

CASA

第三代半导体产业技术创新战略联盟标准

T/CASA 004.1-2018

4H 碳化硅衬底及外延层缺陷术语

The Terminology for Defects in both 4H-SiC Substrates and Epilayers

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	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 一般术语	1
3.2 一般缺陷术语	3
3.3 4H-SiC 衬底缺陷	4
3.4 4H-SiC 外延缺陷	7
3.5 工艺缺陷	12
汉语拼音索引.....	15
英文索引.....	19

前言

由于4H-SiC缺陷特别是4H-SiC外延缺陷与常见的其它半导体缺陷形状、类型、起因因外延生长模式的不同而有所不同或完全不同，而且目前尚未有适用的国家标准和行业标准，因此，为了规范4H-SiC缺陷术语和定义，特制定本标准。

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、中国科学院微电子研究所、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、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、杨霏、柏松、许恒宇、李诚瞻、高玉强、冯淦、胡小波、张乐年、房玉龙。

4H 碳化硅衬底及外延层缺陷术语

1 范围

本标准规定了4H碳化硅衬底及外延层缺陷术语和定义，其中包括4H-SiC材料、缺陷共性用语、衬底缺陷、外延层缺陷以及工艺缺陷五部分，其中工艺缺陷包括抛光（CMP）、离子注入、高温退火与氧化等相关工艺产生的缺陷。

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 14264 半导体材料术语

3 术语和定义

GB/T 14264界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 一般术语

3.1.1

碳化硅 Silicon Carbide

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，以一定序列进行周期性堆放，由此形成的二元化合物称为碳化硅（SiC）。

3.1.2

晶型 polytype

由Si原子层和C原子层构成的Si-C双原子层基本结构层，以不同的序列进行堆放所形成的多种SiC晶体结构。

SiC共有250多种晶型，三种常见的SiC晶型分别是6H-SiC、4H-SiC和3C-SiC，其中具有立方晶型的只有3C-SiC一种。

3.1.3

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，由此形成的碳化硅（SiC）晶体称为4H-SiC。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。

3.1.4

物理气相运输生长 **physical vapor transport growth**

PVT

4H-SiC晶体的一种常用生长方法。为了克服Lely方法中存在的问题，1978年，前苏联科学家Tairov和Tsvetkov首先提出了通过引入籽晶的升华法来生长SiC单晶，缔造了大面积生长SiC晶体生长的先驱性工作，后又称该方法为籽晶升华法或改良Lely法。

3.1.5

4H-SiC 衬底 4H-SiC substrate

通过切、磨、抛加工工艺，将4H-SiC晶体材料加工成适合于4H-SiC外延生长的晶片。4H-SiC衬底分为正晶向衬底和偏晶向衬底两种。偏晶向衬底，即表面法线向[11-20]方向偏转几度，一般用于同质4H-SiC的外延生长，目前常用的偏转角度为4°。

3.1.6

4H-SiC 同质外延 homoepitaxy of 4H-SiC

在4H-SiC衬底上生长与衬底晶型完全相同的薄层工艺。

3.1.7

台阶流外延生长 step controlled epitaxy

4H-SiC 外延材料的一种生长方法，采用偏晶向4H-SiC衬底，通过控制表面上的原子台阶流动，来实现4H-SiC晶型控制及外延层生长。

3.1.8

原位掺杂 in-situ doping

外延生长中，将n型施主或p型受主杂质原子引入到4H-SiC外延层中，以控制外延层的导电类型和载流子浓度。

3.1.9

氮 (N) 施主杂质 N donor impurity

4H-SiC的n型掺杂剂，它向导带提供电子形成电子导电。在导带边下方0.04eV处形成施主杂质能级。

3.1.10

铝 (Al) 受主杂质 Al acceptor impurity

4H-SiC的p型掺杂剂，它向价带提供空穴形成空穴导电。在价带边上方0.19eV处形成受主杂质能级。

3.1.11

4H-SiC 外延层 4H-SiC epilayer

在4H-SiC衬底上通过外延生长形成的一层或多层4H-SiC外延膜材料。

3.1.12

4H-SiC 外延 (晶) 片 4H-SiC epiwafer

包含衬底及其外延层在内的4H-SiC晶片。

3.1.13

KOH 腐蚀 KOH etching

揭示 4H-SiC 材料表面相交的结晶缺陷的一种方法，即使用熔融 KOH 有选择性的去除 4H-SiC 表面物质，形成与结晶缺陷相对应的腐蚀坑，根据腐蚀坑形貌进行不同类型的结晶缺陷统计与分析。

