

团 体 标 准

T/CASAS 060—2025

用于 HEMT 功率器件的硅衬底氮化镓外延片

GaN on Si epitaxial wafers for HEMT power devices

2025 - 08 - 29 发布

2025 - 08 - 29 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 次

前言..... V

引言..... VI

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 分类..... 1

5 技术要求..... 1

 5.1 标称边缘去除..... 1

 5.2 衬底材料..... 2

 5.3 外延层晶体质量..... 2

 5.4 外延层片内厚度不均匀性..... 2

 5.5 几何参数..... 2

 5.6 电学特性..... 3

 5.7 正表面质量..... 3

 5.8 表面颗粒度..... 4

 5.9 表面粗糙度..... 4

6 试验方法..... 4

 6.1 试验条件..... 4

 6.2 衬底检测..... 4

 6.3 外延层晶体质量检测..... 4

 6.4 外延层片内厚度不均匀性检测..... 5

 6.5 几何参数检测..... 6

 6.6 缓冲层漏电流检测..... 6

 6.7 二维电子气浓度检测..... 6

 6.8 迁移率检测..... 6

 6.9 方块电阻检测..... 6

 6.10 正表面质量及表面颗粒度检测..... 6

 6.11 表面粗糙度检测..... 6

7 检验规则..... 7

 7.1 检验分类..... 7

 7.2 交付检验..... 7

 7.3 鉴定检验..... 8

8 标志、包装、运输和贮存..... 8

 8.1 标志..... 8

 8.2 包装..... 8

 8.3 运输..... 8

 8.4 贮存..... 9

附 录 A （资料性） AlGa_N 及 p-GaN 层厚度检测方法——TEM..... 10

 A.1 目的 10

 A.2 方法原理 10

 A.3 一般性要求 10

 A.3.1 仪器设备 10

 A.3.2 环境要求 10

 A.3.3 试样要求 10

 A.4 测试步骤 10

 A.4.1 样品制备 10

 A.4.2 TEM 观察 10

 A.4.3 厚度测量 10

 A.5 检测报告 10

附 录 B （资料性） AlGa_N 及 p-GaN 层厚度检测方法——XRR..... 12

 B.1 目的 12

 B.2 方法原理..... 12

 B.3 一般性要求..... 12

 B.3.1 仪器设备..... 12

 B.3.2 环境要求..... 12

 B.3.3 试样要求..... 12

 B.4 测试步骤..... 12

 B.4.1 样品准备..... 12

 B.4.2 数据采集..... 12

 B.4.3 厚度分析..... 12

 B.5 检测报告..... 13

附 录 C （资料性） 外延片弯曲度及翘曲度检测方法 14

 C.1 目的 14

 C.2 方法原理..... 14

 C.3 一般性要求..... 14

 C.3.1 仪器设备..... 14

 C.3.2 环境要求..... 14

 C.3.3 试样要求..... 14

 C.4 检测报告..... 14

附 录 D （资料性） 缓冲层（Buffer）垂直漏电流检测方法 15

 D.1 目的 15

 D.2 方法原理 15

 D.2.1 仪器设备 15

 D.2.2 环境要求 15

 D.2.3 试样要求 15

 D.3 测试步骤 15

 D.3.1 金属电极沉积 15

 D.3.2 电流-电压（I-V）测试..... 15

D.4 检测报告 15

附录 E （资料性） 方块电阻测量方法 16

 E.1 目的 16

 E.2 方法原理 16

 E.3 一般性要求 16

 E.3.1 仪器设备 16

 E.3.2 环境要求 16

 E.3.3 试样要求 16

 E.4 检测报告 17

附录 F （资料性） 正表面质量及表面颗粒度检测方法 18

 F.1 目的 18

 F.2 方法原理 18

 F.3 一般性要求 18

 F.3.1 仪器设备 18

 F.3.2 环境要求 18

 F.4 检测报告 18

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。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）制定发布，版权归CASA所有，未经CASA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CASA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。

本文件主要起草单位：苏州晶湛半导体有限公司、北京中博芯半导体科技有限公司、厦门市三安集成电路有限公司、中山大学、中国科学院半导体研究所、工业和信息化部电子第五研究所、北京大学东莞光电研究院、广东工业大学、大连理工大学、珠海镓未来科技有限公司、中国科学院微电子研究所，芯联集成电路制造股份有限公司、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：向鹏、程凯、卢国军、叶念慈、刘成、刘扬、贾利芳、施宜军、刘强、贺致远、黄火林、王中党、曾凡明、康玄武、王钰、王文平、高伟。

