

ICS 29.045
CCS H 80



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

碳化硅晶体材料缺陷图谱

Collection of metallographs on defects in silicon carbide crystal materials

(送审稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准管理委员会 发布

目 次

| | |
|-------------------|----|
| 前言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和定义 | 1 |
| 4 缩略语 | 2 |
| 5 碳化硅晶体材料缺陷 | 2 |
| 5.1 晶锭缺陷 | 2 |
| 5.2 衬底缺陷 | 3 |
| 5.3 外延缺陷 | 7 |
| 5.4 工艺缺陷 | 11 |
| 6 缺陷图谱 | 13 |
| 6.1 晶锭缺陷 | 13 |
| 6.2 衬底缺陷 | 14 |
| 6.3 外延缺陷 | 21 |
| 6.4 工艺缺陷 | 39 |
| 参考文献 | 42 |
| 索引 | 37 |

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。

本文件由全国半导体设备和材料标准化技术委员会（SAC/TC 203）与全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分技术委员会（SAC/TC 203/SC 2）共同提出并归口。

本文件起草单位：广东天域半导体股份有限公司……。

本文件主要起草人：……。

碳化硅晶体材料缺陷图谱

1 范围

本文件规定了导电型4H碳化硅(4H-SiC)晶体材料缺陷的术语和定义、形貌特征和产生原因。

本文件适用于SiC半导体行业(晶锭、衬底片、外延片及后续工艺)的研发、生产及检测分析等环节。

2 规范性

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 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文件。

3.1 晶锭缺陷 ingot defect

4H-SiC晶锭在PVT法生长过程中因籽晶自身缺陷延伸、偏离化学计量比、晶锭内部应力、杂质和加工过程而产生的缺陷。

3.2 衬底缺陷 substrate defect

4H-SiC衬底中的结晶缺陷或结构缺陷以及切、磨、抛加工后遗留在4H-SiC衬底表面上的缺陷。

3.3 外延缺陷 epitaxial defect

4H-SiC外延层中的结晶缺陷与4H-SiC外延层表面上因采用台阶流动控制外延生长方法而产生的缺陷。

3.4 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。

3.5 结晶缺陷 crystalline defect

4H-SiC晶体中的点、线、面及体缺陷，包括：4H-SiC晶锭和衬底中的点、线、面及体缺陷，以及4H-SiC外延层中的点、线、面缺陷。

3.6 表面形貌缺陷 surface morphological defect

因偏晶向4H-SiC衬底表面存在外来颗粒物、衬底结晶缺陷、衬底表面抛光划痕、亚损伤层、外延生长条件偏离等原因，在台阶流动控制生长机理下而在4H-SiC外延层表面形成的规则或不规则形状的表面不完整性形貌特征。

注1：表面形貌缺陷借助强光束、显微镜或专业检测设备可以观测到。

注2：4H-SiC外延层典型的表面形貌缺陷包括：掉落颗粒物缺陷、三角形缺陷、胡萝卜缺陷、凹坑、梯形缺陷、台阶聚集、外延凸起和乳凸等。

3.7

不全位错 partial dislocation

PD

伯格斯(Burgers)矢量不等于单位点阵矢量或其整数倍的位错。

注：在4H-SiC中，不全位错构成了层错的两条终止边界。不全位错有肖克莱(Shockley)型和弗兰克(Frank)型两种，前者的Burgers矢量方向平行于层错面，而后的Burgers矢量方向则垂直于层错面，因此，前者可滑移，后者不可动。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BPD：基平面位错(basal plane dislocation)

CVD：化学气相沉积(chemical vapor deposition)

EL：电致发光(electroluminescence)

HLA：半环列阵(half loop array)

ICP：电感耦合等离子体(inductively coupled plasma)

MP：微管(micropipe)

PD：不全位错(partial dislocation)

PL：光致发光(photoluminescence)

PVT：物理气相传输(physical vapor transport)

RIE：反应离子刻蚀(reactive ion etch)

SF：层错(stacking fault)

TED：穿透刃位错(threading edge dislocation)

TSD：穿透螺位错(threading screw dislocation)

5 碳化硅晶体材料缺陷

5.1 晶锭缺陷

5.1.1 裂纹 crack

5.1.1.1 形貌特征

生长的4H-SiC晶体内部有贯穿型或部分穿透的裂纹，严重时可见晶体碎裂成块，如图1~图2所示。

5.1.1.2 产生原因

晶体生长、退火或加工过程中，由于引入晶体内部的热应力过大、晶体内部缺陷过高或机械应力过大，而超过晶体耐受阈值，造成晶体开裂。

5.1.2 杂晶 misoriented grain

5.1.2.1 形貌特征

在4H-SiC晶体内部形成的多晶嵌入式生长，如图3所示。

5.1.2.2 产生原因

在晶体生长过程中，由于包裹物或生长条件剧烈波动导致多晶成核长大，从而形成与单晶取向存在较大偏差的多晶颗粒。

5.1.3 边缘多晶 surrounding polycrystal

5.1.3.1 形貌特征

边缘多晶附着在4H-SiC晶体周围，与内部单晶之间存在明显的衬度交界线，如图4所示。

5.1.3.2 产生原因

在晶体生长过程中，温度场分布不合理造成籽晶边缘升华，导致籽晶直径减小，使得多晶在籽晶边缘附着而形成；或是生长初期籽晶处径向温度梯度过小，导致多晶附着在籽晶边缘的籽晶托上而形成。

5.1.4 多型 polytype

5.1.4.1 形貌特征

在4H-SiC晶体中，形成了6H、15R或3C等异晶型。其中，6H、15R晶型的颜色与4H晶型存在明显的差异层状分布，一般可通过多型分界线或颜色不同来区分（6H呈翠绿色，15R呈暗黄色），如图5~图6所示。

注：3C与4H无明显的颜色或分界线差异，在导电型4H-SiC晶锭中不易观察。但3C在4H-SiC晶锭的表面上，会呈现出起始点位置伴随黄色颗粒的微管簇凹坑。

5.1.4.2 产生原因

在晶体生长过程中，偏离了4H-SiC生长的生长窗口，而产生了有利于6H、15R或3C多型生长的条件而形成；或是晶体生长表面的污染物导致的异晶型成核生长而形成。

5.1.5 微管 micropipe(MP)

5.1.5.1 形貌特征

MP是一种微米级直径的物理孔洞，本质为Burgers矢量数倍于TSD的穿透位错，其终端延伸至晶体表面，从晶体自然面可以观察到小凹坑，如图7所示。MP聚集区通常集中在晶锭边缘区域，其对比度相比于无MP区域较为明显，如图8所示。

5.1.5.2 产生原因

MP通常起始于籽晶或接近籽晶的位置，由多型、碳包裹体、硅滴、籽晶背面升华等因素导致局部应变和晶格畸变而形成。

5.2 衬底缺陷

5.2.1 多晶 polycrystalline

5.2.1.1 形貌特征

在4H-SiC晶体内部形成的多晶嵌入式生长，多晶与单晶之间存在明显的衬度界线，如图9~图10所示。

5.2.1.2 产生原因

在晶体生长过程中，温度场分布不合理或生长条件剧烈波动，导致多晶成核长大。

5.2.2 多型 polype

5.2.2.1 形貌特征

在4H-SiC晶体中，形成了6H、15R或3C等异晶型。其中，6H、15R晶型的颜色与4H晶型存在明显的差异层状分布，一般可通过多型分界线或者颜色不同来区分（6H呈翠绿色，15R呈暗黄色），如图11～图13所示。

5.2.2.2 产生原因

在晶体生长过程中，偏离了4H-SiC生长的生长窗口，而产生了有利于6H、15R或3C多型生长的条件而形成；或是晶体生长表面的污染物导致的异晶型成核生长而形成。

5.2.3 硅滴包裹体 silicon drop inclusion

5.2.3.1 形貌特征

在4H-SiC晶体内部形成的液滴形貌的硅组份夹杂，如图14所示。

5.2.3.2 产生原因

在晶体生长过程中，远离晶体生长平衡态，硅组分分压过高，在生长界面形成Si单质颗粒，进而被后续生长的4H-SiC单晶包裹而形成。

5.2.4 碳包裹体 carbon inclusion

5.2.4.1 形貌特征

由碳元素组成的固相原子团簇或小颗粒体，其形状和大小各异，如图15～图16所示。

5.2.4.2 产生原因

在晶体生长过程中，多晶原料由于非化学计量比升华以及石墨部件腐蚀形成碳颗粒，碳颗粒在生长组分运输的过程中运动至生长界面，进而被后续生长的4H-SiC单晶包裹而形成。

5.2.5 六方空洞 hexagonal void

5.2.5.1 形貌特征

在4H-SiC晶体内部多呈现为六边形的空腔结构，如图17～图19b)所示。

5.2.5.2 产生原因

在晶体生长过程中，籽晶粘接不良造成籽晶背部负生长，在单晶内形成了中空结构。

5.2.6 层错 stacking fault(SF)

5.2.6.1 形貌特征

SF是指晶体中一定范围内晶面堆叠顺序的错误，范围的边界由PD构成。4H-SiC中SF面通常为{0001}晶面，类型有两种，分别是Shockley型和Frank型。

Shockley型SF可以看作晶面的滑移，大多数Shockley型SF在PL图像中呈三角形状，如图20所示；Frank型SF可以看作增加或减少一个或多个晶面而形成堆垛错误，在PL图像中呈条形状，如图21所示。

SF以及对应PD的类型也可以用X射线拓扑图像来进行区分: Shockley型SF对应的PD的Burgers矢量为 $1/3<1\bar{1}00>$, 其形貌如图22所示; Frank型SF对应的PD的Burgers矢量是 $\bar{c}/4$ 、 $\bar{c}/2$ 或 $3\bar{c}/4$, 其形貌如图23所示。

5.2.6.2 产生原因

Shockley型SF主要由于机械应力、温度分布不均匀引起的热应力, 导致晶格失配、晶面错排, 以及制备籽晶过程中遗留在其表面上的残余划痕而导致。Frank型SF由于TSD的结构转变而形成。

5.2.7 穿透螺位错 threading screw dislocation (TSD)

5.2.7.1 形貌特征

在熔融KOH腐蚀后, TSD的蚀坑呈六边形, 该六边形蚀坑是一个倒六面锥体, 锥顶即蚀坑的底尖, 底尖并不在六边形蚀坑的中央, 而是偏向 $[11\bar{2}0]$ 方向, 如图24所示。在同步辐射X射线拓扑图像中, TSD呈大尺寸的圆形亮点(相对于穿透刃位错), 如图25所示。

注: TSD的Burgers矢量为 $1\bar{c}$ 或 $2\bar{c}$ 。

5.2.7.2 产生原因

由于TSD为穿透位错, 籽晶中的TSD会遗传至所生长的单晶衬底中; 或是在生长过程中籽晶粘接不良、温度场设计不合理等因素在单晶内引入内应力及应变, 导致部分晶格区域发生滑移, 而造成TSD的形成、滑移和增殖。

5.2.8 穿透刃位错 threading edge dislocation (TED)

5.2.8.1 形貌特征

在熔融KOH腐蚀后, TED的蚀坑呈近圆形, 由于TED的Burgers矢量小于TSD, 所以TED的蚀坑尺寸也小于TSD, 如图26所示。同样地, 在同步辐射X射线拓扑图像中, TED呈小尺寸的圆形亮点(相对于TSD), 如图27所示。

注: TED的Burgers矢量为 $1/3<11\bar{2}0>$, 约为 $\bar{c}/3$ 。

5.2.8.2 产生原因

衬底TED的形成机制与TSD相似, 由于TED为穿透位错, 籽晶中的TED会遗传至单晶衬底中而形成; 或是在生长过程中籽晶粘接不良、温度场设计不合理等因素在单晶内引入内应力及应变, 导致部分晶格区域发生滑移, 造成TED的形成、滑移和增殖。

5.2.9 基平面位错 basal plane dislocation (BPD)

5.2.9.1 形貌特征

BPD是4H-SiC晶体中位于基晶面内的一种一维结晶缺陷, 在熔融KOH腐蚀后, BPD的蚀坑呈贝壳状, 如图28所示。在同步辐射X射线拓扑图像中, BPD呈线状, 如图29所示。

注: BPD的Burgers矢量为 $1/3<11\bar{2}0>$, 约为 $\bar{c}/3$, 与TED相同, 小于TSD。

5.2.9.2 产生原因

由于籽晶中的BPD遗传至单晶衬底中而形成, 或是晶体生长过程工艺不稳定、引入热应力和杂质而形成。

5.2.10 小角晶界 low-angle grain boundary

5.2.10.1 形貌特征

小角晶界是由高密度TED和BPD构成的高应变区域，在熔融KOH腐蚀后呈现出腐蚀坑直线排列的位错组态，如图30所示。在同步辐射X射线透射拓扑图像中呈现沿着[1100]方向的线条状，如图31所示。

5.2.10.2 产生原因

由于籽晶中的小角晶界传播穿透至衬底表面而形成；或是晶体生长过程中出现强烈干扰、工艺异常和工艺过度修正等原因导致大量TED和BPD聚集而形成。

5.2.11 微管 micropipe (MP)

5.2.11.1 形貌特征

MP是一种微米级直径的物理孔洞，本质为Burgers矢量数倍于TSD的穿透位错，其在SEM图像、明场表面图像和PL图像的形貌，分别如图32～图33b)所示。

在偏振光显微图像中，单个MP看起来像有四个明亮翅膀的蝴蝶，如图34所示；MP聚集区通常集中在晶片边缘区域，其对比度相较于无MP区域较明显，如图35～图36所示。

5.2.11.2 产生原因

多型、碳包裹体、硅滴、籽晶背面升华等缺陷，导致局部应变和晶格畸变而形成；或是籽晶中的微管延伸至单晶衬底中而形成。

5.2.12 凹坑 pit

5.2.12.1 形貌特征

衬底表面的一种凹陷，具有一定形状的凹面，在适当地光照条件下可见凹陷点，如图37a)～34b)所示。

5.2.12.2 产生原因

由抛光阶段KMnO₄腐蚀引起；或是抛光贴蜡时，颗粒磨损衬底表面而形成。

5.2.13 崩边 chip

5.2.13.1 形貌特征

局部边缘破损，并不贯穿衬底正、背表面，存在于衬底表面边缘区域，如图38所示。

5.2.13.2 产生原因

由于切割线摆动、研磨、抛光或倒角时，衬底局部承受压力过大、操作不当而形成；或是退火过程中温度变化引起晶体内部应力改变而形成。

5.2.14 缺口 indent

5.2.14.1 形貌特征

局部边缘破损，贯穿衬底正、背表面，存在于衬底边缘区域，如图39所示。

5.2.14.2 产生原因

由于切割线摆动、研磨、抛光或倒角时，衬底局部承受压力过大、操作不当而形成。

5.2.15 裂纹 crack

5.2.15.1 形貌特征

由衬底内部延伸到晶片表面的解理或断裂，它不贯穿整个表面，容易沿晶体的解理面产生，如图40所示。

5.2.15.2 产生原因

由于研磨、抛光过程中，磨料颗粒形状不规则，造成局部压强过大而形成；或是超声波清洗时，液体与衬底表面存在空化作用，局部存在剧烈的压力、温度变化而导致。

5.2.16 划痕 scratch

5.2.16.1 形貌特征

衬底表面上的一种宏观无规则较浅的细沟槽，其长宽比大于5:1，如图41~图44所示。

5.2.16.2 产生原因

由于研磨和抛光时，研磨机磨盘质量不佳、磨料颗粒形状不规则、抛光液中混有硬质颗粒或抛光工艺环境不满足洁净度要求，造成衬底局部压强过大而形成。

5.2.17 沾污 stain

5.2.17.1 形貌特征

沾污存在于衬底表面，由于其来源不同而有不同的表现，表面沾污包括水迹、污迹、溶剂残留等，区域沾污包括吸盘印、尘埃、指纹印记等，如图45~图46所示。

5.2.17.2 产生原因

由抛光后清洁处理不彻底所引起。

5.3 外延缺陷

5.3.1 掉落颗粒物缺陷 downfall defect

5.3.1.1 形貌特征

掉落颗粒物缺陷有两种典型形貌，一是孤立出现的大型点状形貌，如图47a)~图48c)所示；二是以点状颗粒物为头部，并伴随出现三角形形貌，如图49a)~图50c)所示。掉落颗粒物缺陷一般可以借助强光束用肉眼直接观察到，如图51所示。

5.3.1.2 产生原因

在放片、传输、生长等过程中，反应室、传片腔体等内壁上的不定形碳、SiC小颗粒物或其它尘埃颗粒物，掉落在衬底或外延层表面上而形成。

5.3.2 三角形缺陷 triangular defect

5.3.2.1 形貌特征

三角形缺陷起始于外延层/衬底界面处，从基晶面内延伸到外延层表面，在外延层表面形貌图像和PL图像上均可以观察到三角形图案的部分或整体，三角形沿 $[11\bar{2}0]$ 方向的长度满足公式(1)。图52a)~图53c)、图54a)~图55c)、图56a)~图57c)、图58a)~图59c)，分别反映了由掉落颗粒物缺陷、TSD、乳凸和划痕引起三角形缺陷的典型特征。

