

# CASA

第三代半导体产业技术创新战略联盟标准

T/CASA 003-2018

---

## p 沟道 IGBT 器件用 4H 碳化硅外延晶片

4H-SiC Epitaxial Wafers for p-IGBT Devices

版本：V01.00

2018-11-20 发布

---

第三代半导体产业技术创新战略联盟发布



# 目录

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 分类和标记 .....	2
4.1 产品分类 .....	2
4.2 标记 .....	2
5 要求 .....	3
5.1 衬底 .....	3
5.2 表面缺陷 .....	3
5.3 表面粗糙度 .....	3
5.4 外延层厚度均匀性 .....	4
5.5 掺杂浓度均匀性 .....	4
6 试验方法 .....	4
6.1 试验条件 .....	4
6.2 衬底检测 .....	4
6.3 表面缺陷检测 .....	5
6.4 表面粗糙度检测 .....	5
6.5 外延层厚度均匀性检测 .....	5
6.6 掺杂浓度均匀性检测 .....	7
7 检验规则 .....	8
7.1 检验分类 .....	8
7.2 交付检验 .....	8
7.3 鉴定检验 .....	9
8 标志、包装、运输和贮存 .....	9
8.1 标志 .....	9
8.2 包装 .....	10
8.3 运输 .....	10
8.4 储存 .....	10
附录 A（资料性附录）表面缺陷检测方法 .....	11
附录 B（资料性附录）表面粗糙度检测方法 .....	11
附录 C（资料性附录）外延层厚度检测方法 .....	16
附录 D（资料性附录）外延层掺杂浓度检测方法 .....	19



## 前言

SiC 半导体材料以其独特的优异性能，特别适合制作高压、超高压功率器件。10kV 级以上高压/超高压 SiC 功率器件多为垂直结构的双极型器件，如 SiC PiN 二极管、IGBT 及 GTO 晶闸管等。

从结构上看，n 沟道 IGBT 与 n 沟道 MOSFET 器件结构类似，所不同的是需要将 n 沟道 MOSFET 材料结构中的 n<sup>+</sup>型衬底替换成 p<sup>+</sup>型衬底。由于市面上缺乏电阻可接受的 p<sup>+</sup>型 4H-SiC 衬底，为了制造 n 沟道 IGBT 器件材料，需要使用反转型 n 沟道 IGBT 器件结构，制造工艺复杂。

与 n 沟道 IGBT 相比，p 沟道 IGBT 器件材料不但制造工艺简单，而且可使用质量较高的 n<sup>+</sup>型 4H-SiC 衬底，即 p 沟道 IGBT 器件材料是在 n<sup>+</sup>型 4H-SiC 衬底上外延 p<sup>+</sup>型 4H-SiC 漂移层/电压阻挡层所构成的 p-n 结材料，正是该 p<sup>+</sup>型漂移层，使得 p 沟道 IGBT 器件具有许多优异性能。

本标准由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 CASA 所有，未经 CASA 许可不得随意复制；其他机构采用本标准的技术内容制定标准需经 CASA 允许；任何单位或个人引用本标准的内容需指明本标准的标准号。

到本标准正式发布为止，CASAS 未收到任何有关本文件涉及专利的报告。CASAS 不负责确认本文件的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本标准主要起草单位：东莞市天域半导体科技有限公司、全球能源互联网研究院有限公司、中国电子科技集团公司第五十五研究所、株洲中车时代电气股份有限公司、山东天岳晶体材料有限公司、中国科学院微电子研究所、瀚天天成电子科技(厦门)有限公司、山东大学、台州市一能科技有限公司、中国电子科技集团公司第十三研究所、深圳第三代半导体研究院。

本标准主要起草人：孙国胜、李锡光、杨霏、柏松、李诚瞻、高玉强、许恒宇、冯淦、胡小波、张乐年、房玉龙。



# p 沟道 IGBT 器件用 4H 碳化硅外延晶片

## 1 范围

本标准规定了p沟道IGBT器件用4H碳化硅外延晶片（以下简称“外延片”）的分类和标记、要求、试验方法、检测规则、标志、包装、运输和储存。

本标准适用于P沟道IGBT功率器件用4H碳化硅外延片。产品主要用于制作IGBT功率半导体及电力电子器件。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 6379.2 测量方法与结果的准确度(正确度与精密度) 第2部分：确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法

GB/T 14264 半导体材料术语

GB/T 29332-2012 半导体器件分立器件第9部分：绝缘栅双极晶体管（IGBT）

CASA 004.1 4H碳化硅（4H-SiC）衬底及外延层缺陷术语

## 3 术语和定义

GB/T 14264、GB/T 29332、CASA004.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**绝缘栅双极晶体管** insulated-gate bipolar transistor; IGBT

具有导电沟道和PN结，且流过沟道和结的电流由施加在栅极端和发射极端之间的电压产生的电场控制的晶体管。

注：施加集电极-发射极电压时，PN结为正向偏置。

[GB/T 29332-2012，定义 3.2.1]

### 3.2

**P 沟道 IGBT** P-channel IGBT

具有一个或多个 P 型导电沟道的 IGBT。

[GB/T 29332-2012，定义 3.2.3]