引 言

氮化镓（GaN）高电子迁移率晶体管（HEMT）功率器件具有高工作频率、低损耗和耐高温等优点，能够有效提高功率电子系统的效率和功率密度。GaN HEMT在电力电子器件领域具有广泛的应用前景，如消费电子、数据中心、电机驱动和航空航天等领域。硅（Si）衬底GaN HEMT结合了GaN功率器件高性能和Si衬底大尺寸、CMOS兼容等优势，成为目前GaN HEMT主流路线，实现了规模化商业量产。Si衬底GaN外延材料的性能，如翘曲、二维电子气密度、缓冲层击穿电压等参数直接决定了HEMT的器件性能和可靠性，是制备GaN HEMT的关键基础。由于受到异质外延晶格失配、热失配影响，外延材料的翘曲和击穿电压等材料性能的精确控制存在一定挑战，此外目前Si衬底GaN外延材料也还没有指导性的标准规范。本标准旨在规范用于制备HEMT用硅基GaN外延片在关键参数要求、测试方法、检测规则、包装运输等方面的标准，为后续制造GaN功率器件提供良好基础。

用于 HEMT 功率器件的硅衬底氮化镓外延片

1 范围

本文件规定了用于HEMT功率器件的硅衬底氮化镓外延片（以下简称“氮化镓外延片”）的分类、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于在硅衬底上生长的用于功率电子领域的具有复合结构的氮化镓外延片的研发生产，测试分析及质量评价。

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 1555—2023 半导体单晶晶向测定方法
- GB/T 1557—2018 硅晶体中间隙氧含量的红外吸收测量方法
- 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
- GB/T 13387—2009 硅及其他电子材料晶片参考面长度测量方法
- GB/T 14140—2009 硅片直径测量方法
- GB/T 14146—2021 硅外延层载流子浓度的测试 电容-电压法
- GB/T 14264 半导体材料术语
- GB/T 29507—2013 硅片平整度、厚度及总厚度变化测试 自动非接触扫描法
- GB/T 30653—2014 III族氮化物外延片结晶质量测试方法
- GB/T 32189—2015 氮化镓单晶衬底表面粗糙度的原子力显微镜检验法
- GB/T 32280—2022 硅片翘曲度和弯曲度的测试 自动非接触扫描法
- GB/T 40279—2021 硅片表面薄膜厚度的测试 光学反射法
- T/CASAS 002 宽禁带半导体术语

3 术语和定义

GB/T 14264、T/CASAS 002界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

半峰全宽 full width at half maximum; FWHM
特征峰高一半处的峰宽度。

4 分类

- 4.1 氮化镓外延片按直径分为6吋（150 mm）和8吋（200 mm）两种类型；
- 4.2 氮化镓外延片按应用场景分为增强型（D-mode）和耗尽型（E-mode）两种类型。

5 技术要求

5.1 标称边缘去除

测试中为了避免边缘效应的影响，氮化镓外延片标称边缘去除的要求应符合表1的规定。

表1 标称边缘去除的要求

分类	6 吋	8 吋
标称边缘去除	3 mm	5 mm

5.2 衬底材料

硅衬底氮化镓外延片的衬底参数要求及检测方法应符合表2的规定。

表2 衬底参数要求及检测方法

参数		要求		检测方法	参考标准文件
		6 吋	8 吋		
直径		Φ 150±0.2 mm	Φ 200±0.2 mm	光学投影法	GB/T 14140—2009
晶向		<111>	<111>	X射线衍射定向法 光图定向法	GB/T 1555—2023
主定位边方向 ^a	线状	<1-10>±1.0 °	<1-10>±1.0 °	光学投影法	GB/T 13387—2009
	豁口状	<1-10>±0.5 °	<1-10>±0.5°		
线状主定位边长度		47.25±2.5 mm或 57.25±2.5 mm	57.25±2.5 mm	光学投影法	GB/T 13387—2009
氧含量		<18 new ppma	<18 new ppma	红外光谱法	GB/T 1557—2018
总厚度变化（TTV）		≤3 μm	≤3 μm	自动非接触扫描法	GB/T 29507—2013
弯曲度（Bow）		≤30 μm	≤30 μm	自动非接触扫描法	GB/T 32280—2022
翘曲度（Warp）		≤30 μm	≤30 μm		
^a 指主定位边平行的晶向，一般为<1-10>，部分衬底供应商提供主定位边方向为<110>，两者为等效晶向，不做区分。线状主定位边方向与<1-10>晶向的夹角精度应在±1.0° 以内，豁口状定位边方向与<1-10>晶向的夹角精度应在±0.5° 以内。					