式中：

L——长度，单位为微米（ μm ）；

T——外延层厚度，单位为微米（ μm ）。

5.3.2.2 产生原因

外延生长过程中，由于掉落颗粒物缺陷、乳凸等外来物，或衬底表面划痕、TSD等缺陷影响了原子台阶流动而形成。

注：三角形缺陷的本质是由变形的4H-SiC晶型边界和含有3C晶型夹层的三角形区域构成，在(0001)晶面上形成3C-SiC区域，所以在PL图像中呈三角形图案。

5.3.3 彗星缺陷 comet defect

5.3.3.1 形貌特征

在明场表面图像和PL图像中呈现出彗星状图案，通常有独立的“脑袋”和“尾巴”，如图60a)~图61b)所示，彗星缺陷平行于 $[11\bar{2}0]$ 方向，其长度随外延层厚度的增加而增大，且满足公式(1)。

5.3.3.2 产生原因

外延生长过程中，由外来物影响了原子台阶流动并在化学计量偏向富硅的外延工艺条件下，容易形成彗星缺陷。

5.3.4 胡萝卜缺陷 carrot defect

5.3.4.1 形貌特征

起始于外延层/衬底界面处，在外延层明场表面图像上呈胡萝卜状图案，在PL图像上呈线型图案，沿 $[11\bar{2}0]$ 方向延伸，其长度随着外延层厚度的增加而增大，且满足公式（1）。由TSD引起的胡萝卜缺陷，其典型特征如图62a)~图63c)所示；由划痕引起的胡萝卜缺陷，其典型特征如图64a)~图64b)所示。

注：胡萝卜缺陷由三个缺陷组成，即基平面层错、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，层错的一个边界为Frank型不全位错，层错堆垛序列为(2232)，而棱柱面层错与3C-SiC包裹体相同，与外延层表面相交形成胡萝卜形貌。

5.3.4.2 产生原因

由衬底中的TSD和衬底表面上的划痕所引起。

5.3.5 凹坑 pit

5.3.5.1 形貌特征

在明场表面图像可以观察到小凹陷或小坑状的形貌，在PL图像上观察不到图案，如图65a)～图66b)所示。通过KOH腐蚀外延层前、后的对比可发现，外延层的凹坑分布与衬底TSD分布接近，如图67a)～图68b)所示。

5.3.5.2 产生原因

由于衬底中的凹坑、TSD和TED贯穿到外延层而形成。

注：一般情况下，外延层厚度在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下，主要观察到的是由衬底凹坑和TSD引起的外延凹坑；外延层厚度在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以上，可以同时观察到由衬底凹坑、TSD和TED引起的外延凹坑。

5.3.6 梯形缺陷 trapezoid defect

5.3.6.1 形貌特征

在明场表面图像上呈梯形状，在PL图像上观察不到图案，如图69a)～图71c)所示。其由平行于[1100]方向且长度不等的两条底边构成，短底边处于[1120]方向的上游，长底边处于[1120]方向的下游，两底边的间距随外延层厚度增加而增大，且满足公式(2)。

$$D = T / \tan(4^\circ) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

式中：

D——长度，单位为微米 (μm)；

T——外延层厚度，单位为微米（ μm ）。

5.3.6.2 产生原因

由于BPD、TED、TSD和划痕周围的位错环，在H₂刻蚀过程中影响了原子台阶流动，而产生底边，而后因团簇效应使底边间距变大形成梯形缺陷。

5.3.7 台阶聚集 step bunching

5. 3. 7. 1 形貌特征

台阶聚集是外延层表面上平行于 $[1\bar{1}00]$ 方向的多个原子台阶汇聚在一起而形成的平行线簇，如图72a)~图74c)所示。台阶聚集是外延层表面的一种形貌缺陷，自身不存在结晶缺陷，所以在PL图像中一般不会出现形状或图案。

5.3.7.2 产生原因

由于衬底结晶缺陷、衬底划痕等原因阻碍了原子流动而形成台阶，并在H₂刻蚀过程使原子台阶变明显。

5. 3. 8 外延凸起 epi-crown

5. 3. 8. 1 形貌特征

外延晶片边缘高度凸起，形貌如图75所示。

5.3.8.2 产生原因

由于外延晶片上游端边缘区域无原子台阶补充，或是晶片边缘应力引起三角形缺陷团簇，导致外延层表面高度与晶片边缘出现高度差。

5. 3. 9 乳突 bump

5. 3. 9. 1 形貌特征

在明场表面图像上呈现为凸点或凸起状，但表面观察不到明显的异物，一般会伴随一条沿[1100]方向贯穿其中心的竖线，在PL图像上一般观察不到任何图案，如图76a)～图77b)所示。

5.3.9.2 产生原因

小尺寸微小颗粒、3C-SiC颗粒、碳包裹体等在外延生长前阶段掉落在晶片表面而形成。

5.3.10 微管 micropipe(MP)

5.3.10.1 形貌特征

在明场表面图像中呈凹坑状，且在PL图像中呈数倍于表面凹坑直径的螺旋纹图案，如图78a)～图78b)所示。

5.3.10.2 产生原因

由于衬底MP贯穿到外延层而形成。

5.3.11 层错 stacking fault(SF)

5.3.11.1 形貌特征

外延层的SF根据形貌特征可以分为三类：第一类是SF的一条或两条边界在外延层表面形成可观察的形貌，且在PL图像中呈三角形图案，如图79a)～图82c)所示；第二类是明场表面图像中观察不到相应的形貌，但在PL图像中呈三角形图案，如图83a)～图84c)所示；第三类是在PL图像中呈现条形图案，如图85a)～图86c)所示。

5.3.11.2 产生原因

第一类和第二类SF是外延层的原生型SF，由CVD生长室清洁度、衬底表面状态、外延工艺稳定性和衬底位错滑移等微小扰动引起堆垛序列的错误而形成。第三类是由衬底Frank型SF向外延层的贯穿而形成。

5.3.12 穿透螺位错 threading screw dislocation(TSD)

5.3.12.1 形貌特征

外延层的TSD在没有引起其他缺陷的情况下，明场表面图像观察不到其相应的形貌特征，如图87a)所示，但在熔融KOH腐蚀后，TSD的蚀坑呈较大尺寸（相对于TED）的六边形或椭圆形，如图87b)所示。

注1：TSD经常在外延层表面引起凹坑，小部分TSD会引起胡萝卜缺陷、台阶聚集或三角形缺陷。

注2：TSD蚀坑的形状取决于KOH的腐蚀程度，随着程度的增加，由六边形向圆形转变。

5.3.12.2 产生原因

主要由于衬底TSD向外延层的贯穿而形成，其密度与衬底TSD密度接近。

5.3.13 穿透刃位错 threading edge dislocation(TED)

5.3.13.1 形貌特征

外延层的TED在没有引起其他缺陷的情况下，明场表面图像观察不到其相应的形貌和特征，如图87a)所示，但在熔融KOH腐蚀后，TED的蚀坑呈较小尺寸（相对于TSD）的六边形或椭圆形，如图87b)所示。

5.3.13.2 产生原因

由于衬底TED贯穿到外延层而形成；或是非平行于[11 $\bar{2}$ 0]方向的衬底的BPD在外延生长初期镜像力的作用下转化为TED。

5.3.14 基平面位错 basal plane dislocation (BPD)

5.3.14.1 形貌特征

外延层的BPD在明场表面图像中观察不到形貌特征，但在PL图像中呈现平行于[11 $\bar{2}$ 0]方向的线形图案，如图88a)~图88b)所示。在熔融KOH腐蚀后，BPD的蚀坑呈贝壳状，如图89a)~图89b)所示。

注：BPD在外延晶片的分布特点与其产生原因密切相关：由衬底贯穿的BPD一般是孤立出现，且长度基本满足公式(1)，如图90所示；由三角形缺陷和MP等大尺寸缺陷引起的BPD，会以缺陷为中心，沿着<1 $\bar{1}$ 00>方向多对出现且呈对称分布，如图91a)~图92b)所示；由晶片边缘应力引起的BPD，沿着<1 $\bar{1}$ 00>方向分布密集且数量巨大，如图93a)~图93b)所示；由热应力引起的BPD，沿着<1-100>方向成对出现，两个BPD之间的地方经常会伴随半环列阵(HLA)的出现，如图94a)~图94b)所示。

5.3.14.2 产生原因

BPD的产生原因包括以下四种：平行于[11 $\bar{2}$ 0]方向的衬底BPD向外延层贯穿；三角形缺陷和MP等大尺寸缺陷造成周边晶格应变，需要通过形成BPD来释放应力；晶片边缘由于机械磨抛加工和外延生长过程中的边缘效应所产生的应力引起大量BPD的形成；在晶格失配的前提下，较大的温度不均匀引起热应力与晶格失配应力方向一致时，作用力的叠加使已经存在的BPD产生滑移，增殖形成多个BPD。

5.3.15 半环列阵 half loop array (HLA)

5.3.15.1 形貌特征

HLA在PL图像观察到出现在两对BPD之间的点状或短线图案，沿[1 $\bar{1}$ 00]方向列阵组成，如图95所示。

注：通过熔融KOH后可以发现，HLA的本质就是BPD的滑移过程中沿途留下的BPD碎片列阵，如图96所示。

5.3.15.2 产生原因

由于MP、三角形缺陷和热应力引起的外延过程中BPD滑移而形成。

5.4 工艺缺陷

5.4.1 氧化缺陷 oxidation induced defect

5.4.1.1 形貌缺陷

高温氧化过程会诱导形成深能级中心或1SSF型层错缺陷，如图97所示，该层错的不全位错边界会向[1 $\bar{1}$ 00]或[1100]方向发生形变，如图98所示。

5.4.1.2 产生原因

4H-SiC的热氧化过程中，硅和碳原子容易发生相分离而形成硅团簇和碳团簇。在氧化环境下，硅团簇不稳定，很容易被氧化生成SiO₂。而与硅团簇相比，碳团簇比较稳定，只有部分碳团簇能够被氧化形成CO_x气体，但CO_x气体并不能完全被排出，从而导致SiC/SiO₂界面碳团簇的形成。碳团簇形成的同时也形成了碳空位，这些都是深能级。生长的SiO₂薄层在高温氧化环境下引起体积膨胀，形成界面处应力，造成4H-SiC内的位错迁移、扩张、增殖，形成层错。

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

5.4.2.1 形貌特征

电应力诱导的三角形层错，属于单Shockley型层错，其PL图像和EL图像分别如图99～图100所示。

5.4.2.2 产生原因

从衬底贯穿到外延层中的BPD是电应力诱导三角形层错的主要原因，由于漂移层中BPD或位错环在电子空穴复合驱动下分解为两个不全位错并滑移扩展成为Shockley型层错，激活能约为0.27 eV，会形成电应力诱导三角形层错。

5.4.3 电应力诱导条形层错 electrical stress induced bar stacking fault

5.4.3.1 形貌特征

电应力诱导的条形层错，其扩展速度大，几乎是三角形层错的4倍，因此条形层错的面积一般会远远大于三角形层错，其PL图像和EL图像分别如图101～图102所示。

5.4.3.2 产生原因

外延层/衬底界面由BPD转化而形成的TED是电应力诱导条形层错产生的主要来源，激活能约为0.23 eV，会诱导条形层错的扩展，扩展开始时，层错呈现等腰三角形形状，当层错与PN界面接触后，转化成梯形或条形层错，并随电应力沿[1100]方向继续扩展，最终长度可达器件有源区宽度。

5.4.4 干法刻蚀缺陷 dry etching induced defect

5.4.4.1 形貌特征

刻蚀工艺在4H-SiC外延层表面和侧壁产生不可逆的结晶缺陷，缺陷会在应力下发生扩展，如图103a)～图103d)所示。

5.4.4.2 产生原因

CF4基RIE和ICP刻蚀等制造台面二极管和沟槽MOSFET的基本刻蚀工艺，在4H-SiC外延层表面和侧壁产生点缺陷或位错环，形成位错对，引起局部应变，在PN结处的局部应变或热应力下诱发层错及其扩展。

6 缺陷图谱

6.1 晶锭缺陷图谱



图1 裂纹（强光手电光照，肉眼观察）

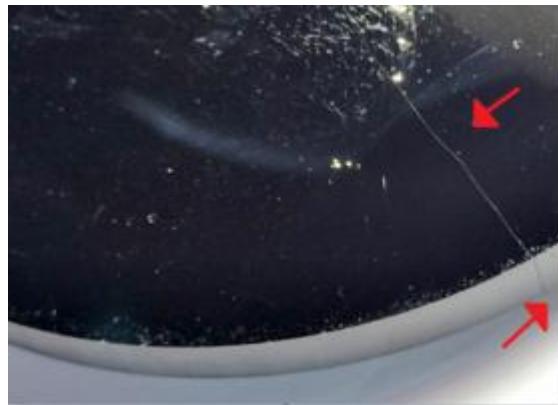


图2 加工裂纹（强光手电光照，肉眼观察）

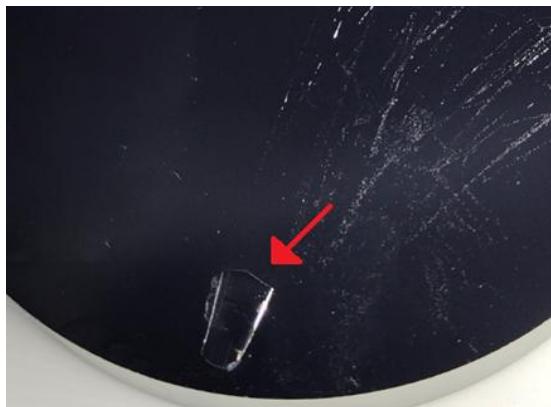


图3 杂晶（日光，肉眼观察）

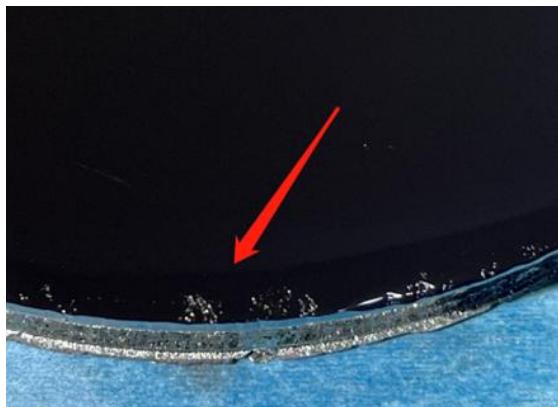


图4 晶锭边缘多晶（日光，肉眼观察）



图5 晶锭多型（日光，肉眼观察）

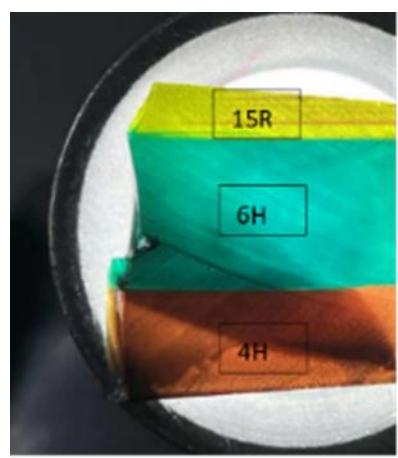


图6 晶锭多型 纵切片（强光手电光照，肉眼观察）



图 7 晶锭微管（强光手电光照，肉眼观察）



图 8 晶锭微管聚集区（强光手电光照，肉眼观察）

6.2 衬底缺陷图谱

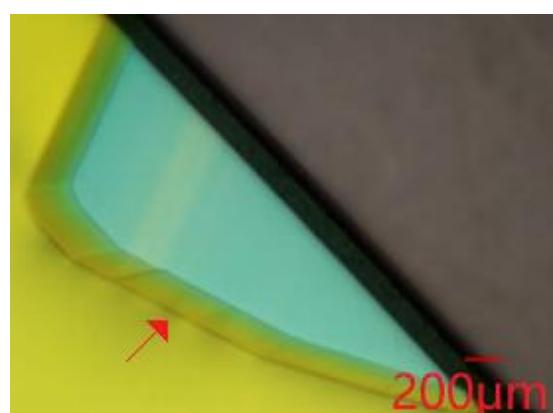


图 9 多晶 1（光学显微图像）

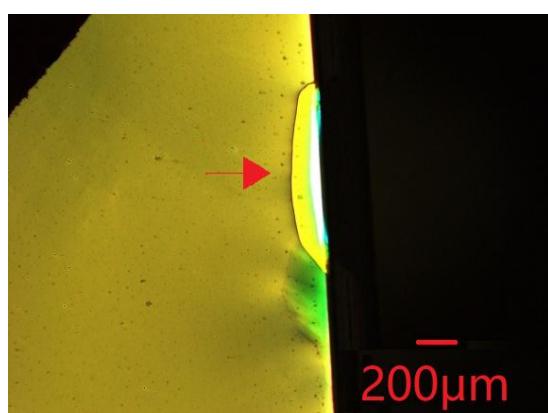


图 10 多晶 2（光学显微图像）

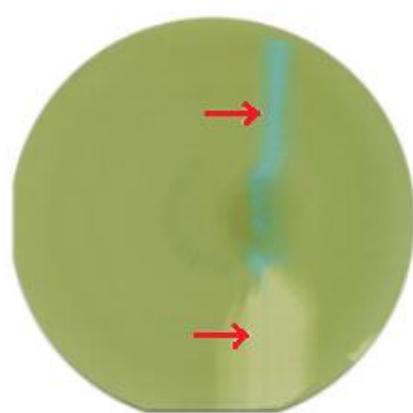


图 11 衬底中心多型（光学图像）

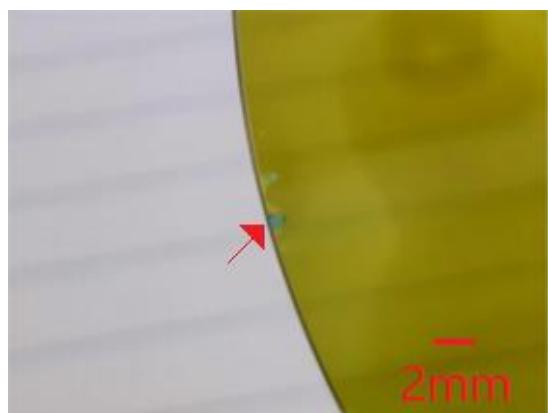


图 12 衬底边缘多型 1（光学显微图像）

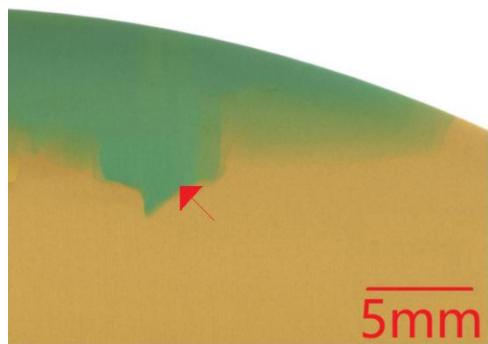


图 13 衬底边缘多型 2 (光学显微图像)

