



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

(预审稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 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 碳化硅晶体材料缺陷 2

 4.1 晶锭缺陷 2

 4.2 衬底缺陷 4

 4.3 外延缺陷 9

 4.4 工艺缺陷 14

5 缺陷图谱 16

 5.1 晶锭缺陷 16

 5.2 衬底缺陷 17

 5.3 外延缺陷 23

 5.4 工艺缺陷 37

6 缩略语 39

参考文献 40

索引 错误！未定义书签。

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：东莞市天域半导体科技有限公司等。

本文件主要起草人：刘薇等。

碳化硅晶体材料缺陷图谱

1 范围

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

本文件适用于涉及碳化硅单晶晶锭、碳化硅衬底片、碳化硅外延片、碳化硅器件研发、生产制备及性能检测、分析的从业者。

2 规范性引用文件

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

GB/T 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、晶锭内部应力和杂质而产生的晶体缺陷。

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表面形貌缺陷。

3.4

结晶缺陷 crystalline defect

4H-SiC晶体中的点、线、面及体缺陷，包括：4H-SiC衬底中的点、线、面及体缺陷，以及4H-SiC外延层中的点、线、面（晶界、层错）缺陷。

3.5

扩展缺陷 extended defect

从衬底贯穿到外延层，或随外延层厚度增大而延伸的结晶缺陷和表面形貌缺陷。

3.6

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。

3.7

不全位错 partial dislocation

PD

伯格(Surgers)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，而后者的Burgers矢量方向则垂直于层错面，因此，前者可滑移，而后者不可动。

3.8

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、三角形缺陷、胡萝卜缺陷、小坑缺陷、梯形缺陷、台阶聚集、外延凸起和乳凸等。

3.9

电应力诱导缺陷 electrical stress induced defect

双极型4H-SiC器件（如PiN二极管等），在正向导通状态下因电子空穴对复合导致漂移层中的基平面位错(BPD)扩展成为Shockley型层错。

4 碳化硅晶体材料缺陷

4.1 晶锭缺陷

4.1.1 裂纹 crack

a) 形貌特征

生长的碳化硅(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所示。

b) 产生原因

晶体生长或者退火过程中,引入晶体内部的热应力过大或者晶体内部缺陷过高,超过晶体耐受阈值,都会造成晶体开裂。

4.1.2 杂晶 misoriented grain

a) 形貌特征

在SiC晶体内部形成的多晶嵌入式生长,这种镶嵌在SiC晶体内部的多晶颗粒,被称为杂晶,如图2所示。

b) 产生原因

在生长过程中,由于包裹物或者生长条件剧烈波动,而带来的多晶成核长大。从而形成了与晶体取向存在较大偏差的多晶颗粒。

4.1.3 边缘多晶 surrounding polycrystal

a) 形貌特征

SiC晶体周围附着多晶,称为边缘多晶。边缘多晶与内部单晶之间存在明显的衬度交界线,如图3所示。

b) 产生原因

在SiC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;或是由于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。

4.1.4 多型 polytype

a) 形貌特征

在4H-SiC晶体中,形成了6H、15R或3C等异晶型,被称为多型。一般可通过多型分界线或者颜色不同来区分,其中,6H、15R晶型的颜色与4H晶型存在差异的层状分布(6H为翠绿色,15R呈暗黄色),如图4~图5所示。

b) 产生原因

在4H-SiC晶体生长过程中,偏离了4H-SiC生长的生长窗口,而形成了有利于6H、15R或3C多型生长的条件,或是由于晶体生长表面的污染物而形成的异晶型成核生长而形成。

4.1.5 微管 micropipe (MP)

a) 形貌特征

4H-SiC晶体中的微管缺陷(MP)是一种直径为微米级的物理孔洞,即一种Burgers矢量数倍于TSD位错Burgers矢量 $1c\langle 0001 \rangle$ 的穿透型螺位错,其终端延伸至结晶面前沿的,可以从单晶自然面观察到小凹坑,如图6所示。微管聚集区域其对比度相较于无微管区域较明显,如图7所示。

b) 产生原因

微管通常起始于籽晶或接近籽晶的位置。微管的形成有四种主要原因,一是硅滴,二是碳包裹体,三是晶型包裹体,四是籽晶背面升华。

4.2 衬底缺陷

4.2.1 多晶 polycrystal

a) 形貌特征

在碳化硅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8~图9所示。

b) 产生原因

在生长过程中,温度场分布不合理或者生长条件剧烈波动,而带来的多晶成核长大,形成多晶。

4.2.2 多型 polytype

a) 形貌特征

在4H-SiC晶体中,形成了6H、15R或3C等异晶型,被称为多型。一般可通过多型分界线或者颜色不同来区分,如图10~图12所示。

b) 产生原因

在4H-SiC晶体生长过程中,偏离了4H-SiC生长的生长窗口,而形成了有利于6H、15R或3C多型生长的条件。或是由于晶体生长表面的污染物而形成的异晶型成核生长而形成。

4.2.3 硅滴包裹体 silicon drop inclusion

a) 形貌特征

在SiC晶体内部形成的液滴形貌的硅组份夹杂,被称为硅滴包裹体,如图13所示。

b) 产生原因

在SiC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SiC单晶包裹所形成。

4.2.4 碳包裹体 carbon inclusion

a) 形貌特征

碳包裹体是在4H-SiC晶体中，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，在光学显微镜下观察到的碳包裹体如图14～图16所示。

b) 产生原因

在碳化硅晶体生长过程中，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，碳颗粒在由多晶原料输运至生长界面的生长组分流的作用下运动至生长界面，进而被后续生长的单晶所包裹。

4.2.5 六方空洞 hexagonal void

a) 形貌特征

在碳化硅晶体内部多呈现为六边形状的空腔结构，被称为六方空洞。强光下会呈现片状的亮晶态，如图17～图18所示。

b) 产生原因

在碳化硅晶体生长过程中，由于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的六方空洞。

4.2.6 层错 stacking fault (SF)

a) 形貌特征

层错(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中层错面通常为{0001}晶面，类型有两种，分别是Shockley型和Frank型。

Shockley型层错可以看作晶面的滑移，大多数Shockley型层错在光致发光(PL)图像中呈三角形状，如图19所示。Frank型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20所示。层错以及对应PD的类型也可以用X-射线拓扑形貌来进行区分。Frank型层错对应的PD的Burgers矢量是 $c/4$ ， $c/2$ 或 $3c/4$ ，其形貌如图21所示。对于Shockley型层错，其对应的PD的Burgers矢量为 $1/3\langle 1-100 \rangle$ ，其形貌如图22所示。

b) 产生原因

Frank型层错起因于螺位错(TSD)的结构转变，Shockley型层错主要是由于机械应力、温度不均匀分布引起的热应力导致晶格失配、晶面错排形成层错，和制备籽晶过程中遗留在其表面上的残余划痕导致形成层错。

4.2.7 螺位错 threading screw dislocation (TSD)

a) 形貌特征

TSD的Burgers矢量为 $1c$ ，它在熔融KOH腐蚀后的呈现六角形的蚀坑，该六角形蚀坑是一个倒六面锥体，锥顶即是蚀坑底部，六角形蚀坑的尖底并不在六角形蚀坑的中央，而是偏向 $\langle 11-20 \rangle$ 方向，如图23所示。在4H-SiC衬底的同步辐射X-射线形貌图谱中，TSD呈现为大尺寸的圆形亮点（相对于刃位错），如图24所示。

b) 产生原因

衬底TSD的产生原因有两个：一是因为TSD为穿透型位错，晶锭生长所使用籽晶中的螺位错会遗传至所生长的单晶衬底中；二是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TSD的形成、滑移和增殖。

4.2.8 刃位错 threading edge dislocation (TED)

a) 形貌特征

在熔融KOH腐蚀后，刃位错 (TED) 的蚀坑呈现近圆形，如图25所示，因为TED的Burgers矢量为 $1/3\langle 11-20 \rangle$ ，远小于TSD的Burgers矢量，大约是 $1c$ 矢量的 $1/3$ ，所以TED的蚀坑尺寸也小于TSD。同样地，在4H-SiC衬底的同步辐射X-射线形貌图谱中，TED呈现为小尺寸的圆形亮点（相对于TSD），如图26所示。

b) 产生原因

衬底TED的形成机制与TSD相似，来源有两个：一是TED同样为穿透型位错，晶锭生长所使用籽晶中的TED会遗传至所生长的单晶衬底中；二是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。

4.2.9 基平面位错 basal plane dislocation (BPD)

a) 形貌特征

基平面位错 (BPD) 是4H-SiC晶体中位于基晶面内的一种常见的一维结晶缺陷。BPD的Burgers矢量为 $1/3\langle 11-20 \rangle$ ，与TED相同，远小于TSD的Burgers矢量，大约是 $1c$ 矢量的 $1/3$ 。BPD的熔融KOH蚀坑呈贝壳形状，如图27所示。在同步辐射X-射线形貌图像中，BPD呈线状，如图28所示。

b) 产生原因

4H-SiC衬底BPD的产生原因主要有三个：一是由于晶体生长中存在热应力，二是籽晶中的位错向晶体中的贯穿。三是生长过程中工艺的不稳定以及引进杂质。

4.2.10 小角晶界 low angle grain boundary

a) 形貌特征

小角晶界是由高密度TED和BPD位错构成的高应变区域，在KOH化学腐蚀后呈现出腐蚀坑直线排列的位错组态，如图29所示。在同步辐射X射线透射拓扑图像下呈现沿着 $\langle 1-100 \rangle$ 方向的线条状，如图30～图31所示。

b) 产生原因

小角晶界有两个产生原因，一是籽晶中的小角晶界传播穿透至晶体表面，二是晶体生长中出现强烈干扰、工艺异常或工艺过度修正等。

4.2.11 微管 micropipe (MP)

a) 形貌特征

4H-SiC晶体中的微管缺陷(MP)是一种直径为微米级的物理孔洞，即一种Burgers矢量数倍于TSD的Burgers矢量 $1c\langle 0001 \rangle$ 的穿透型螺位错，如图32所示。