### 3.3

**4H 碳化硅** 4H-SiC

由Si原子层和C原子层构成的基本Si-C双原子层作为基本结构层，以“ABCBABC...”序列进行周期性堆放的碳化硅（SiC）晶体。其中数字4表示一个周期内Si-C双原子层数，“H”代表六角晶型。

## 3.4

**耗尽区宽度 depletion width**

在pn结和肖特基结中，起势垒作用的空间电荷区的线性宽度。该宽度可随外加电压的增减而发生变化。

## 3.5

**势垒电容 barrier capacitance**

在pn结和肖特基结中，随外加电压的增减，势垒区构成的空间电荷数量变化所等效的电容。

## 4 分类和标记

## 4.1 产品分类

产品按直径尺寸分为：a)  $\Phi 100.0$  mm (4 英寸)；b)  $\Phi 150.0$  mm (6 英寸)。

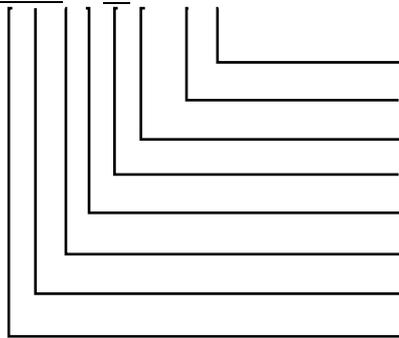
产品按质量等级分为：a) 工业级 (简称 P 级)；b) 研究级 (简称 R 级)。

产品按外延膜厚度 (T) 分为：a) I 型 ( $50 \mu\text{m} < T \leq 100 \mu\text{m}$ )；b) II 型 ( $T > 100 \mu\text{m}$ )。

## 4.2 标记

产品牌号表示如下：

**X□□XX□-XX**



外延层数代号：1--1层；2--2层；3--3层

外延片厚度代号：I--I型；II--II型

抛光面代号：S--Si面；C--C面

晶向角度代号：4--4° 偏角；8--8° 偏角

直径代号：4--4英寸 (100mm)；6--6英寸 (150mm)

等级代号：P--工业级；R--研究级

导电类型代号：n--n型；p--p型；s--半绝缘型

晶型代号：4--4H；6--6H

注：“□”表示字母；“×”表示数字。

晶型代号：由一位阿拉伯数字表示，具体为：4—4H；6—6H。

导电类型代码，由一位小写英文字母表示，具体为：n—n型；p—p型；s—半绝缘型。

等级代码：由一位大写英文字母表示，具体为：P—工业级；R—研究级。

直径代号：由一位阿拉伯数字表示，具体为：4—100mm (4 英寸)；6—150mm (6 英寸)。

晶向角度代号：由一位阿拉伯数字表示，具体为：4—4° 偏角；8—8° 偏角。

抛光面代码：由一位大写英文字母表示，具体为：S—Si 面；C—C 面。

外延片厚度代号：由一位罗马字母，具体为：I— I 型 ( $50 \mu\text{m} < T \leq 100 \mu\text{m}$ )；II— II 型 ( $T > 100 \mu\text{m}$ )。

外延层数代号：由一位阿拉伯数字表示，具体为：1—1 层；2—2 层；3—3 层。

示例：

以东莞市天域半导体科技有限公司生产的晶型为4H，导电类型为p型，等级为工业级，直径为150.0 mm（6英寸），晶向角度为4° 偏角，抛光面为Si面，外延片厚度为I型SiC外延，外延层数为1层的外延片为例，其牌号为：

4pP64S-I 1

牌号中各要素的含义如下：

- 4 ——晶型代号（4H）；
- p ——导电类型代码（p型）；
- P ——等级代码（工业级）；
- 6 ——直径代号（150.0 mm）；
- 4 ——晶向角度代号（4° 偏角）；
- S ——抛光面代码（Si面）；
- I ——外延片厚度代号（I型）；
- 1 ——外延层数代号（1层）。

## 5 要求

### 5.1 衬底

衬底为偏向<11-20>方向4°偏角的n型（0001）硅面4H-SiC晶片。

### 5.2 表面缺陷

表面缺陷应符合表1、表2的规定。

表1 I型（50 μm<T≤100 μm）外延片表面缺陷最大允许限度

项目	最大允许限度（5mm×5mm die yield）	
	P级	R级
胡萝卜型缺陷	>70%	≤70%
彗星缺陷		
三角缺陷		
掉落物		
边缘去除	3 mm（Φ100 mm、Φ150 mm）	

表2 II型（T>100 μm）外延片表面缺陷最大允许限度

项目	最大允许限度（5mm×5mm die yield）	
	P级	R级
胡萝卜型缺陷	>60%	≤60%
彗星缺陷		
三角缺陷		
掉落物		
边缘去除	3 mm（Φ100 mm、Φ150 mm）	

### 5.3 表面粗糙度

I型和II型两种不同厚度的P沟道IGBT器件用4H-SiC外延片的表面粗糙度均应小于1.0 nm。

#### 5.4 外延层片内厚度均匀性

外延层片内厚度均匀性应符合表3和表4的规定。

表3  $\Phi 100.0$  mm 外延片厚度均匀性限度

序号	外延层厚度 (T)	要求	
		P 级	R 级
1	I 型 ( $50 \mu\text{m} < T \leq 100 \mu\text{m}$ )	<5%	<10%
2	II 型 ( $T > 100 \mu\text{m}$ )	<5%	<10%