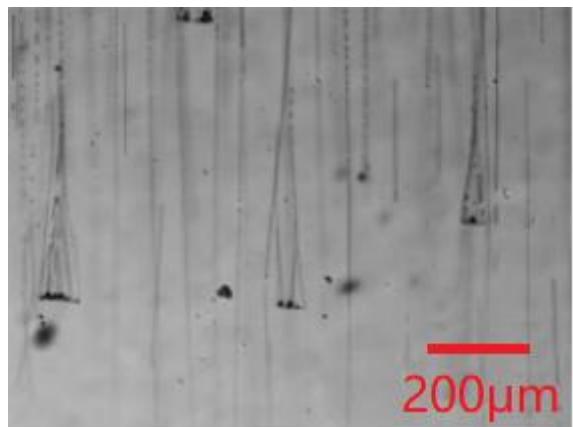


图 14 硅滴包裹物 (光学显微图像)

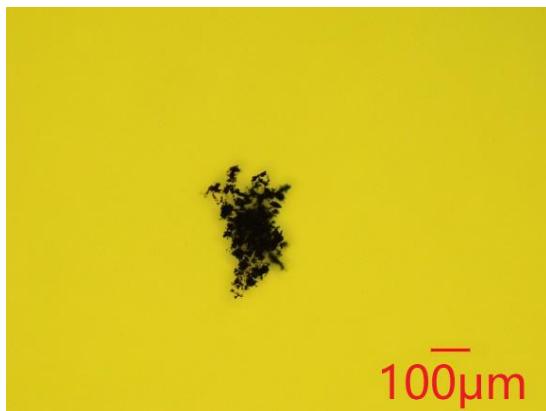


图 15 碳包裹体 1 (光学显微图像)



图 16 碳包裹体 2 (光学显微图像)

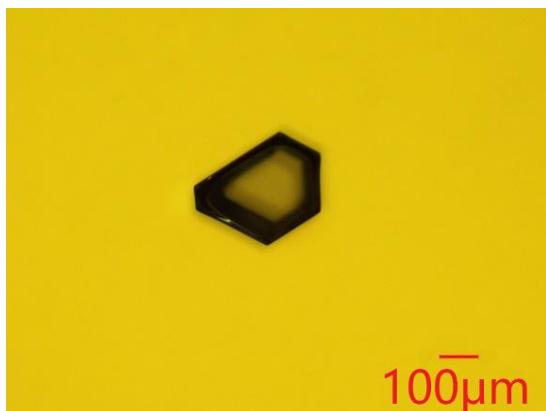


图 17 六方空洞 1 (光学显微图像)

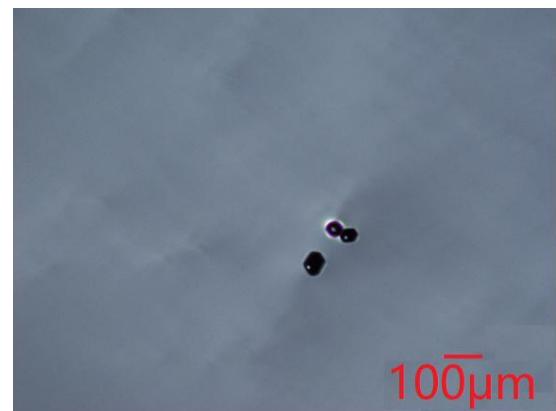


图 18 六方空洞 2 (光学显微图像)

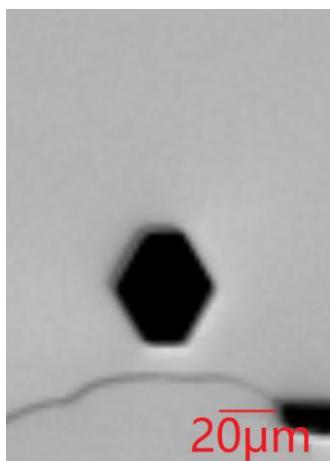


图 19a) 六方空洞 (明场表面图像, 微分干涉法)

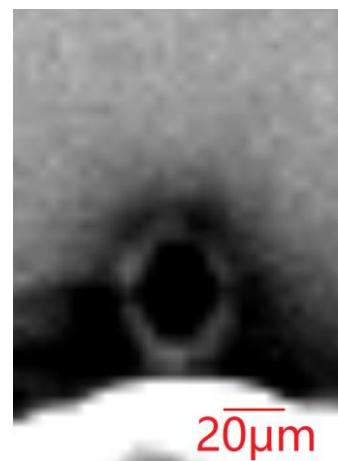


图 19b) 六方空洞 (PL 图像)

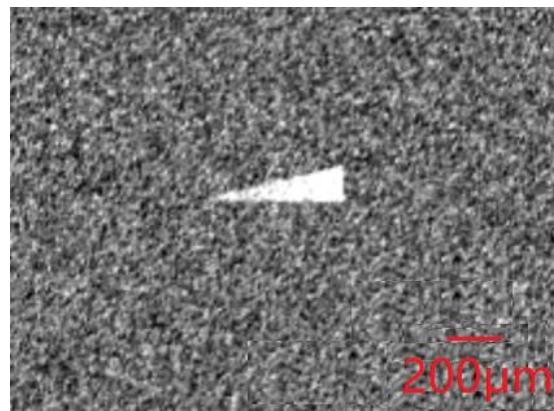


图 20 Shockley 型层错 (PL 图像)

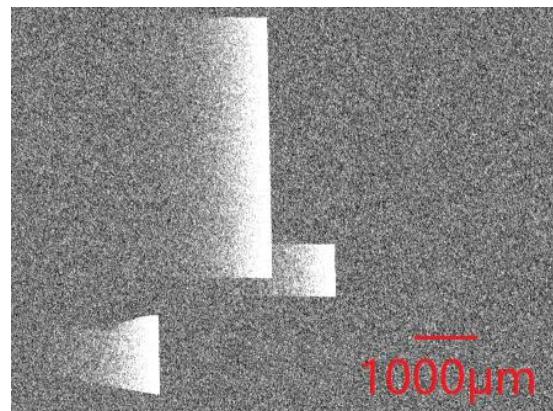


图 21 Frank 型层错 (PL 图像)

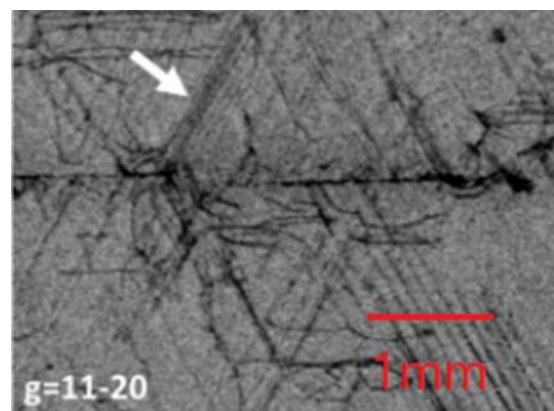


图 22 Shockley 型层错 (X 射线拓扑图像)

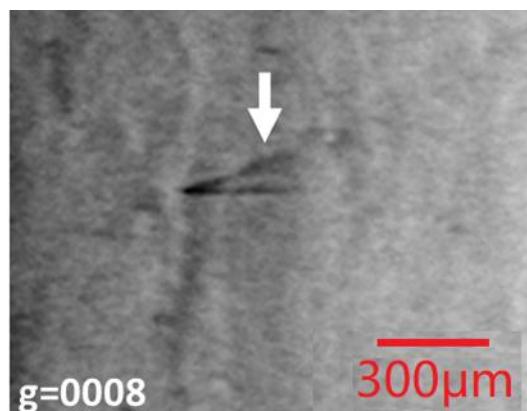


图 23 Frank 型层错 (同步辐射 X 射线拓扑图像)