在应力双折射图像中，单个微管具有蝴蝶状图案，即微管看起来像有四个明亮翅膀的蝴蝶，如图33所示。微管聚集区域通常集中在晶片边缘区域，其对比度相较于无微管区域较明显，如图34～图36所示。

b) 产生原因

微管通常起始于籽晶或接近籽晶的位置。微管的形成有三种主要原因，一是硅滴，二是碳包裹体，三是籽晶背面升华。

4.2.12 凹坑 pit

a) 形貌特征

凹坑是SiC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37所示。

b) 产生原因

抛光阶段高锰酸钾腐蚀会产生凹坑，抛光贴蜡时的颗粒也会造成衬底表面产生凹坑。

4.2.13 崩边 Chip

a) 形貌特征

崩边是不贯穿碳SiC衬底正、背表面的局部边缘破损，它是衬底表面或边缘非有意地造成脱落材料的区域，如图38所示。

b) 产生原因

切割过程中切割线摆动、研磨或抛光时 SiC 衬底片承受压力不均匀以及操作不当等原因都可能造成崩边。

4.2.14 缺口 indents

a) 形貌特征

缺口是贯穿SiC衬底正、背表面的局部边缘破损，如图39所示。

b) 产生原因

切割过程中切割线摆动、研磨或抛光时碳化硅衬底片承受压力不均匀以及操作不当等原因都可能造成缺口。

4.2.15 裂纹 Crack

a) 形貌特征

裂纹是延伸到晶片表面的解理或断裂，是不贯穿整个表面的裂痕，裂纹容易沿晶体解理面产生，如图40所示。

b) 产生原因

在研磨或抛光时SiC衬底片承受压力不均匀以及操作不当等原因是造成裂纹的主要原因。

4.2.16 划痕 scratch

a) 形貌特征

划痕是4H-SiC衬底表面上出现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43所示。

b) 产生原因

研磨机磨盘质量不佳，磨料中混有粒径较大的磨砂，抛光液中混有硬质颗粒，抛光工艺环境不符合洁净度要求等都会造成划痕产生。

4.2.17 沾污 stain

a) 形貌特征

沾污的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，区域沾污可以是吸盘印、尘埃、指纹印记等，如图44～图45所示。

b) 产生原因

抛光后清洁处理不彻底而在抛光衬底表面残存如水迹、溶剂等有机物以及外界引入的各种沾污。

4.3 外延缺陷

4.3.1 掉落颗粒物 downfall defect

a) 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 46～图 49 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 50～图 53 所示；两者在 PL 图像上一般可以观察到明显的三角形图案。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 54 所示。

b) 产生原因

外延生长前或生长过程中，从反应生长室内壁上掉落在衬底或外延层表面上的不定形碳、SiC 小颗粒物或其它尘埃颗粒物。

4.3.2 三角形缺陷 triangular defect

a) 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，三角形沿 $\langle 11-20 \rangle$ 方向的高度满足 $L = d/\sin(\theta)$ ，其中 d 为外延层厚度， θ 为衬底偏角 (4H-SiC 衬底常用的 $\theta = 4^\circ$)。图 55～图 58、图 59～图 62、图 63～图 66、图 67～图 70，分别反映了由掉落颗粒物、TSD、乳凸和划痕引起三角形缺陷的典型特征。

b) 产生原因

外延生长过程中，由于掉落颗粒物、乳凸等外来物，或表面划痕、TSD 等衬底缺陷影响了原子台阶流动而产生。

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。

4.3.3 彗星缺陷 comet

a) 形貌特征

在外延层表面呈现出彗星状的外形，通常它有独立的“脑袋”和“尾巴”，如图 71～图 72 所示，彗星缺陷平行于 $[11-20]$ 方向，长度随着外延层厚度的增大，基本满足 $L = d/\sin(\theta)$ ，其中 d 为外延层厚度， θ 为衬底偏角 (4H-SiC 衬底常用的 $\theta = 4^\circ$)。

b) 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。

4.3.4 胡萝卜缺陷 carrot

a) 形貌特征

胡萝卜缺陷起始于外延层/衬底界面处,在外延层表面形貌图像上呈胡萝卜状图案,在PL图像上呈线型图案,沿[11-20]方向延伸,长度随着外延层厚度的增大,基本满足关系式 $L = d/\sin(\theta)$,其中 d 为4H-SiC外延层厚度, θ 为衬底的偏角($\theta = 4^\circ$)。由TSD引起的胡萝卜缺陷,其典型特征如图73~图76所示;由划痕引起的胡萝卜缺陷,其典型特征如图77所示。

注:胡萝卜缺陷由三个缺陷组成,即基层面层错、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形貌。

b) 产生原因

起因于衬底中的TSD和衬底表面上的划痕。

4.3.5 小坑缺陷 pit

a) 形貌特征

在外延层表面上,外形为小凹陷或小坑状的形貌缺陷,在PL图像上观察不到图案,如图78~图79所示。通过KOH腐蚀外延层前、后的对比可发现,小坑缺陷密度和分布与衬底TSD密度和分布接近,如图80~图83所示。

b) 产生原因

由于衬底TSD贯穿到外延层所导致。

4.3.6 梯形缺陷 trapezoid defect

a) 形貌特征

由平行于[1-100]方向且长度不等的两条底边构成的梯形状形貌缺陷,短底边处于[11-20]方向的上游,长底边处于[11-20]方向的下游,两底边的间距随外延层厚度增加而增大,可用 $d/\tan(\theta)$ 表示,其

中 d 为外延层厚度， θ 为衬底偏角(4H-SiC衬底常用的 $\theta = 4^\circ$)，在PL图像上观察不到图案，如图84～图88所示。

b) 产生原因

起始于BPD、TED和TSD等位错及划痕周围的位错环，在 H_2 刻蚀过程中产生底边，而后在外延生长过程中由于团簇效应使底边间距变大形成梯形缺陷。

4.3.7 台阶聚集 step bunching

a) 形貌特征

台阶聚集是4H-SiC外延层表面上平行于 $[1-100]$ 方向的多个原子台阶汇聚在一起而形成的平行线簇，如图89～图93所示。台阶聚集是外延层表面出现的一种形貌特征，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。

b) 产生原因

台阶聚集的形成有两个原因，一是起因于衬底结晶缺陷、衬底划痕等阻碍原子流动形成台阶，并在 H_2 刻蚀过程使原子台阶变明显。二是由于SiC有较高的晶体表面能量，在高温（如1600℃左右）工艺过程中表面原子大量迁移而形成。

4.3.8 外延凸起 epi-crown

a) 形貌特征

由于外延晶片边缘高度凸起造成的形貌缺陷，如图94所示。

b) 产生原因

外延晶片上游端边缘区域因无原子台阶补充而出现外延层表面高度与晶片边缘的高度差，或晶片边缘应力引起的三角形缺陷团簇造成的高度差。

4.3.9 乳凸 bump

a) 形貌特征

乳凸是外形为凸点或凸起状，但表面观察不到明显异物的形貌缺陷，一般会伴随一条沿 $[1-100]$ 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95～图96所示。

b) 产生原因

小尺寸微小颗粒、3C碳化硅颗粒、碳包裹体在外延生长前阶段掉落在晶片表面，外延后形成凸起形状。

4.3.10 微管 micropipe (MP)

a) 形貌特征

在表面形貌图像中呈凹坑状，且在 PL 图像中呈数倍于表面凹坑直径的螺旋纹图案，如图 97 所示。

b) 产生原因

由衬底微管贯穿到外延层所致。

4.3.11 层错 stacking fault (SF)

a) 形貌特征

外延层的 SF 根据形貌特征可以分为三类：第一类是层错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 98～图 105 所示；第二类是表面光学图像观察不到相应的形貌和特征，但在 PL 图像中呈现三角形图案，如图 106～图 109 所示；第三类是在 PL 图像中呈现条状图案，如图 110～图 113 所示。

b) 产生原因

第一类和第二类层错是4H-SiC外延层的原生型层错，化学气相沉积(CVD)生长室清洁度、衬底表面状态、外延工艺稳定性、衬底位错滑移等任何微小扰动都有可能引起堆垛序列的错误而形成。第三类是衬底Frank型层错向外延层的贯穿形成。

4.3.12 螺位错 threading screw dislocation (TSD)

a) 形貌特征

外延层的TSD在没有引起其他形貌缺陷的情况下，表面光学图像和PL图像观察不到其相应的形貌和特征，如图114～图115所示，但在熔融KOH腐蚀后得到较大尺寸（相对于TED）的六角形或椭圆形蚀坑，如图116～图117所示。

注1：TSD经常在外延层表面引起小坑缺陷，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，由六角形向圆形转变。

b) 产生原因

主要来自于衬底TSD向外延层的贯穿，其密度与衬底TSD密度接近。

4.3.13 刃位错 threading edge dislocation (TED)

a) 形貌特征

外延层的TSD在没有引起其他形貌缺陷的情况下，表面光学图像和PL图像观察不到其相应的形貌和特征，如图114～图115所示，但在熔融KOH腐蚀后得到较小尺寸（相对于TSD）的六角形或椭圆形蚀坑，如图116～图117所示。

b) 产生原因

外延层TED的产生原因主要有两个，一是衬底TED贯穿到外延层，二是非平行于[11-20]方向的衬底BPD在外延生长初期镜像力的作用下向TED的转化。

4.3.14 基平面位错 basal plane dislocation (BPD)

a) 形貌特征

外延层的BPD在表面光学图像观察不到形貌特征，但在PL图像中呈现平行于[11-20]方向的线型图案，如图118～图119所示。在熔融KOH腐蚀后，BPD会形成贝壳形状的蚀坑如图120～图121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，且长度基本满足满足关系式 $L = d / \sin(\theta)$ ，其中 d 为4H-SiC外延层厚度， θ 为衬底偏角（4H-SiC衬底常用的 $\theta = 4^\circ$ ），如图122所示；由三角形缺陷和微管等大尺寸形貌缺陷引起的BPD，会以形貌缺陷为中心，沿着<1-100>方向呈对称分布和多对出现，如图123～图124所示；由晶片边缘应力引起的BPD，分布特点是沿着<1-100>分布、数量巨大和分布密集，如图125所示；由热应力引起的BPD，一般是沿着<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126所示。

b) 产生原因

BPD的产生原因包括以下四种：平行于[11-20]方向的衬底BPD向外延层贯穿；三角形缺陷和微管等大尺寸形貌缺陷造成周边晶格应变，需要通过形成BPD来使应力释放；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。

