在氮化物外延层 AlGaN/GaN 异质结结构中插入厚度为 1 nm 左右的薄层 AlN 材料, 形成 AlGaN/AlN/GaN 异质结, 这是材料优化常用的措施, 有利于改善异质结的材料特性^[84, 85]。AlN 插入层可以提高 AlGaN 层和 GaN 沟道层之间的有效导带带阶, 加深势阱从而提高沟道处二维电子气的密度和限域性。AlN 插入层的存在与否不影响 AlGaN/GaN HEMT 器件的工作机理。本论文中所使用的半导体外延片结构 (从上至下) 包括: 20 nm AlGaN 势垒层, 其中 Al 组分含量为 30%、1 nm AlN 插入层、300 nm 非故意掺杂 GaN 沟道层和 3.5 μm 厚 GaN 层, 其中核心材料结构是 AlGaN/AlN/GaN 异质结, 如图 3.1 所示。

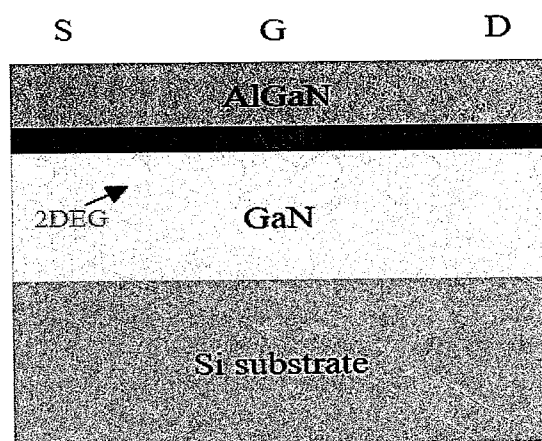


图 3.1 HEMT 器件结构示意图

Figure 3.1 The structure diagram of HEMT

在本论文中我们利用原子力显微镜（AFM）对 MOCVD 法制备的氮化物半导体材料进行了直观的表面形貌表征，如图 3.2 所示。由图可知，半导体材料的表面凸起较少、台阶明显、表面较平整，表面均方根粗糙度 $RMS=0.311nm$ 。实验结果说明外延生长的半导体材料的质量较好，满足了器件制作对外延材料的要求。

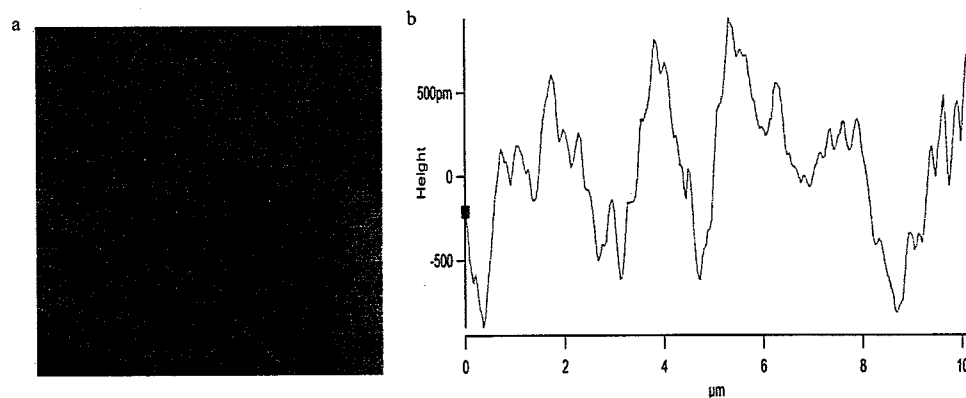


图 3.2 半导体材料的 AFM 形貌图

Figure 3.2 AFM morphology of semiconductor material

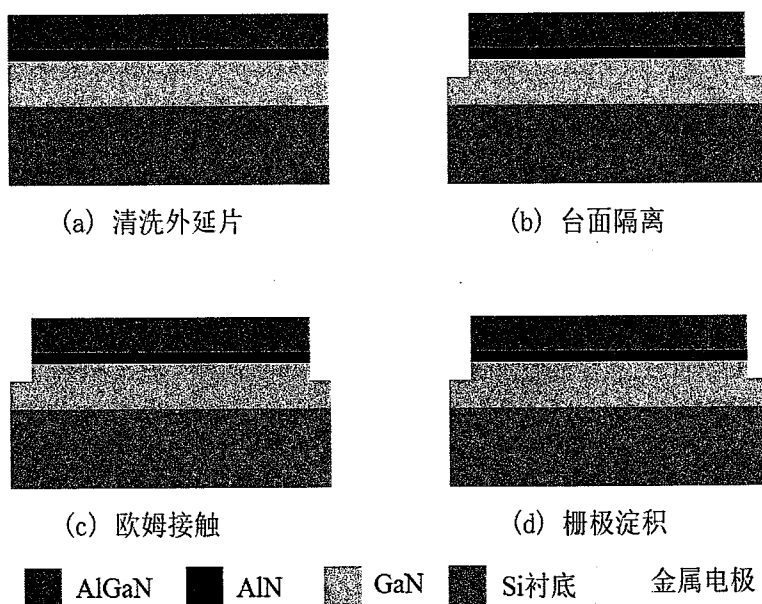


图 3.3 HEMT 器件制备流程图

Figure 3.3 The main preparation flow chart of HEMT

本论文中 HEMT 器件的简要制备工艺流程如图 3.3 所示。在正式制备半导体器件之前，首先要保证半导体外延材料表面的清洁，材料表面的洁净程度对介质的附着或金属沉积以及器件的电学特性都有重要的影响，因此外延材料的表面清洗也是半导体工艺的重要组成部分。未经清洗的 AlGaIn/GaN 异质结材料表面通常有无机物、有机物以及氧化层等污染物，可以通过使用丙酮、乙醇、盐酸和去离子水等来清洗半导体材料，在保证外延材料表面清洁的同时又不破坏其表面特性。以下针对制备流程中的各单步器件工艺进行相关介绍。

3.2.1 光刻工艺

应用光学方法将掩模版上的图形几何尺寸以及位置转移到涂敷光刻胶层的晶圆片表面上，这样的技术称为光刻。光刻工艺是半导体器件制备工艺中必不可少的技术，一般由涂胶、前烘、紫外曝光、后烘、显影和坚膜步骤组成。其中光刻胶是把掩模版上图案转移到晶圆片表面的关键材料，可分为正性光刻胶和负性光刻胶。正胶经过紫外线曝光后，曝光区域变得容易溶解于显影液，未曝光区域在显影液中的溶解度较小，得以保留下来，而负胶与之相反，如图 3.4 所示。利用光刻工艺可以在晶圆片表面形成刻蚀区域或金属电极接触区域的图案，为下一步工艺流程做准备。本论文所使用的 SUSS MA6 型曝光设备是采用汞灯作为曝光光源，光刻工艺中所使用的光刻胶型号为正胶（AZ4620）和负胶（SUN-9i），光刻胶在使用后可通过有机溶剂丙酮去除。

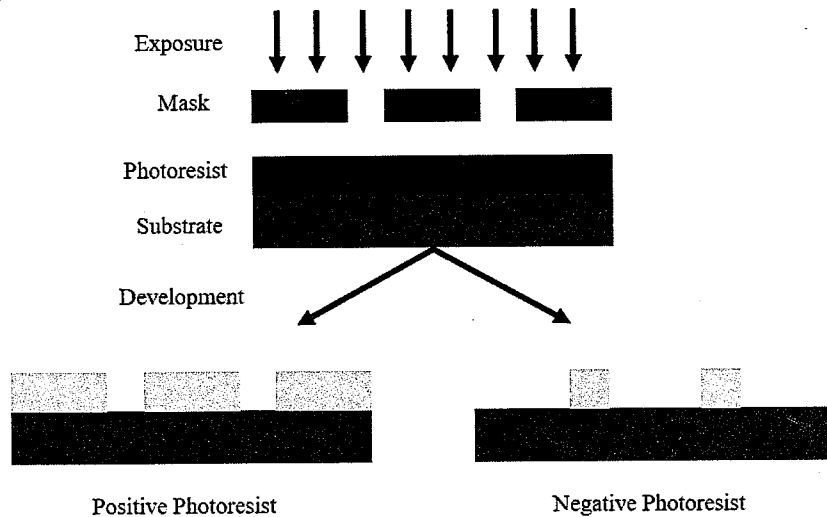


图 3.4 曝光和显影过程示意图

Figure 3.4 Schematic of exposure and development process

3.2.2 器件隔离工艺

为了避免器件之间的相互干扰,需要隔断相邻器件间载流子的流动,保证栅极对沟道的调控作用。器件隔离通常有两种方式,一种是通过离子注入形成高阻区,进而达到隔离的目的;另一种是利用台面刻蚀阻断导电沟道,实现器件之间的隔离。刻蚀中的干法刻蚀是一个化学反应和物理溅射同时存在的过程,具有工艺简单、重复性好等优点,在 AlGaIn/GaN HEMT 器件的制备中得到了广泛应用。本论文利用设备型号为德国 SENTECH SI500 的电感耦合等离子体刻蚀系统(ICP)在外延材料表面制作出隔离岛,刻蚀到 GaN 层以保证器件间的导电沟道被阻断,从而实现器件的相互隔离。