3.1.14

干法刻蚀 dry etching

半导体器件制造中的一个基本工艺，如反应离子刻蚀（RIE）是制造台面和沟槽的常用工艺。

3.2 一般缺陷术语

3.2.1

衬底缺陷 substrate defect

4H-SiC 衬底中的结晶缺陷或结构缺陷（包括各种包裹体）以及化学机械抛光（CMP）加工遗留在衬底表面上的划痕和亚损伤层缺陷。

3.2.2

外延缺陷 epitaxial defect

在 4H-SiC 外延过程中，因衬底表面颗粒物、衬底中结晶缺陷及表面损伤等而导致台阶流动模式发生变化，在 4H-SiC 外延层及其表面形成的两类缺陷表面形貌缺陷、结晶缺陷。

其中表面形貌缺陷按尺寸又分为两类：

第一类是大缺陷，尺度一般大于 $10\mu\text{m}$ 。第二类是小缺陷或生长型小坑，尺度一般小于 $10\mu\text{m}$ ，且不随4H-SiC外延层厚度而变化。

3.2.3

晶体缺陷 crystal defect

结晶缺陷 crystalline defect; crystallographic defect

结构缺陷 structural defect

偏离理想晶格点阵中原子有规则的排列。

[修改 GB/T 14264-2009，定义 3.48]

3.2.4

扩展缺陷 **extended defect**

从衬底或衬底表面贯穿到外延层，或随外延层厚度而增大的外延缺陷。

随着4H-SiC外延层厚度的增大，沿[11-20]方向的长度（L）呈现规律性的增大，长度L可表示为

$$L=d/\sin(\theta)$$

其中d为4H-SiC外延层厚度， θ 为4H-SiC表面沿[11-20]方向的偏转角度，这个关系说明大缺陷起始于衬底与外延层界面处。

3.2.5

工艺缺陷 **processing induced defect**

器件制造或材料改性工艺过程中引入到4H-SiC晶体中的深能级中心或非本征结晶缺陷，这些深能级可能是杂质原子、间隙原子、空位或其复合体等，起复合中心作用。其中主要器件制造工艺包括离子注入、高温氧化、高温退火、反应离子刻蚀等，材料改性工艺包括中子辐照、电子辐照、质子辐照、离子辐照等。

3.3 4H-SiC 衬底缺陷

3.3.1

微管缺陷 **micropipe**

MP

SiC中特有的一种直径达微米级的物理孔洞或中空管道，即一种Burgers矢量数倍于螺位错（TSD）Burgers矢量的贯穿型螺位错。

3.3.2

碳包裹体 **carbon (C) inclusion**

4H-SiC衬底中存在的由碳（C）元素组成的固相原子团簇或小颗粒体。不同的C包裹体，其形状和大小各异。

3.3.3

晶型夹杂 **polytype inclusion**

4H-SiC衬底中存在的其它晶型的SiC颗粒体或薄层，如3C-SiC、6H-SiC、8H-SiC和15R-SiC等。

3.3.4

六方空洞缺陷 **hexagonalvoid**

SiC单晶中，具有六角形的片状空洞。

3.3.5

堆垛层错 stacking fault

4H-SiC 衬底中存在的一种二维晶面缺陷，它由于基本结构层正常的周期性重复堆垛顺序在某二层间出现了错误排列而偏离了正常的堆垛秩序所致。例如在立方密堆积结构中，正常堆垛顺序为 ABCABCABC.....，如果局部出现诸如.....ABC A\C ABC.....或者.....ABC AB\C ABC.....，则划线处便是堆垛层错。堆垛层错在形式上也可看成是一个完整晶格沿层错面两侧晶格间发生非重复周期平移所致。

每个层错的边界是不全位错。

3.3.6

Frank 型层错 Frank-type stacking fault**FSF**

4H-SiC 晶体中一种重要的堆垛层错，该层错是通过抽取或插入一个或多个原子层而构成，其边界为 Frank 型不全位错。

3.3.7

Shockley 型层错 Shockley-type stacking fault**SSF**

4H-SiC 晶体中另一种重要的堆垛层错。常见的 Shockley 型层错有 1SSFs, 2SSFs 等。Shockley 型层错不像 Frank 型层错那样是通过抽取或插入多余原子层来构成，而是上下两部分原子层在剪应力的作用下发生相对移动而形成的。Shockley 型层错特点是可在外力的作用下（比如激光照射或载流子注入条件下）进行移动和扩展，从而改变大小。相比之下，Frank 型层错则不能这样移动，这是两者的重要区别。

3.3.8

双 Shockley 型堆垛层错 double Shockley-type stacking fault**DSSF (2SSF)**

n^+ 型 4H-SiC 晶体生长、高温处理、划痕、其它晶体表面损伤等产生的一种层错缺陷。在 4H-SiC 晶体中，DSSF 的扩展速率为 $20\mu\text{m/h}$ 到 $100\mu\text{m/h}$ ，且随 N_N-N_{Al} 浓度的增大而增大。在相同掺杂浓度下，N-Al 共掺杂晶体中 DSSF 的扩展速率小于 N 掺杂晶体。