5.3 外延层晶体质量

外延层晶体质量考核参数为Ga_N(002)及Ga_N(102)特征峰的半峰全宽（FWHM）值应符合表3的规定。不同应用场景需求的外延材料厚度不同，Ga_N(002)及Ga_N(102)FWHM也不同。本文件建议Ga_N(002)及Ga_N(102)FWHM应符合表3的规定，或者根据实际应用场景做进一步的限定。

表3 特征峰 FWHM 最大允许限度

特征峰	GaN(002)	GaN(102)
半峰全宽（FWHM）	$< 800 \text{ arcsec}$	$< 1\,500 \text{ arcsec}$

5.4 外延层片内厚度不均匀性

外延层片内厚度不均匀性应小于3%，包括总厚度不均匀性，AlGa_N及p-Ga_N层厚度不均匀性。

5.5 几何参数

氮化镓外延片的几何参数（包括弯曲度和翘曲度）的要求应满足表4的规定。

表4 不同直径氮化镓外延片几何参数的要求

分类	6 吋	8 吋
弯曲度	-30 μm~30 μm	-50 μm~50 μm
翘曲度	≤ 30 μm	≤ 50 μm

5.6 电学特性

缓冲层（buffer layer）垂直漏电流、二维电子气、迁移率及方块电阻是氮化镓外延片的重要电学特性。由于AlGa_N/Ga_N异质结中的自发极化和压电极化效应，在AlGa_N势垒层（barrier）和Ga_N沟道层（channel）之间形成了二维电子气，具有该电学特性的外延片结构如图1所示。

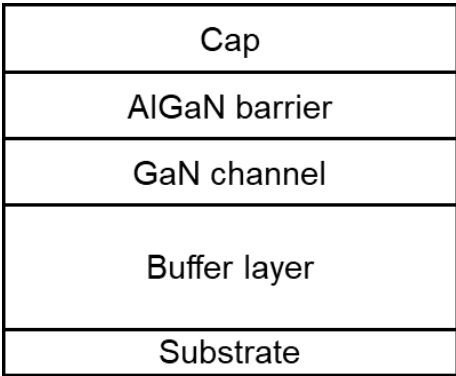


图1 HEMT 用硅衬底氮化镓外延片结构示意图

不同应用等级产品的缓冲层在不同额定电压下垂直漏电流应符合表5的规定。

表5 室温下不同应用等级产品 Buffer 在不同额定电压下漏电流最大允许限度

应用等级	额定电压下漏电流	1.5 倍额定电压下漏电流
650 V	< 0.1 μA/mm ² @ 650 V	< 10 μA/mm ² @975 V
200 V	< 0.1 μA/mm ² @200 V	< 10 μA/mm ² @300 V
100 V	< 0.1 μA/mm ² @100 V	< 10 μA/mm ² @150 V

不同应用场景对材料的电学性能要求差异较大。本文件建议不同用途氮化镓外延片的二维电子气、迁移率及方块电阻应符合表6的规定，或者根据具体的应用场景做进一步限定。

表6 不同应用氮化镓外延片二维电子气、迁移率及方块电阻的要求

应用分类	D-Mode	E-Mode
二维电子气	> 7×10 ¹² cm ⁻²	> 5×10 ¹² cm ⁻²
迁移率	> 1 600 cm ² /Vs	> 1 200 cm ² /Vs
方块电阻	< 500 Ω/sq	< 800 Ω/sq
方块电阻不均匀性	< 3 %	< 3 %