3.2.3 欧姆接触电极制备

对于 AlGaIn/GaN HEMT 器件,广泛通过在样品表面沉积 Ti/Al/Ni/Au 四层金属体系并进行快速热退火,实现源极和漏极金属电极的欧姆接触。选用 Ti/Al 金属是因为其功函数较低,适合与氮化物形成无整流作用的欧姆接触,但是只采用 Ti/Al 双层金属形成的欧姆接触容易在高温条件下被氧化,需要在其上添加一层帽层金属,常用性质稳定的 Au。此外,在 Al 和 Au 之间加入耐熔金属 Ni 充当隔离层,可以阻止金属间的相互扩散。本论文中使用型号为美国 Denton Explore 14 的电子束蒸发镀膜仪蒸镀技术结合剥离工艺,沉积 Ti/Al/Ni/Au 多层金属体系,再经过 N₂ 氛围下的快速热退火,形成良好的欧姆接触。比接触电阻率通常可以用来衡量欧姆接触的性能,可通过传输线模型(TLM)来进行测量。本论文中制作的 TLM 图形中金属电极的宽度 W 为 300 μm,相邻电极间距 L 分别为 10、20、30、50、70、100 μm。通过数据处理可以得知,实验中制备的欧姆接触比接触电阻率为 $8.17 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

3.2.4 肖特基接触电极制备

对于氮化物半导体材料(例如 AlGaIn 和 GaN)来说,许多研究表明其肖特基势垒高度主要取决于金属的功函数与半导体材料的亲和能之差,所以常常采用 Pt (5.56 eV)、Ni (5.15 eV)、Au (5.1 eV) 等功函数高的金属来做具有整流作用的肖特基栅极。Ni 金属以其与氮化物材料黏附性较好且价格低廉而得到广泛应用,在其上继续沉积 Au 金属可以用来增强栅极的导电性。因此, Ni/Au 是 AlGaIn/GaN HEMT 器件制备过程中常用的肖特基栅极金属体系。本实验是利用

Denton Explore 14 型电子束设备淀积 Ni/Au 金属体系来得以实现肖特基接触的栅极。

3.3 AlGaIn/GaN HEMT 器件的柔性化

近年来, 柔性电子技术引起了极大的关注, 显示出了快速的发展趋势和应用前景^[86]。GaN 基柔性电子器件为系统集成安装在要求苛刻的环境中提供了更高的灵活性, 在可穿戴电子器件、人机交互、电力电子等前沿技术领域有巨大的应用前景。由于生长动力学的限制, 传统 GaN 半导体材料一般是生长在蓝宝石、碳化硅、Si 等刚性衬底上^[5], 而刚性衬底的 GaN 基电子器件很难进行弯曲或拉伸, 在受到形变时容易导致电子器件的结构遭受破坏, 引起器件的性能失效从而无法正常工作。想要实现 GaN 基电子器件的柔性化, 就需先将 GaN 外延层从刚性衬底上剥离下来, 然后转移到柔性基底上, 使其能够在独特的平台和器件上实现功能, 这将具有巨大的应用价值和应用领域。

根据先前研究, 目前已有多种衬底转移技术来实现 AlGaIn/GaN HEMT 器件的柔性化, 例如激光剥离^[87, 88], 引入二维牺牲层^[67, 89]等方法。在本论文中, 我们开发了一种方便快捷、大尺寸且阵列化转移的柔性化方法。HEMT 器件柔性化的第一步是先对器件表面涂覆一层抗蚀剂, 本实验中使用的是 Apiezon 蜡。实验中使用的 Apiezon 蜡化学性质不活泼, 能够抵抗刻蚀液的腐蚀, 因此利用抗蚀剂可以把器件正面保护起来免受腐蚀, 同时将 Si 衬底暴露出来。除此之外, Apiezon 蜡也是性能优良的固定剂, 可将器件固定在临时载体上。然后将临时载体上的器件放入刻蚀液 ($\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{CH}_3\text{COOH}$) 中浸泡, 通过化学腐蚀的方式去除 Si 衬底。由于 III-N 层内的应变随着衬底的蚀刻得到释放, 所以本实验中 Si 衬底以较慢的腐蚀速率去除, 可以保证外延材料内的应变得得到缓慢释放。等完全除去 Si 衬底后, 用环氧树脂胶将样品背面转移到柔性衬底 (例如铜片) 上, 最后使用烃类或含氯溶剂 (甲苯或者三氯甲烷) 可轻松将器件表面的抗蚀剂去除并与临时载体分离, 实现 AlGaIn/GaN HEMT 器件柔性化。衬底转移过程的主要步骤如图 3.5 所示。