3.3.9

位错 dislocation**TD**

晶体中一种线性缺陷，它是晶体中已滑移与未滑移区之间边界构成的，或是以伯格回路闭合性破坏来表征的缺陷。

[GB/T 14264-2009, 定义 3.65]

3.3.10

螺位错 threading screw dislocation**TSD**

4H-SiC 衬底中 Burgers 矢量为 $1c$ 的贯穿型位错。TSD 位错很难直接被观察到，但可用熔融 KOH ($T > 450^\circ$) 腐蚀方法来表征，其蚀坑呈现六角形形状，即一个锥顶为蚀坑底、且偏向 $\langle 11-20 \rangle$ 方向的不对称倒六面锥体。TSD 位错密度通常在 10^2-10^3cm^{-2} 量级。

3.3.11

刃位错 threading edge dislocation**TED**

4H-SiC 衬底中 Burgers 矢量为 $1/3[11-20]$ 的贯穿型位错。TED 位错很难直接被观察到，但可用熔融 KOH ($T > 450^\circ$) 腐蚀方法来表征，与 TSD 一样，TED 蚀坑也呈现六角形，TED 位错密度通常在 10^4cm^{-2} 量级。TED 的 Burgers 矢量为 $1/3[11-20]$ ，小于 TSD 的 $1c$ Burgers 矢量，大约是 $1c$ 矢量的 $1/3$ ，所以 TED 六角形蚀坑尺寸小于 TSD 蚀坑。

3.3.12

基晶面位错 basal plane defect**BPD**

BPD 是 4H-SiC 衬底中位于基晶面内的一种常见一维结晶缺陷。经熔融 KOH 腐蚀后，BPD 位错蚀坑呈现壳形形貌。BPD 位错的 Burgers 矢量为 $1/3[11-20]$ ，与 TED 位错的 Burgers 矢量相同。对于壳形蚀坑，其底部所在的方向与六角形蚀坑底部方向相反，且其底部更接近于蚀坑的边缘。

3.3.13

小角晶界 low angle grain boundary

晶体中相邻区域晶向差别在几分之一到 1° 的晶粒间界。晶粒间界是指固体中不同取向的晶粒间相接触的界面，简称晶界，晶界只有几个原子的厚度，化学腐蚀后蚀坑呈现一个直线或近直线状排列的位错组态。BPD 和 TED 有时组合形成 LAGB。

4H-SiC 衬底中有两种典型的 LAGB：一是晶片边缘区域，LAGB 区域存在小的高应变晶粒，与晶体有几分取向偏差；二是晶片中央区域，LAGB 区域主要由 $\langle 1-100 \rangle$ 方向 Burgers 矢量为 $a/3\langle 11-20 \rangle$ 的 TED 位错构成。

[修改 GB/T 14264-2009，定义 3.147]

3.3.14

划伤 scratch**划痕 scratch**

一种浅的细沟槽或晶片表面已确立的平面下的刀痕，其长宽比大于 5:1。

在白炽灯（高强度光）或荧光灯（漫射光）照明条件下用肉眼可看得见的划伤为重划痕；在荧光灯照射条件下用肉眼看不见，但在白炽灯（高强度光）照明条件下可以看得到的划伤

为轻微划伤。

3.3.15

CMP 隐含划痕 CMPlatent scratch

由 CMP 诱发的残余线状划痕, 或未被完全消除的切、磨、抛划痕。隐含划痕尺度很小, 不易用光学或微分干涉显微技术探测。

3.3.16

亚表面损伤 subsurface damage

在衬底表面亚微米深度区域, 因表面加工工艺而产生的晶格形变或损伤。

3.3.17

微型裂痕 microcracks

延伸到晶片表面的解离或断裂, 其可能或许没有穿过整个晶片厚度。

3.3.18

腐蚀坑 etching pit

在晶体表面的位错应力区域, 由择优腐蚀而产生的一种界限清晰、形状规则的腐蚀坑。

4H-SiC 衬底表面局限于结晶缺陷或应力区通过选择性腐蚀而形成的一种界限清晰、形状规则或不规则的凹坑, 在 200 倍放大倍数下清晰可见。

3.4 4H-SiC 外延缺陷

3.4.1

表面形貌缺陷 surface morphological defect

外延生长期间, 在4H-SiC外延层表面形成的规则形或不规则形, 且可借助光学显微镜直接观察的表面特征, 常见的形貌缺陷有三角形缺陷、胡萝卜缺陷、直线形缺陷、彗星缺陷、小坑缺陷、掉落颗粒物、台阶聚集等。