表4  $\Phi 150.0$  mm 外延片厚度均匀性限度

序号	外延层厚度 (T)	要求	
		P 级	R 级
1	I 型 ( $50 \mu\text{m} < T \leq 100 \mu\text{m}$ )	<10%	<15%
2	II 型 ( $T > 100 \mu\text{m}$ )	<10%	<15%

#### 5.5 掺杂浓度均匀性

掺杂浓度均匀性应符合表5、表6的规定。

表5  $\Phi 100.0$  mm (4 英寸) 外延片掺杂浓度均匀性限度

序号	外延层厚度 (T)	要求	
		P 级	R 级
1	I 型 ( $50 \mu\text{m} < T \leq 100 \mu\text{m}$ )	<15.0%	<20.0%
2	II 型 ( $T > 100 \mu\text{m}$ )	<15.0%	<20.0%

表6  $\Phi 150.0$  mm (6 英寸) 外延片掺杂浓度均匀性限度

序号	外延层厚度 (T)	要求	
		P 级	R 级
1	I 型 ( $50 \mu\text{m} < T \leq 100 \mu\text{m}$ )	<20.0%	<25.0%
2	II 型 ( $T > 100 \mu\text{m}$ )	<20.0%	<25.0%

### 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：

- 环境温度：23℃ ±5℃；
- 相对湿度：小于 80%；
- 大气压：86 kPa~106 kPa。

#### 6.2 衬底检测

按照衬底供应商衬底信息对衬底进行核实或检验。

### 6.3 表面缺陷检测

表面缺陷检测方法见附录A。

### 6.4 表面粗糙度检测

表面粗糙度检测方法见附录B。

### 6.5 外延层厚度均匀性检测

外延层厚度的检测按附录C进行。

对于直径为 $\Phi 100.0$  mm（4英寸）规格的外延层厚度，“9点”检测位置见图1，位置坐标见表7。对于直径为 $\Phi 150.0$  mm（6英寸）规格的外延片，“13点”检测位置见图2，位置坐标见表8。

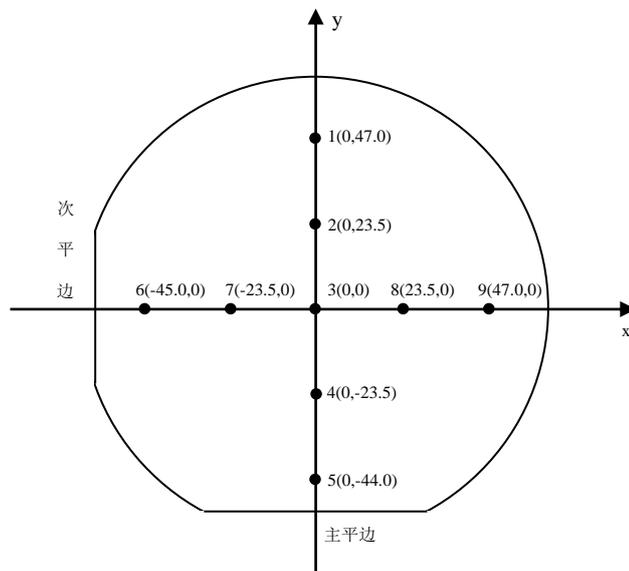


图1  $\Phi 100.0$  mm（4英寸）外延片外延层厚度均匀性“9点”检测位置

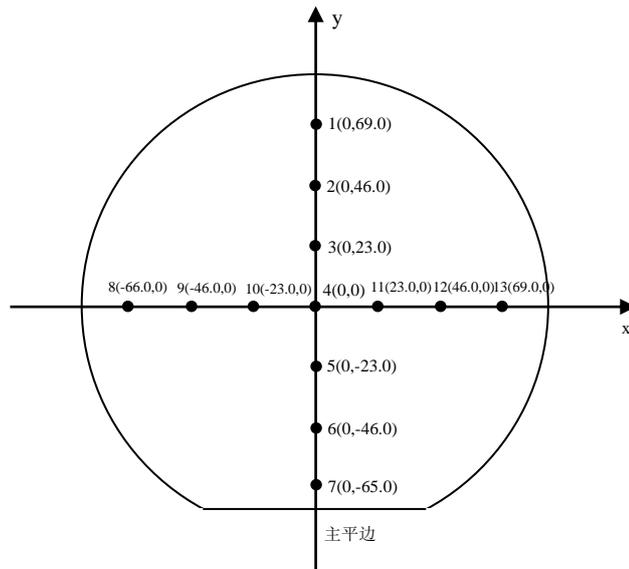


图2  $\Phi 150.0$  mm（6英寸）外延片外延层厚度均匀性“13点”检测位置

表 7 外延层厚度均匀性“9点”检测位置 单位为毫米

编号	4 英寸测试点坐标
1	(0,47.0)
2	(0,23.5)
3	(0,0)
4	(0,-23.5)
5	(0,-44.0)
6	(-45.0,0)
7	(-23.5,0)
8	(23.5,0)
9	(47.0,0)

表 8 外延层厚度均匀性“13点”检测位置 单位为毫米

编号	6 英寸测试点坐标
1	(0,69.0)
2	(0,46.0)
3	(0,23.0)
4	(0,0)
5	(0,-23.0)
6	(0,-46.0)
7	(0,-65.0)
8	(-66.0,0)
9	(-46.0,0)
10	(-23.0,0)
11	(23.0,0)
12	(46.0,0)
13	(69.0,0)