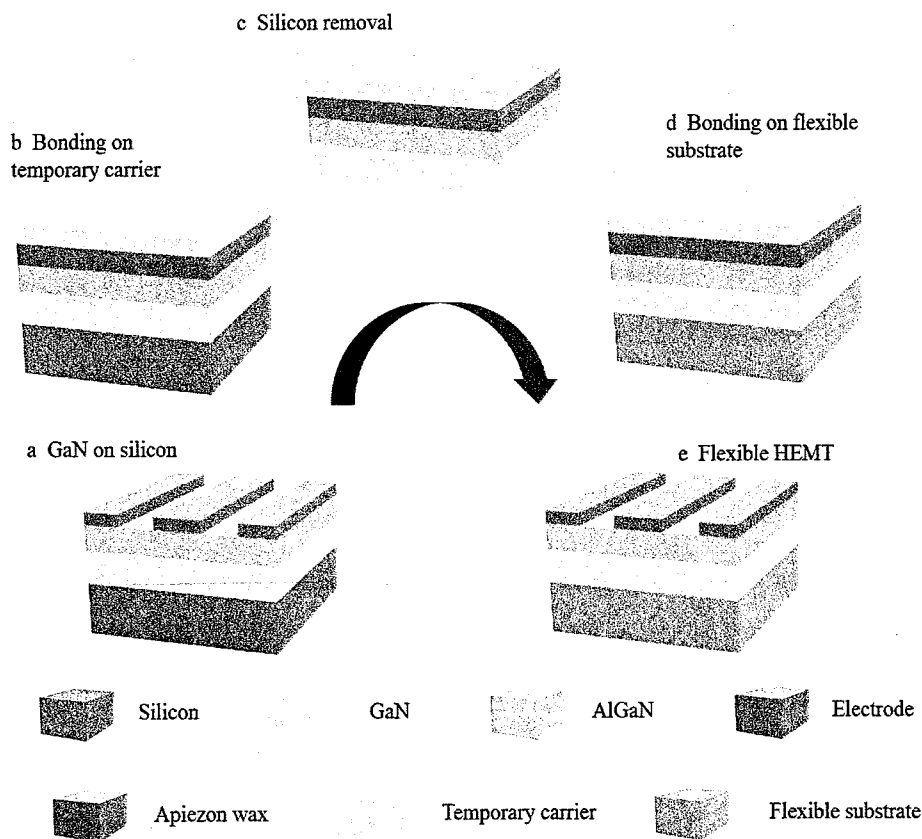


图 3.5 衬底转移的流程图

Figure 3.5 Main steps of substrate transfer technology

本研究借助 SEM 和光学显微镜设备对位于不同衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行形貌表征（如图 3.6）。衬底转移前后的 AlGaIn/GaN HEMT 器件（ 10×12 HEMT 阵列和 $1.3 \times 1.3 \text{ cm}^2$ 样品面积）的光学图像如图 3.6 a 所示。光学图片的左图清楚地显示了排列良好的阵列和黑色的硅衬底，右图的柔性 HEMT 器件证明这种大规模且排列良好的 HEMT 阵列已完全转移到黄色铜柔性衬底上。从图 3.6 b 中 3×3 柔性 AlGaIn/GaN HEMT 阵列的显微照片中，我们可以很清楚的看到柔性 HEMT 阵列和器件是完整的。通过刚性衬底剥离与转移之后，单个柔性衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的微观 SEM 形貌图如图 3.6 c 所示，柔性 HEMT 器件在源/漏/栅电极上没有任何损坏。这些形态特征表明，我们的衬底转移技术可以实现大尺寸且排列完整的 HEMT 阵列化转移，而且衬底转移之后的器件结构保持完整无损坏。

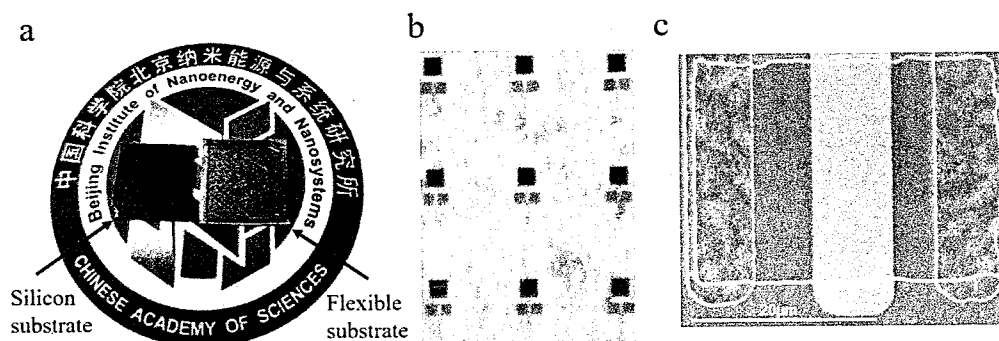


图 3.6 (a) 衬底转移前后 HEMT 的光学照片；(b) 3×3 HEMT 阵列的光学图像；(c) 单个柔性 HEMT 器件的 SEM 图像

Figure 3.6 (a) Optical photos of HEMT before and after substrate transfer; (b) Optical images of 3×3 HEMT array; (c) SEM images of a single flexible HEMT device

3.4 本章小结

在本章节中，我们利用微纳加工工艺制备出了 Si 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件，并结合 AFM 和 SEM 测试手段对半导体材料与器件进行了形貌表征。实验结果表明，异质外延生长的半导体材料满足了器件制作对材料的要求，而且制作的 HEMT 器件结构完整，显示出良好的阵列。通过对 GaN 基 HEMT 器件的柔性化进行探索，本研究开发出一种简便易行、大尺寸、阵列化的衬底转移技术成功制备了柔性 AlGaIn/GaN HEMT 器件。表征的结果表明刚性衬底上大规模且排列整齐的 HEMT 阵列已完全转移到柔性衬底上，而且柔性 HEMT 器件的结构保持完整，器件的电极没有损坏。形貌表征的结果说明我们的衬底转移技术可以实现大尺寸且排列完整的 HEMT 器件阵列化转移，为实现 GaN 基器件的柔性化提供了新的解决办法，也为后续针对柔性电子器件开展研究奠定了基础。

第四章 压电电子学效应调制 GaN 基柔性器件

4.1 引言

柔性电子器件的产生改变了我们的生活方式，便携性和柔性化是未来电子技术的一个发展方向。随着器件结构和性能的不断优化，柔性电子器件会使许多目前不能实现的应用在可预见的将来成为可能，在未来的生活中会发挥出更大的作用。GaN 基柔性电子器件为系统集成安装在要求苛刻的环境中提供了更高的灵活性，在可穿戴电子器件、雷达天线、电力电子等前沿技术领域中得到应用，实现 GaN 基电子器件的柔性化具有很重要的应用价值。非中心对称的 GaN 材料兼具半导体特性和压电特性，当 GaN 基柔性电子器件受到机械形变时，所施加的机械形变会引起压电极化，进而影响器件中载流子的输运性质。

压电电子学效应是半导体材料中的压电特性和半导体特性间的双向耦合效应，通过利用应变诱导产生的压电极化电荷来调制界面处的能带结构。压电电子学效应为优化器件性能提供了不同的自由度，有望改善许多电子器件的性能，该效应可以用于制造新颖的器件来响应外部机械刺激，以实现微/纳米电子设备与外部机械应变之间有效且无缝的相互作用。基于这种机理，已有研究成功地制备了应力调制的 HEMT 器件^[90-92]，这些电子器件在外部弱机械刺激和高功率输出之间建立了实时、灵敏和无缝的交互。

本章节中，在制备出柔性 HEMT 器件的基础上，我们分析了半导体材料特性和器件性能在衬底转移前后的变化情况，并通过压电电子学效应细致地分析了机械形变与电子器件性能之间的关系。本研究通过研究压电电子学效应调制 GaN 基柔性 HEMT 器件，为柔性电子器件和周围环境中的激励信号间的自适应式交互起到了桥梁作用，还为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供了新的思路。

4.2 衬底转移前后半导体材料表征

4.2.1 共焦显微拉曼表征

共焦显微拉曼测量具有无损、无接触的优点，是一种非破坏性的测量方法。许多拉曼散射研究表明，可以用其表征 GaN 外延层中的残余应力^[93, 94]。材料内部的残余应力会使原子间距发生改变，当入射光照射到样品时，原子间距的变化会使散射光的频率增加或减小，散射谱图上的峰位会发生蓝移或者红移。根据双轴应力（压应力和张应力）模型可知，我们可以通过拉曼峰的频移（即应变晶体的声子频率相对无应力状态频率值 ω_0 发生移动）来估算外延层中应力的大小，红移表明外延膜中存在张应力，蓝移表明含有压应力^[74, 95]。测量原理如图 4.1 所示。

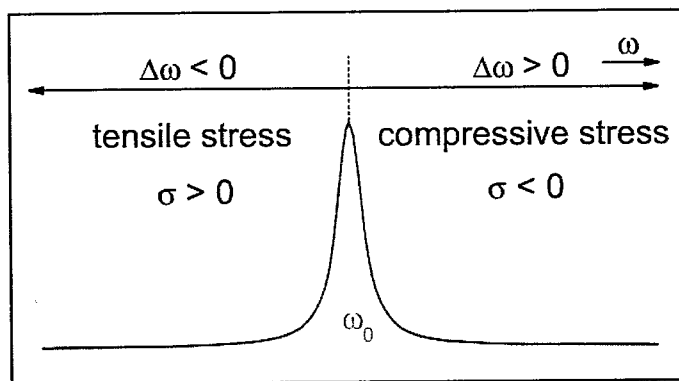


图 4.1 拉曼光谱法测量应力原理。观察到应变晶体的声子频率相对于无应变值 ω_0 移动^[96]

Figure 4.1 Principle of stress measurement by Raman spectroscopy. The observed phonon frequencies of a strained crystal are shifted with respect to the strain-free values ω_0 .^[96]

外延生长的 GaN 半导体材料是纤锌矿晶体结构，单位晶胞含有四个原子，属于 C_{6v}^4 ($P6_3mc$) 点群结构，存在一个 A_1 模，一个 E_1 模，两个 E_2 模和两个 B_1 声子模。其中在拉曼光谱和红外光谱中， A_1 模和 E_1 模均可以激活，而 E_2 (high) 模式只能在拉曼散射下激活， B_1 模在拉曼散射和红外光谱中都不能被激活。对于 GaN 外延层，当入射光以垂直方式照射到样品表面时，由拉曼选择法则判断只能探测到 A_1 (LO) 和 E_2 (high) 两个模式峰，其他模式因无法被激活而不能观察到^[74]。在 GaN 的声子拉曼峰中， E_2 (high) 支声子模的半高宽较窄、强度较大，因此可以通过观察 E_2 (high) 支声子模的峰位相对移动来推测层内应力的变化情况^[97]。