5.7 正表面质量

氮化镓外延片正表面质量的要求应符合表7的规定。

表7 不同直径氮化镓外延片正表面质量的要求

分类	6吋	8吋
边缘裂纹	<3 mm	<5 mm
划痕、划伤	表面无划痕、划伤	表面无划痕、划伤

5.8 表面颗粒度

氮化镓外延片表面颗粒度的要求应符合表8的规定。

表8 不同直径外延片边缘裂纹及颗粒（particle）要求

分类	6吋	8吋
Particle（直径>0.3 μm）	<200个	<200个
Particle（直径>1 μm）	<50个	<50个

5.9 表面粗糙度

氮化镓外延片5×5 μm²范围内表面粗糙度的要求应符合表9的规定。

表9 不同应用氮化镓外延片表面粗糙度的要求

应用分类	D-Mode	E-Mode
表面粗糙度	<0.5 nm	<1 nm

6 试验方法

6.1 试验条件

若无其它规定，产品试验应在洁净室内进行：

- a) 环境温度：23 °C±5 °C；
- b) 相对湿度：<65 %；
- c) 大气压：96 kPa～106 kPa。

6.2 衬底检测

按照衬底供应商衬底信息及表1中相关国家标准对衬底进行核实或检验。

6.3 外延层晶体质量检测

使用X射线衍射法检测外延层晶体质量，试验步骤参考国家标准GB/T 30653—2014。建议直径Φ150 mm±0.2 mm规格外延片采用9点测试，直径Φ200 mm±0.2 mm规格外延片采用9点测试（或按客户需求不同点位测试），检测点位示意图见图2和图3。

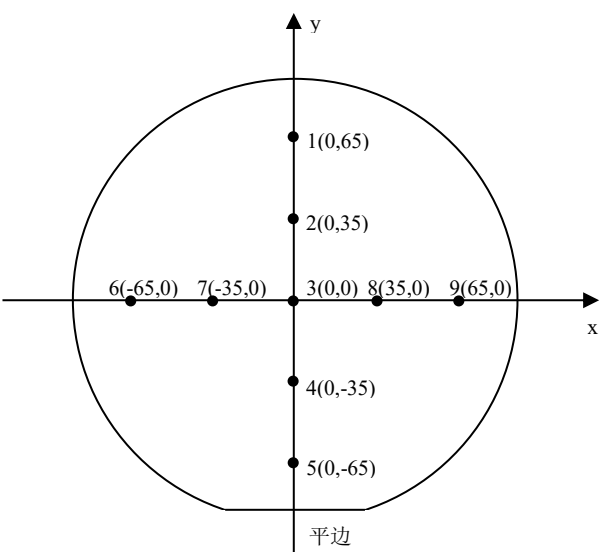


图2 Φ150 mm±0.2 mm 外延片外延层晶体质量 9 点检测点位

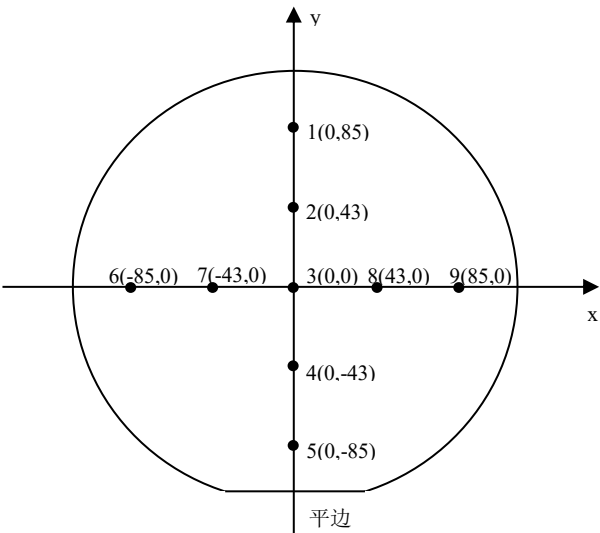


图3 Φ200 mm±0.2 mm 外延片外延层晶体质量 9 点检测点位

6.4 外延层片内厚度不均匀性检测

采用光学反射法测量外延层总厚度，检测方法参考国家标准GB/T 40279—2021。AlGaIn及p-GaN层厚度采用透射电子显微镜（有损）或X射线反射率法（无损）检测，检测方法分别按照附录A和附录B进行。建议采用9点测试（或按需求不同点位测试），检测点位示意图见图2和图3。

厚度不均匀性（TH%）按公式（1）计算：

$$TH\% = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (x_i - T)^2} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

厚度平均值（T）按公式（2）计算：

$$T = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I x_i \dots\dots\dots (2)$$