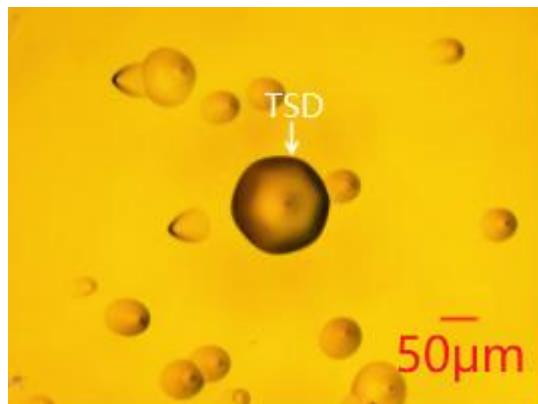


图 24 螺位错（光学显微图像，KOH 腐蚀后）

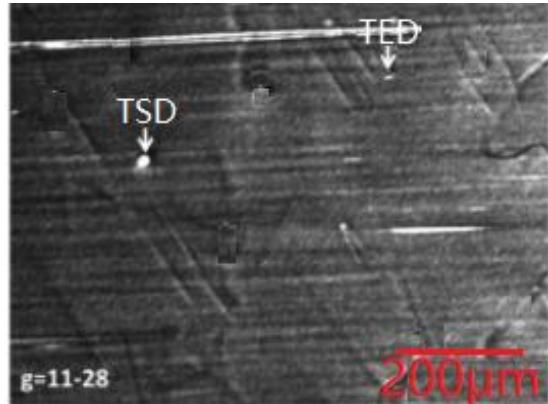


图 25 螺位错（同步辐射 X 射线拓扑图像）

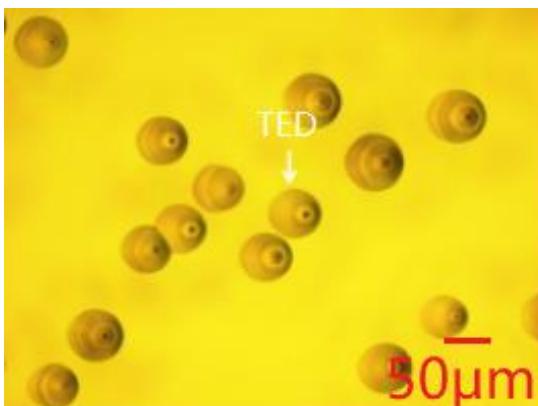


图 26 刃位错（光学显微图像，KOH 腐蚀后）

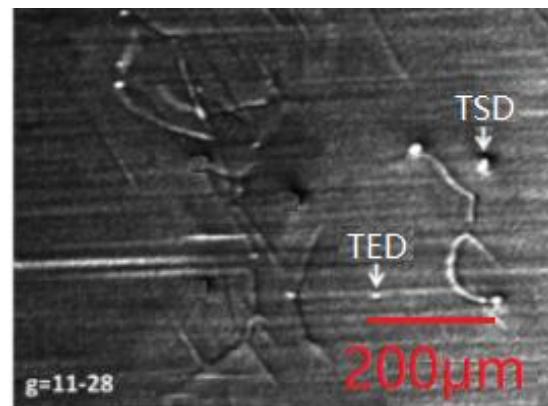


图 27 刃位错（同步辐射 X 射线拓扑图像）

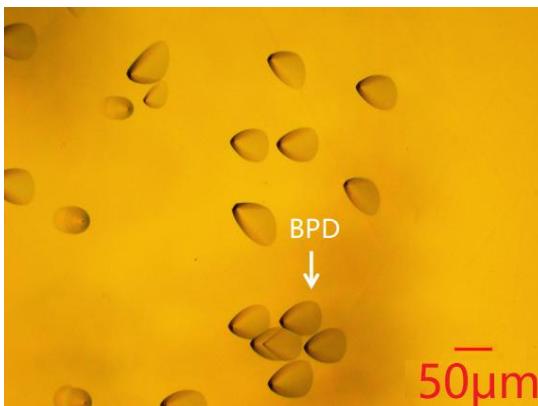


图 28 基平面位错（光学显微图像，KOH 腐蚀后）

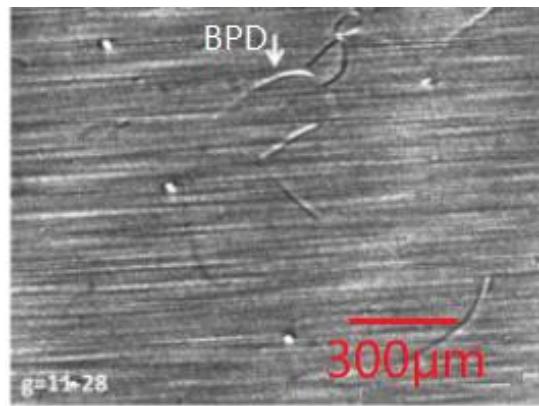


图 29 基平面位错（同步辐射 X 射线拓扑图像）

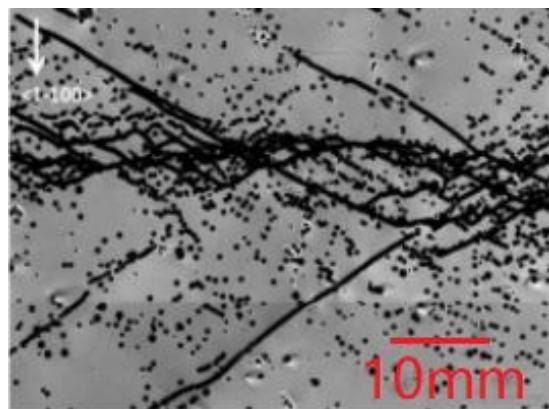


图 30 小角晶界（光学显微图像，KOH 腐蚀后）

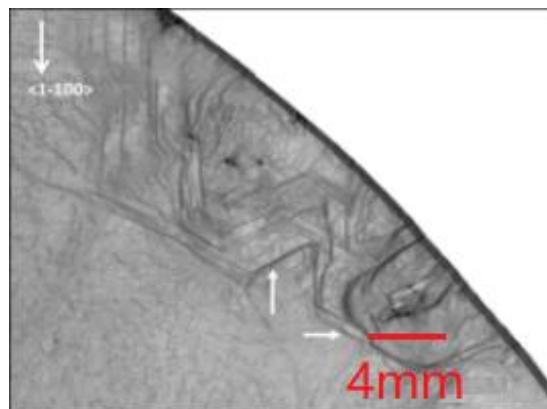


图 31 小角晶界（同步辐射 X 射线拓扑图像）

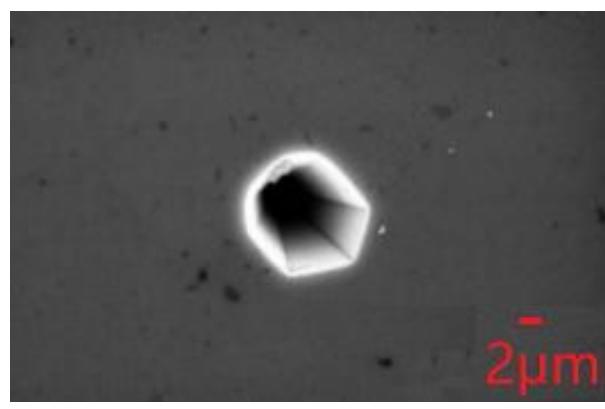


图 32 微管（SEM 图像）

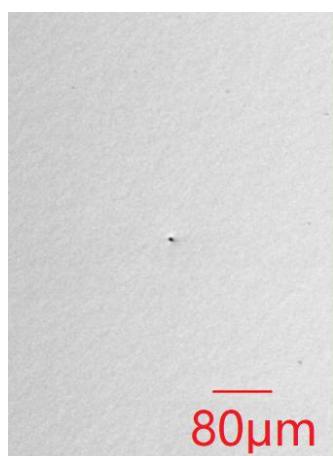


图 33a) 微管（明场表面图像，微分干涉法）

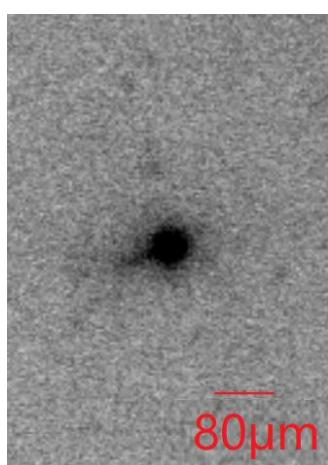


图 33b) 微管（PL 图像）

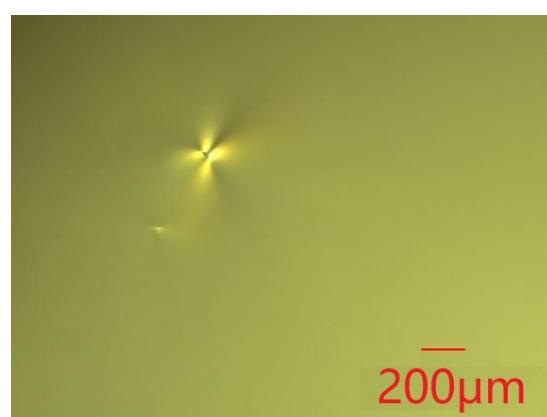


图 34 微管（偏振光显微图像）

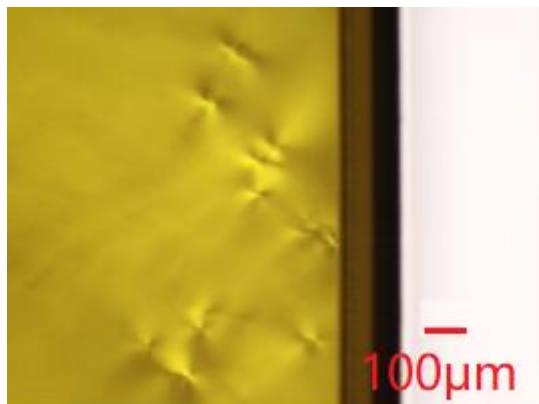


图 35 微管聚集区（偏振光显微图像）

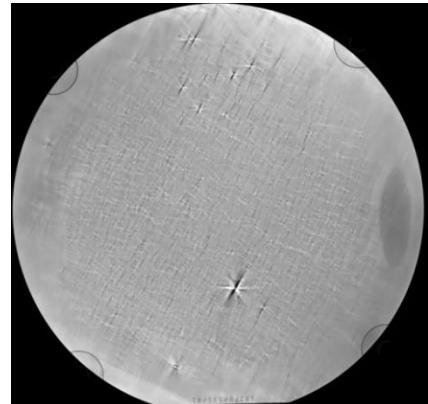


图 36 微管聚集区（应力透射偏振光图像）

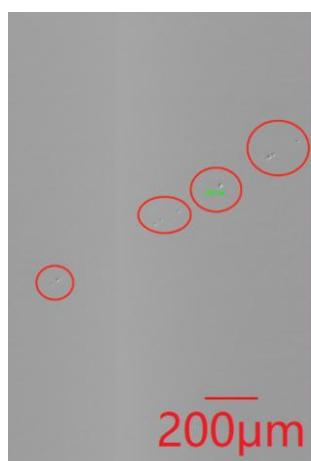


图 37a) 凹坑（明场表面图像，微分干涉法）

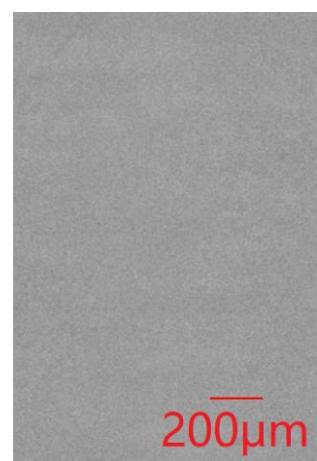


图 37b) 凹坑（PL 图像）

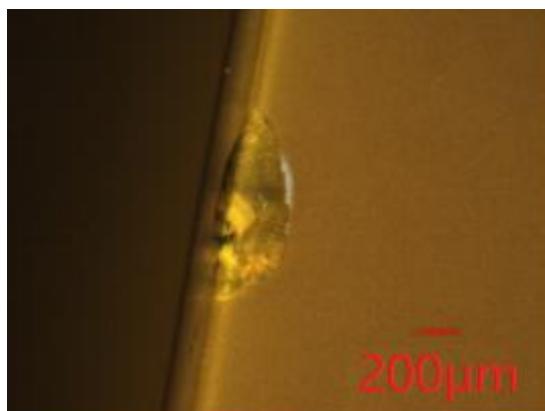


图 38 崩边（光学显微图像）



图 39 缺口（光学显微图像）



图 40 裂纹（光学显微图像）

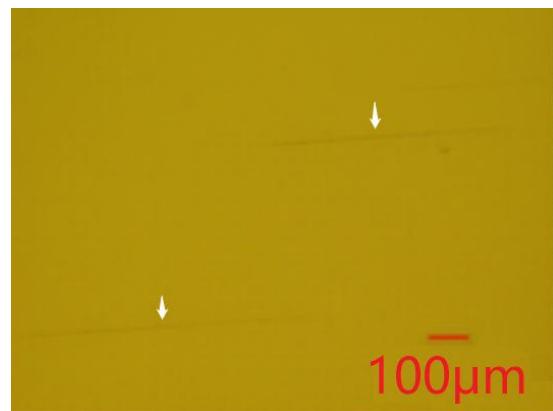


图 41 划痕（光学显微图像）

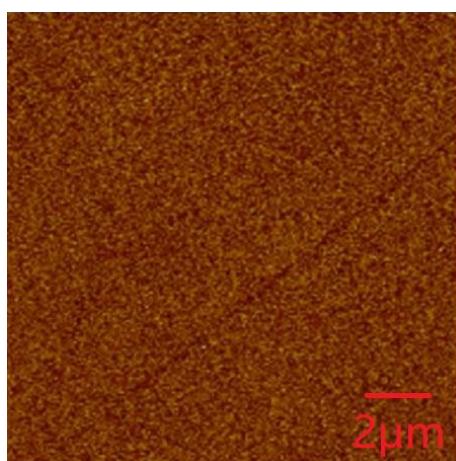


图 42 划痕（AFM 图像）

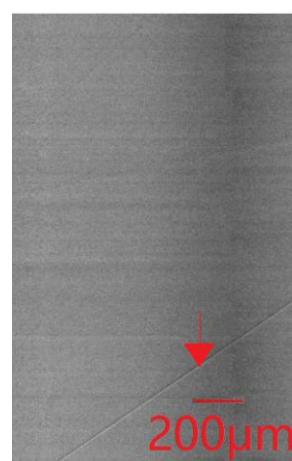


图 43a) 划痕（明场表面图像，微分干涉法）

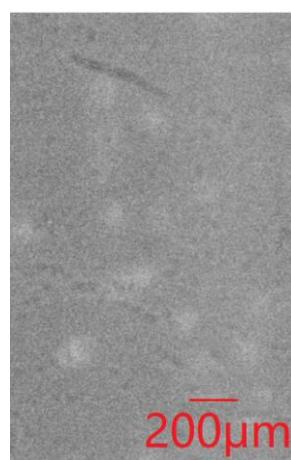


图 43b) 划痕（PL 图像）

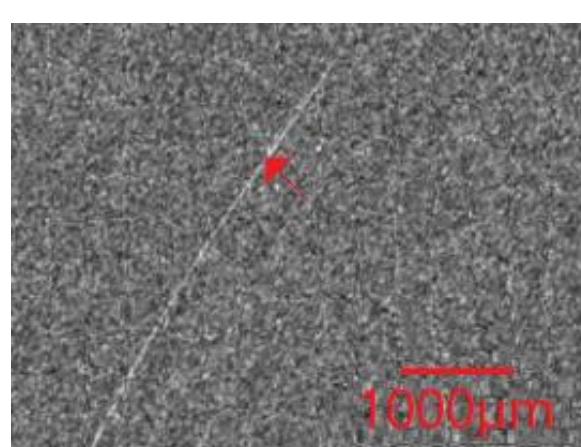


图 44 划痕（明场表面图像，ScN 通道，激光散射法）



图 45 水迹沾污（光学图像）

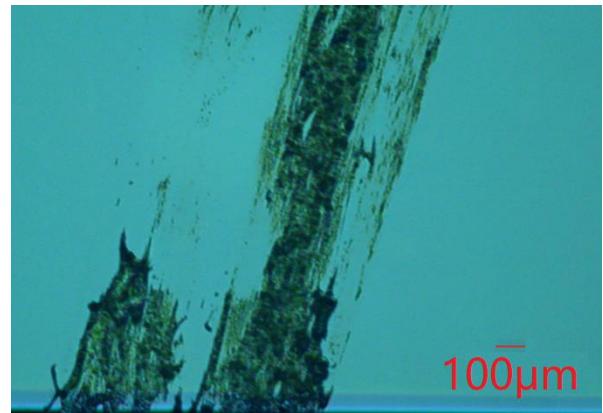


图 46 沾污（光学显微图像）

6.3 外延缺陷图谱

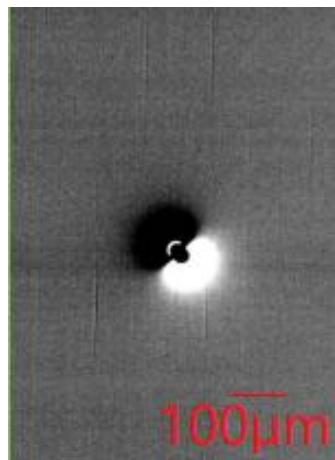


图 47a) 孤立出现的掉落颗粒物缺陷（明场表面
图像，微分干涉法）

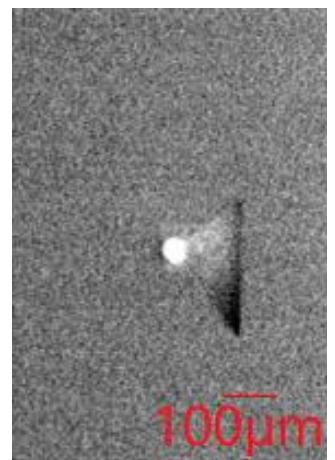


图 47b) 孤立出现的掉落颗粒物缺陷（PL 图像）

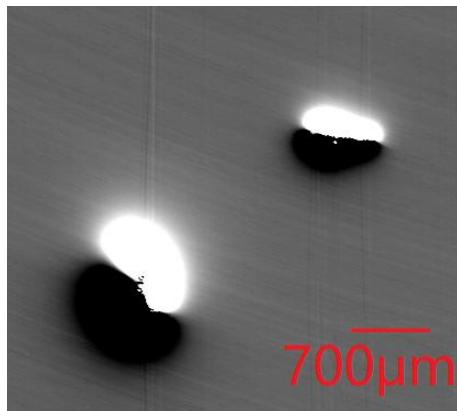


图 48a) 孤立出现的掉落颗粒物缺陷（激光散射
法 QZr0 通道）

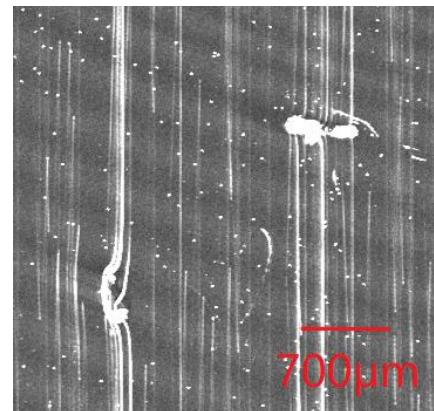


图 48b) 孤立出现的掉落颗粒物缺陷（激光散射法
ScN 通道）

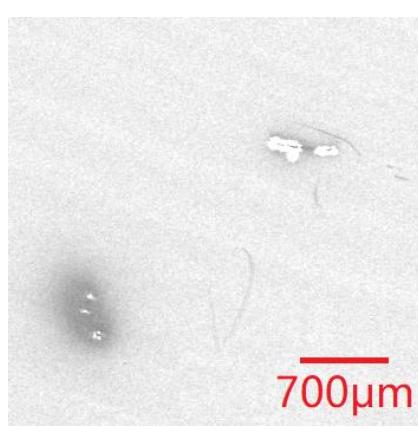


图 48c) 孤立出现的掉落颗粒物缺陷 (激光散射法 PL 通道)

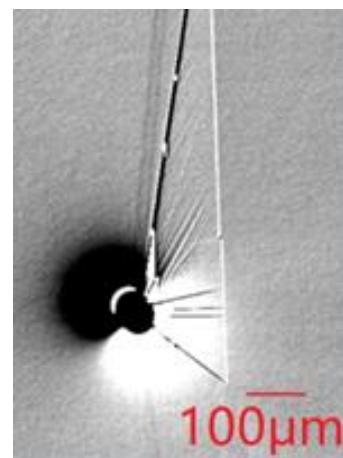


图 49a) 引起三角形形貌的掉落颗粒物缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

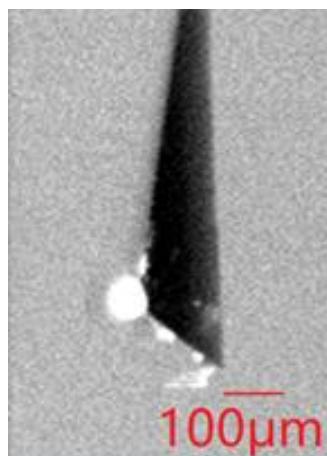


图 49b) 引起三角形形貌的掉落颗粒物缺陷 (PL 图像)

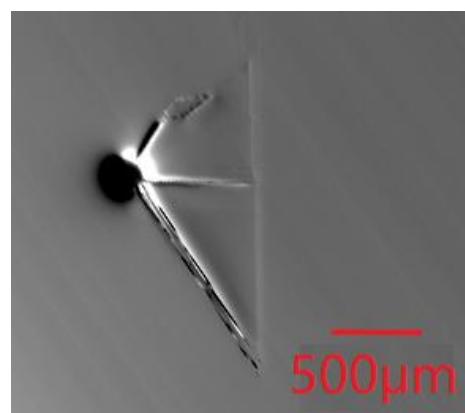


图 50a) 引起三角形形貌的掉落颗粒物缺陷 (激光散射法 QZrO 通道)

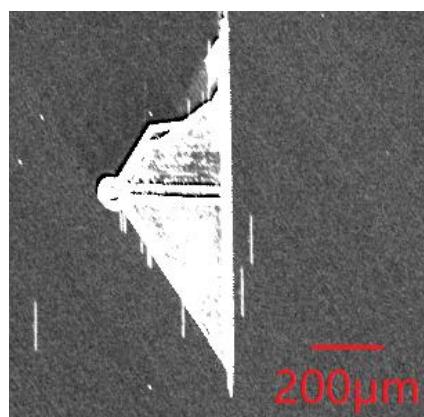


图 50b) 引起三角形形貌的掉落颗粒物缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

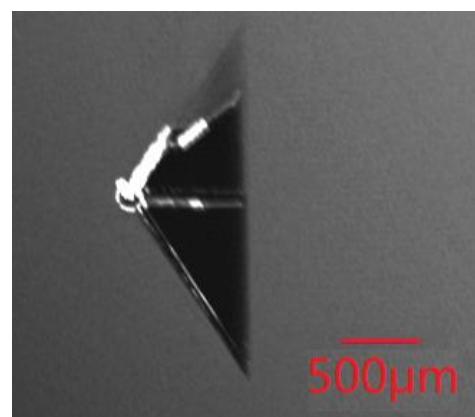


图 50c) 引起三角形形貌的掉落颗粒物缺陷 (PL 图像)

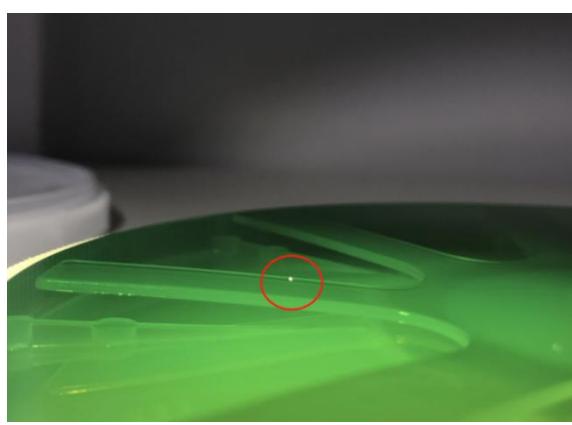


图 51) 掉落颗粒物缺陷 (强光手电筒光照, 肉眼观察)



图 52a) 掉落颗粒物缺陷引起的三角形缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

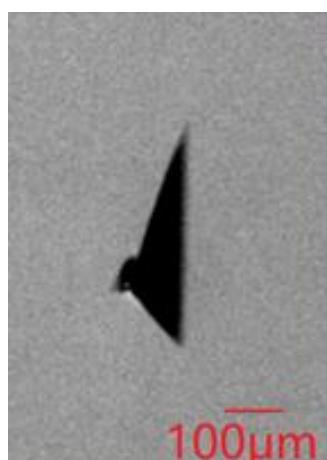


图 52b) 掉落颗粒物缺陷引起的三角形缺陷 (PL 图像)

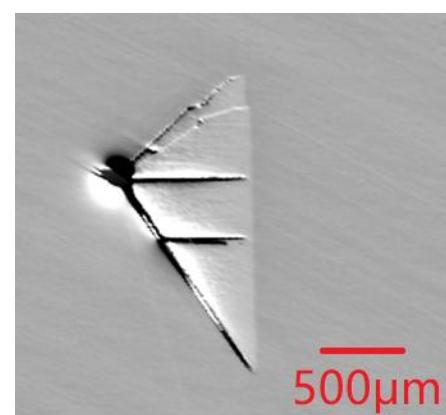


图 53a) 掉落颗粒物缺陷引起的三角形缺陷 (激光散射法 QZrO 通道)