如图 4.2 a 所示为 GaN 外延层的拉曼光谱图，插图为 E_2 (high) 支声子模峰位的放大图。位于 520.57 cm^{-1} 的模式峰可以归因于 Si 衬底的拉曼峰，可以很

清楚的从图中看出，在转移至柔性衬底上后， 520.57 cm^{-1} 的模式峰的消失了，也进一步表明了 Si 衬底已完全去除。由于 GaN (002) 的晶格常数 (3.189Å) 小于 Si (111) 的晶格常数 (3.84Å)，所以 Si 上生长的 GaN 层中所受面内应力为张应力。根据双轴应力模型^[98]：

$$\sigma_a = - \frac{\Delta\omega}{\kappa_{Ra,a}} \quad (4.1)$$

式中， σ_a 为应力值， $\Delta\omega$ 为拉曼峰值变化量， $\kappa_{Ra,a}$ 为双轴应力模型的应力系数，对于 GaN 材料来说， $\kappa_{Ra,a} = 4.2 \pm 0.3\text{ cm}^{-1}\text{ GPa}^{[97]}$ 。由拉曼谱图 4.2 a 可得，柔性衬底上的 E_2 (high) 模式峰位相对于 Si 衬底上的 GaN 材料发生了蓝移，我们根据公式可以计算得到应力大小是 0.245 GPa ，即表示从 Si 刚性衬底剥离之后转移到柔性衬底上，GaN 外延层的面内张应力减小了 0.245 GPa 。半导体外延层材料内部应力状态的变化会影响沟道内载流子的性质，进而器件的电学性能也会相应的受到一定影响。

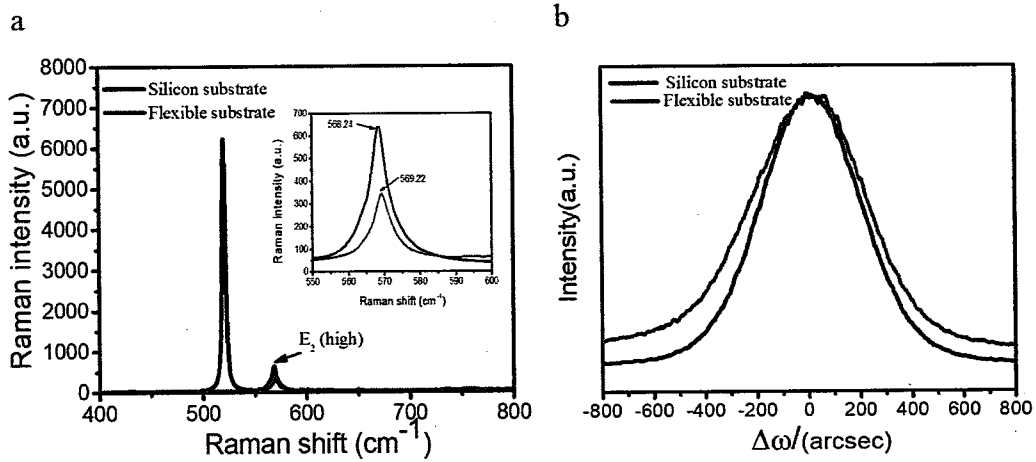


图 4.2 衬底转移前后的 GaN (002) 面的 (a) 拉曼谱图和 (b) 摇摆曲线

Figure 4.2 (a) Raman spectrum and (b) rocking curve of GaN (002) plane before and after substrate transfer.

4.2.2 高分辨 X 射线衍射表征

异质外延生长的晶体材料中存在的位错等晶体缺陷会导致材料特性恶化，而晶体质量又是材料的重要参数，是影响器件性能的关键材料属性。高分辨 X 射线衍射 (HRXRD) 是材料研究领域常用的非破坏性测试表征技术，可以用来表征材料的晶体质量。根据研究可知，HRXRD 测试技术的 ω 扫描模式下的摇

摆曲线可以用来衡量材料的结晶品质，其半高宽（FWHM）可用于计算材料的位错密度。我们对衬底转移前后 GaN 外延材料的对称衍射面（002）面进行了 HRXRD 测量，以评估转移前后半导体材料的晶体质量。GaN（002）面在衬底转移前后的摇摆曲线如图 4.2 b 所示。由图可知，Si 衬底上的 GaN（002）平面的 FWHM 为 425 arcsec，而转移到柔性基底后，FWHM 增加到 509 arcsec。根据相关研究^[99]可知，GaN（002）面的摇摆曲线与螺位错有关，其 FWHM 值可以反映螺位错的密度。根据公式^[100-102]，可以计算得：

$$D_{\text{screw}} = \frac{\beta^2}{4.36b^2} \quad (4.2)$$

式中， D_{screw} 为螺位错密度， β 为摇摆曲线的半高宽值， b 为伯格斯量。位于刚性衬底和柔性衬底上的 GaN（002）平面的螺位错密度分别是 $3.62 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $5.12 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，可以看到衬底转移前后位错密度有所增加，表明衬底去除会导致外延层中产生位错或生成新的缺陷，会对晶体质量和材料性能造成损伤。

4.3 不同衬底器件电学性能分析

在衬底转移过程中，半导体材料特性的改变势必会对器件的电学性能产生影响。在研究中我们对位于不同衬底上的 HEMT 器件进行了电学性能测试，以探讨在柔性化过程中器件电学性能的变化情况。

4.3.1 电容-电压分析

肖特基势垒的空间电荷区的宽度与电荷数量与结上外加电压有关。电容-电压（C-V）测试正是利用这一特性来对肖特基势垒半导体一侧的电荷浓度及其分布进行测量。对 AlGaIn/GaN 异质结材料而言，C-V 测试可以得到异质结间 2DEG 的面密度以及载流子浓度随深度的分布情况。刚性衬底和柔性衬底上的 C-V 测试曲线图（在 1 MHz 频率条件下）以及相应载流子浓度随深度的分布图如图 4.3 所示。由 C-V 曲线图 4.3a 可知，AlGaIn/GaN 异质结间 2DEG 的面密度可以由如下公式表示^[103]：

$$n_s = \frac{1}{qA} \int C dV \quad (4.3)$$

根据分析可以得知，在衬底转移之后，位于柔性衬底上的半导体异质结处

的 2DEG 的面密度相比之前有所降低, 这会对柔性电子器件的电学性能产生影响。通过 C-V 曲线可以得到载流子浓度随深度的分布图, 即载流子的剖面图^[104]。图 4.3 b 直观表示了在异质结不同耗尽深度下的载流子体密度的分布情况。图中纵坐标 N 为载流子体密度, 横坐标 Depth 是载流子在异质结中的深度。从图 4.3 b 可知, 2DEG 主要集中在 25 nm 深度以内, 而且由其峰值的位置可以估算出异质结处 2DEG 所处的大致位置。可见在衬底转移之后 2DEG 的限域性依然良好, 紧密分布在半导体异质结界面处。通过 C-V 测试曲线我们可以看到, 衬底转移之后异质结处 2DEG 的面密度有所下降, 但载流子的限域性依然保持良好。对于 GaN 基 HEMT 器件而言, 其电学性能和 2DEG 的状态密切相关, 由于衬底转移过程中会不可避免地在材料内部产生缺陷, 导致载流子的密度降低, 并最终会引起 HEMT 器件的电学性能下降。