见外延缺陷 (3.2.2)。

3.4.2

掉落颗粒物 downfall

4H-SiC外延生长前或生长过程中, 从反应生长室内壁上的黑色不定形碳或SiC微颗粒掉落在衬底或外延层表面上, 经过外延生长后局部或全部陷于外延层中, 形成大小不一、形状各异的点状外延形貌缺陷。

掉落颗粒物缺陷有两种典型形貌, 一是大型点状形貌, 二是以颗粒物为头的三角形形貌。掉落颗粒物缺陷可用肉眼观察。

3.4.3

三角形缺陷 **triangular defect**

外延生长中，在4H-SiC外延层表面上形成的具有三角形形状或图案的外延形貌缺陷，借助光学显微镜可以用肉眼直接观察。

三角形缺陷由变形的4H-SiC晶型边界和含有3C晶型夹层的三角形区域构成，是外延生长过程中，台阶流动因衬底表面存在外来颗粒物、晶体缺陷或划痕而受到干扰所致。

沿台阶流动方向三角形缺陷的高度基本满足

$$L=d/\sin(4^\circ)$$

其中d为4H-SiC外延层厚度。

3C-SiC与4H-SiC晶格常数不同，在三角形缺陷的周围通常存在应力场。

3.4.4

3C-SiC 晶型包裹体 **3C-SiC polytype inclusion**

4H-SiC外延层中所含有的具有3C-SiC晶型的薄层或颗粒体。3C-SiC晶型包裹体通常起始源于外延层/衬底界面处，可在基晶面内延伸到外延层表面。不同的3C-SiC晶型包裹体，其[0001]方向的厚度也会不同。

见3.4.3三角形缺陷。

3C-SiC晶型有多种类型，如在外延层表面呈现出一定形貌的三角形缺陷和彗星缺陷，以及在外延层表面不呈现任何形貌的原生型层错。

3.4.5

彗星缺陷 **comet**

4H-SiC外延层表面上出现的具有彗星形状一种外延形貌缺陷，一般情况下它具有独立的“头”和“尾”。这些彗星缺陷平行排列，与主平边平行。其长度（L）随外延层厚度的变化与三角形缺陷相同，即满足 $L=d/\sin 4^\circ$ 关系，其中d为4H-SiC外延层厚度。

3.4.6

胡萝卜缺陷 **carrot**

4H-SiC外延层表面出现的一种具有胡萝卜状形的外延缺陷或形貌缺陷。有时胡萝卜缺陷棱角分明。这些缺陷平行排列，随着外延层厚度的增大，胡萝卜缺陷沿[11-20]方向延伸，且与主平边[11-20]方向平行。胡萝卜缺陷长度（L）趋于相同，并满足 $L=d/\sin\theta$ 关系式，其中，d为4H-SiC外延层厚度， θ 为衬底表面的偏转角度（ $\theta=4^\circ$ ）。

胡萝卜缺陷由三个缺陷组成，即基晶面层错、棱柱面层错和两者交界处的阶梯杆状位错，基晶面层错是插入一个双原子层的Frank型层错，一层错边界为Frank型不全位错，层错堆垛序列为（2232），而棱柱面层错与3C-SiC包裹体相联系。另外胡萝卜状表面形貌是由于棱柱面层错与外延层表面相交所致。

3.4.7

直线缺陷 **line shape defect; straight line defect**

4H-SiC 外延层表面出现的外形为直线形的形貌缺陷。其沿[1 1-20]方向的长度 (L) 趋于相同, 也基本满足 $L=d/\sin\theta$ 关系式, 其中, d 为 4H-SiC 外延层厚度, θ 为衬底表面的偏转角度 ($\theta=4^\circ$)。

3.4.8

小坑缺陷 growth pit

晶片表面的凹陷, 有陡峭的倾斜侧面, 该侧面以可分辨的方式与表面相交, 和凹坑的圆滑侧面形成对照。

小坑缺陷是 4H-SiC 外延层表面出现在 TSD 位错顶端的小凹陷或小坑状的形貌缺陷, 其尺度小于 $10\ \mu\text{m}$ 。小坑缺陷密度大约在 $10^2\sim 10^3\ \text{cm}^{-2}$, 与衬底中的 TSD 位错密度接近。TED 在外延层表面引起的小坑尺寸远小于 TSD 诱发的小坑尺寸, 很难被观察到。

