

团 体 标 准

T/CASAS 027—2023

射频 GaN HEMT 外延片二维电子气迁移率 非接触霍尔测量方法

Two-dimensional electron gas mobility of RF GaN HEMT epitaxial
wafers—Non-contact Hall measurement method

版本：V01.00

2023-06-30 发布

2023-07-01 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 次

前言.....	III
引言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号.....	1
5 测试原理.....	2
6 精密度.....	3
7 试验条件.....	3
8 干扰因素.....	3
9 仪器设备.....	3
10 测试样品.....	4
11 测试程序.....	4
11.1 系统自校准.....	4
11.2 测试步骤.....	4
11.3 测试点位.....	4
12 试验报告.....	5
附录 A （资料性） 测试报告示例	6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由北京第三代半导体产业技术创新战略联盟标准化委员会（CASAS）制定发布，版权归 CASAS 所有，未经 CASAS 许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经 CASAS 允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件起草单位：中国科学院半导体研究所、厦门市三安集成电路有限公司、北京大学、中兴通讯股份有限公司、中国电子科技集团公司第十三研究所、LUVA SYTEM INC.、苏州能讯高能半导体有限公司、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：魏学成、刘波亭、杨学林、刘建利、宋学峰、Roger Luo、裴轶、徐瑞鹏。

引 言

随着 5G 移动通讯技术的快速发展,基于氮化镓材料的功放模块已广泛应用于 5G 基站中用来提升系统性能。氮化镓基异质结构是氮化镓高电子迁移率晶体管的基本外延结构,在氮化镓异质结界面因极化而产生二维电子气,其迁移率是射频氮化镓器件的核心指标项,决定着氮化镓器件的性能。因此准确测试和真实反映射频氮化镓异质结构外延片的二维电子气迁移率,成为衡量该外延片和对应器件性能的重要指标;基于此,制定射频氮化镓异质结构外延片二维电子气迁移率的非接触霍尔测量方法及规范,真实反映和量测二维电子气的迁移率,对研发、生产过程中外延片的性能评估和监控等具有指导意义。

射频 GaN HEMT 外延片二维电子气迁移率 非接触霍尔测量方法

1 范围

本文件描述了射频 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 外延片的二维电子气迁移率非接触 Hall 测量方法的测试原理、干扰因素、测试程序和试验报告。

本文件适用于半绝缘衬底上的 GaN HEMT 外延片二维电子气迁移率测量，其迁移率测量范围在 $100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \sim 20000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。该方法同样适用于其他材料体系的类似结构（例如 GaAs、InP HEMT 结构）外延片的二维电子气迁移率测量，衬底材料的导电性应为半绝缘。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4326—2006 非本征半导体单晶霍尔迁移率和霍尔系数测量方法

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 符号

下列符号适用于本文件。

H : 磁场强度。

h : 样品厚度。

R : 微波反射率。

R_H : 霍尔系数。

R_S : 样品方阻。

TE₁₀: 电磁波波型指数为 1,0 的横电模，是入射波的偏振微波。

TE₁₁: 电磁波波型指数为 1,1 的横电模，是霍尔效应引起的于入射波正交的偏振微波。

Z_0 : 波导特征阻抗。

Z_S : 样品阻抗。

μ : 载流子迁移率。

σ : 电导张量。

5 测试原理

非接触霍尔测量是一种利用微波原理来测量半导体材料载流子迁移率的方法。该方法是使用一个固定频率的微波源，通过特定的波导网络，将微波能量传导至测试样品表面。该波导网络的设计可以使得微波的TE10和TE11的传播模式都能够被传输和测量。垂直入射到样品表面的TE10模的微波，会从测试样品表面处产生两种模式的反射波，如图1所示，一种是和入射波相同模式和极性的TE10反射波，通过探测在无外界磁场的条件下的反射回来的TE10波的功率并结合波导系统的整体阻抗来计算测试样品的方块电阻；另外一种反射波是TE11模式的波，它是TE10波到达样品表面时，由于样品在磁场作用下的霍尔效应将TE10模旋转90°以TE11模的波返回，通过探测此TE11模微波的功率，可计算出测试样品的载流子迁移率。

非接触霍尔测量系统探测到不同模式的微波得到迁移率的计算原理如下，当TE10模微波传输至样品表面时，在磁场作用下，样品的霍尔效应使电导张量发生偏转，TE10极化方向电导张量为 σ_{xx} ，TE11极化方向电导张量为 σ_{xy} 。

$$\rho_s = \sigma_{xx} / (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$R_H = -\frac{1}{H} \left| \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} \right| \dots\dots\dots (2)$$

式中：

H ——磁场强度；

R_H ——霍尔系数；

ρ_s ——薄膜电阻率。

载流子迁移率和浓度可由下式计算得出：

$$n = -1/eR_H \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu = -R_H/\rho_s \dots\dots\dots (4)$$