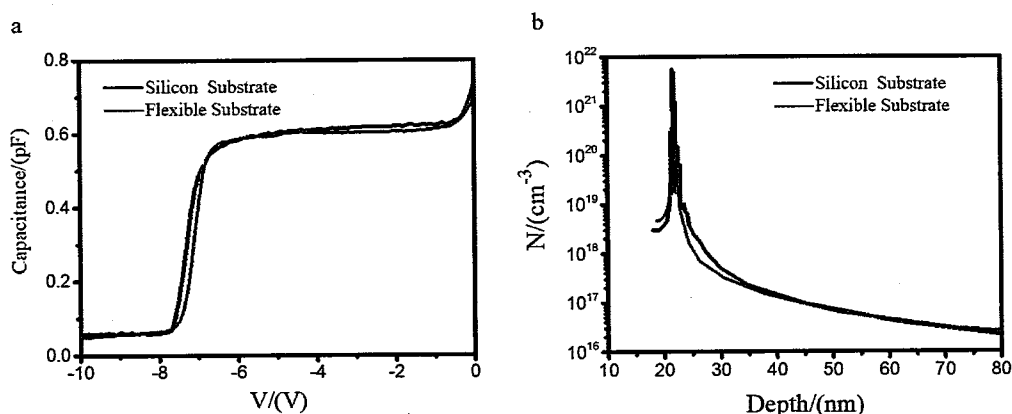


图 4.3 Si 衬底和柔性衬底上 (a) C-V 曲线; (b) 载流子浓度与耗尽深度的分布图

Figure 4.3 (a) C-V curve and (b) carrier concentration as a function of depletion depth on Si substrate and flexible substrate.

4.3.2 HEMT 器件电学性能分析

AlGa_N/Ga_N 异质结界面处 2DEG 中的电子是 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件导电沟道传输的载流子。HEMT 器件是一种场效应晶体管, 其中两个欧姆接触之间的电流流动受到栅极肖特基势垒接触的控制, 肖特基栅极可以利用栅极偏压调制 AlGa_N 势垒层的电场的变化, 进而调控栅极金属下方沟道处的 2DEG 的电荷密度^[105]。GaN 基 HEMT 器件的源极和漏极金属电极与 AlGa_N/Ga_N 异质结材料中的沟道 2DEG 衔接形成欧姆接触, 施加漏极偏压 V_{ds} 在沟道中形成横向电

场，引起电子横向输运形成电流 I_{ds} ；肖特基势垒栅极利用栅极偏压 V_{gs} 调制栅极下面沟道中的电子浓度，从而控制沟道的开启或闭合。

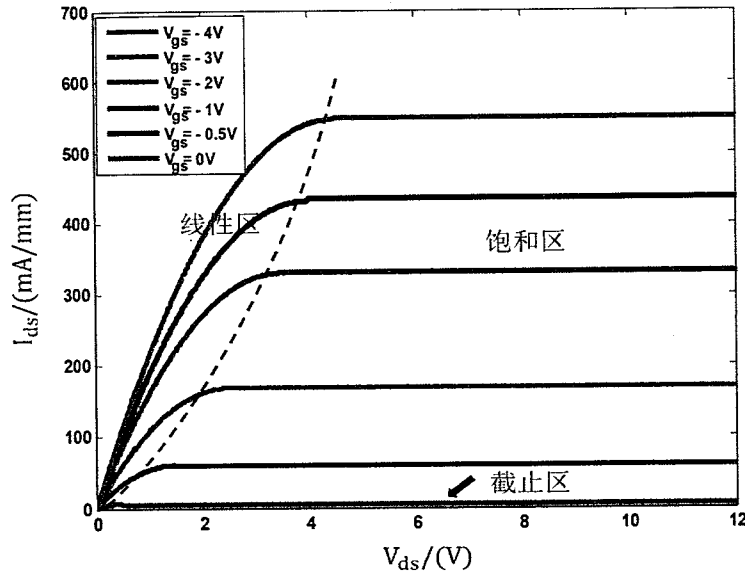


图 4.4 AlGaN/GaN HEMT 器件的理论理想输出特性^[106]

Figureb 4.4 Theoretical ideal output characteristics of AlGaN / GaN HEMT device^[106]

图 4.4 为 AlGaN/GaN HEMT 器件的理论理想输出特性曲线，器件的工作范围可以分为：（1）截止区，当 HEMT 器件的栅极偏压 V_{gs} 小于阈值电压 V_{th} 时，栅极下方沟道处的二维电子气被耗尽，导电沟道被关断，器件源极和漏极之间的电流 I_{ds} 将非常小，接近于零，此时器件处于截止状态；（2）线性区，当施加固定的栅极偏置电压 V_{gs} ，且大于阈值电压 V_{th} 时，在这种情况下，器件沟道处于导通状态，源漏电压 V_{ds} 较小时，器件的开态电阻近似保持不变，器件的漏源电流 I_{ds} 正比于漏源之间的电压 V_{ds} ，器件工作于线性区；（3）饱和区，在线性区的基础上，当漏极电压 V_{ds} 继续增加，直到达到夹断电压时，靠近漏极的栅极电极下的电压差小于器件的阈值电压，此处沟道中的电子将被耗尽，当漏极电压超过夹断电压后，漏极的电流基本上保持不变，器件工作于饱和区。除此之外，源漏电极间的电流在饱和区曲线平坦，没有出现较大的上升或者下降，表明器件的性能稳定。以上是 AlGaN/GaN HEMT 器件输出特性曲线的简化分析，当具体分析器件性能时需要同时考虑电场分布、极化效应、缺陷以及自热效应等问题的影响。

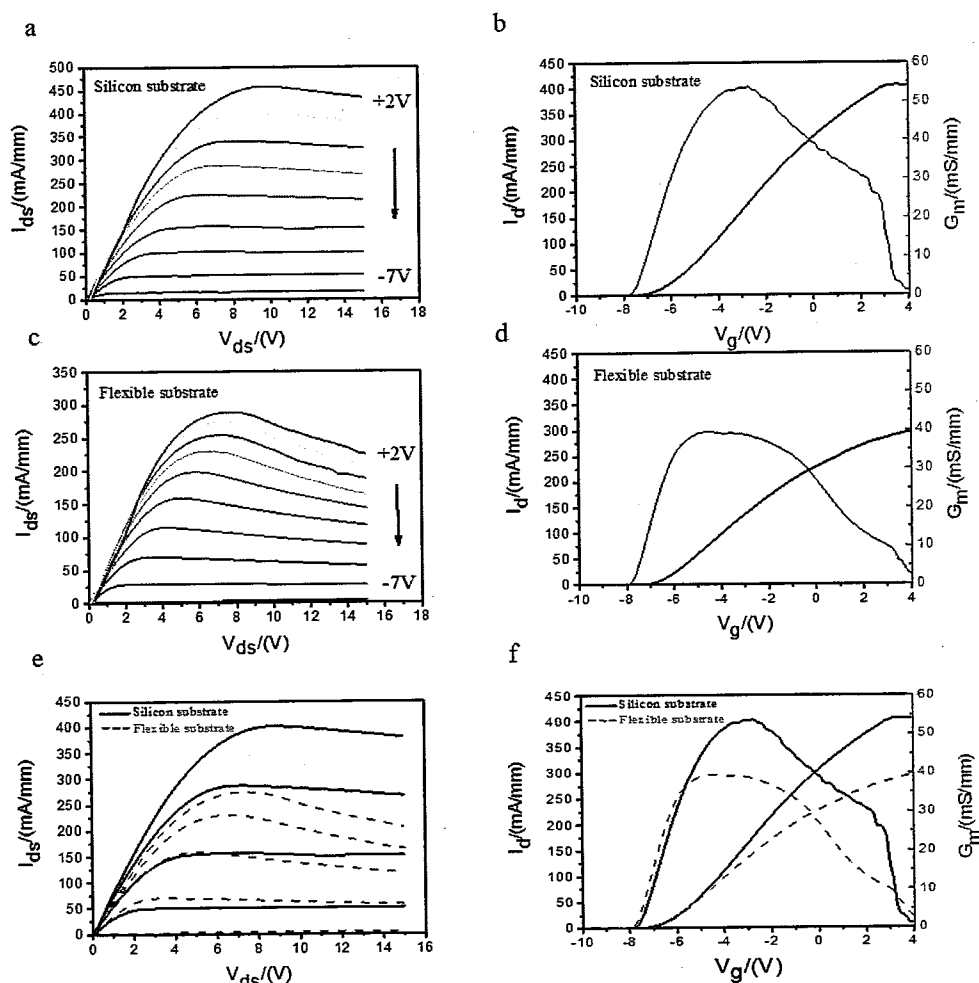


图 4.5 AlGaIn/GaN HEMT 器件的直流电学性能。Si 衬底上 HEMT 器件的 (a) 输出曲线和 (b) 转移曲线；柔性衬底上 HEMT 器件的 (c) 输出曲线和 (d) 转移曲线；(e) 和 (f) 为不同衬底上 HEMT 器件的直流电学性能对比

Figure 4.5 DC electrical performance of AlGaIn / GaN HEMT devices. (a) Output curve and (b) transfer curve of HEMT device on Si substrate; (c) output curve and (d) transfer curve of HEMT device on flexible substrate; (e) and (f) comparison of DC electrical performance of HEMT devices on different substrates.