3.4.9

梯形缺陷 trapezoid defect

梯形缺陷是 4H-SiC 外延层表面平行于[1-100]方向、两条长度不等的上游端 ‘U-GSB’ 坡堤线和下游端 ‘D-GSB’ 宏观台阶线构成的梯形表面形貌缺陷。U-GSB 和 D-GSB 之间间距随外延层厚度增加而增大, 可用 $d/\sin\theta$ 表示, 其中 d 是外延层厚度, θ 是衬底偏角。

3.4.10

台阶聚集 step bunching

4H-SiC 外延层表面出现的平行于<1-100>方向的有多个原子台阶汇聚在一起而形成的线条状宏观台阶或平行线簇形貌。台阶聚集会增大外延层表面粗糙度。

3.4.11

外延凸起 epi-crown

在4H-SiC外延晶片上游端边缘区域出现的表面高度与晶片边缘处高度之间的差异。

3.4.12

乳凸 bump

4H-SiC 外延层表面出现的外形为凸点或凸起状的形貌缺陷。

3.4.13

界面位错 interfacial dislocation

ID

在 4H-SiC 外延生长中, 因 4H-SiC 外延层与衬底间较大 N 掺杂浓度差异所导致的失配应力或因晶片不均匀加热而导致的热弹性应力, 4H-SiC 外延晶片边缘区域在外延层/界面处出现在基晶面内的 BPD 位错或团簇。延层/衬底界面处失配应力, 是通过界面位错的扩展而

弛豫的，该界面位错是贯穿到外延层中的部分 BPD 位错，扩展方向为[1-100]方向。ID 易产生半环列阵（HLA）。

3. 4. 14

半环列阵 half loop array

HLA

半环列阵是一个复杂的扩展缺陷。4H-SiC外延过程中，在靠近衬底/外延层界面处因存在应力而驱使BPD位错沿着倾斜的基晶面滑移，以便释放应力，因此而产生半环列阵，外延层越厚，半环列阵越长，最长可达到数厘米。

半环列阵由一系列的半环缺陷构成，每个半环缺陷由一小段BPD位错和位于BPD两端的两个直达外延层表面的TED位错构成。由于半环缺陷中有BPD碎段，在一定条件下可扩展成层错缺陷。

3. 4. 15

原生型层错 in-grown stacking fault

IGSF

外延生长期间，4H-SiC 外延层中产生的 SF。

IGSF 是位于基晶面内的一种 2 维结构缺陷，4H-SiC 外延层中大部分 IGSF 成核点位于外延层/衬底界面处，IGSF 从其成核点会一直延伸到外延层表面。该类型层错不可用光学显微镜直接被观察到，可借助 PL 成像手段来观察。

3. 4. 16

原生型三角形层错 triangular in-grown stacking fault

T-IGSF

在 4H-SiC 外延层基晶面内形成的三角形原生型层错。在外延层表面没有形成对应的三角形形貌。

3. 4. 17

条形原生型层错 bar shape in-grown stacking fault

B-IGSF

在 4H-SiC 外延层中形成的条形原生型层错。B-IGSF 位于基晶面内，与外延层表面相交一平行于[1-100]方向的交界线。

3. 4. 18

不全位错 partial dislocation

PD

柏氏矢量不等于单位点阵矢量或其整数倍的位错称为“不全位错”或“部分位错”。在 4H-SiC 中，不全位错构成了晶体内部层错终止的边界。

不全位错分为 Shockley 型和 Frank 型，这两种不全位错的 Burgers 矢量方向不同，前者平行于层错面，而后者则垂直于层错面，因此，前者可滑移，而后者不可动。Burgers 矢量偏离 $\langle 11-20 \rangle$ 方向 30° 的 Si 核不全位错 $[30^\circ\text{-Si}(g)]$ ，具有可移动性，在一定条件下，Si 核不全位错会沿 SSF 扩展的方向滑移。C 核不全位错，具有不可移动性。

在 X-射线拓扑形貌图像中，Frank 型不全位错衬度不随反射条件而变化，因 Shockley 型不全位错位于基晶面内，其衬度则随反射条件而发生改变。

3.4.19

点缺陷 point defect

本征缺陷 intrinsic defect

一种局部的晶体缺陷，像晶格空位，间隙原子，或替位杂质。

注：4H-SiC 外延层中形成的 C 空位 (VC) 和 Si 空位及反位原子和间隙原子等，这些点缺陷以不同的电荷态存在，在带隙中引入深能级，起复合中心或陷阱中心作用。

[改写 GB/T 14264, 3.187, 增加注的内容]