4.3.15 半环列阵 half loop array (HLA)

a) 形貌特征

半环列阵 (HLA) 是PL图像观察到出现在两对BPD之间的点状或短线沿[1-100]方向列阵组成的半环型缺陷，如图127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碎片阵列，如图128所示。

b) 产生原因

微管、三角形缺陷和热应力引起的外延过程中BPD滑移，都有可能产生HLA。

4.4 工艺缺陷

4.4.1 氧化缺陷 oxidation induced defect

a) 形貌缺陷

高温氧化过程会诱导形成深能级中心或ISSF型层错缺陷，如图129所示，该层错的不全位错边界会向[1-100]或[-1100]方向发生形变，如图130所示。

b) 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，造成界面处应力，造成4H-SiC内的位错迁移、扩张、增殖，形成层错。

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

a) 形貌特征

电应力诱导的三角形层错，属于单Shockley型层错，其PL图像和电致发光(EL)图像分别如图131和图132所示。

b) 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。

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

a) 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133和图134所示。

b) 产生原因

外延层/衬底界面转化为TED的BPD是电应力诱导条形层错产生的主要原因，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[1-100]方向继续扩展，最终长度可达器件有源区宽度。

4.4.4 干法刻蚀缺陷 dry etching induced defect

a) 形貌特征

蚀刻工艺在4H-SiC外延层表面和侧壁产生不可逆的结晶缺陷或扩展缺陷，如图135～图139所示。

b) 产生原因

CF₄基反应离子刻蚀(RIE)和电感耦合等离子体蚀刻(ICP)等制造台面二极管和沟槽MOSFET的基本蚀刻工艺，在4H-SiC外延层表面和侧壁产生点缺陷或位错环，点缺陷或位错环会产生位错对，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。

5 缺陷图谱

5.1 晶锭缺陷

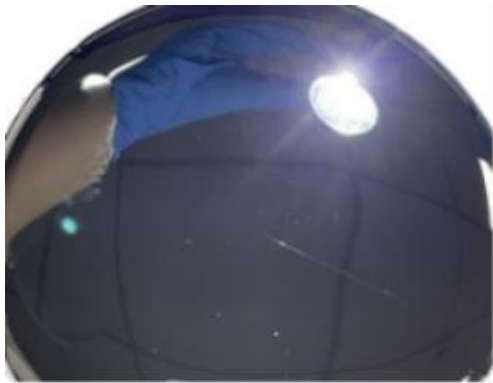


图 1 裂纹（强光手电光照，肉眼观察）



图 2 杂晶（日光，肉眼观察）

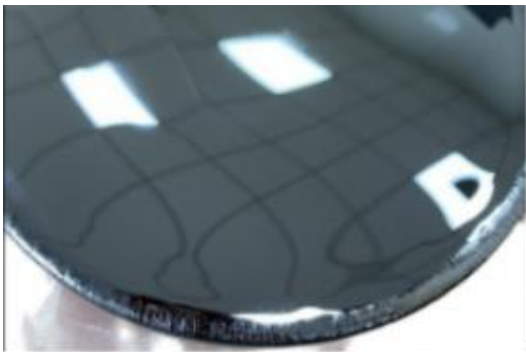


图 3 晶锭边缘多晶（日光，肉眼观察）

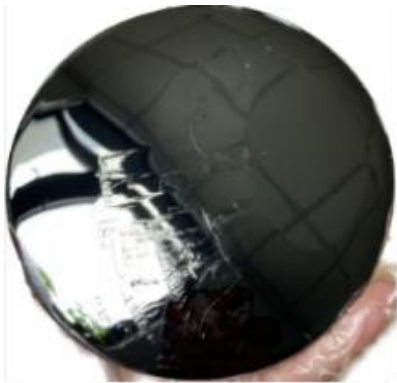


图 4 晶锭多型（日光，肉眼观察）

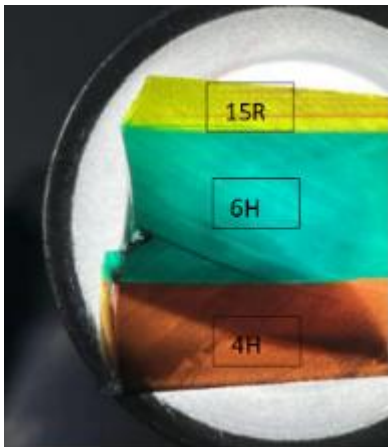


图 5 晶锭多型 纵切片（强光手电光照，肉眼观察）



图 6 晶锭微管缺陷（强光手电光照，肉眼观察）



图7 晶锭微管密集区(强光手电光照, 肉眼观察)

5.2 衬底缺陷

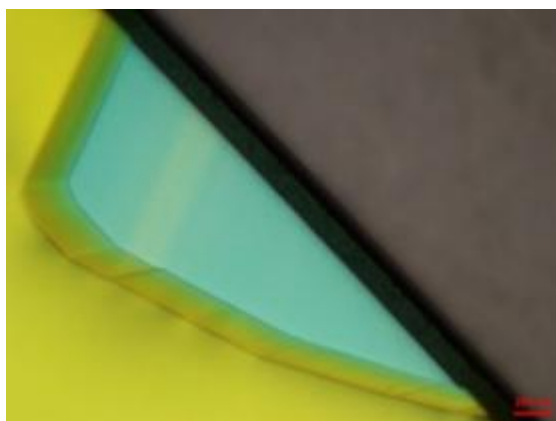


图8 多晶 1 (光学显微图像)

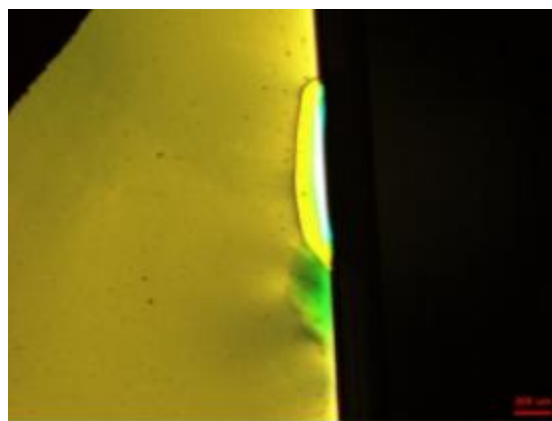


图9 多晶 2 (光学显微图像)

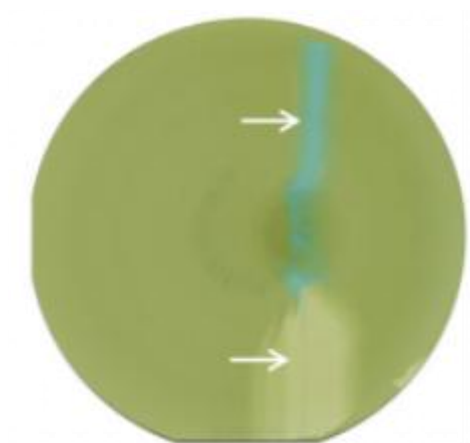


图10 衬底中心多型 (光学图像)

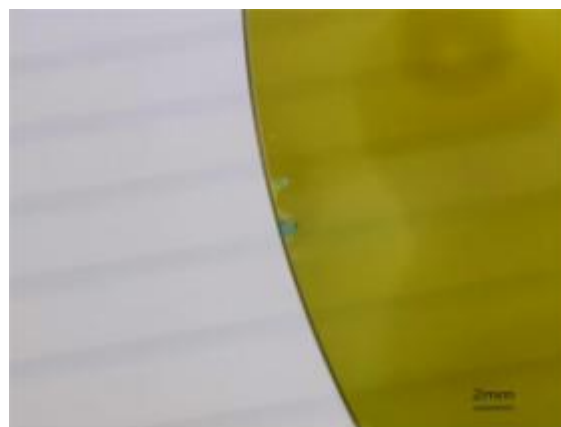


图11 衬底边缘多型 1 (光学显微图像)

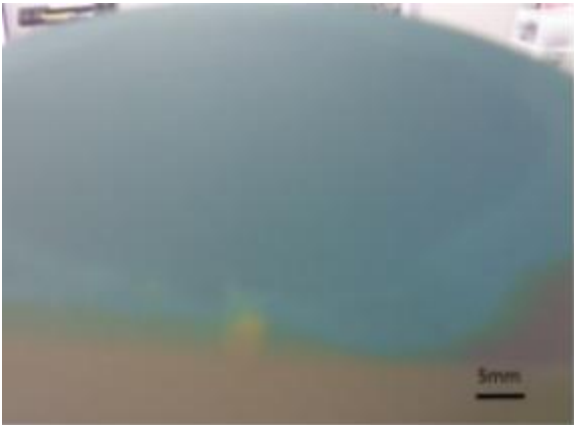


图 12 衬底边缘多型 2（光学显微图像）

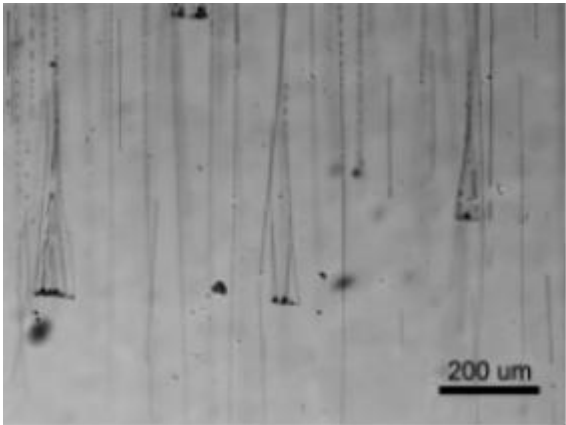


图 13 硅滴包裹物（光学显微图像）



图 14 碳包裹体 1（光学显微图像）



图 15 碳包裹体 2（光学显微图像）



图 16 碳包裹体 3（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 19 Shockley 型层错 (PL 图像)