对于Φ100.0 mm (4英寸) 外延片, 在图3所示的十字交叉位置上取九个点, 分别进行厚度测试, 厚度均匀性按公式 (1) 计算:

$$U\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (x_i - m)^2}{8}}}{m} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$x_i$ ——每个检测位置点的厚度值;

$m$ ——厚度平均值。

厚度平均值 ( $m$ ) 按公式 (2) 计算:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^9 x_i}{9} \quad \dots\dots\dots(2)$$

对于Φ150.0 mm（6英寸）外延片，在图4所示的十字交叉位置上取十三个点，分别进行厚度测试，厚度均匀性按公式（3）计算：

$$U\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} (x_i - m)^2}{12}}}{m} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$x_i$ ——每个检测位置点的厚度值；

$m$ ——厚度平均值。

厚度平均值（ $m$ ）按公式（4）计算：

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{13} x_i}{13} \quad \dots\dots\dots(4)$$

## 6.6 掺杂浓度均匀性检测

外延层掺杂浓度的检测按附录D进行。

掺杂均匀性的检测按图1的“9点”和图2的“13点”法进行。对于直径为Φ100.0 mm（4英寸）的外延片，“9点”检测的具体位置示于表7。对于直径为Φ150.0 mm（6英寸）规格的外延片，“13点”检测的具体位置示于表8。

注：对于4英寸外延片，主平边和次平边位置多去除3 mm、2 mm；对于6英寸外延片，主平边位置多去除4 mm。

对于Φ100.0 mm（4英寸）外延片，在图1所示的十字交叉位置上取九个点，分别进行掺杂浓度测试，掺杂浓度均匀性按公式（5）计算：

$$U\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (y_i - M)^2}{8}}}{M} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中：

$y_i$ ——每个检测位置点的掺杂浓度值；

$M$ ——掺杂浓度平均值。

掺杂浓度平均值（ $M$ ）按公式（6）计算：

$$M = \frac{\sum_{i=1}^9 y_i}{9} \dots\dots\dots(6)$$

对于Φ150.0 mm（6英寸）外延片，在图2所示的十字交叉位置上取十三个点，分别进行掺杂浓度测试，掺杂浓度均匀性按公式（7）计算：

$$U\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} (y_i - M)^2}{12}}}{M} \times 100\% \dots\dots\dots(7)$$

式中：

$y_i$ ——每个检测位置点的掺杂浓度值；

$M$ ——掺杂浓度平均值。

掺杂浓度平均值（ $M$ ）按公式（8）计算：

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{13} y_i}{13} \dots\dots\dots(8)$$

## 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

产品建议由供方技术质量监督部门进行检验，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。

对外延生长的每片外延片，进行外延层厚度、掺杂浓度、表面粗糙度和表面缺陷密度参数检测。检测规则及合格判据见表 9。

表 9 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	表面缺陷	5.2	6.2	每片外延片进行检测	0
2	表面粗糙度	5.3	6.3	每片外延片进行检测	0
3	外延层厚度及均匀性	5.4	6.4	每片外延片进行检测	0
4	掺杂浓度及均匀性	5.5	6.5	每片外延片进行检测	0

若表 9 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。

鉴定检验项目为本标准第 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、运输和储存

### 8.1 标志

包装盒上应有下列标志：

- a) 产品名称；
- b) 晶型、导电类型、角度；
- 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；
- e) 产品标准号。

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、导电类型；
- d) 晶片加工类型、表面粗糙度；

- e) 晶向角度、晶片直径尺寸、晶片厚度、晶片主/副定位边晶向及长度；
- f) 外延层厚度及均匀性、掺杂浓度及均匀性、表面粗糙度；
- g) 检验员盖章；
- h) 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，用塑料袋充氮气密封，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 储存

产品应存放在洁净、干燥、无化学腐蚀的环境中。

附录 A  
(资料性附录)  
表面缺陷检测方法

### A.1 目的

本方法用于P沟道IGBT器件用4H碳化硅(4H-SiC)外延片表面缺陷的测试。

### A.2 检测方法概述

#### A.2.1 方法原理

采用光学成像方法,快速获取包括4英寸和6英寸在内的整个外延片样品表面的形貌图像,通过对形貌图像数据的分析,得到样品表面上的缺陷信息,其中包括缺陷的形状、尺寸、高度等。

#### A.2.2 表征参数的选择

按照图1和图2所示的虚线区域对表面缺陷进行统计,表面缺陷密度用虚线区域内观察到的缺陷数除以该区域面积来表征。

对于尺寸为 $\Phi 100.0\text{ mm}$ (4英寸)和 $\Phi 150.0\text{ mm}$ (6英寸)的外延片,边界去除宽度为3 mm( $EE=3\text{ mm}$ )。其中,4英寸外延片的计算面积为 $69.4\text{ cm}^2$ ,6英寸外延片的计算面积为 $162.8\text{ cm}^2$ 。