3.4.20

碳空位 carbonvacancy

V_C

4H-SiC 晶格中正常 C 晶位上的 C 原子被移去后遗留下来的空位，标记为 V_C 。

V_C 是 SiC 中的一种点缺陷，从其双正电荷态到其双负电荷态，所有能级都位于 4H-SiC 带隙内。n-型 4H-SiC 外延层中有两类陷阱，即 $Z_{1/2}$ 和 $EH_{6/7}$ ，它们分别位于 $E_C-0.62\text{eV}$ 、和 $E_C-1.6\text{eV}$ 处。 V_C 具有负相关能，其受主能级归因于 Z_1/Z_2 缺陷， Z_1/Z_2 分别对应于 4H-SiC 晶体中六角晶位上的双受主能级和位于立方晶位上的单受主能级。施主能级归因于 $EH_{6/7}$ 缺陷，具有类施主行为。

3.4.21

硅空位缺陷 silicon vacancy

V_{Si}

4H-SiC 晶格中正常 Si 晶位上的 Si 原子被移去后遗留下来的空位，标记为 V_{Si} 。 V_{Si} 是 SiC 中的一种点缺陷。

3.4.22

碳间隙原子 carbon interstitial

C_i

位于 4H-SiC 晶格中正常晶位之外的 C 原子，标记为 C_i 。C 离子注入和高温热氧化均可产生 C 间隙原子。在高温下，C 间隙原子可在 SiC 晶格中扩散，最大扩散长度可达 $300\mu\text{m}$ 。

3.4.23

载流子寿命致命性缺陷 carrierlifetime killerdefect

直接限制载流子寿命的点缺陷，如 C 空位 V_C 。

3.4.24

外延层螺位错 **threading screw dislocation**

TSD

外延层中的螺位错来自于衬底螺位错向外延层的贯穿，其密度与衬底螺位错接近。衬底中螺位错向外延层的贯穿可在外延层表面形成生长型小坑缺陷。

3.4.25

外延层刃位错 **threading edge dislocation**

TED

外延层中的刃位错来自于衬底刃位错向外延层的贯穿，以及衬底中 BPD 转化而来的 TED 位错。因 BPD 的转化，外延层中 TED 位错密度略大于衬底中的 TED 位错密度。

3.4.26

外延层基晶面位错 **basal plane dislocation**

BPD

4H-SiC 外延层中来自于衬底并贯穿到外延层的螺型 BPD 位错，其 Burgers 矢量为 $\pm 1/3[11-20]$ 。

3.5 工艺缺陷

3.5.1

辐照缺陷 **radiation defect**

因辐照而在 4H-SiC 辐照层内产生的点缺陷或非本征结晶缺陷。辐照产生的主要缺陷是 Z_1/Z_2 中心 ($E_C-0.68$ eV)，辐照还产生另外两个深能级中心， $RD_{1/2}$ 和 RD_4 ，它们分别位于导带下方 $E_C-0.98$ eV 和 $E_C-1.63$ eV 处。

常见的照射方法有：离子辐照、电子辐照、 γ 射线辐照、质子辐照及中子辐照等。

3.5.2

离子辐照缺陷 **ion irradiation defect**

因离子辐照而在 4H-SiC 辐照层产生的点缺陷或深能级中心。1 MeV 的 Si^+ 离子辐照后，产生的主要缺陷是 Z_1/Z_2 中心 ($E_C-0.68$ eV)，辐照还产生另外两个中心， $RD_{1/2}$ 和 RD_4 ，它们分别位于导带下方 $E_C-0.98$ eV 和 $E_C-1.63$ eV 处。

3.5.3

电子辐照缺陷 **electron irradiation defect**

因电子辐照而在 4H-SiC 辐照层产生的点缺陷。

SiCPI_n 二极管中的载流子寿命经常用辐照缺陷来控制。在 4H-SiC 中，电子辐照导致陷

阱浓度增大，产生新陷阱 EH1。

3.5.4

γ 射线辐照陷阱 gamma irradiation trap

因 γ 射线辐照而在 4H-SiC 辐照层产生的点缺陷。

γ 射线辐照 (⁶⁰Co gamma 射线) 在 $E_C-0.6\text{eV}$ 和带隙中央间产生类受主陷阱。

3.5.5

粒子辐照缺陷 particle irradiation defect

因粒子辐照（如中子、质子等）而产生的点缺陷。n 型 4H-SiC 中，粒子辐照可产生寿命杀手缺陷 C 空位 V_C ，其中 V_C 是降低寿命、增大漏电流而影响 4H-SiC p^+-i-n 二极管性能的主要缺陷。

3.5.6

质子辐照缺陷 proton irradiation defect

因质子辐照而产生的点缺陷。质子辐照导致载流子寿命减小，随着质子辐照剂量的增大，辐照缺陷密度增大。

在 p^+-i-n 二极管中，质子辐照缺陷是 $Z_{1/2}$ 和 $EH_{6/7}$ 。辐照还产生 EH_4 和 EH_5 两个新深能级和两个少子陷阱 HT1 和 HT4。