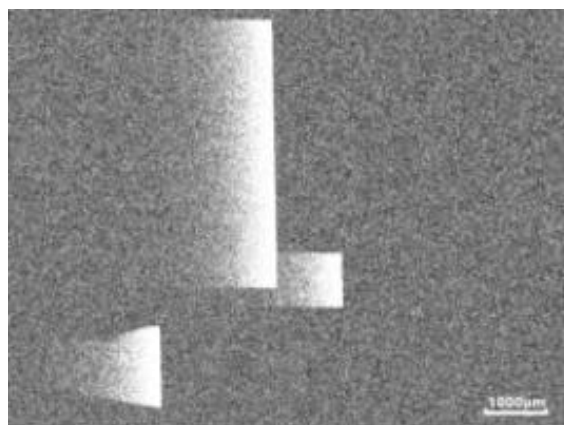


图 20 Frank 型层错 (PL 图像)

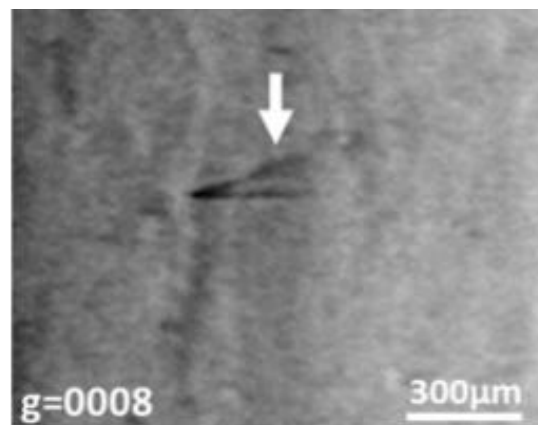


图 21 Frank 型层错 (X 射线拓扑图像)

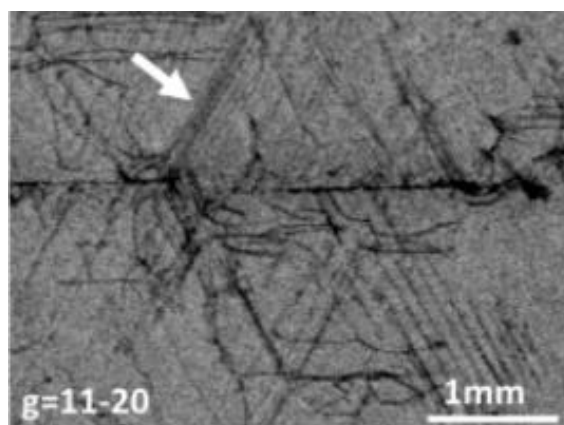


图 22 Shockley 型层错 (同步辐射 X 射线拓扑图像)

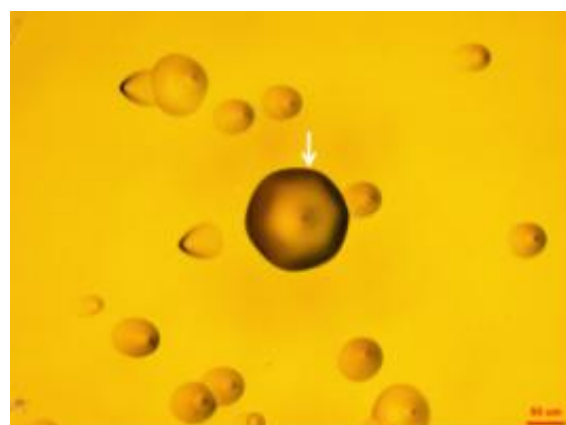


图 23 TSD (KOH 腐蚀后光学显微图像)