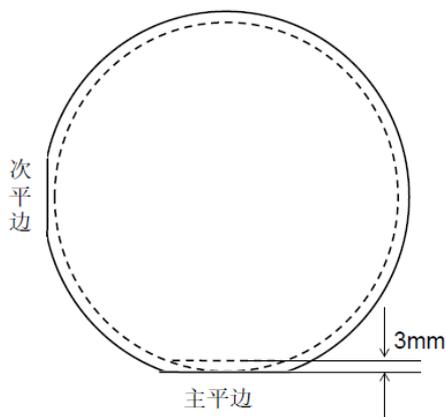


图 A.1  $\Phi 100.0\text{ mm}$  (4英寸)外延片表面缺陷密度的计算面积示意图

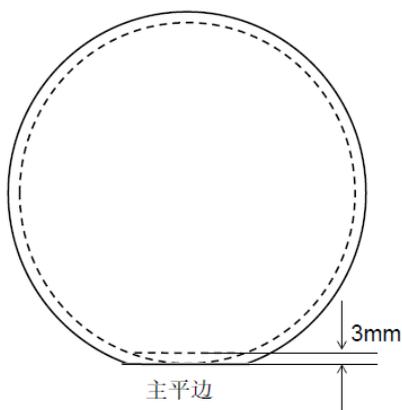


图 A.2  $\Phi 150.0\text{ mm}$  (6英寸)外延片表面缺陷密度的计算面积示意图

### A. 3 一般性要求

#### A. 3.1 仪器设备

使用具有4英寸和/或6英寸整片扫描功能的商用光学表面缺陷检测分析系统。

#### A. 3.2 环境要求

环境要求如下：

- a) 环境温度：18℃~25℃；
- b) 相对湿度：不大于 60%；
- 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

测试样品应为完整的4英寸和/或6英寸外延片，表面洁净无污染。

#### A. 3.4 测试报告

报告应包括以下内容：

- a) 样品的来源、规格及编号；
- d) 所用测试系统编号；
- e) 测试单位及测试操作人印章或签字；
- f) 被测试样品的测试点及测试数据；
- g) 检测时间。

附录 B  
(资料性附录)  
表面粗糙度检测方法

### B.1 目的

本方法用于P沟IGBT器件用4H碳化硅(4H-SiC)外延片表面粗糙度的测试。

### B.2 检测方法概述

#### B.2.1 方法原理

使用原子力显微镜测量样品表面的粗糙度,样品放置在扫描器上方,扫描器中的压电陶瓷管在外加电压的作用下,可以在X、Y和Z方向上独立运动。其原理图如下图A.1所示。探针长 $2\mu\text{m}$ ,直径小于 $10\text{nm}$ ,安装在一个长度为 $100\sim 200\mu\text{m}$ 的微悬臂的一端。激光器发射出的激光照射在靠近探针的背面微悬臂上,经微悬臂反射后,激光光斑落在位置传感器上。探针和样品表面之间的力导致微悬臂的弯曲或偏转。当探针在样品表面上扫描时,位置传感器将测量微悬臂的偏转随探针位置的变化情况,这样可以用计算机获得一个样品表面形貌的图像。

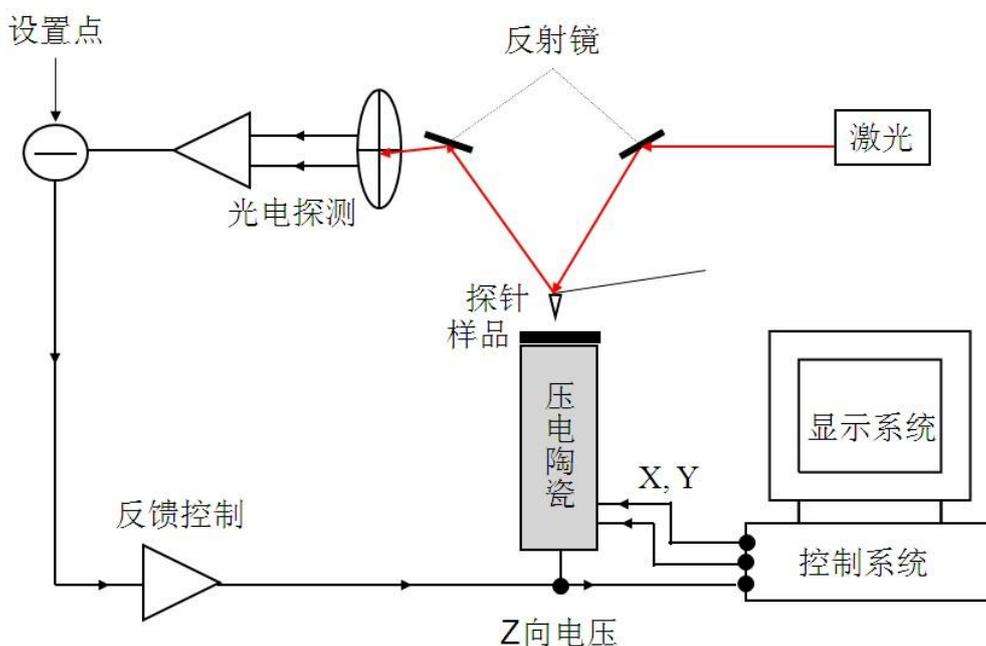


图 B.1 原子力显微镜测量样品表面粗糙度的原理图

#### B.2.2 表征参数的选择

##### B.2.2.1 表面粗糙度的几何平均值— $R_a$

按公式(B.1)计算:

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |Z(X_k, Y_l) - \mu| \quad (\text{B.1})$$

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；

$\mu$ ——扫描点的平均高度。

扫描点的平均高度 ( $\mu$ )，按公式 (B.2) 计算。

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} Z(X_k, Y_l) \quad (\text{B.2})$$

### B. 2. 2. 2 表面粗糙度的算术平方根— $R_q$

按公式 (B.3) 计算。

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [Z(X_k, Y_l) - \mu]^2} \quad (\text{B.3})$$

## B. 3 一般性要求

### B. 3. 1 仪器设备

使用原子力显微镜或其它同等检测精度的表面检测仪器。仪器测量精度不大于0.1 nm。

### B. 3. 2 环境要求

环境要求如下：

- a) 环境温度：18℃~25℃；
- b) 相对湿度：不大于 60%；
- c) 仪器安装场地及附近无强震动源、强声源，且显微镜探头安装减震。

### B. 3. 3 试样要求

测试样品应为厚度均匀的外延片，表面洁净无污染。

## B. 4 测试步骤

### B. 4. 1 检测准备与扫描参数设定

- a) 将对应模式的探针装入 AFM 探针架中，并将探针插入探头内；
- b) 打开电脑，打开控制机箱电源，进入专用检测软件；
- c) 设定的参数：扫描范围（按客户要求），X 偏移（最小值为 0，最大值为 90 μm），Y 偏移（最小值为 0，最大值为 90 μm）；

- d) 根据实际情况，调节积分增益，比例增益，参考增益，选择适当的扫描频率。

#### B. 4. 2 激光位置的调节

将样品放置在样品架上。选择与探针相同的扫描模式，并打开激光；调节激光器位置，使激光落在靠近探针的背面微悬臂上；调整放射镜的角度，使反射光斑落在位置传感器的中央。

#### B. 4. 3 样品扫描

单击“进针”按钮，进行表面扫描；扫描结束后，退针，取出样品。

#### B. 4. 4 图形的处理和输出

a) 选择适当处理，使图像达到最清晰的效果；扫描图像自动保存在缓冲区，可从缓冲区将结果保存至目标文件夹；

- b) 测试结束后，关闭软件，关掉控制机箱电源，关闭电脑。

#### B. 5 测试报告

报告应包括以下内容：

- a) 样品的来源、规格及编号；
- b) 所用测试系统编号及选用参数；
- c) 测试单位及测试操作人印章或签字；
- d) 被测试样品的测试点及测试数据；
- e) 检测时间。

**附录 C**  
**(资料性附录)**  
**外延层厚度检测方法**

**C.1 目的**

本方法用于P沟IGBT器件用4H碳化硅（4H-SiC）外延片外延层厚度的测试。

**C.2 原理**

衬底与外延层掺杂浓度的不同导致两者具有不同的折射率,因此试样的反射光谱会出现含有外延层厚度信息的连续干涉条纹。根据反射谱中干涉条纹的极值峰位,试样的光学常数以及入射角可以计算出相应的外延层厚度。

由于附加相移影响主要在小数点后第三位的厚度数值（0.001 μm），故假设附加相移为零。

干涉条纹极值级数按公式（C.1）计算：

$$P_i = \frac{m\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_i} + 0.5 \quad (\text{C.1})$$

式中：

$\lambda_1$ ——选定的第一个极值处的波长, 设为参考波长, 单位为纳米（nm）；

$\lambda_i$ ——第*i*个极值处的波长且满足 $\lambda_1 > \lambda_i$ , 单位为纳米（nm）；

$P_i$ ——第*i*个极值所对应的级数；

$m$ —— $\lambda_1$ 和 $\lambda_i$ 的级数差。

第*i*个极值所对应的外延层厚度公式（C.2）计算：

$$T_i = (P_i - 0.5) \cdot \frac{0.001 \cdot \lambda_i}{2\sqrt{(n_1^2 - \sin^2 \theta)}} \quad (\text{C.2})$$

式中：

$T_i$ ——第*i*个极值所对应的外延层厚度, 单位为微米（μm）；

$n_1$ ——4H 碳化硅外延层的折射率（ $n_1=2.55$ ）；

$\theta$ ——入射光的入射角, 单位为度（°）。

**C.3 干扰因素**

外延层结晶质量不高、表面粗糙度大等因素可导致反射率降低或干涉条纹消失,从而影响测试结果的准确性。

掩模孔材料、孔径大小以及探测器探测到的杂散光可影响测试结果。静电、噪音、振动及温、湿度稳定性等测试环境可影响测试结果。

**C.4 试样要求**

试样表面应是镜面光滑, 无大面积晶格不完整或缺陷, 除自然氧化层外不应有钝化层。测量前试样若需要进行清洁处理, 此处理方法不应影响到试样外延层厚度。

## C.5 测量仪器及环境

### C.5.1 红外光谱仪

本方法选用双光束红外分光光度计或傅里叶变换红外光谱仪。波长范围(1 000~2 700) nm, 本方法常用波长范围为(1 500~2 700) nm。

波长重复性优于 $\pm 0.05$  nm。

波长准确度优于 $\pm 0.1$  nm。

### C.5.2 仪器附件

a) 和仪器相匹配的反射附件, 入射角不大于 $30^\circ$ 。

b) 掩模由非反射材料制成, 透光孔径不大于8 mm。

## C.6 测量步骤

### C.6.1 仪器校准

用厚度为(300~500)  $\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯膜做标样, 以标样的 $1601.6\text{ cm}^{-1}$ 或 $648.9\text{ cm}^{-1}$ 峰为测量参考峰, 按GB/T 6379.2的规定进行测试, 其波长重复性和准确度应满足C.5.1的要求。