为了表征 HEMT 器件的直流电学特性，我们测量了器件的直流 I-V（电流-电压）特性，称为输出特性和转移特性。在本研究中，我们使用 Keysight B1500 半导体器件分析仪对不同衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的电学性能进行了测试，如图 4.5 所示。根据图 4.5 我们可以看出，无论是在 Si 衬底还是柔性衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件，其测得的电性能曲线均具有常规 HEMT

器件理想电学性能的典型特征，这也证明我们实验中所制备的 HEMT 器件均具有良好的电学性能。图 4.5 a 为 Si 衬底上的 GaN 基 HEMT 器件的输出特性曲线，固定源漏电压的范围是 0V~15V，栅极偏压从上至下为 +2V~-7V，步长为 1V；图 4.5 b 为器件的转移特性曲线，固定源漏电压高于膝点电压，栅极电压变化范围为 -10V~4V。由输出曲线图 4.5 a 可知，当栅极偏压 $V_{gs} = -7V$ （小于阈值电压 V_{th} ）时，器件沟道处于关闭状态，Si 衬底上的 HEMT 器件处于截止区，此时的源漏电流很小，表明该器件在这种情况下具有良好的低漏电特性。随着栅极偏压 V_{gs} 继续增加，器件沟道开启，输出电流逐渐增大，当 $V_{gs} = +2V$ 时，HEMT 器件源漏间的最大饱和输出电流密度 $I_{ds} = 457 \text{ mA/mm}$ ，表明制备的器件具备良好的电学性能。器件的跨导 g_m 反映了栅极对沟道电流的调控能力，是 HEMT 器件的重要参数之一，根据转移特性曲线图 4.5 b 可知，Si 衬底上的 HEMT 器件的最大跨导值为 $g_{m,max} = 53 \text{ mS/mm}$ 。图 4.5 c 和图 4.5 d 分别为柔性衬底上的 GaN 基 HEMT 器件的输出和转移特性曲线。由图可知，位于柔性衬底上的 AlGaN/GaN HEMT 器件依然具有 HEMT 器件的典型电学曲线特征，当晶体管在截止区（栅压 $V_{gs} = -7V$ ）时，柔性 HEMT 的关态源漏电流也很低，这说明在衬底转移之后柔性 HEMT 的关态电学性能没有发生改变，这也证明衬底转移技术保持了 HEMT 的基本电学特性。柔性 HEMT 器件源漏之间的最大饱和输出电流密度为 $I_{ds} = 290 \text{ mA/mm}$ ，此时栅压 $V_{gs} = +2V$ ，而最大跨导值为 $g_{m,max} = 40 \text{ mS/mm}$ 。由前述材料特性分析可知，衬底转移之后 AlGaN/GaN 异质结的材料特性发生了改变，反映到半导体器件上就是器件的电学性能会有差异。由图 4.5 e 可知，柔性衬底上 HEMT 器件的最大饱和输出电流密度与 Si 衬底上器件相比有所降低，而且在饱和区出现了明显的电流崩塌现象^[107, 108]，即当 HEMT 源漏电压较高时，器件的输出电流大大减小。除此之外，图 4.5 f 显示柔性 HEMT 器件的最大跨导值也有所下降，但是与刚性衬底上的器件相比，其跨导可以在较大的栅极电压范围内保持相对稳定，这可能有利于器件在动态环境中的应用。与先前的研究^[66, 109-111]相比，本论文中的柔性 AlGaN/GaN HEMT 器件依然具有良好的电学特性。

在器件柔性化过程中，造成器件电学性能损失是不可避免的现象，减轻柔性器件的性能下降仍然是一个重大问题。柔性器件电流下降的原因有很多，例

如应力状态变化^[112], 陷阱效应^[113]和自热效应^[66, 114]等。从衬底转移前后的 HRXRD 表征和 Raman 测试可以分析得出, 在衬底转移之后, 半导体外延层中的位错密度增加, 层内的应力状态也发生了改变, 导致半导体材料的晶格失配和位错加剧, 在外延层中产生了新的缺陷, 导致沟道内的载流子受到影响, 引起异质结间二维电子气的密度下降。先前的报道^[115-117]指出, 半导体材料特性变差会引起器件电性能退化, 反映到电学曲线上即源漏输出电流值降低、跨导值减小, 导致器件的输出功率密度减小^[118, 119]。如图 4.5 e 所示, 当柔性 HEMT 器件位于饱和区内, 器件的源漏电压较高时, 器件的输出电流存在电流崩塌现象, 这可能和自热效应有关。当 AlGaIn/GaN HEMT 器件在较大的偏置电压下工作时, 较大的功耗将导致器件温度升高, 引起器件的有源区发生明显的自热, 该现象对器件的 I-V 特性具有重大影响, 通常被称为“自热效应”^[120, 121]。自热效应的特征是源漏间的 I-V 曲线中电流有个明显的向下弯曲现象, 它会导致栅极性能退化, 并可能导致设备故障和一系列可靠性问题^[122]。针对 AlGaIn/GaN HEMT 器件而言, 器件中驱动的非常高的电流主要限制在薄层的沟道内, 由于二维电子气和 III 族氮化物器件层较薄, 所以 AlGaIn/GaN HEMT 的散热主要是垂直的, 因此加强衬底的散热非常有必要^[114]。在常见的散热材料中, 铜具有非常好的导热性, 这也是我们选择它作为 HEMT 器件柔性衬底的原因之一。但是为了将 HEMT 器件粘附到柔性铜衬底上, 我们采用了环氧树脂作为粘合剂, 该环氧树脂粘合剂的导热性较差, 所以器件的散热效果不佳, 这也导致了柔性器件的电学性能出现饱和电流下降和崩塌的现象。在以后的工作中, 我们可以通过优化环氧树脂粘合剂的厚度或选择导热性更好的粘合剂来进一步地降低自热效应, 从而改善柔性 HEMT 器件的性能并提高器件的可靠性。

4.4 压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件

根据先前研究可知, 在 AlGaIn/GaN 异质结界面处存在高密度的二维电子气, 通过改变 AlGaIn/GaN 异质结界面的能带结构, 可以有效地调节载流子的密度, 进而调制器件的电学性能^[123, 124]。压电电子学效应是半导体材料中的压电特性和半导体特性之间的耦合效应, 通过利用应变诱导产生的压电极化电荷来调制界面处的能带结构, 为调制接触处或结区的载流子的输运提供了一条新途径^[125]。压电电子学效应为优化器件性能提供了不同的自由度, 有望改善许多电

子器件的性能, 该效应可以用于制造新颖的器件来响应外部机械刺激, 以实现微/纳米电子设备与外部机械应变之间的有效且无缝的相互作用。基于这种机理, 已有研究成功地制备了应力调制的 HEMT 器件^[90-92], 这些电子器件在外部弱机械刺激和高功率输出之间建立了实时、灵敏和无缝的交互, 在人机界面、智能传感和机械能收集等方面具有巨大的潜力。但是刚性衬底上 HEMT 器件的调制范围有限, 承受更高的机械变形是柔性电子器件的重要方向, 而 GaN 基柔性 HEMT 恰好可以实现这一目标。由于非中心对称的 GaN 材料同时具备半导体特性和压电特性, 当 GaN 基柔性电子器件受到机械形变时, 所施加的机械形变会诱导产生压电极化, 进而影响器件中载流子的输运性质; 而压电电子学效应是压电特性和半导体特性之间的耦合效应, 因此利用压电电子学效应可以细致地分析机械形变与电子器件性能之间的关系。通过研究压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件, 不仅为柔性电子器件和周围环境中的激励信号间自适应式的交互起到桥梁作用, 而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的思路。