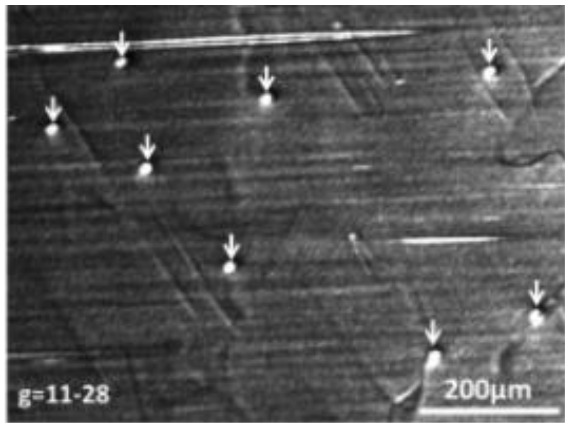


图 24 TSD（同步辐射 X 射线拓扑图像）

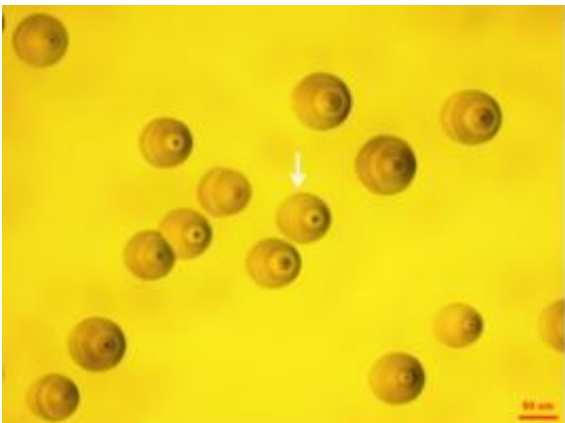


图 25 TED（KOH 腐蚀后光学显微图像）

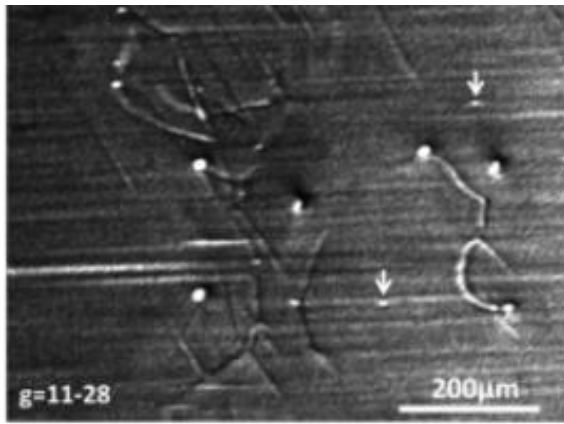


图 26 TED（同步辐射 X 射线拓扑图像）



图 27 BPD（KOH 腐蚀后光学显微图像）

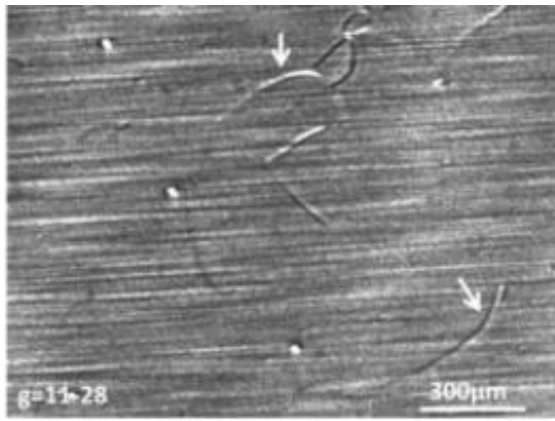


图 28 BPD（同步辐射 X 射线拓扑图像）

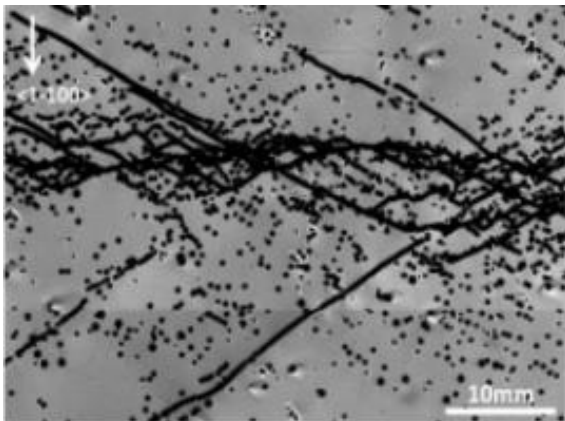


图 29 小角晶界（KOH 腐蚀后显微图像）

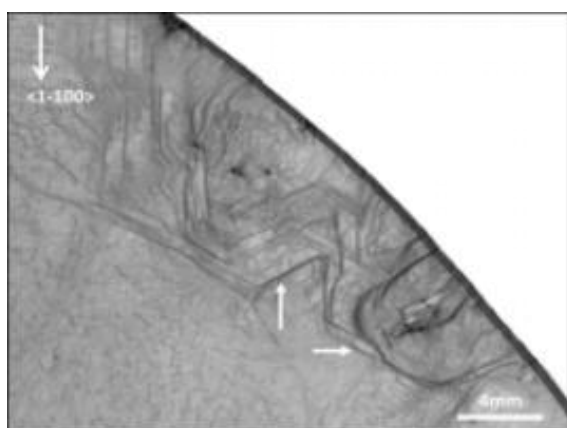


图 30 小角晶界 1（同步辐射 X 射线拓扑图像）

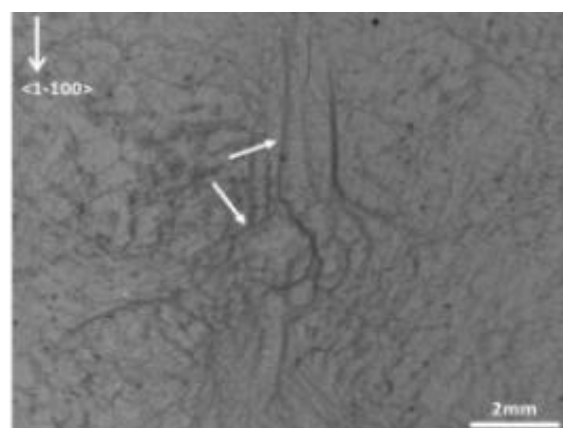


图 31 小角晶界 2（同步辐射 X 射线拓扑图像）

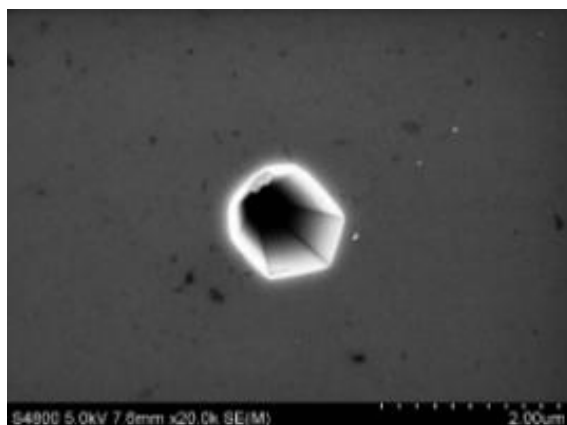


图 32 微管（SEM 图像）

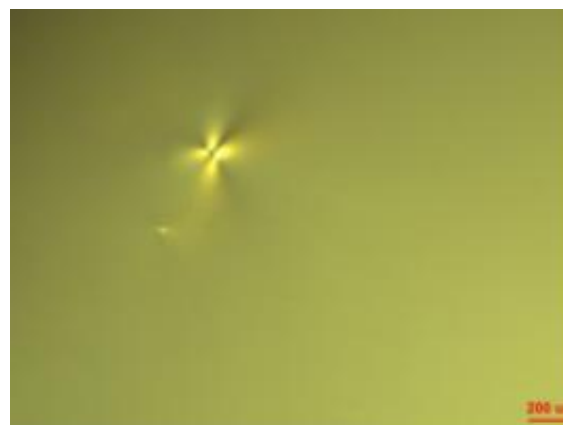


图 33 微管（偏振光显微图像）

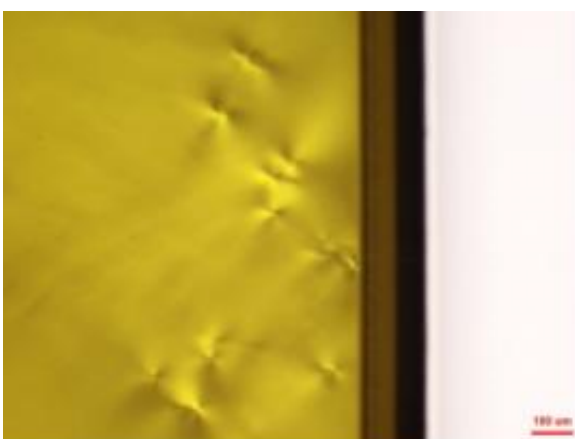


图 34 微管聚集区（偏振光显微图像）

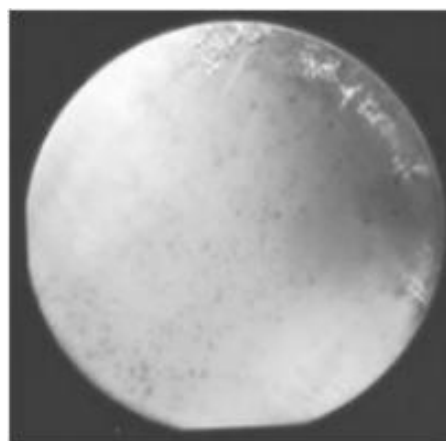


图 35 微管聚集区 1（应力透射偏振光图像 1 倍）

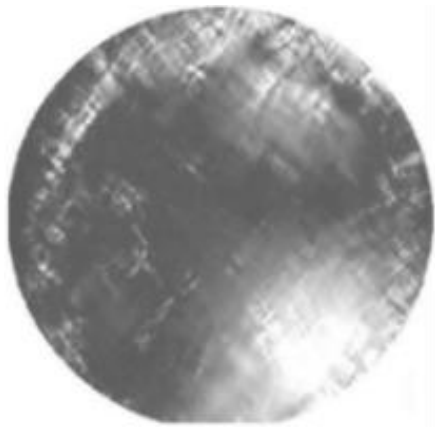


图 36 微管聚集区 2（应力透射偏振光图像 1 倍）

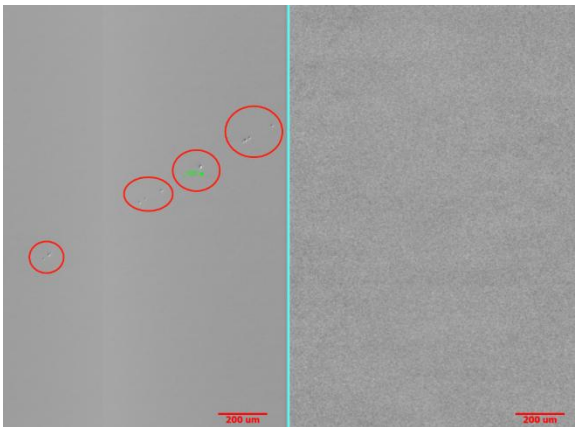


图 37 凹坑 表面光学（左）图像和 PL（右）图像
（Sica 88 微分干涉法）

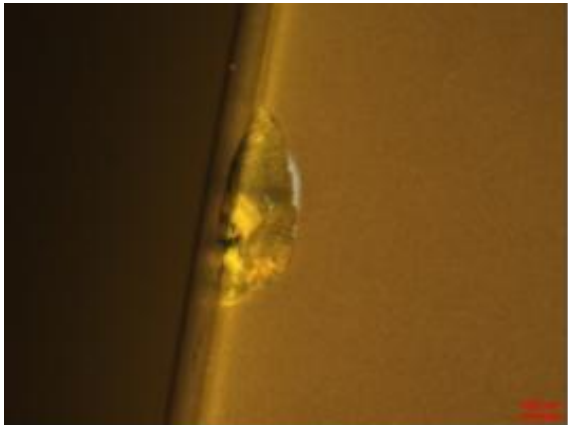


图 38 崩边（光学显微图像）



图 39 缺口（光学显微图像）



图 40 裂纹（光学显微图像）

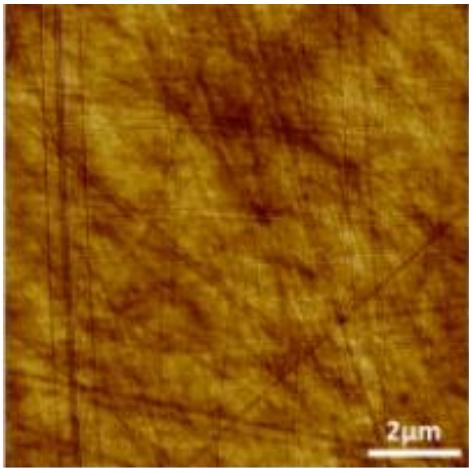


图 41 划痕（AFM 图像）

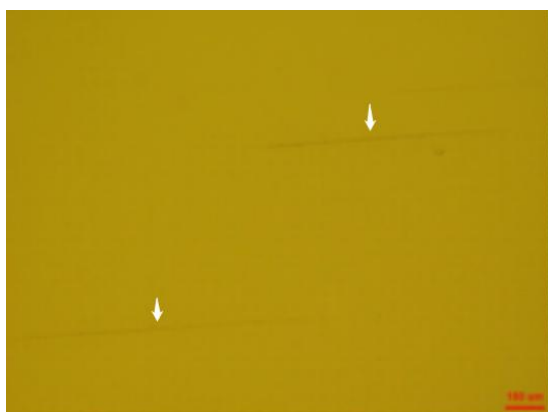


图 42 划痕（光学显微图像）

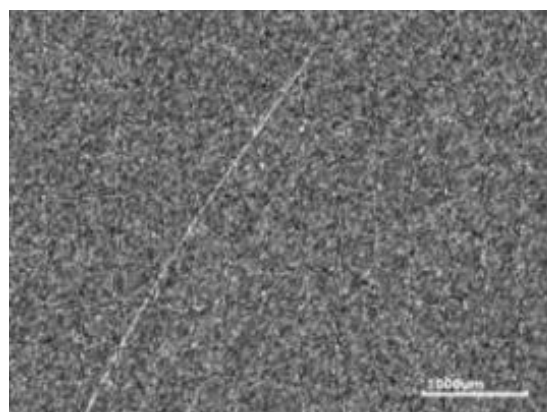


图 43 划痕 SCN 图像(Candela 8520, 激光散射法)

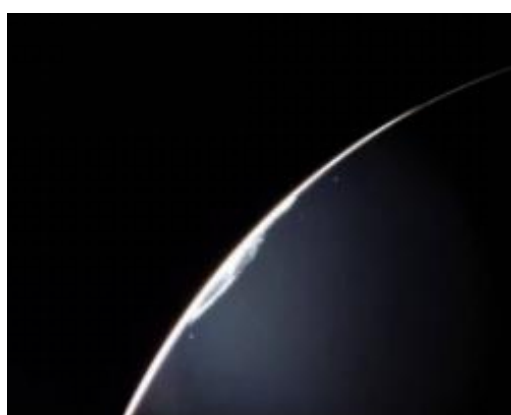


图 44 水迹沾污（光学图像）

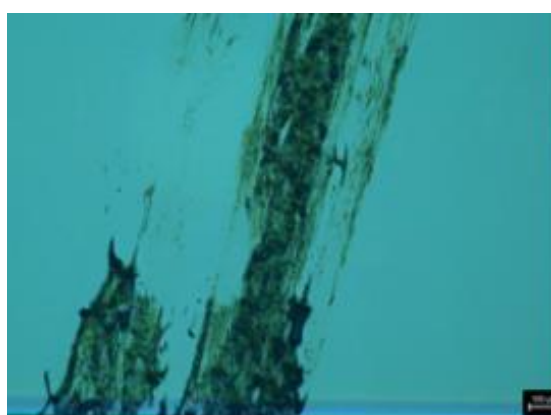


图 45 沾污（光学显微图像）

5.3 外延缺陷

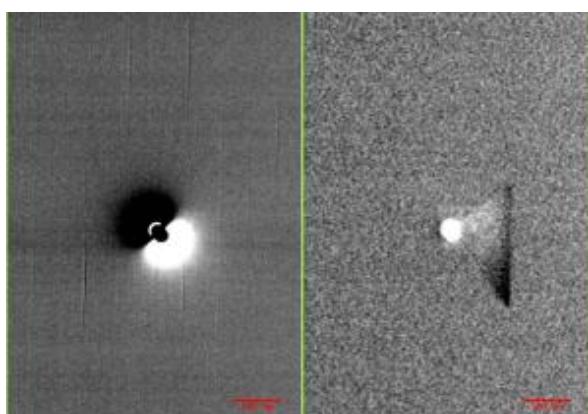


图 46 孤立出现的掉落颗粒物 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica88, 微分干涉法）