将反射附件置于光路中, 测量100%线, 其峰谷值应小于8%。

### C.6.2 选择测量条件

所有容许的扫描速度相对最慢扫描速度所对应的极值位置应不超过 $\pm 1\text{ nm}$ 的极小值位移变化。

对傅里叶变换红外光谱仪所使用的分辨率应不低于 $4\text{ cm}^{-1}$ 。

峰值振幅与噪音振幅比大于5。

### C.6.3 测量

放置试样, 使目标测量位置对准光束。

根据所测谱图, 确定极值的波数。

按公式(C.3)进行极值的波数与波长的相互转换:

$$\lambda_i = \frac{10000000}{\nu_i} \quad (\text{C.3})$$

式中:

$\lambda_i$ ——第*i*个极值波长, 单位为纳米(nm);

$\nu_i$ ——第*i*个极值波数, 单位为每厘米( $\text{cm}^{-1}$ )。

按公式(C.1)计算得到的极值的级数, 并对所得级数进行舍入处理, 极大值取整数, 极小值取半整数。计算出一个级数后, 按波长递增、级数递减的顺序求得其余的极值级数。

按公式(C.2)计算各个级数下的外延层的厚度, 并计算厚度平均值。

#### C. 6. 4 测量精度与偏差

根据多个实验室的结果，对于厚度大于2  $\mu\text{m}$ 的4H-SiC外延层，本测量方法的测量精度为 $0.018T \pm 0.25 \mu\text{m}$ 。T为外延层的平均厚度，单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。

#### C. 7 检测报告

报告应包括以下内容：

- a) 样品的来源、规格及编号；
- b) 所用测试系统编号及选用参数；
- c) 测试单位及测试操作人印章或签字；
- d) 平均厚度数据；
- e) 检测时间。

附录 D  
(资料性附录)  
外延层掺杂浓度检测方法

### D.1 目的

本方法用于P沟IGBT器件用4H碳化硅（4H-SiC）外延片外延层掺杂浓度的测试。

### D.2 方法原理

汞探针与外延片表面相接触，形成肖特基势垒。在汞电极与外延片之间加一反向偏压，结的势垒宽度将随外加偏压的增加而向外延层中扩展。结的势垒电容及其电压的变化率与势垒扩展宽度及其相应的载流子浓度按公式（D.1）和公式（D.2）：

$$N(x) = \frac{C^3}{\varepsilon_0 e A^2} \times \frac{1}{\left(-\frac{dC}{dV}\right)} \quad (\text{D.1})$$

式中：

$x$ ——势垒宽度，单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）；

$N(x)$ ——掺杂浓度，单位为 $\text{cm}^{-3}$ ；

$C$ ——势垒电容，单位为法（F）；

$e$ ——电子电荷，数值为 $1.602 \times 10^{-19}$ ，单位为库仑（C）；

$\varepsilon$ ——4H-SiC的相对介电常数，其值为9.7；

$\varepsilon_0$ ——真空介电常数，其值为 $8.859 \times 10^{-14}$ ，单位为法每厘米（F/cm）；

$A$ ——汞电极面积，单位为平方厘米（ $\text{cm}^2$ ）。

$$x = 10000 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A / C \quad (\text{D.2})$$

只要测得 $C$ ， $dC/dV$ 和 $A$ ，便可由式（D.1）和式（D.2）计算得到势垒宽度 $x$ 处的 $N(x)$ 。

### D.3 干扰因素

外延片表面上的缺陷、汞的沾污、Hg探针的沾污或损伤等会造成测试误差和测试不良。C-V汞探针测量中的肖特基接触不良，常表现为漏电流大，也会产生较大的测试误差。确定补偿电容的标准片在电压应用范围内的浓度一致性不好，会导致补偿电容的的错误，进而影响测试浓度的准确性。每次测量时汞接触面积的不稳定，会影响测试结果的可重复性，这种情况在刚刚更换完汞后比较常见。衬底掺杂浓度过低，会导致测试时串联电阻过大，影响测得电容的准确性。

### D.4 测量仪器及环境

#### D.4.1 电容测量仪

- a) 驱动频率:  $100 \times (1 \pm 0.01\%)$  kHz和 $1 \times (1 \pm 0.01\%)$  MHz。
- b) 驱动电压 $V_{rms}$ : 15 mV。
- c) 电容量程: 1 MHz下量程为(0~2 000) pF, 0.1 MHz下量程为(0~20 000) pF, 测试值与标准值偏差应不大于0.5%。
- d) 电导量程: (0~2 000)  $\mu$ S, 测试值与标准值偏差应不大于0.5%。