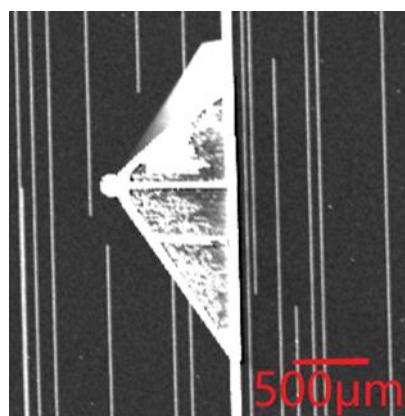


图 53b) 掉落颗粒物缺陷引起的三角形缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

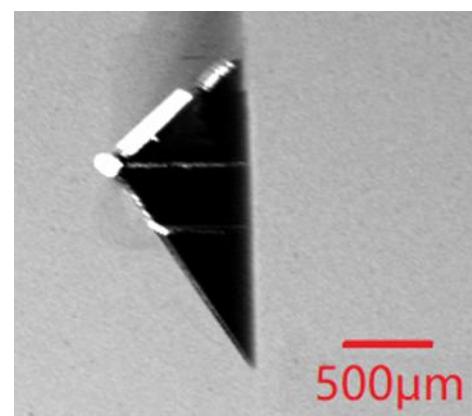


图 53c) 掉落颗粒物缺陷引起的三角形缺陷 (激光散射法 PL 通道)

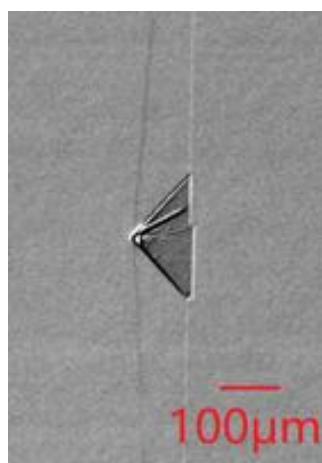


图 54a) 螺位错引起的三角形缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

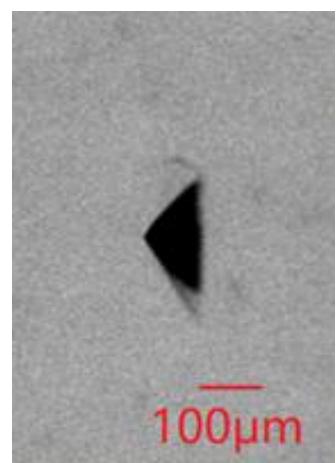


图 54b) 螺位错引起的三角形缺陷 (PL 图像)

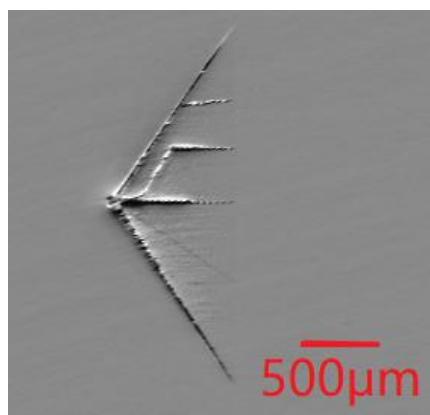


图 55a) 螺位错引起的三角形缺陷 (激光散射法 QZr0 通道)

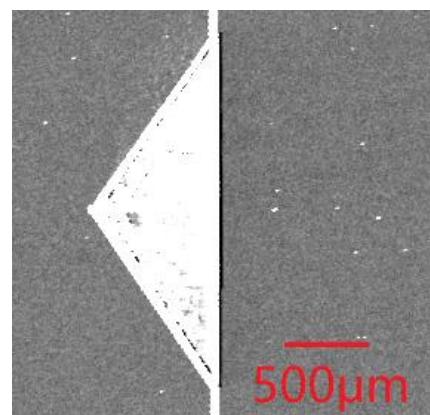


图 55b) 螺位错引起的三角形缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

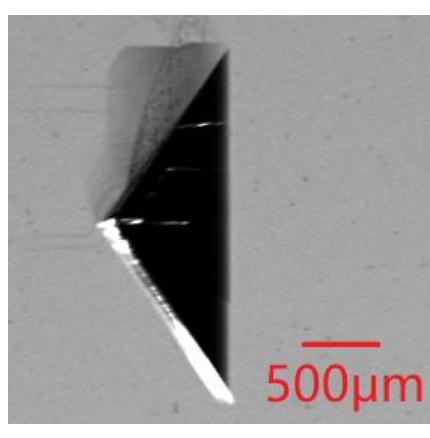


图 55c) 螺位错引起的三角形缺陷 (激光散射法 PL 通道)

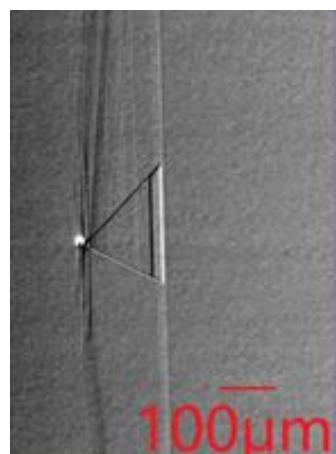


图 56a) 乳凸引起的三角形缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

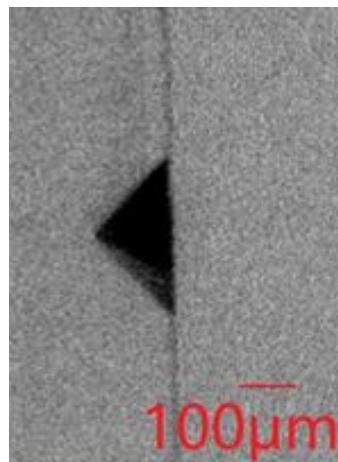


图 56b) 乳凸引起的三角形缺陷 (PL 图像)

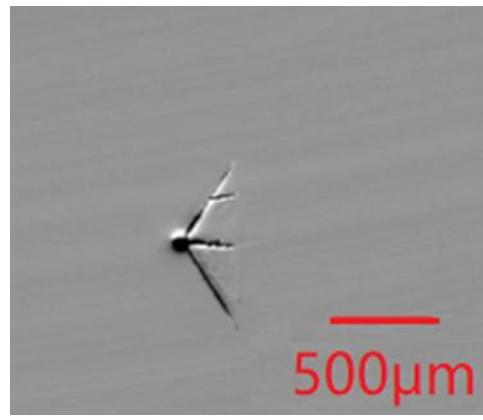


图 57a) 乳凸引起的三角形缺陷 (激光散射法 QZrO 通道)

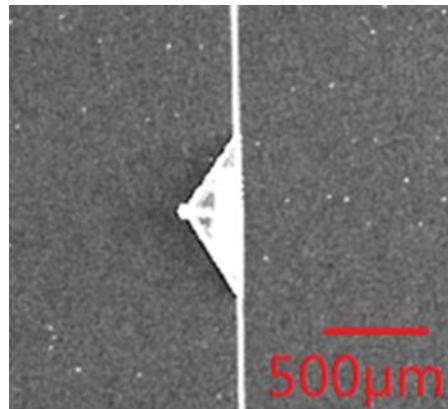


图 57b) 乳凸引起的三角形缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

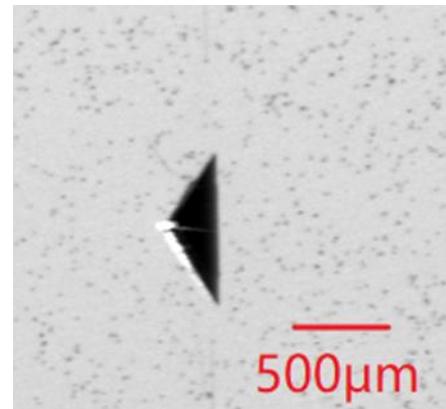


图 57c) 乳凸引起的三角形缺陷 (激光散射法 PL 通道)

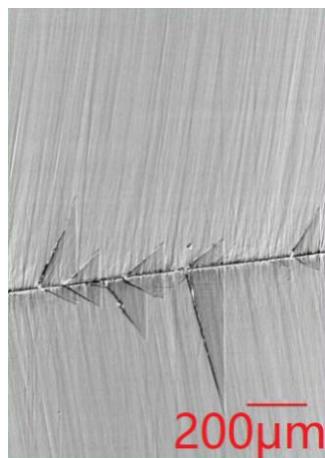


图 58a) 划痕引起的三角形缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

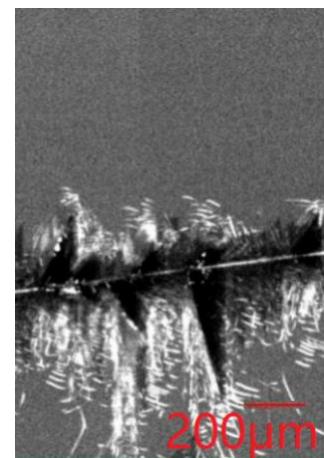


图 58b) 划痕引起的三角形缺陷 (PL 图像)

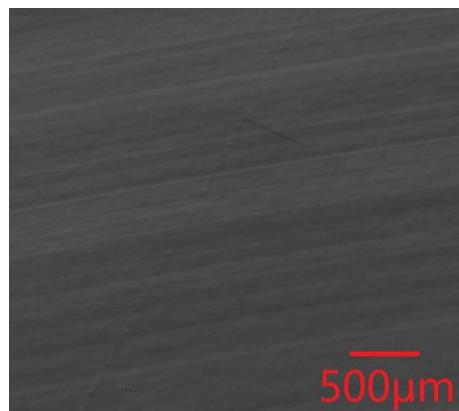


图 59a) 划痕引起的三角形缺陷 (激光散射法 QZrO 通道)

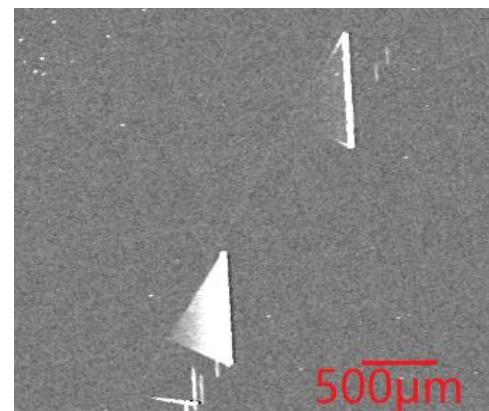


图 59b) 划痕引起的三角形缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

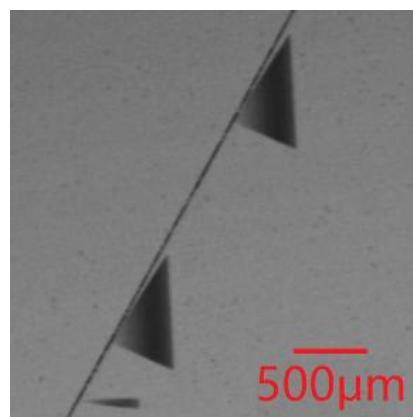


图 59c) 划痕引起的三角形缺陷 (激光散射法 PL 通道)



图 60a) 彗星缺陷 1 (明场表面图像, 微分干涉法)

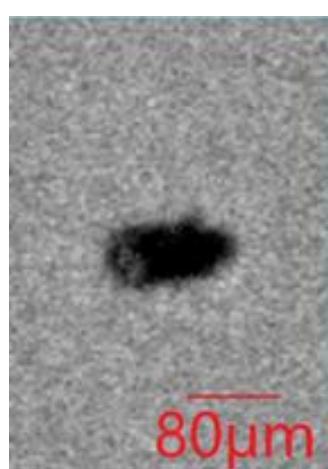


图 60b) 彗星缺陷 1 (PL 图像)

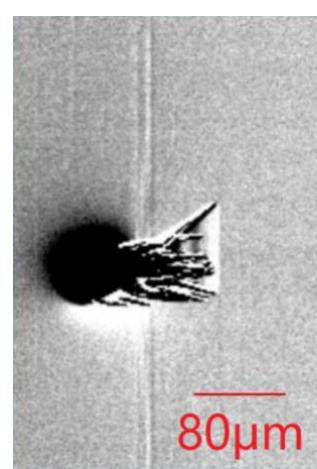


图 61a) 彗星缺陷 2 (明场表面图像, 微分干涉法)

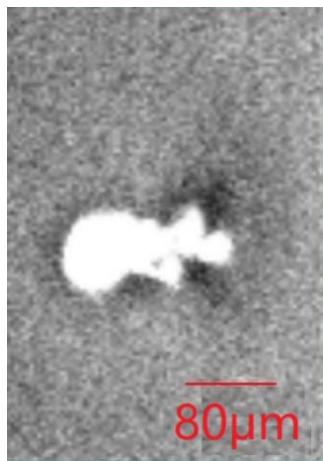


图 61b) 彗星缺陷 2 (PL 图像)

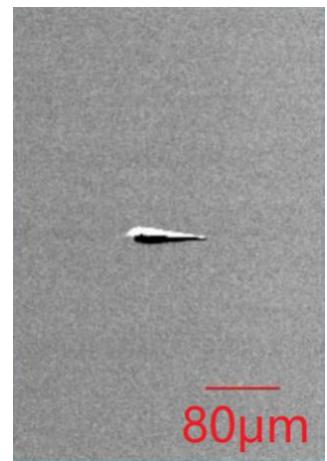


图 62a) 螺位错引起的胡萝卜缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

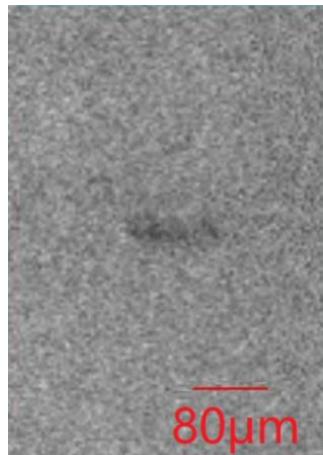


图 62b) 螺位错引起的胡萝卜缺陷 (PL 图像)

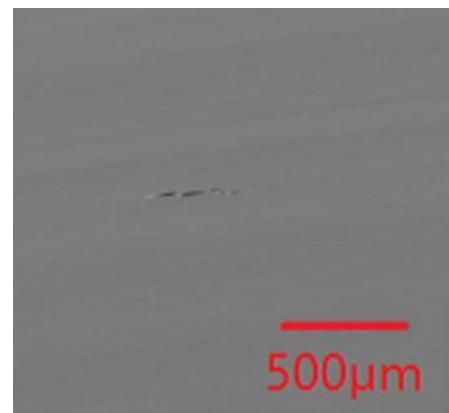


图 63a) 螺位错引起的胡萝卜缺陷 (激光散射法 QZr0 通道)

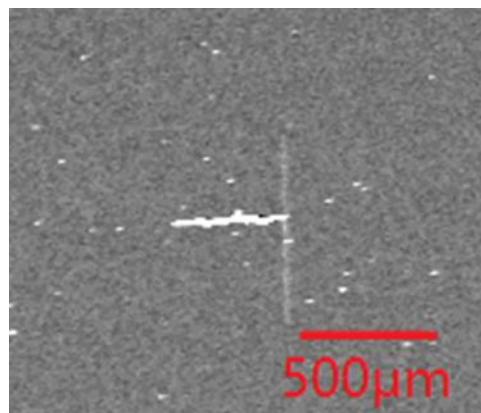


图 63b) 螺位错引起的胡萝卜缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

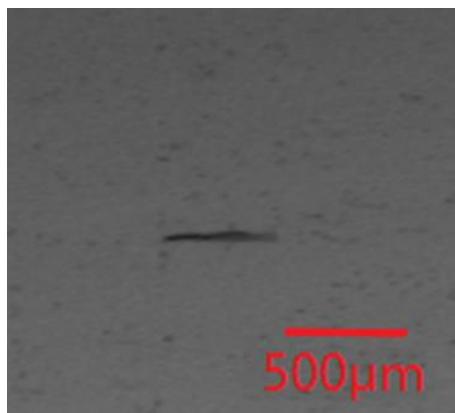


图 63c) 螺位错引起的胡萝卜缺陷 (激光散射法 PL 通道)

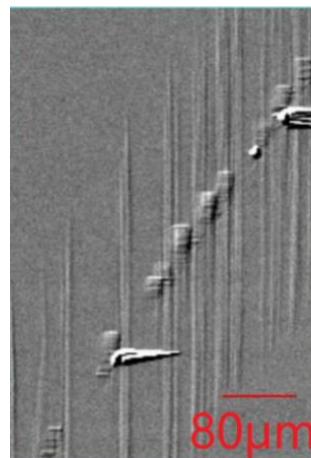


图 64a) 划痕引起的胡萝卜缺陷 (明场表面图像, 微分干涉法)

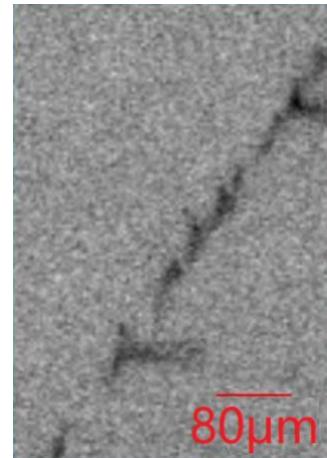


图 64b) 划痕引起的胡萝卜缺陷 (PL 图像)