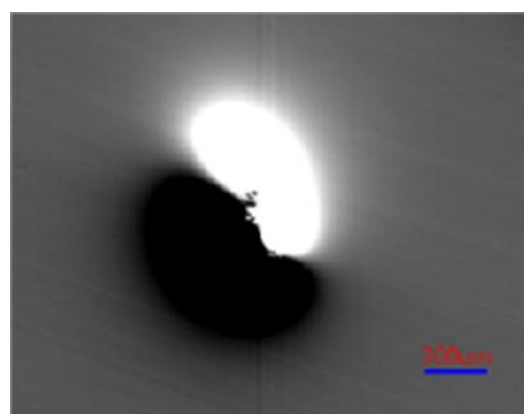


图 47 孤立出现的掉落颗粒物 Qzr0 图像(Candela 8520, 激光散射法)

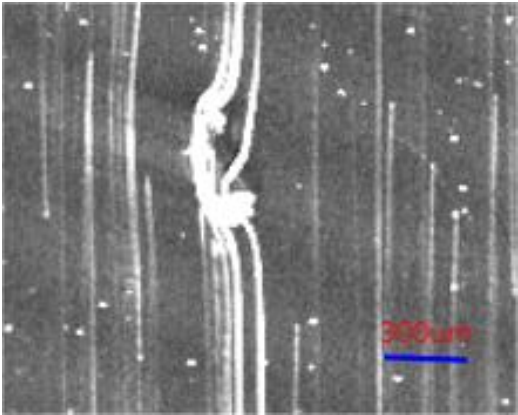


图 48 孤立出现的掉落颗粒物 SCN 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

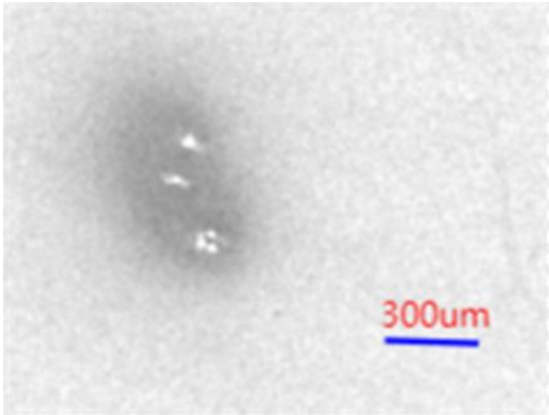


图 49 孤立出现的掉落颗粒物 PL 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

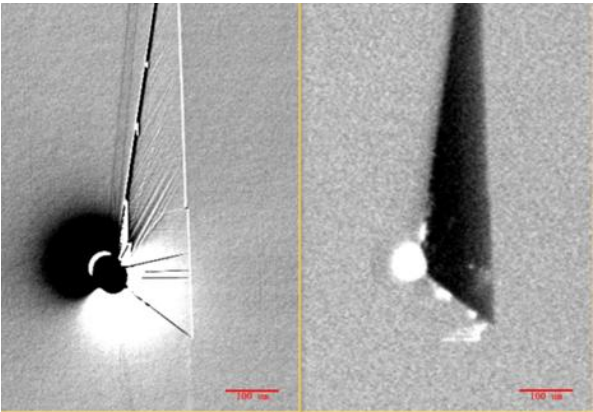


图 50 引起三角形形貌的掉落颗粒物 表面光学图像 (左) 和 PL 图像 (右) (Sica88, 微分干涉法)

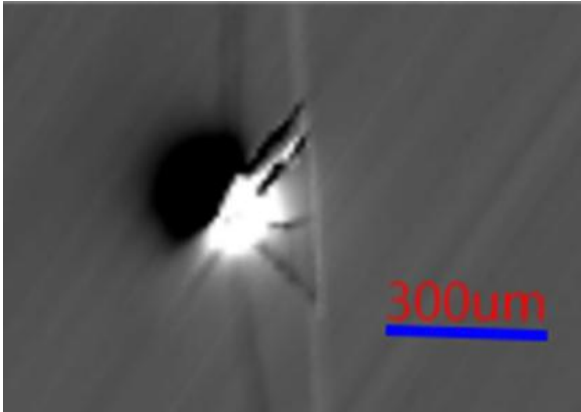


图 51 引起三角形形貌的掉落颗粒物 Qzr0 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

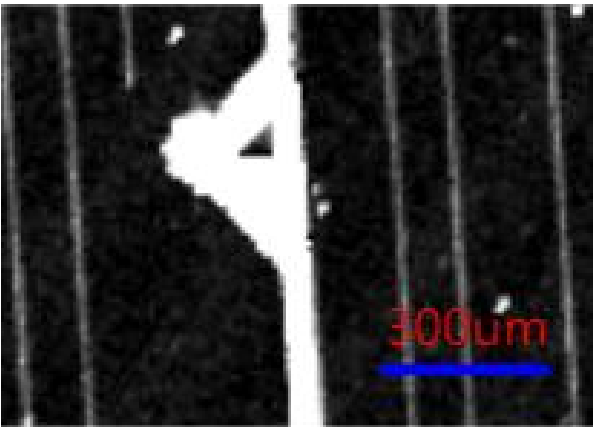


图 52 引起三角形形貌的掉落颗粒物 SCN 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

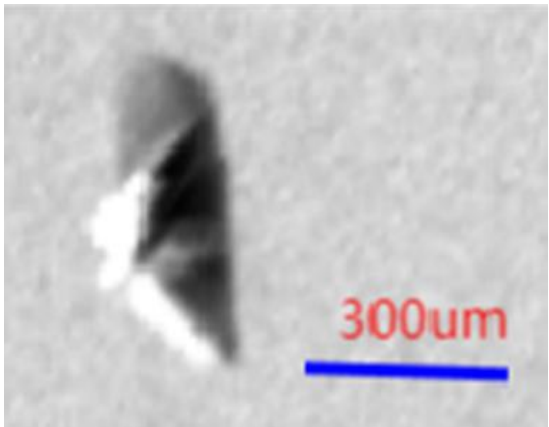


图 53 引起三角形形貌的掉落颗粒物 PL 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

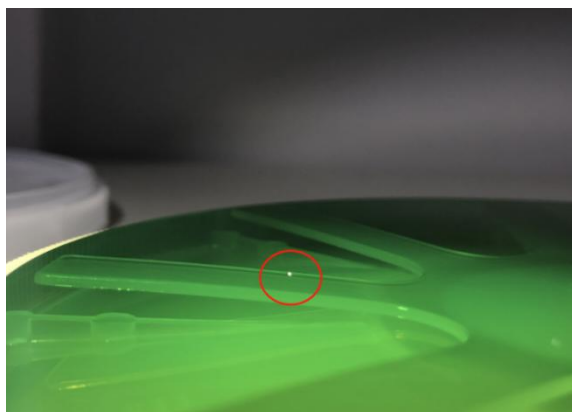


图 54 掉落颗粒物（强光手电筒光照，肉眼观察）

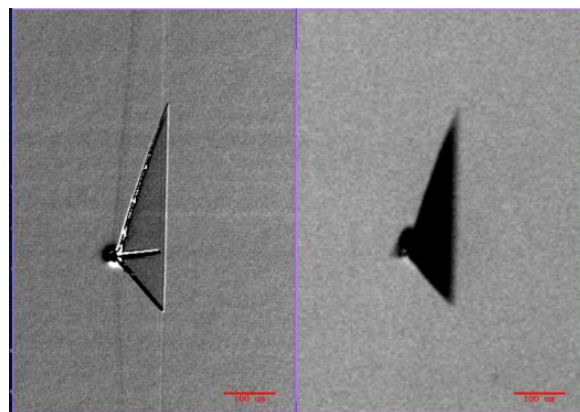


图 55 掉落颗粒物引起的三角形缺陷 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

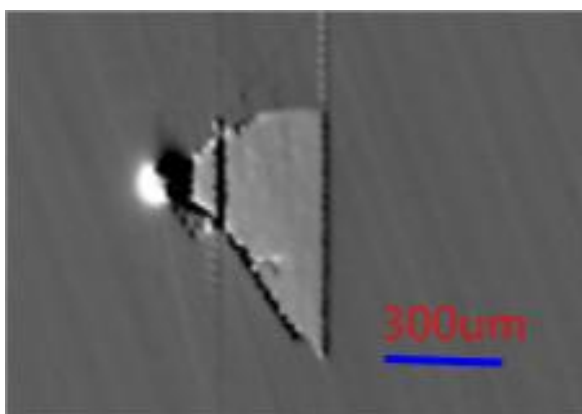


图 56 掉落颗粒物引起的三角形缺陷 Qzr0 图像（Candela 8520，激光散射法）

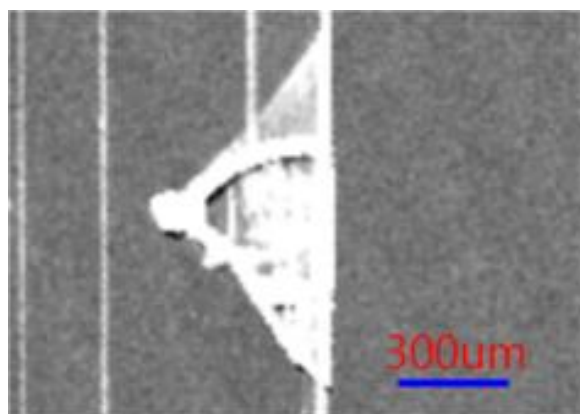


图 57 掉落颗粒物引起的三角形缺陷 SCN 图像（Candela 8520，激光散射法）

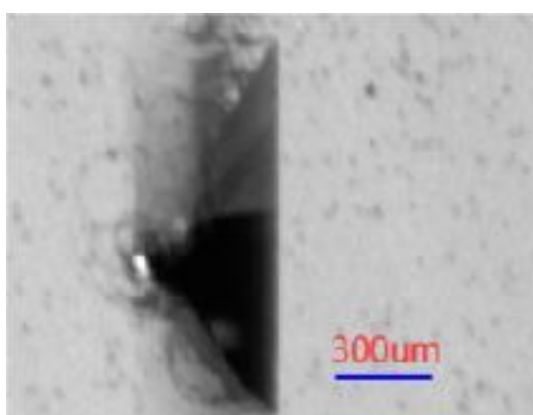


图 58 掉落颗粒物引起的三角形缺陷 PL 图像（Candela 8520，激光散射法）

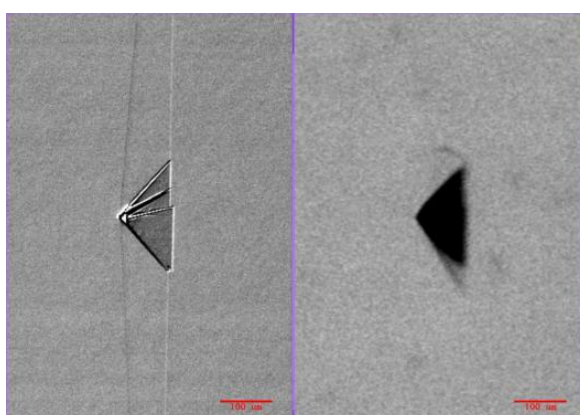


图 59 螺位错引起的三角形缺陷 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

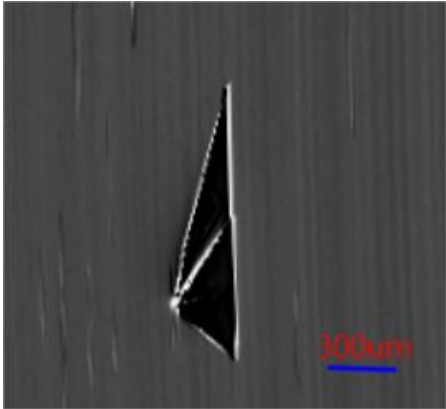


图 60 TSD 引起的三角形缺陷 Qzr0 图像(Candela 8520, 激光散射法)