#### D. 4. 2 直流电压源

- a) 直流偏压: -250 V~250 V, 连续可变, 测试值与标准值偏差应不大于0.1%。
- b) 变化速率: (0~50) V/s, 连续可变。

#### D. 4. 3 测量环境

温度(18~25℃), 温度波动小于 $\pm 2^\circ\text{C}$ , 相对湿度不大于65%。

#### D. 5 样品要求与欧姆接触的制备

##### D. 5. 1 样品要求

- a) 衬底和外延层的导电类型及外延层的厚度是已知的。
- b) 衬底与外延层具有相同的导电类型。
- c) 衬底为导电衬底。

##### D. 5. 2 欧姆接触的制备

欧姆接触可由金属托盘与整个4H-SiC晶片背面通过真空吸力紧密接触形成。

#### D. 6 仪器校准

##### D. 6. 1 电容测量仪校准

###### D. 6. 1. 1 标准电容仪校准

选用电容值分别为10 pF, 100 pF, 1 000 pF, 和10 000 pF的标准电容, 在100 kHz下测量范围为0~2 000pF, 在1 MHz下测量范围为0~20 000pF, 其测试值与标准值偏差应小于0.1%。

###### D. 6. 1. 2 标准封装肖特基二极管校准

选用标准封装硅肖特基二极管, 要求其串联电阻小于50  $\Omega$ , 总器件电阻在50~100 $\Omega$ 。所测得的相角应在 $87^\circ \sim 90^\circ$ , 十次重复测量值的偏差应小于0.167%; 所测得的载流子浓度应在 $10^{14} \sim 7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 十次重复测量值的偏差应小于0.167%。

##### D. 6. 2 补偿电容的校准

测试补偿电容用片: 浓度小于 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 电压应用范围内纵向浓度分布的偏差不大于2%的硅片。将此硅片置于测试台上, 并形成可靠的肖特基接触。设定一大概的补偿电容值(如未知, 则设为0), 开始测试掺杂, 并观察测试曲线的斜率。如斜率为正, 按0.1 pF的步进逐步增大补偿电容值, 直至斜率第一次为负后再按0.02 pF的步进逐步减小补偿电容值,

直至斜率刚好有改变的现象，此时得到系统的补偿电容。如斜率为负值，按0.02 pF的步进减小补偿电容，直至斜率第一次为正后再按0.1 pF的步进逐步增大补偿电容值，直至斜率刚好有改变的现象。此时得到系统的补偿电容。

### D. 6. 3 汞探针电极

选用一直径1.7 mm的毛细管，金属汞由毛细管的一端吸入，另一端插入一金属丝，用于传递测试信号。

#### D. 6. 3. 1 汞探针接触面积可重复性测量

选用氧化层为二氧化硅的标准硅MOS片，其氧化层厚度需经其他方法（如椭偏仪测厚法）精确获得。将其放在样品台上，在-30 V~10 V范围内测量其C-V曲线。负偏压下，MOS电容处于多子积累状态，该状态最大电容、氧化层厚度和汞接触面积有如公式（D.3）所示关系。由于氧化层厚度已知，按公式（D.3）测得汞的实际接触面积。

$$A_G = 10^{-7} \cdot W_{ox} \cdot C_{MOS} / (\epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0) \quad (D.3)$$

式中：

$A_G$ ——汞探针与MOS片的接触面积，单位为平方厘米（ $\text{cm}^2$ ）；

$W_{ox}$ ——氧化层厚度，单位为纳米（nm）；

$C_{MOS}$ ——多子积累状态下最大MOS电容，单位为法（F）；

$\epsilon_{ox}$ ——二氧化硅相对介电常数，其值为3.9；

$\epsilon_0$ ——真空介电常数，其值为 $8.859 \times 10^{-14}$ ，单位为法每厘米（F/cm）。

在同一样品点重复测量10次，所得接触面积的1 $\sigma$ 标准偏差应小于0.167%。

#### D. 6. 3. 2 汞探针有效接触面积校准

选用一外延层厚度和载流子浓度已知的4H-SiC外延片，将其放在样品台上，分别在100 kHz和1 MHz下对其进行测量。

已知装汞毛细管直径，由公式（D.4）计算得到汞探针的标定接触面积：

$$A = \frac{\pi d^2}{400} \quad (D.4)$$

式中：

$A$ ——汞探针管的标定面积，单位为 $\text{cm}^2$ ；

$d$ ——汞探针管的标定直径，单位为mm。

用测试系统测量多个已知标定浓度为标准片的浓度值，通过式（D.5）计算每个标准片测量的汞探针的有效接触面积：

$$A_{eff} = A \sqrt{\frac{N_{avg}}{N_{ref}}} \quad (D.5)$$

式中：

$N_{ref}$ ——标准片的标定浓度，单位为每立方厘米（ $\text{cm}^{-3}$ ）；

$N_{avg}$ ——标准片的测量浓度，单位为每立方厘米（ $\text{cm}^{-3}$ ）；

$A_{eff}$ ——由标准片的测量值计算得到的有效接触面积，单位为平方厘米（ $\text{cm}^2$ ）。

#### D.7 测量步骤

将待测外延片置于测试台上，汞探针接触外延片正面形成肖特基接触，背面欧姆接触由金属托盘与外延片背面通过真空吸力紧密接触形成。对于n型外延层，需在汞电极处加载负偏压，对于p型外延层，需加载正偏压。

测试，得到外延片掺杂浓度。

#### D.8 测试报告

测试报告应包括以下内容：

- a) 试样编号；
  - b) 4H-SiC外延片掺杂浓度；
  - c) 检测单位，检测者和检测时期。
-