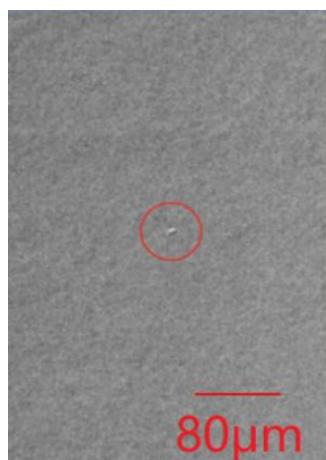


图 65a) 凹坑 1 (明场表面图像, 微分干涉法)

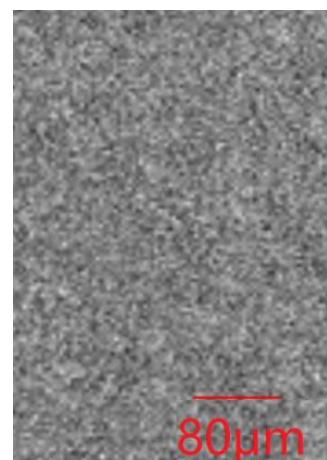


图 65b) 凹坑 1 (PL 图像)

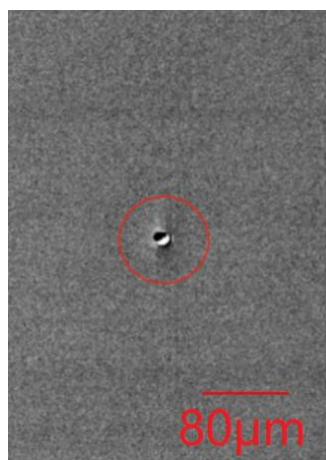


图 66a) 凹坑 2 (明场表面图像, 微分干涉法)

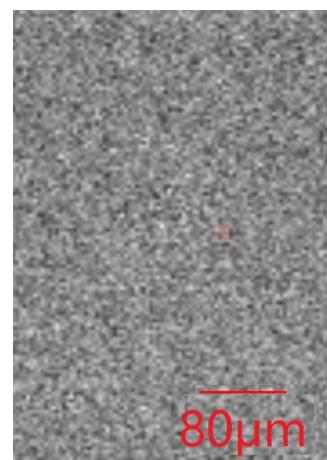


图 66b) 凹坑 2 (PL 图像)

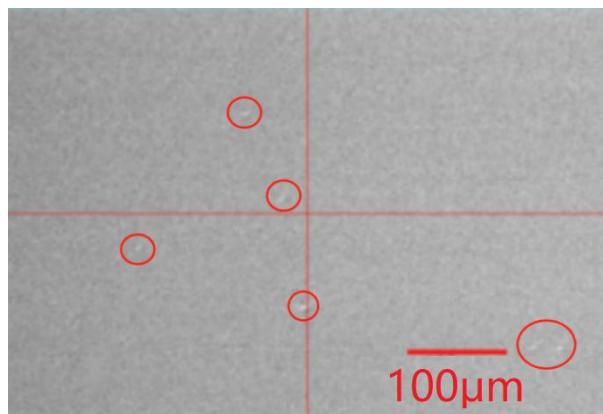


图 67a) 凹坑 3 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀前)

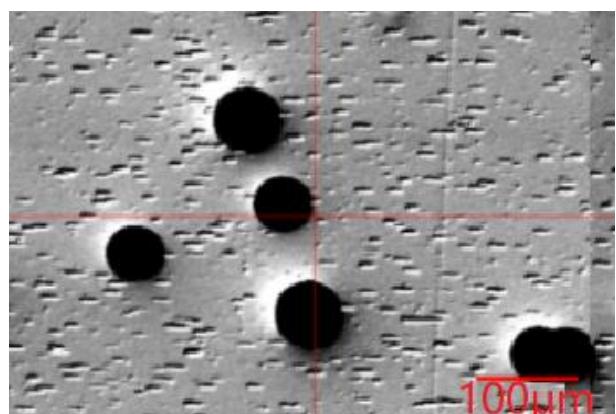


图 67b) 凹坑 3 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀后)

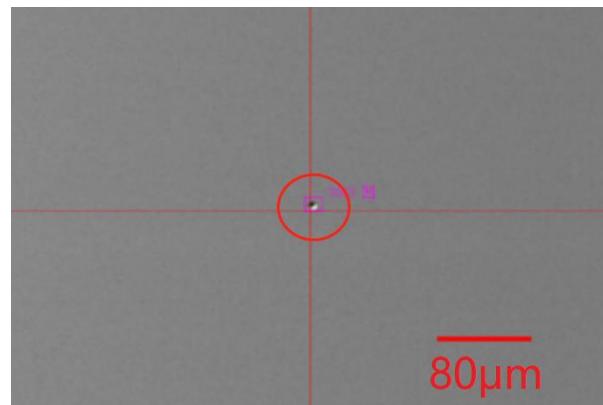


图 68a) 凹坑 4 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀前)

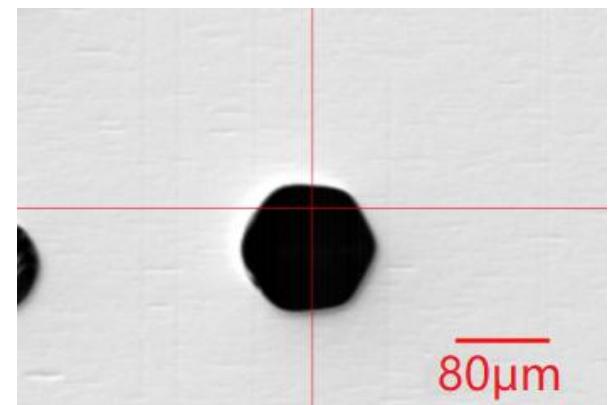


图 68b) 凹坑 4 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀后)

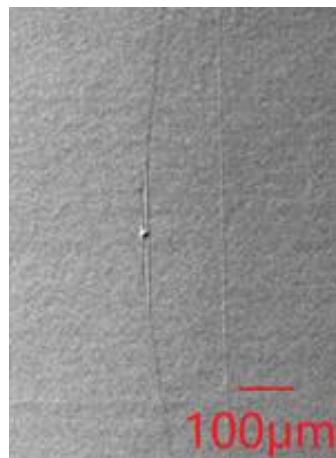


图 69a) 梯形缺陷 1 (明场表面图像, 微分干涉法)

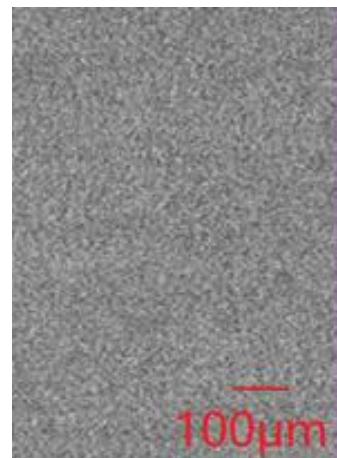


图 69b) 梯形缺陷 1 (PL 图像)

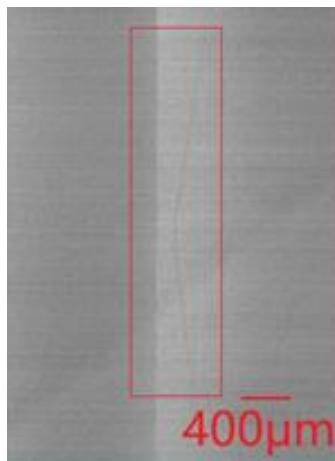


图 70a) 梯形缺陷 2 (明场表面图像, 微分干涉法)



图 70b) 梯形缺陷 2 (PL 图像)

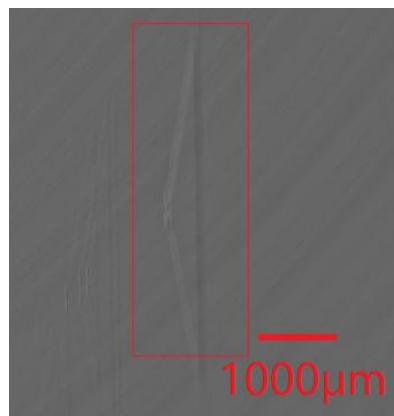


图 71a) 梯形缺陷 (激光散射法 QZr0 通道)

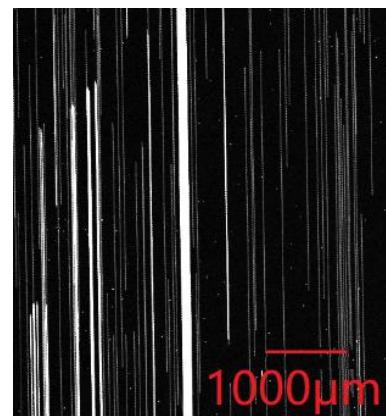


图 71b) 梯形缺陷 (激光散射法 SCN 通道)

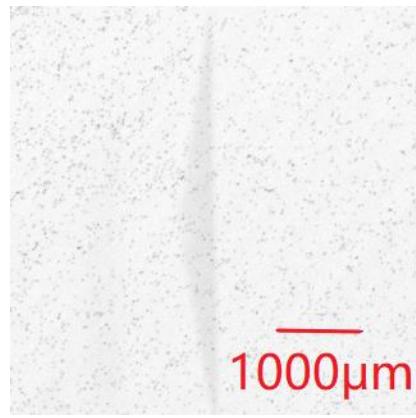


图 71c) 梯形缺陷 (激光散射法 PL 通道)

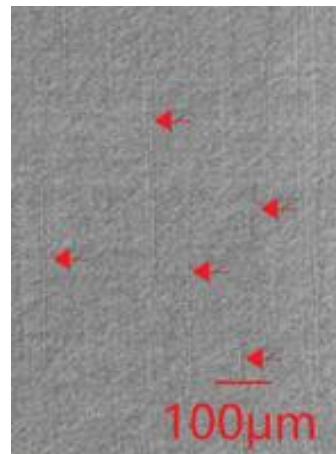


图 72a) 台阶聚集 (明场表面图像, 微分干涉法)

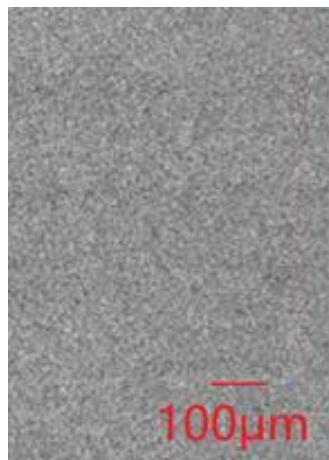


图 72b) 台阶聚集 (PL 图像)

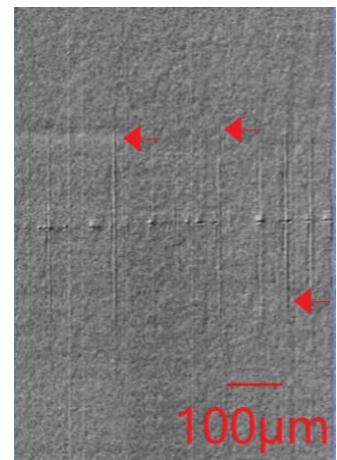


图 73a) 划痕引起的台阶聚集 (明场表面图像, 微分干涉法)

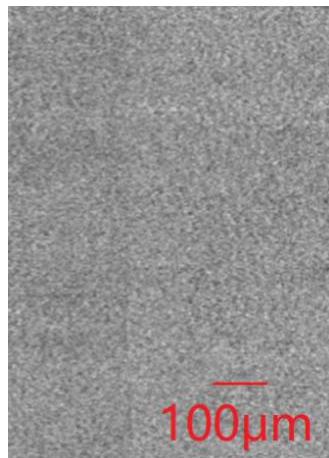


图 73b) 划痕引起的台阶聚集 (PL 图像)

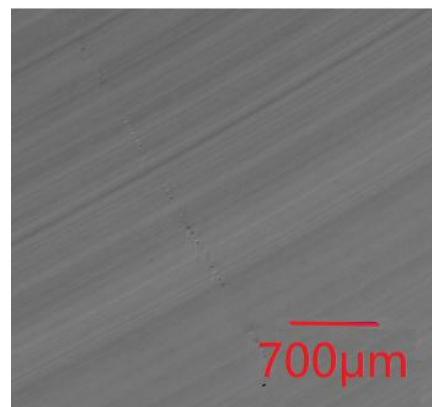


图 74a) 划痕引起的台阶聚集 (激光散射法 QZr0 通道)

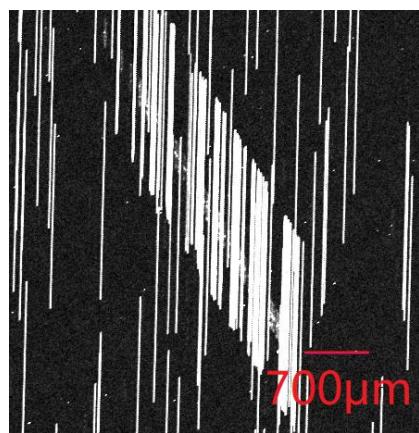


图 74b) 划痕引起的台阶聚集 (激光散射法 SCN 通道)

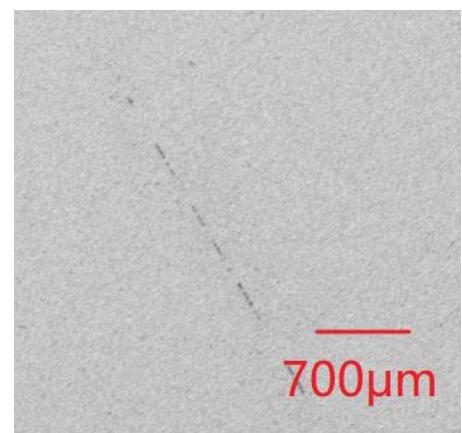


图 74c) 划痕引起的台阶聚集 (激光散射法 PL 通道)

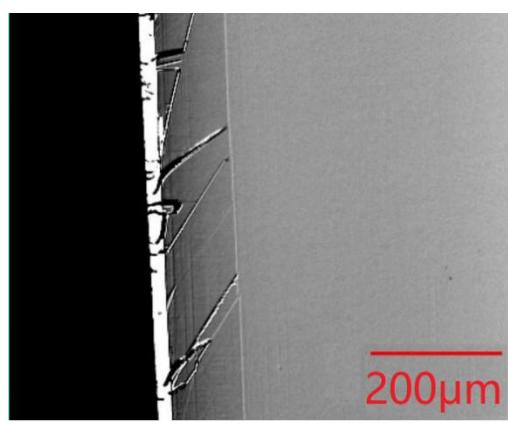


图 75 外延凸起 (明场表面图像, 微分干涉法)

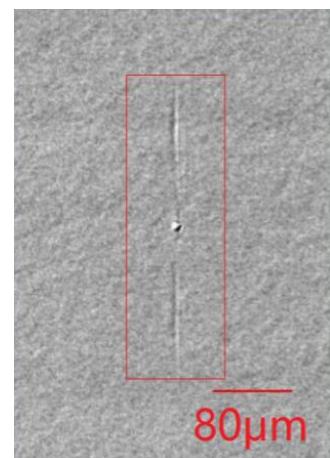


图 76a) 乳凸 1 (明场表面图像, 微分干涉法)

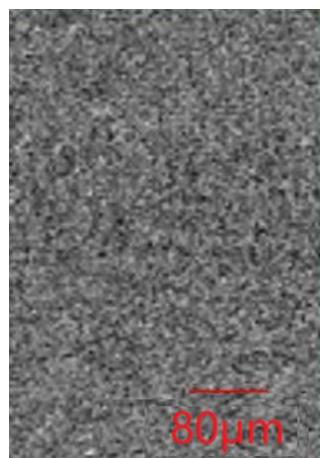


图 76b) 乳凸 1 (PL 图像)

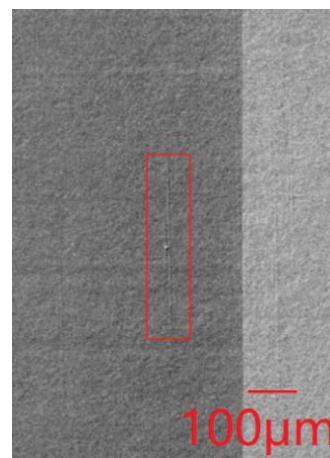


图 77a) 乳凸 2 (明场表面图像, 微分干涉法)

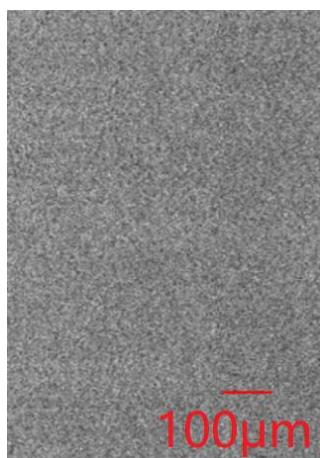


图 77b) 乳凸 2 (PL 图像)

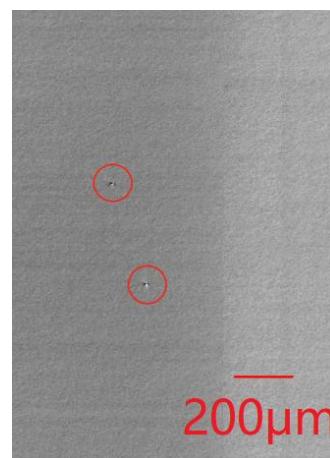


图 78a) 外延层微管 (明场表面图像, 微分干涉法)