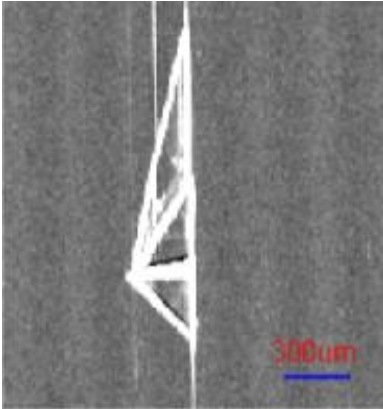


图 61 TSD 引起的三角形缺陷 SCN 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

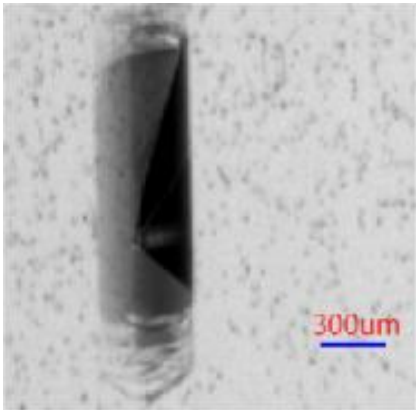


图 62 TSD 引起的三角形缺陷 PL 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

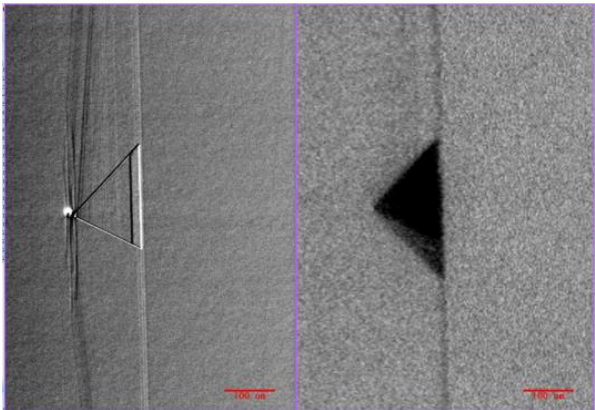


图 63 乳凸引起的三角形缺陷 表面光学图像(左)和 PL 图像(右) (Sica 88, 微分干涉法)

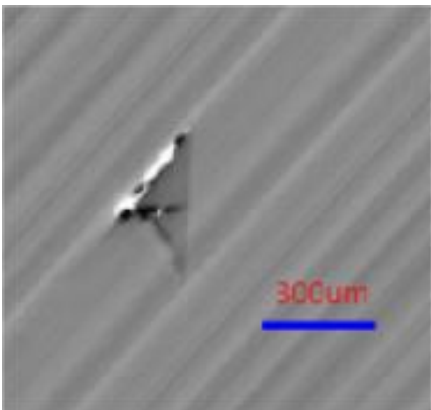


图 64 乳凸引起的三角形缺陷 Qzr0 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

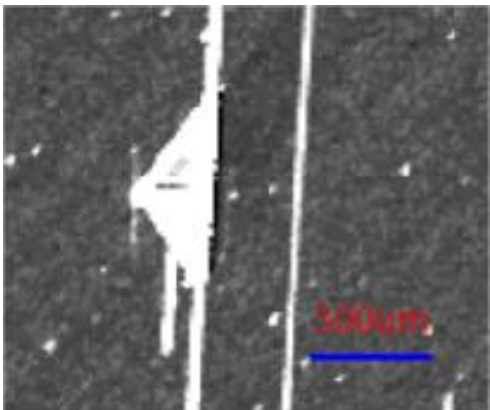


图 65 乳凸引起的三角形缺陷 SCN 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

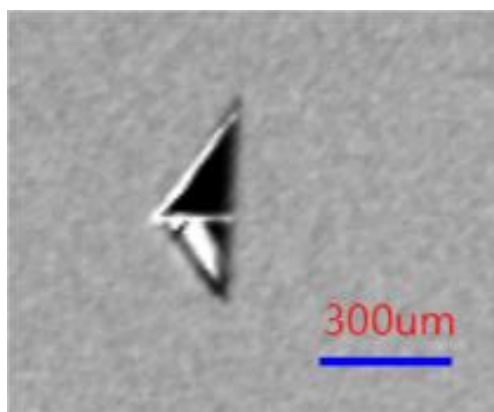


图 66 乳凸引起的三角形缺陷 PL 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

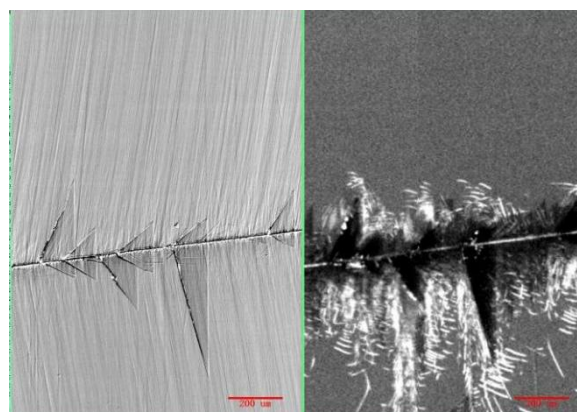


图 67 划痕引起的三角形缺陷 表面光学图像 (左) 和 PL 图像 (右) (Sica 88, 微分干涉法)

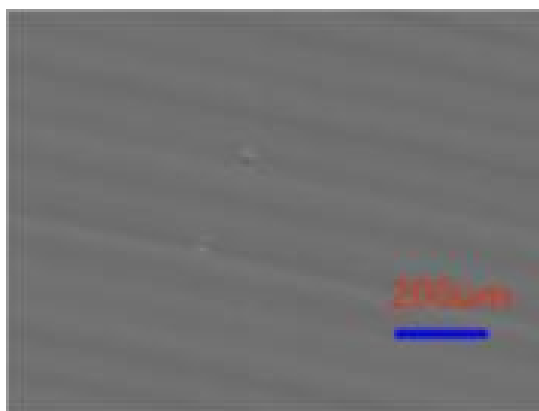


图 68 划痕引起的三角形缺陷 Qzr0 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

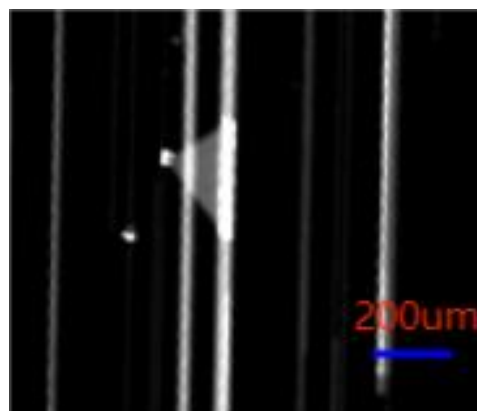


图 69 划痕引起的三角形缺陷 SCN 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

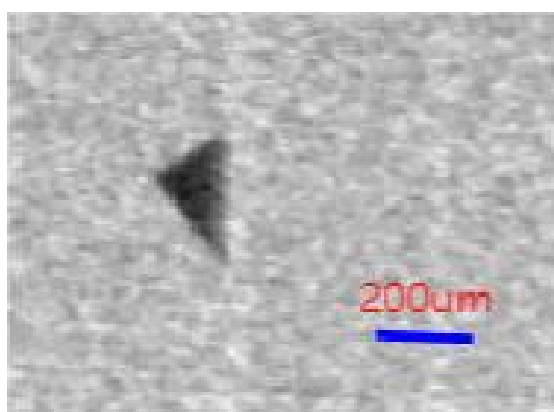


图 70 划痕引起的三角形缺陷 PL 图像 (Candela 8520, 激光散射法)

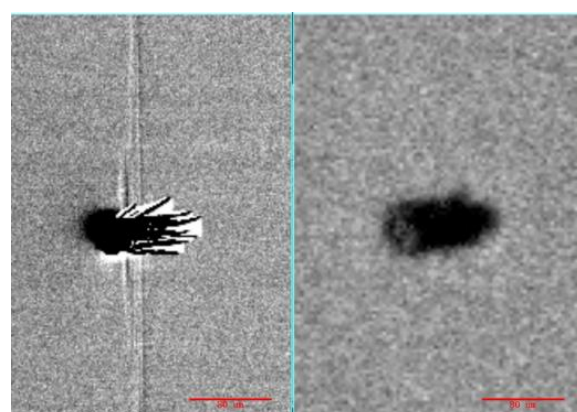


图 71 彗星缺陷 1 表面光学图像 (左) 和 PL 图像 (右) (Sica 88, 微分干涉法)