式中：

x_i ——每个测试点位的厚度值；

I ——测试点数。

6.5 几何参数检测

采用激光反射法检测外延片弯曲度和翘曲度,检测方法按照附录C进行。测试方式可按一定步长(如1 mm)沿X、Y轴或者整面测试并输出mapping图像。

6.6 缓冲层漏电流检测

由于功率器件耐压主要由外延层的垂直击穿决定,因此直接测量外延片本身的垂直击穿可以在器件加工之前估计其耐压水平,节省工艺成本。本文件采用电流-电压(I-V)法测试额定电压下缓冲层垂直漏电流,检测方法参考附录D。

6.7 二维电子气浓度检测

采用电容-电压(C-V)法检测2DEG,检测方法参考国家标准GB/T 14146—2021。或采用霍尔测试法检测2DEG,检测方法参考GB/T 4326—2006。建议采用9点测试(或按客户需求不同点位测试),检测点位示意图见图2和图3。

6.8 迁移率检测

采用霍尔测试法检测迁移率,检测方法参考GB/T 4326—2006。建议采用9点测试(或按需求不同点位测试),检测点位示意图见图2和图3。

6.9 方块电阻检测

采用传输线法检测方块电阻,检测方法按附录E进行。

或者采用霍尔测试法得到二维电子气密度(n)及迁移率(μ_H),并根据公式(3)计算得到方块电阻 R_s :

$$R_s = \frac{1}{ne\mu_H} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

e ——电子电量。

方块电阻不均匀性($R_s\%$)按公式(4)计算:

$$R_s\% = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{i=1}^J (y_i - R)^2} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

方块电阻平均值(R)按公式(5)计算:

$$R = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J y_i \dots\dots\dots (5)$$

式中:

y_i ——每个测试点位的方块电阻值;

J ——测试点数。

6.10 正表面质量及表面颗粒度检测

采用光学成像法检测外延片正表面质量及颗粒度,检测方法参考附录F。建议整片测试。

6.11 表面粗糙度检测

采用原子力显微镜检测表面粗糙度,检测方法参考国家标准GB/T 32189—2015。测试点位可选择外延片中心点或结合不同需求多点位测试。

表面粗糙度的几何平均值(R_a),按公式(6)计算:

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |Z(X_k, Y_l) - h| \dots\dots\dots (6)$$

式中：
 M ——X方向上扫描点的数量；
 N ——Y方向上扫描点的数量；
 Z ——某个扫描点的高度；
 h ——扫描点的平均高度。
扫描点的平均高度（ h ），按公式（7）计算：

$$h = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} Z(X_k, Y_l) \dots\dots\dots (7)$$

表面粗糙度的算术平方根—— Rq ，按公式（8）计算：

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [Z(X_k, Y_l) - h]^2} \dots\dots\dots (8)$$

7 检验规则

7.1 检验分类

产品检验分为交付检验和鉴定检验。

7.2 交付检验

产品检验由供方技术质量监督部门进行，保证产品质量符合本标准（或订货合同）的规定，并填写产品质量证明书。

对于时间成本较高、具有破坏性或在非洁净区环境进行的测试，一般选择每批次抽测一片；对于非破坏性且在洁净区环境进行的测试，一般选择每片外延片进行检测。外延片检测规则的建议及合格判据见表10。

表10 交付检验

序号	项目	要求	试验方法	检验规则	允许不合格数
1	外延层晶体质量	5.3	6.3	每片外延片进行检测	0
2	外延层片内厚度不均匀性	5.4	6.4	光学反射法：每片外延片进行检测 TEM 法：每批次抽检一片 XRR 法：每片外延片进行检测	0
3	几何参数	5.5	6.5	每片外延片进行检测	0
4	缓冲层漏电流	5.6	6.6	每批次生产前进行缓冲层标定检验并提供检验报告	0
5	二维电子气浓度	5.6	6.7	每批次抽检一片	0
6	迁移率	5.6	6.8	每批次抽检一片	0
7	方块电阻	5.6	6.9	每批次抽检一片	0
8	正表面质量	5.7	6.10	每片外延片进行检测	0
9	表面颗粒度	5.8	6.10	每片外延片进行检测	
10	表面粗糙度	5.9	6.11	每批次抽检一片	0

若表10中存在检验不合格项，由供需双方协商确定。

如果产品因不合格而被拒收，生产方应将该产品取回进行分析；若产品不合格是因为外延片的电学参数、厚度、表面粗糙度等达不到合格标准或者合同的要求，则该产品应由生产方重新提供合格的产品。