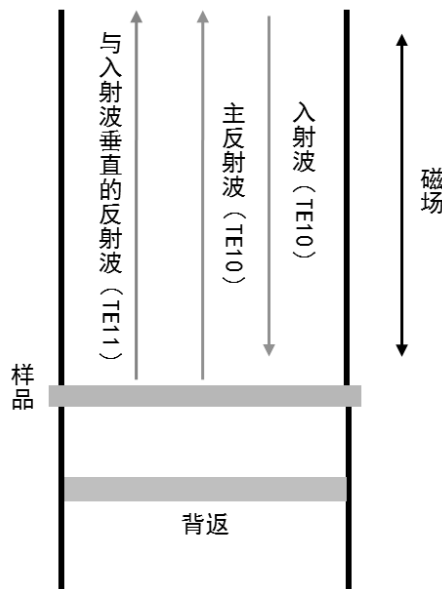


图 1 非接触霍尔测试原理

6 精密度

样品迁移率在 $100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ~ $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $10000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ~ $20000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 范围内，同一样品重复测试不少于5次，测试重复性相对偏差不超过3%；样品迁移率在 $1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ~ $10000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 范围内，同一样品重复测试不少于5次，测试重复性相对偏差不超过2%。

7 试验条件

为保证样品迁移率测试的一致性及准确性，在测试过程中需确保测试环境符合以下条件：

- 测试过程中要求无振动、无电磁干扰、良好接地的测试机台；
- 温度： $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ；
- 相对湿度： $60 \text{ \%RH} \pm 20 \text{ \%RH}$ 。

8 干扰因素

如下干扰因素会对测试结果造成影响，在测试过程中应避免：

- 不同温度对测试样品的迁移率测试结果有影响，测试环境需恒温；
- 不同光照强度对样品的迁移率测试结果有影响，测试过程中应关闭设备的遮光罩；
- 振动、磁场、静电等测试环境可对迁移率测试结果产生影响，测试过程应采取严格的屏蔽措施。

9 仪器设备

非接触霍尔测试设备的基本构成如图2所示，主要组件包含以下几部分：

- 微波源：微波发射源，一般配置为低功率及特定频率的微波源；
- 磁铁：霍尔测试过程中用来产生磁场，配置为永磁铁或电磁铁，磁场强度在 10 K Gs ；
- 波导传输系统：一组波导网络，用来传输和侦测由微波源产生或样品反射回来的特定模式的电磁波；
- 数据处理系统：将探测的微波功率的变化转换为迁移率，输出测试结果。

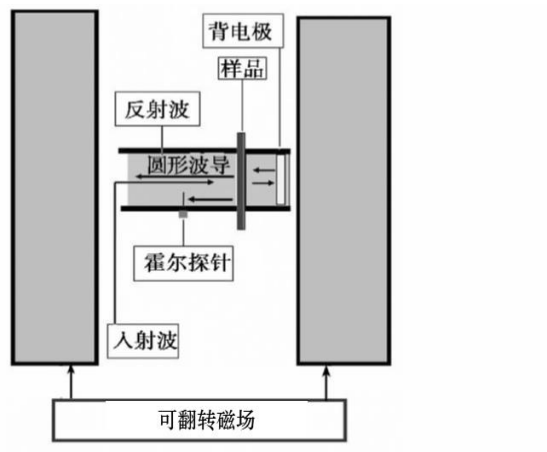


图2 非接触霍尔测试设备结构

10 测试样品

测试 GaN HEMT 结构外延片以及其他材料的类似结构外延片（例如 GaAs、InP HEMT）的二维电子气迁移率，衬底材料的导电性应为半绝缘；测试样品的总厚度范围建议在 $300\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ ；建议测试样品表面无大面积可视缺陷。

11 测试程序

测试程序应包含以下步骤：

11.1 系统自校准

使用 $\phi 50\text{ mm}$ (2英寸) Cu标准圆片对设备进行校准，将Cu标准片置于测试位置，测试出微波源的发射功率及其在Cu片上的反射功率，然后计算出Cu片的Gamma因子(发射功率和反射功率的比值)，确认该Gamma因子在 1 ± 0.05 的标准范围内，基于此步骤确认测试系统的微波源及波导系统处于正常状态。

采用经过范德堡霍尔法标定过的GaN HEMT结构样品结果（测试方法遵守GB/T 4326-2006）校准本设备，设备在校准时所用的样品与范德堡霍尔法测试样品应为同结构同批次的GaN HEMT结构外延片，确认测试结果与标定样品结果一致。

11.2 测试步骤

确认测试设备正常并校准后，开始测试：

- a) 将待测外延片置于机台特定的载物台上；
- b) 根据样品的尺寸以及测试的点位需求设置对应的测试程序文件，将材料类型，待测晶片的编号信息输入计算机，开始测试；
- c) 测试设备将根据定义好的测试位置控制载台移动对相应的区域进行迁移率测试；
- d) 测试结束后，取出所测样品，机台将自动生成文本格式的数据；
- e) 在测试软件工具中，可以根据需求将测试结果输出为Mapping图，填写测试报告。

11.3 测试点位

对不同尺寸的样品，如果需求多点位测试，建议点位说明如下：对于直径为 50 mm (2英寸)规格的样品建议取“5点”检测，其位置及坐标见图3；对于直径为 100 mm (4英寸)规格的样品建议取“9点”检测，其位置及坐标见图4；对于直径为 150 mm (6英寸)规格的样品建议取“13点”检测，其位置及坐标见图5，更多尺寸样品以此类推。