3.5.7

中子辐照缺陷 neutron irradiation induced defect

中子辐照在 4H-SiC 外延层产生的点缺陷或层错缺陷。

3.5.8

工艺缺陷 processing induced defect

4H-SiC 器件制造相关工艺，如离子注入、高温氧化、高温退火、界面态缺陷控制、载流子寿命增强、干法刻蚀等，在 4H-SiC 晶体中引入的点缺陷或层错等结晶缺陷。

3.5.9

离子注入缺陷 ion implantation induced defect

见 3.4.2 离子辐照缺陷。

因离子注入工艺而产生的深能级或晶格损伤。

3.5.10

高温退火缺陷 high temperature annealing induced defect

高温退火在 4H-SiC 中产生的点缺陷或层错等结晶缺陷。高温下可形成称为 Frenkel 对的 C 空位-C 间隙原子对，额外 C 空位还可能形成肖特基缺陷。高温退火产生层错缺陷或使

层错扩展。POA 可使来自衬底的 TSD 转化为表面缺陷，如 Frank 型 SF 或胡萝卜缺陷。

3.5.11

高温氧化缺陷 **high temperature oxidation induced defect**

高温氧化过程中在 4H-SiC 外延层中及 SiO₂/4H-SiC 界面处产生层错缺陷及深能级界面态。氧化诱导层错是单 Shockley 型层错（1SSF, Zhdanov 标记为 (1,3)），深能级界面态主要是 C 悬挂键和 C 间隙原子与 C 团簇。

3.5.12

干法刻蚀缺陷 **dry etching induced defect**

蚀刻工艺在 4H-SiC 外延层表面或侧壁产生的不可逆的结晶缺陷或扩展缺陷。如 CF₄ 基反应离子刻蚀（RIE）或感应耦合等离子体刻蚀（ICP）在 4H-SiC 表面以下 0.3-1.0μm 的深度范围内产生的 Z_{1/2}、S 中心、EH₅ 和 EH_{6/7} 深能级及位错环。

3.5.13

电应力诱导缺陷 **electrical stress induced defect**

在正向电流应力下，双极型 4H-SiC 器件漂移层中的 BPD 位错因电子空穴复合扩展成为单 Shockley 型层错。

电应力诱导层错有两种形状，一是三角形，二是条形，层错的两个边界为不全位错。

3.5.14

电应力诱导三角形层错 **electrical stress induced triangle stacking fault**

在正向电流应力下，4H-SiC 双极型器件漂移层产生的形状为三角形单 Shockley 型层错。

3.5.15

电应力诱导条形层错 **electrical stress induced bar-shaped stacking fault, B-SSF**

在正向电流应力下，4H-SiC 双极型器件漂移层产生的形状为条状形的单 Shockley 型层错（B-SSF）。

中文索引

B

表面形貌缺陷.....	3.4.1
半环列阵.....	3.4.14
本征缺陷.....	3.4.20
不全位错.....	3.4.18

C

衬底缺陷.....	3.2.1
4H-SiC 衬底	3.1.5

D

电应力诱导缺陷.....	3.5.13
电应力诱导三角形层错.....	3.5.14
电应力诱导条形层错.....	3.5.15
电子辐照缺陷.....	3.5.3
堆垛层错.....	3.3.4
掉落颗粒物.....	3.4.2
点缺陷	3.4.19

F

腐蚀坑	3.3.15
辐照缺陷.....	3.5.1
KOH 腐蚀.....	3.1.13

G

高温退火缺陷.....	3.5.10
高温氧化缺陷.....	3.5.11
干法刻蚀缺陷.....	3.5.12
干法刻蚀.....	3.1.14
工艺缺陷.....	3.5.8
硅空位缺陷.....	3.4.22

H

彗星缺陷.....	3.4.5
胡萝卜缺陷.....	3.4.6

划痕3.3.12

K

扩展缺陷.....3.2.6

L

螺位错3.3.8

J

晶型3.1.2

结晶缺陷.....3.2.3

晶体缺陷.....3.2.4

结构缺陷.....3.2.5

基晶面位错.....3.3.10

界面位错.....3.4.13

晶型包括体.....3.3.3

3C-SiC 晶型包裹体.....3.4.4

L

粒子辐照缺陷.....3.5.5

离子注入缺陷.....3.5.9

离子辐照缺陷.....3.5.2

R

乳凸3.4.12

刃位错3.3.9

S

N 施主杂质.....3.1.9

Al 受主杂质.....3.1.10

双 Shockley 型堆垛层错.....3.3.6

三角形缺陷.....3.4.3

寿命致命性缺陷.....3.4.24

γ 射线辐照陷阱.....3.5.4

T

台阶控制外延生长.....	3.1.7
碳化硅	3.1.1
4H 碳化硅.....	3.1.3
4H-SiC 同质外延	3.1.6
碳包裹体.....	3.3.2
条形原生型层错.....	3.4.17
台阶聚集.....	3.4.10
碳间隙原子.....	3.4.23
碳空位	3.4.21
梯形缺陷.....	3.4.9