需方可对收到的产品按本标准进行检验。若发现产品质量不符合本标准或合同要求时，应在收到产品之日起3个月内向供方提出，由供需双方协商解决。

7.3 鉴定检验

在下列情况之一，应做鉴定检验：

- a) 新产品鉴定时；
- b) 产品结构、工艺、材料发生变化影响质量时；
- c) 正常生产产品每六个月至少一次；
- d) 停产半年以上又恢复生产时；
- e) 产品质量发生异常情况时；
- f) 质量监督部门要求检验时。

鉴定检验项目为本文件第5章规定的全部项目。

鉴定检验的样品应从交付检验合格的产品中随机抽取六片，分为三组。

取一组外延片进行鉴定检验，检验中发现一项不合格则将另外两组进行复查，如仍然出现一项不合格，则该次鉴定检验判定为不合格。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

包装盒上应有下列标志：

- a) 产品名称；
- b) 晶型、尺寸；
- c) 晶片编号。

包装箱上应有下列标志：

- a) 产品名称、型号、数量、发货日期；
- b) 需方名称、地址；
- c) 生产方名称、地址、电话；
- d) 防撞、防摔、防腐蚀标志。

产品质量保证书的内容包括：

- a) 合同定单号、质量保证书编号；
- b) 晶片编号；
- c) 晶片类型；
- d) 晶向、晶片直径尺寸、晶片厚度；
- e) 表6中交付检验的测试数据；
- f) 检验员盖章；
- g) 出厂日期。

8.2 包装

在百级洁净室内，经过清洗干净的外延片放在特制的聚乙烯满足百级净化条件的包装盒里密封，然后连同质量保证书一起装入“物流盒”，再将“物流盒”放入包装箱内，周围用塑料泡沫填充，防止移动或相互挤压。最后用胶带封好。

8.3 运输

产品在运输过程中应防止挤压、碰撞并采取防震、防潮等措施。

8.4 贮存

产品应存放在洁净、干燥、无化学腐蚀的环境中。

附 录 A

(资料性)

AlGa_N 及 p-GaN 层厚度检测方法——TEM

A.1 目的

本方法用于HEMT功率器件用硅衬底氮化镓外延片AlGa_N及p-GaN层厚度的测试。

A.2 方法原理

使用透射电子显微镜(TEM)对样品截面进行测试,获得AlGa_N层及p-GaN层厚度信息。TEM是一种利用基于电子束与物质相互作用的高分辨率成像技术。电子枪发射出高速、聚焦的电子束,由聚光镜将其聚焦成极小的光斑,照射在样品上。当电子束穿透极薄的样品时,会与样品中的原子发生相互作用,包括散射、透射和吸收等过程。其中的透射电子在穿过样品后仍然保持原来方向,携带了样品内部结构信息,并被物镜进一步聚焦、放大,最终在荧光屏或相机上形成高分辨图像。由于不同材料内部结构的差异,TEM拍摄的截面图可以清晰判断衬底及不同外延层的分界面,进一步量测其层厚。

A.3 一般性要求

A.3.1 仪器设备

使用高分辨透射电子显微镜设备进行测试。设备应具备聚焦离子束(FIB)系统制备超薄样品。

A.3.2 环境要求

环境要求如下:

- a) 环境温度: 18℃~28℃;
- b) 相对湿度: <65 %;
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源。

A.3.3 试样要求

测试样品表面洁净无污染。

A.4 测试步骤

A.4.1 样品制备

将外延片沿特定方向切割,得到适合TEM观察的截面样品;使用研磨和抛光技术将截面减薄至电子束可以穿透的程度,通常不超过100 nm。

A.4.2 TEM观察

将样品放置在样品架上。调整TEM设备参数,包括加速电压、电子束的聚焦和放大倍数,以获得清晰的透射电子图像。观察外延片的截面图像,找到清晰的外延层与衬底或外延层之间的界面。

A.4.3 厚度测量

在TEM图像中,使用软件中的测量工具直接测量AlGa_N层或p-GaN层厚度。

A.5 检测报告

报告应包括以下内容:

- a) 样品的类型、规格及编号；
- b) 测试参数；
- c) 测试图像及厚度数据；
- d) 测试数据汇总表。

附 录 B

(资料性)