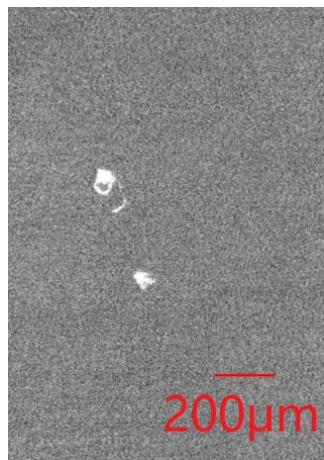


图 78b) 外延层微管 (PL 图像)

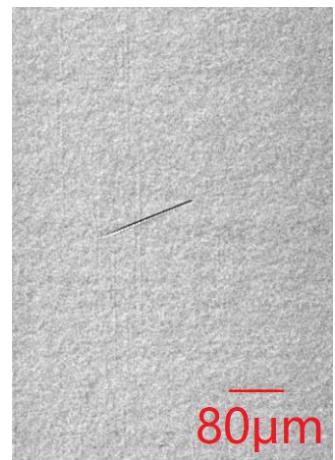


图 79a) 表面有一条边界的层错 (明场表面图像,
微分干涉法)

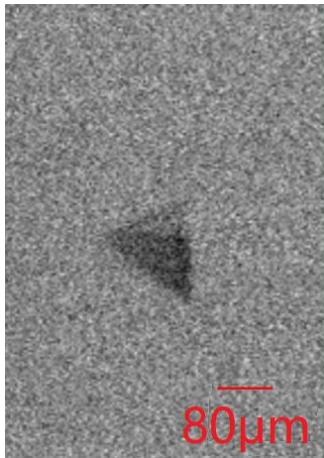


图 79b) 表面有一条边界的层错 (PL 图像)

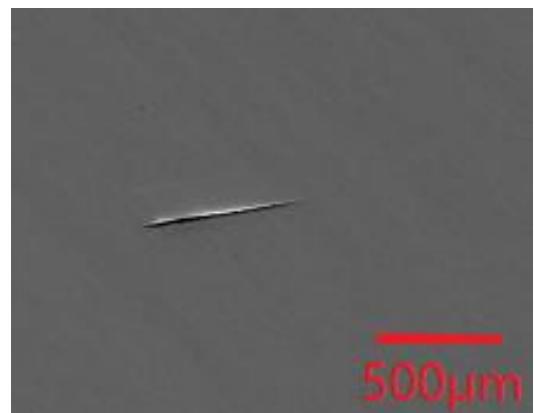


图 80a) 表面有一条边界的层错 (激光散射法 QZrO
通道)

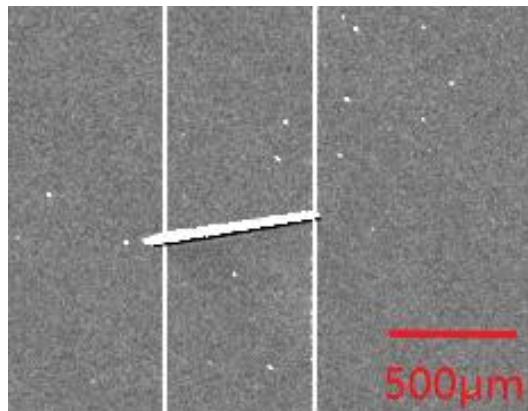


图 80b) 表面有一条边界的层错 (激光散射法
SCN 通道)

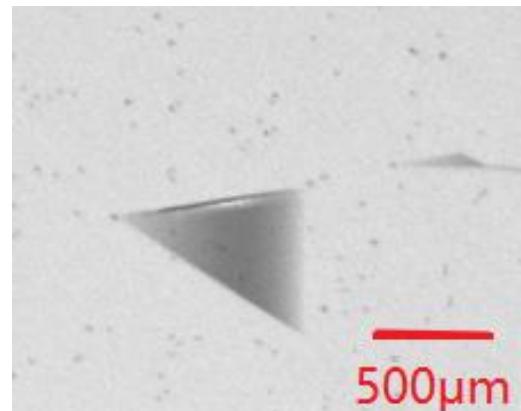


图 80c) 表面有一条边界的层错 (激光散射法 PL
通道)

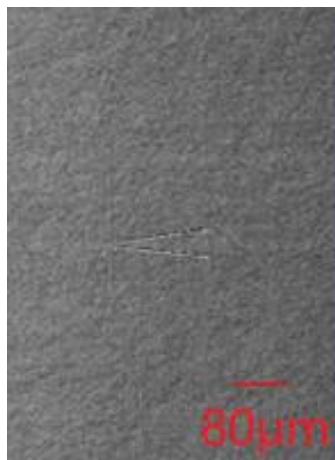


图 81a) 表面有两条边界的层错 (明场表面图像,
微分干涉法)

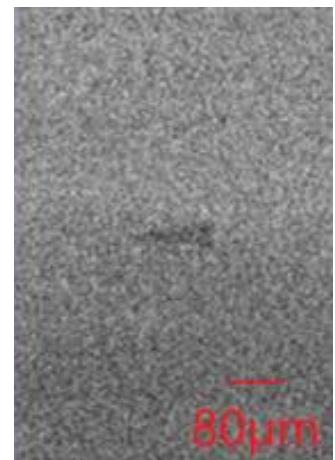


图 81b) 表面有两条边界的层错 (PL 图像)

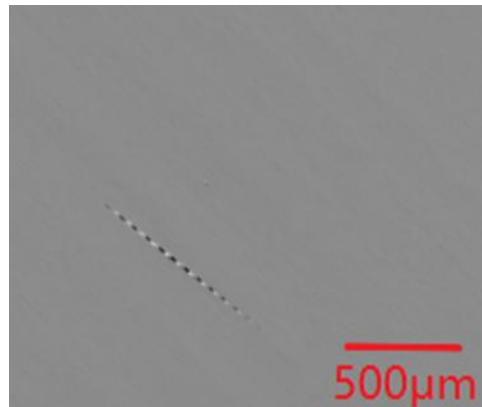


图 82a) 表面有两条边界的层错 (激光散射法
QZr0 通道)

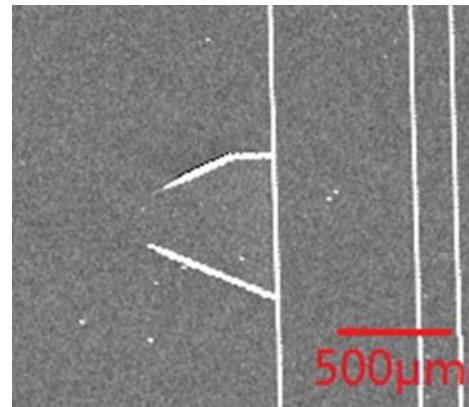


图 82b) 表面有两条边界的层错 (激光散射法 SCN
通道)

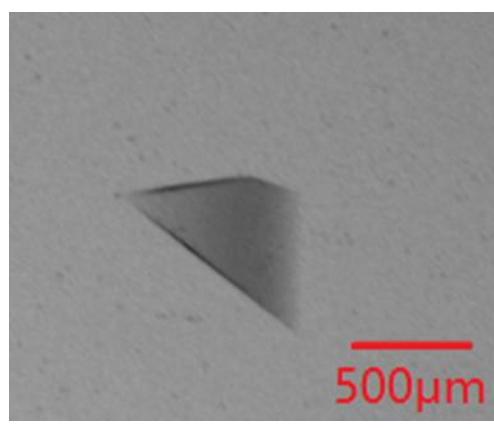


图 82c) 表面有两条边界的层错 (激光散射法 PL
通道)



图 83a) 表面无边界的层错 (明场表面图像, 微分
干涉法)

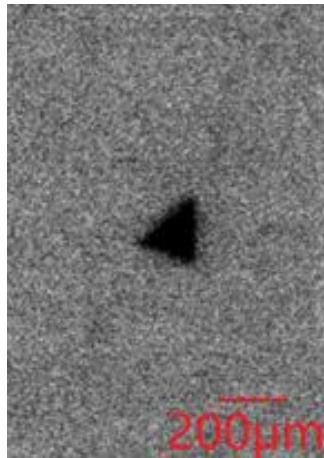


图 83b) 表面无边界的层错 (PL 图像)

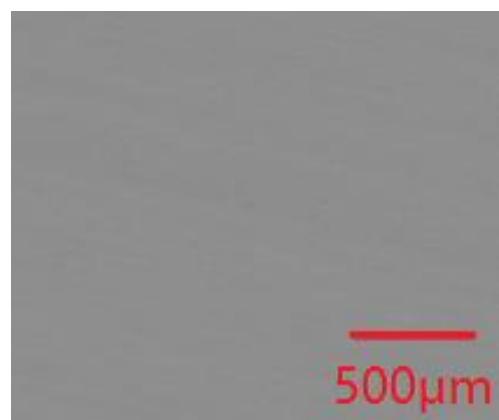


图 84a) 表面无边界的层错 (激光散射法 QZrO 通道)

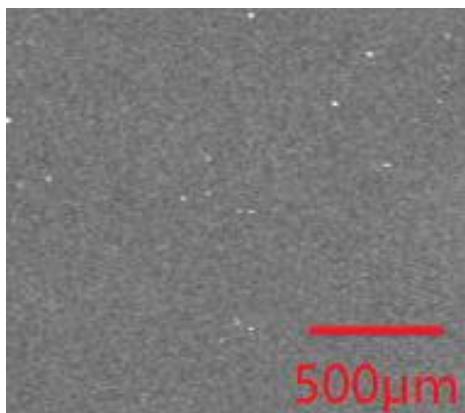


图 84b) 表面无边界的层错 (激光散射法 SCN 通道)

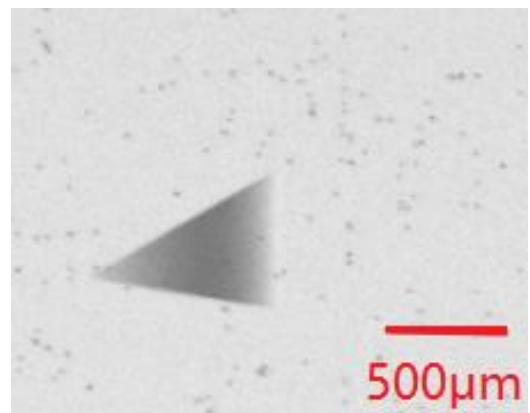


图 84c) 表面无形边界的层错 (激光散射法 PL 通道)

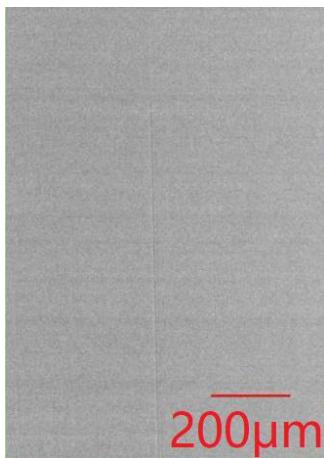


图 85a) PL 呈条状的层错 (明场表面图像, 微分干涉法)

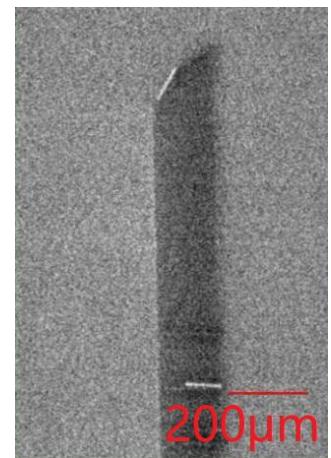


图 85b) PL 呈条状的层错 (PL 图像)

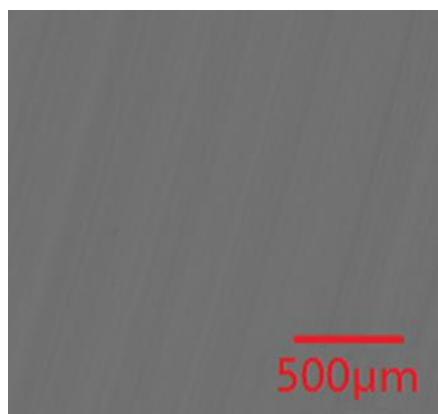


图 86a) PL 呈条状的层错 (激光散射法 QZrO 通道)

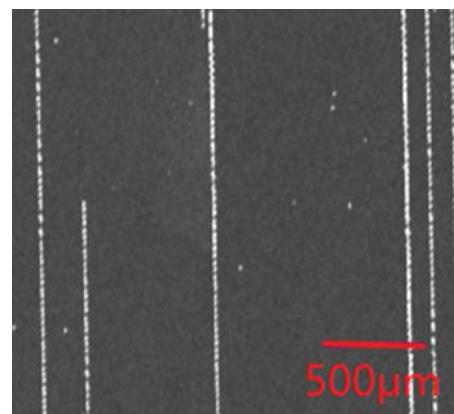


图 86b) PL 呈条状的层错 (激光散射法 SCN 通道)

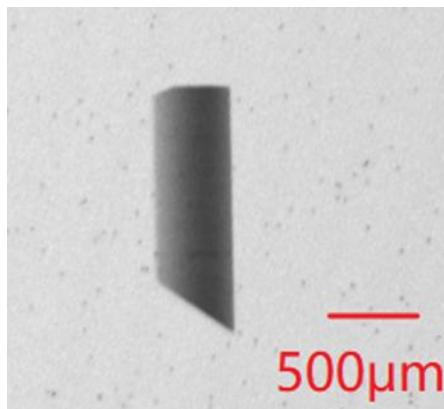


图 86c) PL 呈条状的层错 (激光散射法 PL 通道)

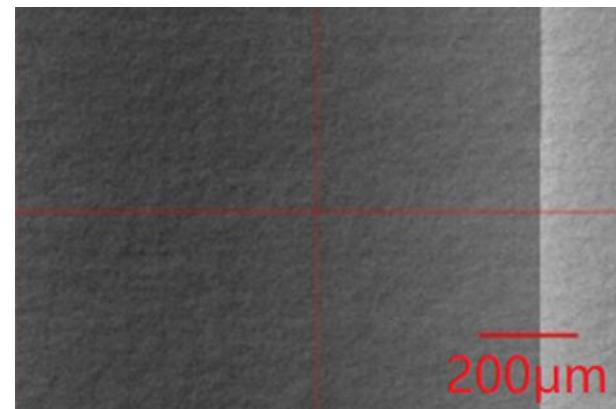


图 87a) 外延层螺位错和刃位错 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀前)

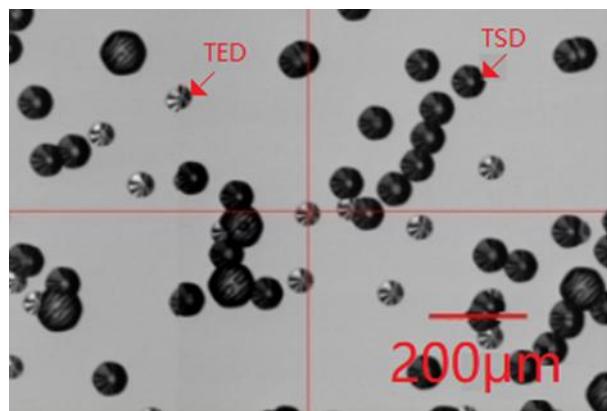


图 87b) 外延层螺位错和刃位错 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀后)

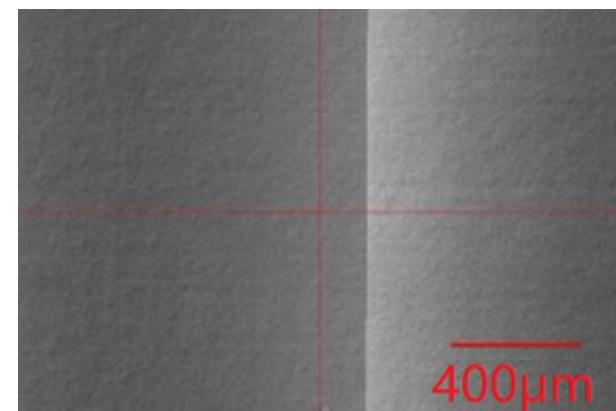


图 88a) 外延层基平面位错 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀前)

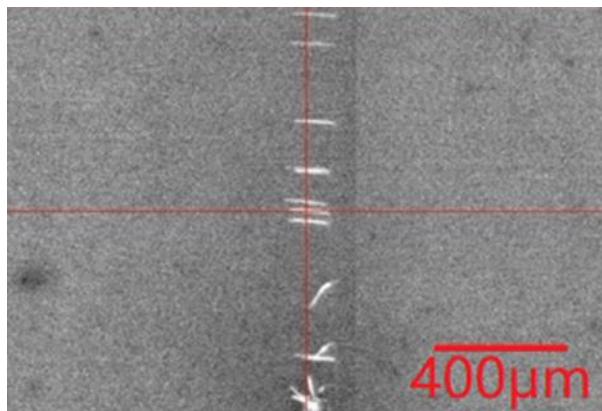


图 88b) 外延层基平面位错 (PL 图像, KOH 腐蚀前)