W

4H-SiC 外延层	3.1.11
4H-SiC 外延（晶）片	3.1.12
物理气相输运生长.....	3.1.4
外延缺陷.....	3.2.2
微管缺陷.....	3.3.1
微型裂痕.....	3.3.14
外延凸起.....	3.4.11
位错	3.3.7
外延层螺位错.....	3.4.25
外延层刃位错.....	3.4.26
外延层基晶面位错.....	3.4.27

X

Frank 型层错	3.3.5
Shockley 型层错.....	3.3.5
小坑缺陷.....	3.4.8
小角晶界.....	3.3.11

Y

原位掺杂.....	3.1.8
原生型层错.....	3.4.15
原生型三角形层错.....	3.4.16
CMP 隐含划痕.....	3.3.13
亚表面损伤.....	3.3.14

Z

质子辐照缺陷.....	3.5.6
中子辐照缺陷.....	3.5.7
直线缺陷.....	3.4.7

英文索引

A

Al impurity.....3.1.10

B

Basal plane dislocation, BPD.....3.4.27

Basal plane defect, BPD.....3.3.10

Bump.....3.4.12

Bar shape in-grown stacking fault, B-IGSF.....3.4.17

C

Carbon vacancy, V_C3.4.21

Carbon interstitial.....3.4.23

Carbon (C) inclusion.....3.3.2

Crystalline defect/crystallographic defect.....3.2.3

Crystal defect.....3.2.4

Comet.....3.4.5

Carrot.....3.4.6

D

Double Shockley-type stacking fault, DSSF (2SSF).....3.3.6

Downfall.....3.4.2

Dry etching.....3.1.14

Dry etching induced defect.....3.5.12

E

Electrical stress induced defect.....3.5.13

Electrical stress induced triangle stacking fault.....3.5.14

Electrical stress induced bar-shaped stacking fault.....3.5.15

Electron irradiation defect.....3.5.3

Epi-crown.....3.4.11
 Etching pit.....3.3.15
 Epitaxial defect3.2.2
 Extended defect.....3.2.6

F

Frank-type stacking fault, FSF.....3.3.5

G

Gamma irradiation trap3.5.4
 Growth pit.....3.4.8

H

HT annealing induced defect3.5.10
 High temperature oxidation induced defect3.5.11
 Homoepitaxy of 4H-SiC3.1.6
 Half loop array3.4.14

I

intrinsic defect.....3.4.20
 in-grown stacking fault3.4.15
 ion implantation induced defect.....3.5.9
 interfacial dislocation.....3.4.13
 ion irradiation defect.....3.5.2
 In-situ doping3.1.8

K

KOH etching3.1.13

L

low angle grain boundary.....3.3.11
 latent scratch3.3.13
 lifetime killer defect.....3.4.24

line shape defect/straight line defect3.4.7

M

Micropipe, MP3.3.1

Microcracks.....3.3.14

N

Neutron article irradiation defect3.5.7

N impurity3.1.9

P

Partial dislocation.....3.4.18

Particle irradiation defect3.5.5

Physical vapor transport growth.....3.1.4

Processing induced defect3.5.8

Proton particle irradiation defect.....3.5.6

Point defect3.4.19

Polytype3.1.2

Polytype inclusion.....3.3.3

3C-SiC polytype inclusion.....3.4.4

R

Radiation defect3.5.1

S

Silicon Carbide, SiC.....3.1.1

4H-SiC3.1.3

4H-SiC substrate3.1.5

4H-SiC epilayer3.1.11

4H-SiC epiwafer3.1.12

Step controlled epitaxy.....3.1.7

Step bunching.....3.4.10

Scratch.....3.3.12

Stacking fault3.3.4

Shockley-type stacking fault, SSF3.3.5

Subsurface damage3.3.14

Surface morphological defect3.4.1

Silicon vacancy, V_{Si} 3.4.22

Substrate defect.....3.2.1

Structural defect.....3.2.5

T

Threading screw dislocation, TSD.....3.4.25

Threading edge dislocation, TED3.4.26

trapezoid defect.....3.4.9

threading dislocation, TD.....3.3.7

Threading screw dislocation, TSD.....3.3.8

threading edge dislocation, TED.....3.3.9

Triangular defect.....3.4.3

triangular in-grown stacking fault, T-IGSF.....3.4.16