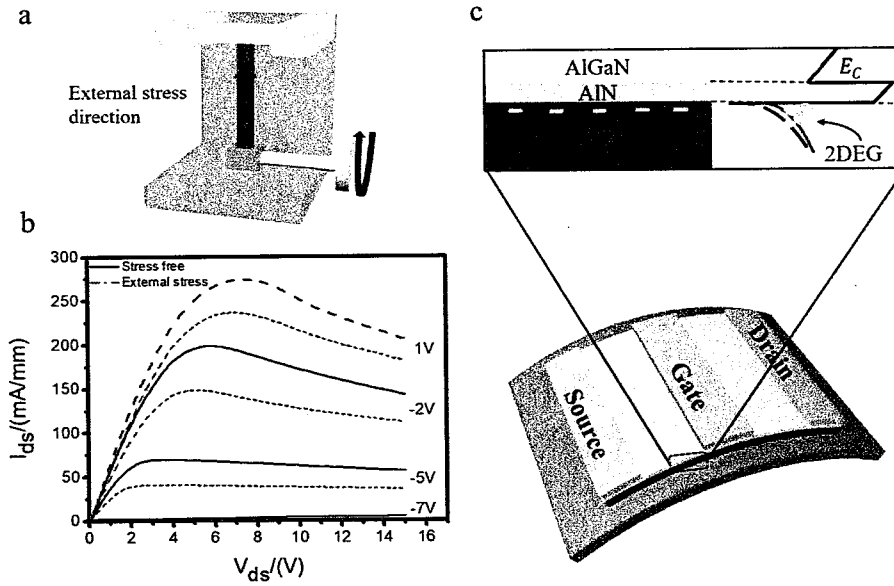


图 4.6 压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件。(a) 施加外应力的装置; (b) 外应力作用下的柔性 HEMT 器件的电学性能; (c) 压电电子学效应调制器件示意图

Figure 4.6 Piezotronic effect modulated flexible AlGaIn/GaN HEMT. (a) Devices for applying external stress; (b) Electrical performance of flexible HEMT device under stress; (c) Schematic of a device modulated by piezotronic effect.

如图 4.6 a 所示, 我们可以通过自制的应力装置给柔性 HEMT 器件施加外应力, 调节装置的旋钮可以控制旋进的深度, 而不同的旋进深度可以用来表征施加到样品上的外应力大小。与刚性硅衬底相比, 柔性衬底具有较好的柔韧性。在无应力和施加外应力状态下的 HEMT 器件的 I-V 曲线绘制在图 4.6 b 中。可以很明显看到, AlGaIn/GaN HEMT 的直流性能受到所施加应力的影响。在相同的栅极电压下, 与无应力状态时相比, 有外应力状态下的器件位于饱和区的电流 I_{ds} 下降, 而饱和区的电流又与二维电子气的性质紧密相关, 所以可以尝试从压电电子学效应的角度来进行理解。如图 4.6 c 所示, 由于 AlGaIn/GaN 异质结具有很强的自发极化 (P_{sp}) 和压电极化 (P_{pe}) [126, 127], 施加的外应力会引起 AlGaIn/GaN 异质结的能带结构发生变化, 进而改变异质结处的势阱深度, 调节界面处载流子的密度, 最终影响器件的电学性能。

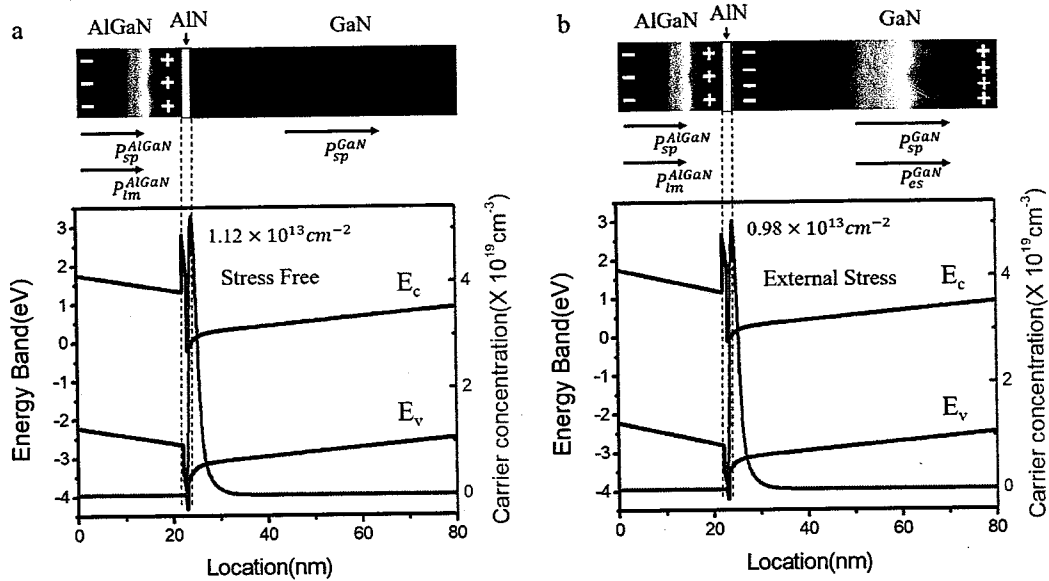


图 4.7 AlGaIn/GaN 异质结界面处的能带图 (a) 不受力; (b) 有应力

Figure 4.7 Band diagrams at the interface of AlGaIn/GaN heterojunction. (a) Under stress free; (b) Under external stress.

为了进一步了解器件电学性能的变化与压电电子学效应之间的关系, 我们通过 Schrödinger 方程和 Poisson 方程的自洽数值计算获得了 AlGaIn/GaN 异质结的能带图。如图 4.7 所示, 黑色的线表征异质结构中的能带弯曲情况, 红色的线表示载流子在异质结材料中的分布情况 (图中所标数值为二维电子气的的面密

度值)。在无应力条件下,如图 4.7 a 所示,由于 AlGaN 和 GaN 中正负电荷中心的不重合,存在自发极化 P_{SP}^{AlGaN} 和 P_{SP}^{GaN} ,以及由 AlGaN 层中的晶格失配而引起的压电极化 P_{lm}^{AlGaN} ,在 P_{SP}^{AlGaN} 、 P_{SP}^{GaN} 和 P_{lm}^{AlGaN} 引起的电场作用下,电子被俘获在 AlGaN/GaN 异质结界面处的三角形势阱中,形成只能在平面内运动而垂直方面运动受阻的高密度二维电子气。在有应力状态时,由于厚的 GaN 层基本没被刻蚀掉,而台面隔离的 AlGaN 层隔离岛的尺寸又远小于整个外延层的尺寸,因此可以认为施加到器件背面的外应力通过弯曲形变只传递到 GaN 层,即外应力不改变 AlGaN 层的应力状态而只影响 GaN 层的应力状态^[128, 129]。如图 4.7 b 所示,施加外部应力会改变 AlGaN/GaN 异质结带,外应力在 GaN 层中产生压电极化引起负压电电荷,导致负的有效电荷积聚在异质结界面处,提高了 GaN 一侧的能带,从而使异质结界面处的三角势阱变浅。由于势阱变浅会造成束缚载流子的能力变弱,进而降低势阱中 2DEG 的密度,所以将导致 HEMT 器件的饱和电流值下降,这也解释了在无/有外应力状态下器件电学性能的变化情况。压电电子学效应为优化器件性能提供了不同的自由度,可以用于制造新颖的器件来响应外部机械刺激,以实现微/纳米电子设备与外部机械应变之间的有效且无缝的相互作用。