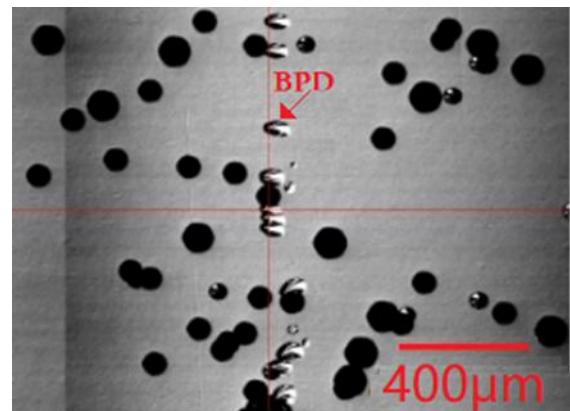


图 89a) 外延层基平面位错 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀后)

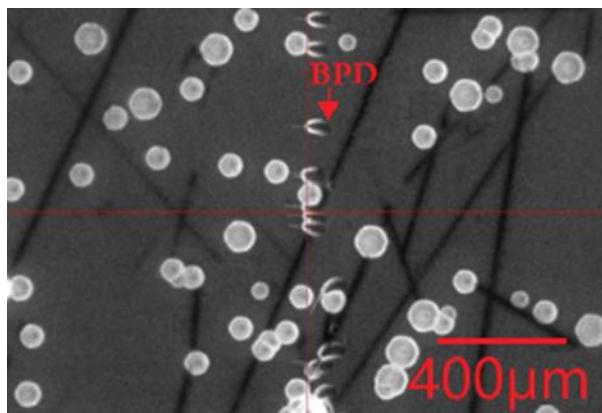


图 89b) 外延层基平面位错 (PL 图像, KOH 腐蚀后)

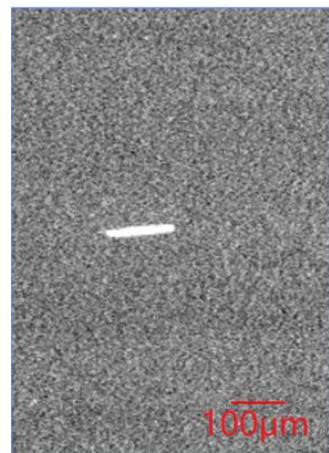


图 90 衬底贯穿到外延层基平面位错 (PL 图像)



图 91a) 三角形缺陷引起外延层基平面位错 (明场表面图像, 微分干涉法)

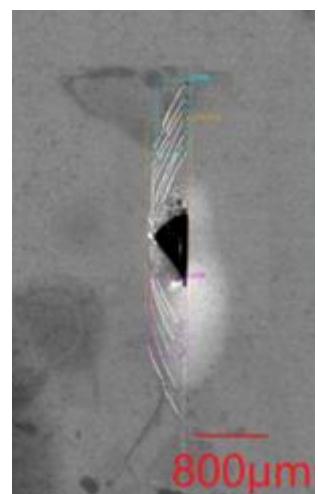


图 91b) 三角形缺陷引起外延层基平面位错 (PL 图像)

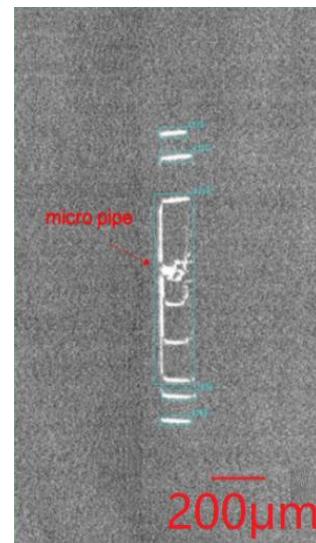
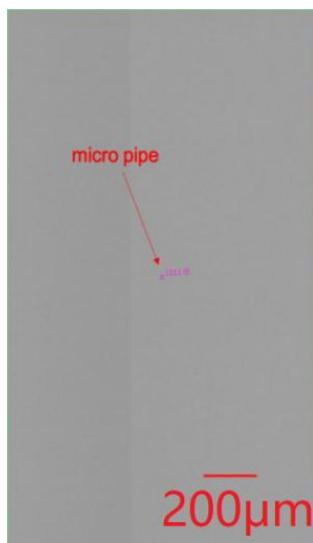


图 92a) 微管引起外延层基平面位错 (明场表面图
像, 微分干涉法)

图 92b) 微管引起外延层基平面位错 (PL 图像)



图 93a) 晶片边缘应力引起外延层基平面位错
(明场表面图像, 微分干涉法)

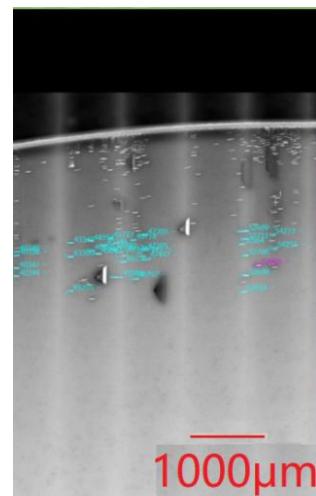


图 93b) 晶片边缘应力引起外延层基平面位错 (PL
图像)



图 94a) 热应力引起外延层基平面位错 (明场表面图像, 微分干涉法)
图 94b) 热应力引起外延层基平面位错 (PL 图像)

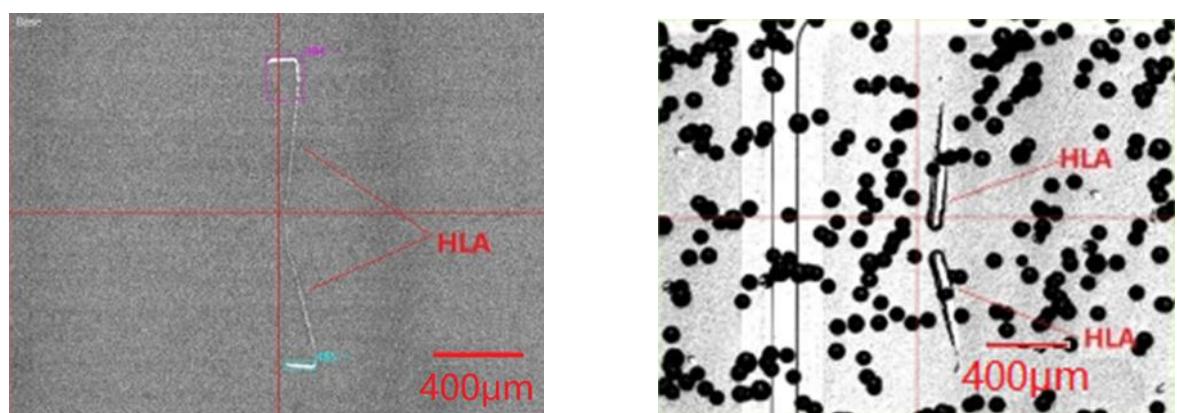


图 95 外延层半环列阵 (PL 图像)

图 96 外延层半环列阵 (明场表面图像, 微分干涉法, KOH 腐蚀后)

6.4 工艺缺陷图谱

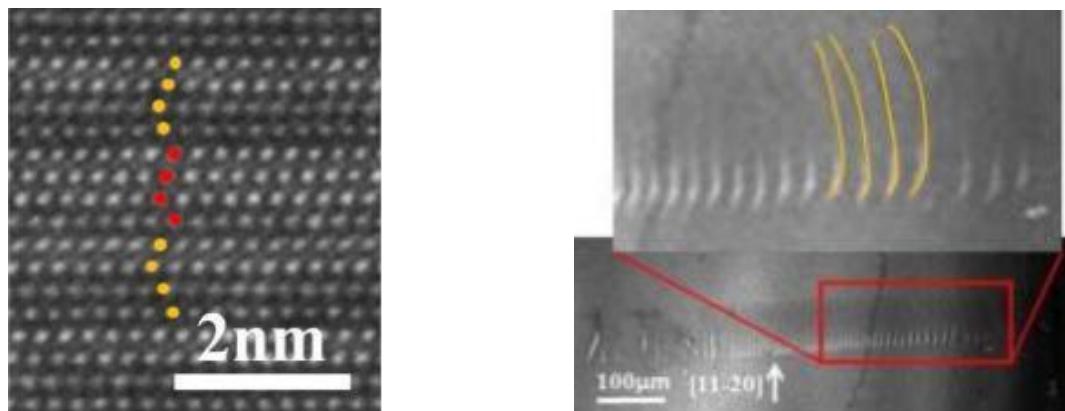


图 97 高温氧化诱导层错(高分辨 TEM 图, Zhdanov

图 98 高温氧化诱导层错 (PL 图)

标记为(1, 3), 1SSF 层错)

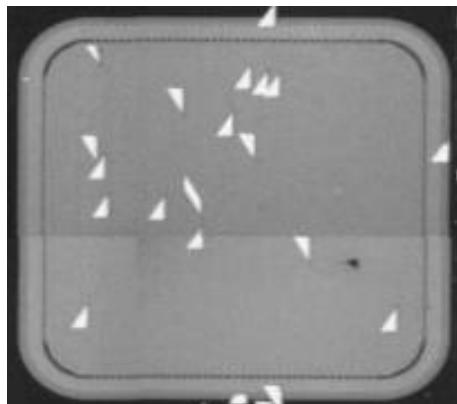


图 99 电流应力后 PIN 二极管中三角形层错 (PL 图像)

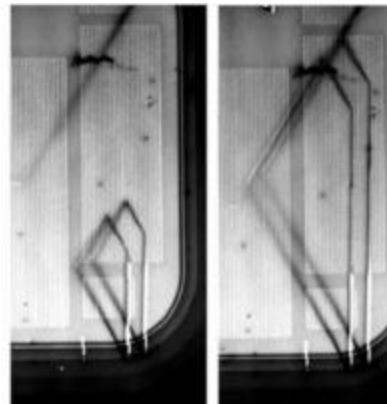


图 100 电流应力后 SiC 双极性器件三角形层错 (EL 图像)

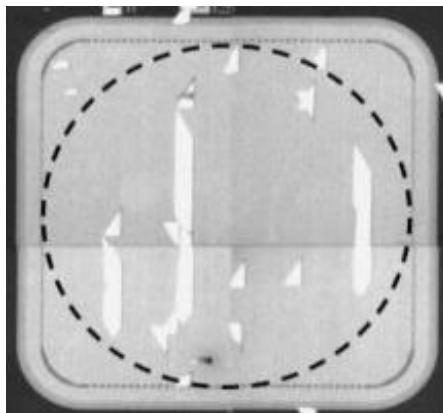


图 101 电流应力后 PIN 二极管中条形层错 (PL 图像)

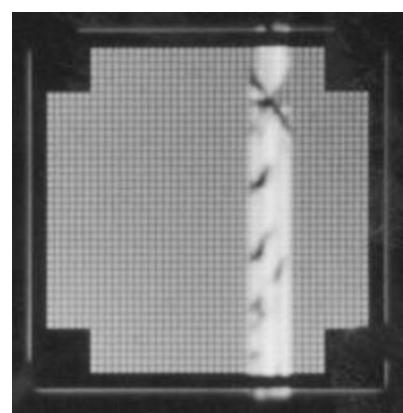


图 102 薄缓冲层 PIN 中条形层错 (EL 图像)

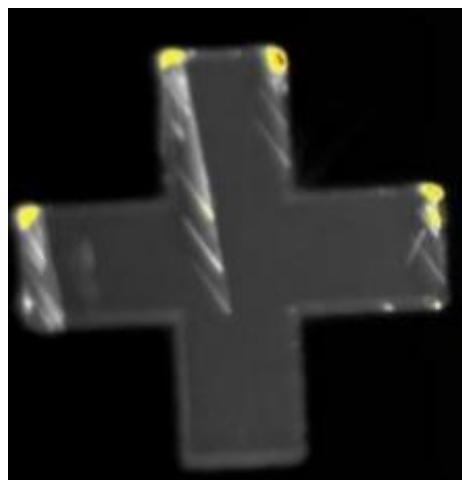


图 103a) 源于台面侧壁的缺陷传播 (p+nn+p 二极管, 10 min)

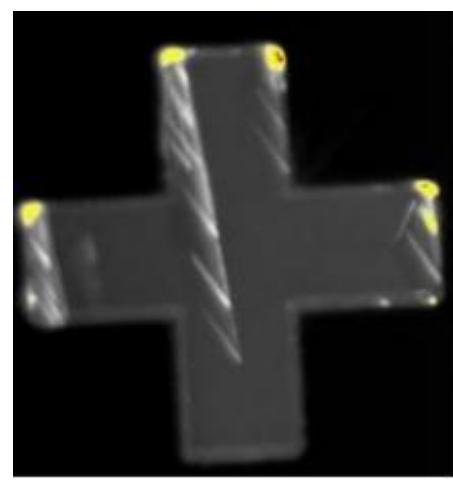


图 103b) 源于台面侧壁的缺陷传播 (p+nn+p 二极管, 20 min)

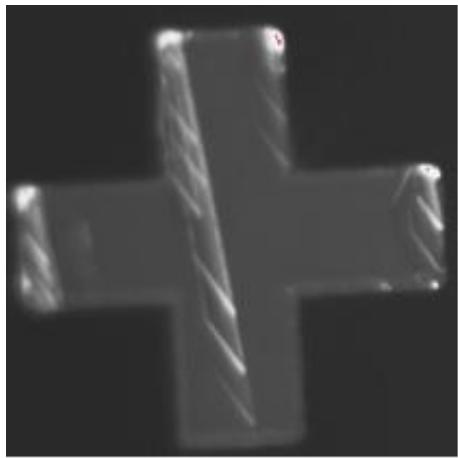


图 103c) 源于台面侧壁的缺陷传播 ($p+nn+p$ 二极管, 30 min)

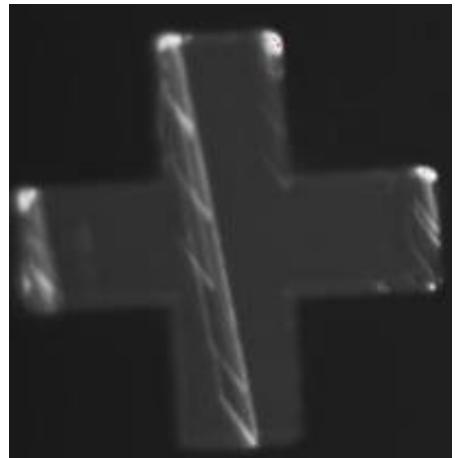


图 103d) 源于台面侧壁的缺陷传播 ($p+nn+p$ 二极管, 40 min)

参 考 文 献

- [1] T/CASA 004.2—2018 4H碳化硅衬底及外延层缺陷图谱
- [2] 夏经华. 碳化硅技术基本原理—生长、表征、器件和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 20

索引

A

凹坑.....5.1.5, 5.2.12, 5.3.5, 5.3.10, 图36图78, 图79, 图80, 图81, 图82, 图83

B

半环列阵.....4, 5.3.15, 图127, 图128

崩边.....5.2.13, 图37

边缘多晶.....5.1.3, 图3

C

层错....4, 5.2.6, 5.3.11, 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3, 5.4.4, 图19, 图20, 图21, 图22, 图98, 图100, 图101, 图102, 图103

穿透螺位错.....4, 5.2.7, 5.3.12

穿透刃位错.....4, 5.2.7, 5.2.8, 5.3.13

D

电应力诱导三角形层错.....5.4.2

电应力诱导条形层错.....5.4.3

掉落颗粒物缺陷.....5.3.1, 图46, 图47, 图48, 图49, 图50, 图51, 图52, 图53, 图54, 图55, 图56, 图57, 图58

多型.....5.1.4, 5.2.2, 图4, 图5, 图10, 图11, 图12

G

干法刻蚀缺陷.....5.4.4

硅滴包裹体.....5.2.3

H

胡萝卜缺陷.....5.3.4, 图73, 图74, 图75, 图76, 图77

划痕, 5.2.6, 5.2.16, 5.3.2, 5.3.4, 5.3.6, 5.3.7, 图40, 图41, 图42, 图43, 图67, 图68, 图69, 图70, 图77, 图90, 图91, 图92

彗星缺陷.....5.3.3, 图71, 图72

J

基平面位错....4, 5.2.9, 5.3.14, 图27, 图28, 图118, 图119, 图120, 图121, 图122, 图123, 图124, 图125, 图126, 图139

L

裂纹.....5.1.1, 5.2.15, 图1, 图39

六方空洞.....5.2.5, 图16, 图17, 图18

Q

缺口.....5.2.14, 图38

R

乳凸.....5.3.2, 5.3.9, 图63, 图64, 图65, 图66, 图95, 图96

S

三角形缺陷5.3.2, 5.3.8, 5.3.14, 5.3.15, 图55, 图56, 图57, 图58, 图59, 图60, 图61, 图62, 图63, 图64, 图65, 图66, 图67

T

台阶聚集.....5.3.7, 图89, 图90, 图91, 图92, 图93

碳包裹体.....5.1.5, 5.2.4, 5.2.11, 5.3.9, 图14, 图15

梯形缺陷.....5.3.6, 图84, 图85, 图86, 图87, 图88

W

外延凸起.....5.3.8, 图94

微管.....4, 5.1.5, 5.2.11, 5.3.10, 5.3.14, 5.3.15, 图6, 图7, 图31, 图32, 图33, 图34, 图35, 图97, 图124

X

| | |
|-----------|------------------|
| 小角晶界..... | 5.2.10, 图29, 图30 |
| | Y |
| 氧化缺陷..... | 5.4.1 |
| | Z |
| 杂晶..... | 5.1.2, 图2 |
| 沾污..... | 5.2.17, 图44, 图45 |