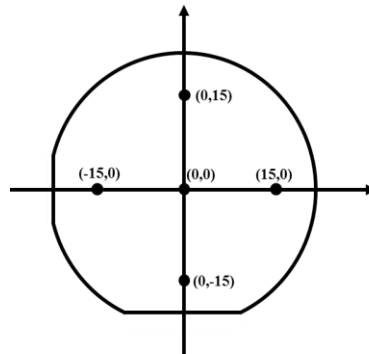


图3 直径50 mm (2英寸)样品迁移率“5点”检测位置

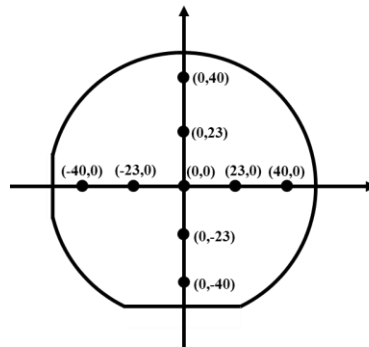


图4 直径100 mm (4英寸)样品迁移率“9点”检测位置

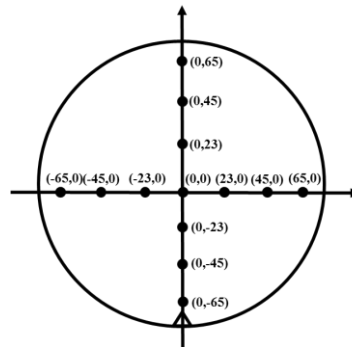


图5 直径150 mm (6英寸)样品迁移率“13点”检测位置

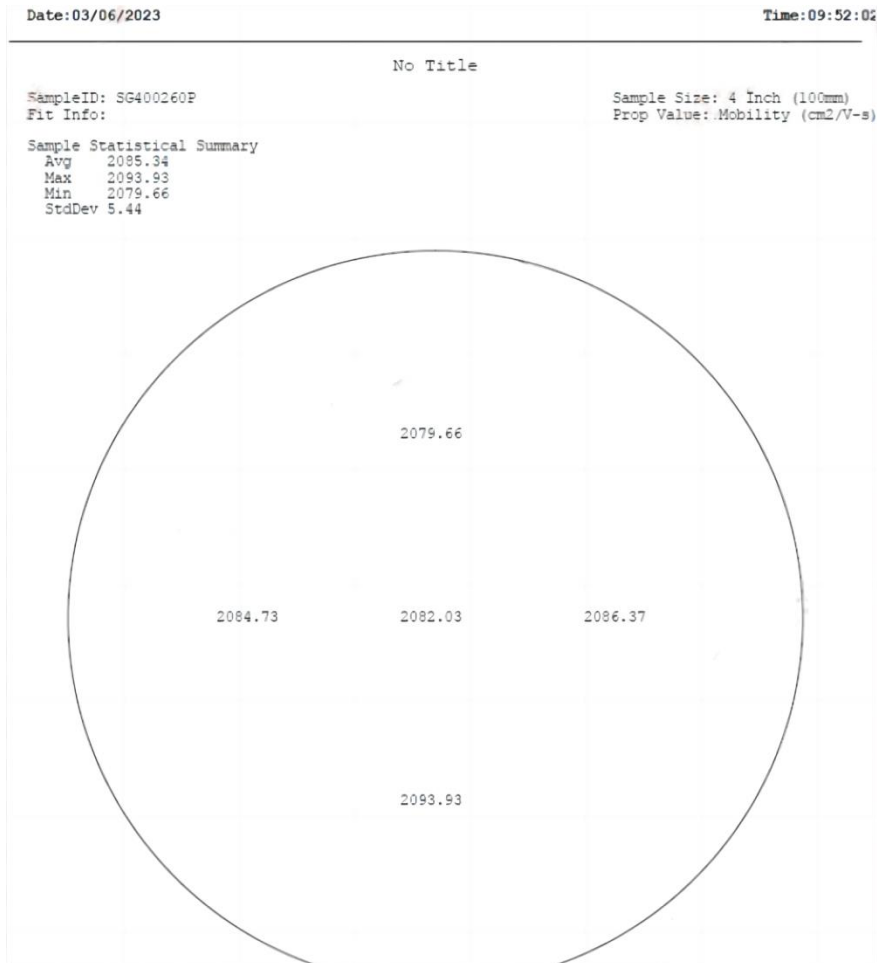
12 试验报告

测试报告应至少包含下列内容：

- a) 测试日期；
- b) 测试样品编号、尺寸；
- c) 迁移率的平均值、最大值、最小值、标准差；
- d) 测试结果输出图；
- e) 本文件编号。

附录 A
(资料性)
测试报告示例

射频GaN HEMT 外延片的二维电子气迁移率非接触Hall 测量方法测试报告参考图A. 1。



图A. 1 迁移率多点测试输出结果示例