AlGa_N 及 p-GaN 层厚度检测方法——XRR

B.1 目的

本方法用于HEMT功率器件用硅衬底氮化镓外延片AlGa_N及p-GaN层厚度的测试。

B.2 方法原理

使用X射线反射率法(XRR)检测AlGa_N及p-GaN层厚度。X射线以极小的掠入射角(通常0.1°~1°)入射,在多层结构中,X射线在每层界面之间反射后产生干涉,形成Kiessig振荡条纹。其振荡周期($\Delta\theta$)与薄膜厚度(d)满足以下关系:

$$\Delta\theta \propto \frac{\lambda}{2d} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

λ ——X射线波长。

通过分析振荡周期可精确计算各层厚度。

B.3 一般性要求

B.3.1 仪器设备

使用具有平行光束光学系统和二维探测器的高分辨率X射线衍射仪(如Bruker D8 Advance),并配备具有建模和拟合功能的分析软件。

B.3.2 环境要求

环境要求如下:

- a) 环境温度: 18 °C~28 °C;
- b) 相对湿度: <65 %;
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源。

B.3.3 试样要求

试样表面应保持平整、洁净无污染,粗糙度应小于1 nm。

B.4 测试步骤

B.4.1 样品准备

确保样品表面平整、洁净无污染,将样品置于样品台中心十字处,按照仪器设置进行样品位置校准。

B.4.2 数据采集

选择合适的入射角度(如0.1°~2°)及测试步长(如0.005°~0.01°),采用 θ -2 θ 模式联动扫描,记录反射率随入射角的变化曲线。

B.4.3 厚度分析

根据样品结构建立多层膜结构模型,输入各层初始参数,如厚度、密度、粗糙度等,使用仪器配套分析工具通过最小二乘法优化模型参数,使理论曲线与实验数据匹配,得到各层膜厚。

B.5 检测报告

报告应包括以下内容：

- a) 样品的类型、规格及编号；
- b) 测试参数；
- c) 测试数据汇总表。

附录 C

(资料性)

外延片弯曲度及翘曲度检测方法

C.1 目的

本方法用于HEMT功率器件用硅衬底氮化镓外延片外延层弯曲度的测试。

C.2 方法原理

采用激光反射法检测弯曲度。将一定波长的激光作为入射光源照射样品表面,激光经过反射,被光学成像系统记录,以测量样品表面高低起伏。随着样品表面局部曲率的变化,反射光的角度也随之发生微小的变化。同时,光学成像系统的检测器在Z轴方向上不断进行微小位移,在每个位置均进行拍照并收集图片,确保不同角度的反射光束都能被检测器接收。按一定路径及步长扫描样品表面,可以形成整个三维形貌数据,经信号处理系统后得到外延片的弯曲度及翘曲度。

C.3 一般性要求

C.3.1 仪器设备

使用配备激光光源及光学成像系统的高精度光学系统,仪器精度应小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

C.3.2 环境要求

环境要求如下:

- a) 环境温度: $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) 相对湿度: $<65\%$;
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源。

C.3.3 试样要求

测试样品应为镜面光滑的外延片。

C.4 检测报告

报告应包括以下内容:

- a) 样品的类型、规格及编号;
- b) 测试参数;
- c) 外延片弯曲度及翘曲度数据。

附录 D

(资料性)

缓冲层 (Buffer) 垂直漏电流检测方法

D.1 目的

本方法用于HEMT功率器件用硅衬底氮化镓外延片Buffer击穿电压及漏电流的测试。

D.2 方法原理

HEMT作为高耐压功率器件,其晶体管漏极在关断时需承受较大的工作电压,同时维持源漏电流在一个较低的水平。缓冲层垂直击穿电压及漏电流检测是在缓冲层上方及硅衬底之间施加一定电压,测量二者之间的漏电流,从而得到缓冲层的垂直漏电流的I-V曲线。建议生长一炉没有有源区p-GaN及AlGaN势垒层只有缓冲层的结构进行测量,每批次测量一次。

D.2.1 仪器设备

使用可以进行脉冲和直流电流-电压(I-V)测量的高压探针台和半导体参数分析仪,如Keithley 4255-PMU或Keysight B1505。

D.2.2 环境要求

环境要求如下:

- a) 环境温度: 18 °C~28 °C;
- b) 相对湿度: <65 %;
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源。