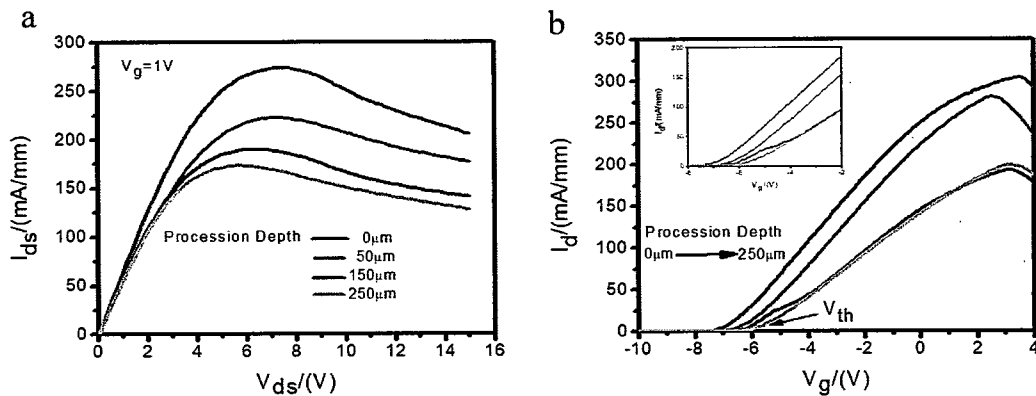


图 4.8 不同外应力条件下的柔性 HEMT 器件的 (c) 输出特性曲线和 (d) 转移特性曲线

Figure 4.8 (c) Output characteristic curve and (d) transfer characteristic curve of flexible HEMT device under different stress conditions

此外我们还探索了在不同外应力状态下压电电子学效应的调制作用。图 4.8 a 显示了在 $V_g = 1$ V 时 GaN 基柔性 HEMT 器件在不同外应力下的电流变化情况

(旋进深度从上到下增加表明外应力逐渐增大)。从图中可以发现,随着外部应力的增加,源漏电流 I_{ds} 逐渐减小,这与压电电子学效应调制 AlGaIn/GaN 异质结处的 2DEG 密切相关。压电电子学效应的调制机制如上所述,实验结果表明随着外应力的逐渐增加,HEMT 器件的饱和电流值逐渐下降,这说明压电电子学效应的调制作用得到了加强,引起了异质结界面处 2DEG 的密度进一步降低。由于常规的 AlGaIn/GaN HEMT 器件为耗尽型器件,所以器件的阈值电压是负值。根据研究,就材料特性与器件性能参数的关系来说,二维电子气密度与阈值电压的绝对值之间存在正相关的关系^[67, 130]。图 4.8 b 是施加不同外应力状态下的转移特性曲线,可以看到随着外应力的逐步增加,器件的阈值电压 (V_{th}) 逐渐正向偏移,表明异质结处的 2DEG 密度呈下降趋势,这也进一步佐证了不同应力状态下柔性 HEMT 器件电学性能的变化情况。研究结果的分析表明,压电电子学效应可以有效地调节柔性 HEMT 的电学性能,并且随着外应力的逐渐增加,压电电子学效应的调制作用也得到了加强,从而实现电子器件与外部刺激之间有效且无缝的相互作用。

4.5 本章小结

本章节在实现 HEMT 器件柔性化的基础上,通过 Raman、HRXRD、电容-电压测试手段分析了衬底转移前后氮化物材料特性的变化,实验结果表明在衬底去除的过程中,材料内部的缺陷密度增多,应力状态也发生了变化,引起异质结处的二维电子气密度降低。半导体材料特性变差导致 GaN 基柔性 HEMT 器件的电学性能下降,即器件饱和电流值和跨导值降低。本章节探究了压电电子学效应对柔性 HEMT 器件性能的调制作用,并且通过能带的自洽计算深入理解了压电电子学效应调制的机理,即施加的外部应力会改变 AlGaIn/GaN 异质结能带,使异质结界面处的势阱束缚载流子的能力变弱。实验结果表明,压电电子学效应可以有效地调节柔性 HEMT 器件的电学性能,能够实现电子器件与外部刺激之间有效且无缝的相互作用,在智能传感和机械能收集等方面具有巨大的应用潜力。通过研究压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件,不仅为柔性电子器件和周围环境中的激励信号间自适应式的交互起到桥梁作用,而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的思路。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本论文主要研究了 GaN 基柔性电子器件。实验中以 GaN 材料为基础,通过微纳加工工艺制备了 Si 衬底上的 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件,并开发了一种简便易行、阵列化的衬底转移技术,实现了 GaN 基电子器件的柔性化。结合材料表征、电学性能测试等手段对不同衬底上的半导体材料与器件进行研究,分析了在柔性化过程中材料与器件的变化情况。基于压电电子学效应调制的柔性 HEMT 器件,不仅为柔性电子器件和机械应力激励信号间自适应式的交互起到桥梁作用,而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的思路。本论文的主要结论如下:

(1) AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的制备与柔性化

以异质外延生长的半导体材料为基础,通过微纳加工工艺制备出了 Si 衬底上的 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件。研究中开发了一种简便易行、阵列化的衬底转移技术,实现了 GaN 基 HEMT 器件阵列的柔性化。柔性 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的形貌表征说明,刚性衬底上大规模且排列良好的器件阵列已完全转移到柔性衬底上,而且柔性 HEMT 器件的电极没有损坏。形貌分析的结果说明我们使用的衬底转移技术可以实现大尺寸、排列完整的阵列化转移,为实现 GaN 基器件的柔性化提供了新的解决办法,也为后续针对柔性电子器件开展研究奠定了基础。

(2) 压电电子学效应调制 GaN 基柔性器件

对氮化物材料特性的分析表明,在衬底去除的过程中,材料内部的缺陷密度增多,应力状态也发生了变化,引起异质结处的二维电子气密度降低。不同衬底上 HEMT 器件的电学测试结果说明,在柔性化过程中器件的性能有所下降,但是制备的柔性 HEMT 器件依然具有良好的电学性能。论文探究了压电电子学效应对柔性 AlGa_N/Ga_N HEMT 器件的调制,并且通过能带的自洽计算深入理解了压电电子学效应调制的机理。实验结果证明压电电子学效应可以有效地调节柔性 HEMT 的电学性能,实现电子器件与外部刺激之间有效且无缝的相互作用。通过研究压电电子学效应调制柔性 HEMT 器件,不仅为柔性电子器件

和周围环境中的激励信号间自适应式的交互起到桥梁作用，而且还可以为压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用提供新的见解。

5.2 展望

AlGaIn/GaN HEMT 器件以其优异的性能可以满足不断增长的通信等领域的需求，具有广阔的应用前景。传统的 GaN 基电子器件位于刚性衬底上，在受到形变时容易导致器件性能失效，极大的限制了其应用，而 GaN 基柔性电子器件能够提供更高的灵活性，可以在可穿戴电子器件、非平面设备、雷达天线、电力电子等技术领域中得到广泛应用。

在本研究中，我们实现了 GaN 基电子器件的柔性化，而且制备的柔性 HEMT 器件具有良好的电学性能，但是仍然可以合理地针对衬底转移技术进行优化，例如使用更合适的粘结剂或者改进腐蚀工艺等等，以减轻柔性化过程给半导体材料和器件带来的影响，此外也可以使电子器件获得更大的柔韧性，使其在更大的形变环境下保持正常工作。实现 GaN 基电子器件的柔性化是电子器件未来的研究方向之一，具有很高的应用价值，在我们以后的研究工作中可以对柔性化的相关问题进行深入探索。

压电电子学效应是压电特性和半导体特性之间的双向耦合效应，通过利用应变诱导产生的压电极化电荷来调制界面处的能带结构。压电电子学效应为调制界面处或结区的载流子的输运提供了一条新途径，为优化器件性能提供了不同的自由度，有望改善电子器件的性能，具有重要的应用意义。

在研究中我们证明了压电电子学效应可以有效地调节柔性 HEMT 的电学性能，能够实现电子器件与外部刺激之间有效且无缝的相互作用。将压电电子学与柔性电子器件在更多的不同环境下结合起来，将在人机界面、智能传感和机械能收集等方面具有巨大的应用潜力。压电电子学在柔性电子器件中的潜在应用值得我们在未来的工作当中开展进一步研究。