D.2.3 试样要求

试样表面应洁净无污染,以确保沉积的金属电极与试样表面形成较好的物理接触。

D.3 测试步骤

D.3.1 金属电极沉积

在GaN表面沉积图形金属电极。

D.3.2 电流-电压(I-V)测试

在衬底和晶圆表面金属电极区域分别施加低电位和高电位,即可通过电流-电压(I-V)测试缓冲层垂直漏电流。

D.4 检测报告

报告应包括以下内容:

- a) 样品的类型、规格及编号;
- b) 电流-电压(I-V)曲线;
- c) 测试数据汇总表。

附录 E
(资料性)
方块电阻测量方法

E.1 目的

本方法用于HEMT功率器件用硅衬底氮化镓外延片方块电阻的测试。

E.2 方法原理

采用传输线法(Transmission Line Method, 以下简称TLM)测试外延片方块电阻。其测试原理基于传输线模型,它假设电流在材料中传播时受到电阻的影响。这种电阻与材料的电阻率和电极的几何尺寸及电极间距有关。在TLM测试中,通过在样品上制备一系列已知间距的电极,并施加电压或电流,然后测量各个电极之间的电压和电流值。利用这些测量值和传输线理论中的电阻计算公式,可以计算出接触电阻和方块电阻。

以矩形TLM法为例,其模型采用的电极欧姆接触图形如图E.1所示:

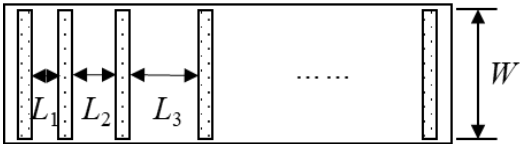


图 E.1 矩形 TLM 采用的电极示意图

测量相邻电极之间的电阻(R_L),可以得到 R_L 随电极间距(L)的线性关系:

$$R_L = \frac{2R_s}{W} L_t + \frac{R_s}{W} L \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

- R_s ——方块电阻;
- W ——电极长度;
- L_t ——传输长度。

根据测试结果线性拟合即可得到方块电阻值。

E.3 一般性要求

E.3.1 仪器设备

使用具有电流-电压(I-V)测试功能的半导体参数分析仪和探针台设备进行测试。

E.3.2 环境要求

环境要求如下:

- a) 环境温度: 18 °C~28 °C;
- b) 相对湿度: <65 %;
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源。

E.3.3 试样要求

样品应采取相应加工工艺，使其尺寸符合TLM测试模型的需求；电极应有金属或其他导电材料沉积而成，并通过掩膜或光刻等方法确保电极尺寸符合模型要求，且与样品间应形成良好的欧姆接触。

E.4 检测报告

报告应包括以下内容：

- a) 样品的类型、规格及编号；
- b) 测试采用的TLM模型图及电极尺寸；
- c) 测试原始数据及计算所得方块电阻值；
- d) 测试汇总数据表。

附录 F

(资料性)

正表面质量及表面颗粒度检测方法

F.1 目的

本方法用于HEMT功率器件用硅衬底氮化镓外延片边缘裂纹及颗粒的测试。

F.2 方法原理

采用光学成像方法，快速获取包括6吋和8吋规格在内的整个外延片样品表面的形貌图像。通过两束不同角度的激光扫描样品表面，使用不同的检测器收集折射、反射、散射、光致发光等信号，光源与检测器的组合形成一组信号通道，不同类型缺陷在不同信号通道下的表象会存在差异，通过分析信号组对检测到的缺陷进行分类识别，并得到其分布、数目和尺寸等信息。或采用光学图像捕捉技术，利用高分辨率摄像头捕捉样品表面图像，通过图像预处理与预设标准图像进行比对和特征提取，自动识别样品边缘裂纹及颗粒信息。

F.3 一般性要求

F.3.1 仪器设备

使用具有6吋和8吋规格外延片整片扫描功能的采用光学表面分析(OSA)专用技术的光学检测仪(如Candela检测系统)，或使用具有光学图像捕捉技术的AOI检测设备。

F.3.2 环境要求

环境要求如下：

- a) 环境温度：18℃~28℃；
- b) 相对湿度：<65%；
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源。

F.4 检测报告

报告应包括以下内容：

- a) 样品的类型、规格及编号；
 - b) 边缘裂纹及表面颗粒坐标文件及分布图像；
 - c) 测试汇总数据表。
-