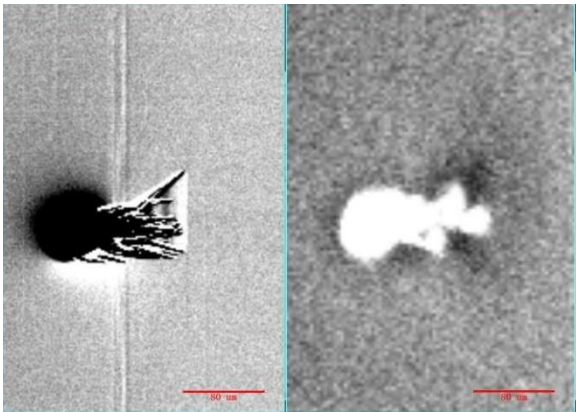


图 72 彗星缺陷 2 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

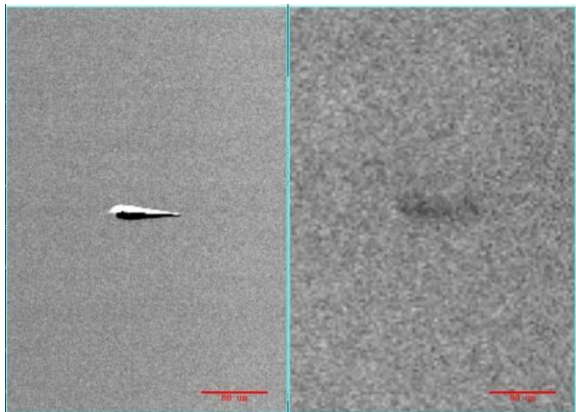


图 73 TSD 引起的胡萝卜缺陷 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

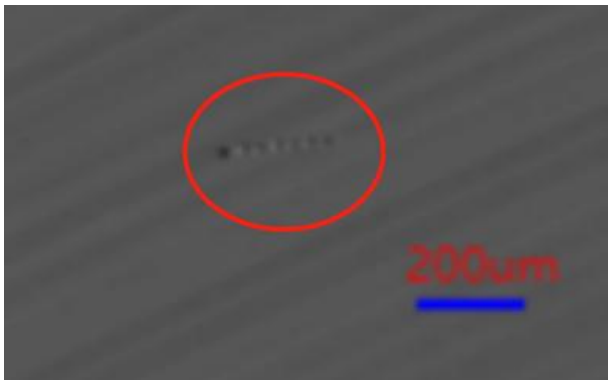


图 74 胡萝卜缺陷 Qzr0 图像（Candela 8520，激光散射法）

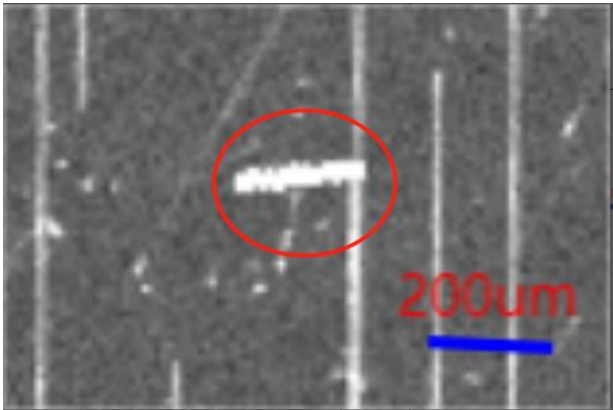


图 75 胡萝卜缺陷 SCN 图像（Candela 8520，激光散射法）

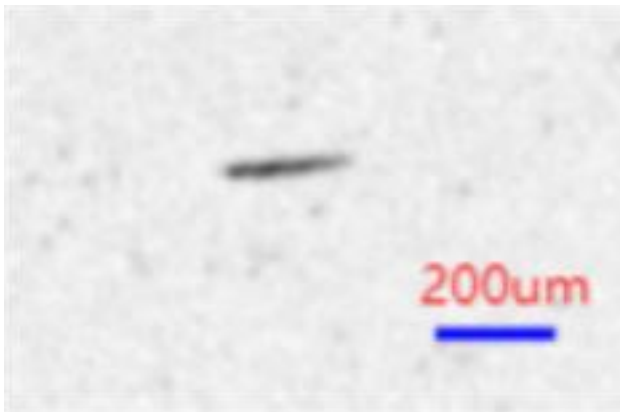


图 76 胡萝卜缺陷 PL 图像（Candela 8520，激光散射法）

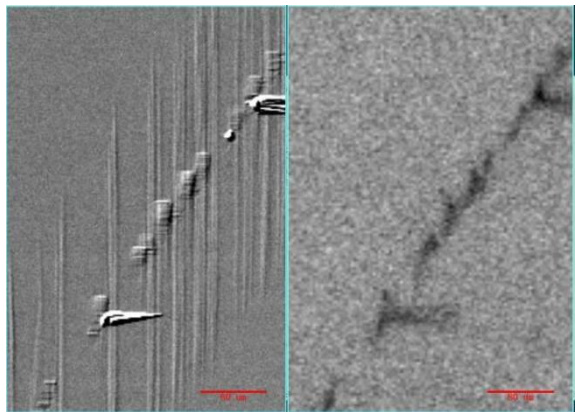


图 77 划痕引起的胡萝卜缺陷 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

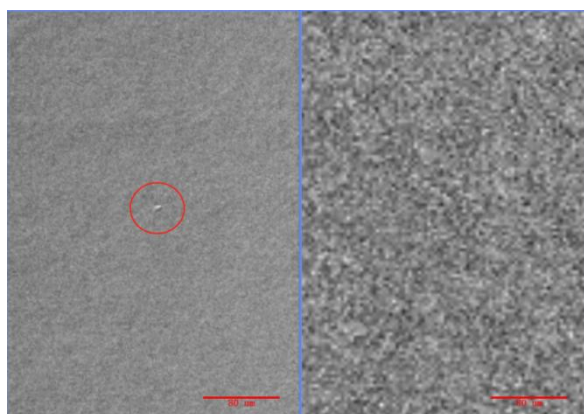


图 78 小坑缺陷 1 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

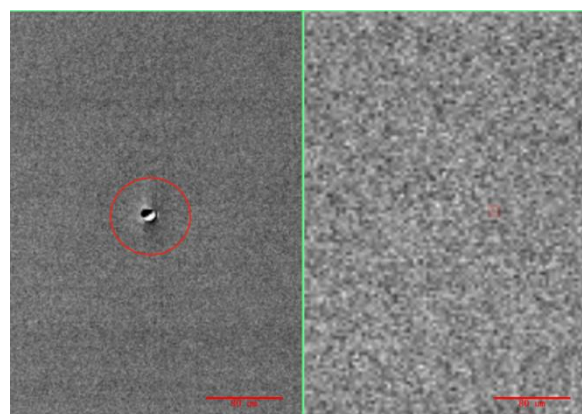


图 79 小坑缺陷 2 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

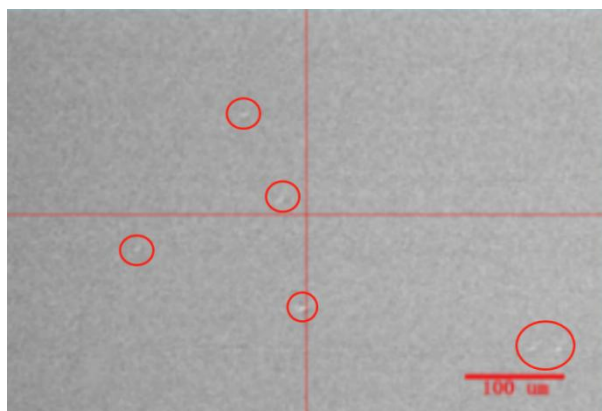


图 80 小坑缺陷 3 KOH 腐蚀前，表面光学图像（Sica 88，微分干涉法）

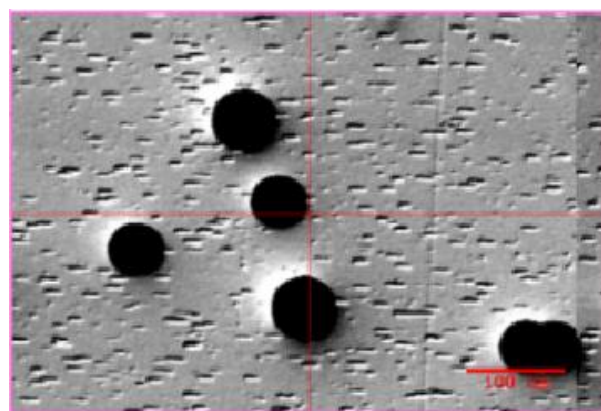


图 81 小坑缺陷 3 KOH 腐蚀后，表面光学图像（Sica 88，微分干涉法）

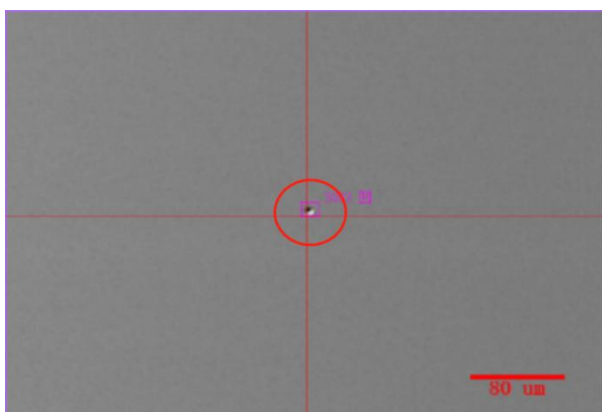


图 82 小坑缺陷 4 KOH 腐蚀前，表面光学图像（Sica 88，微分干涉法）

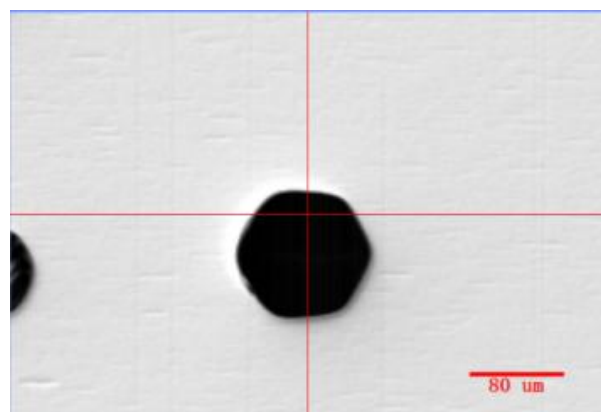


图 83 小坑缺陷 4 KOH 腐蚀后，表面光学图像（Sica 88，微分干涉法）

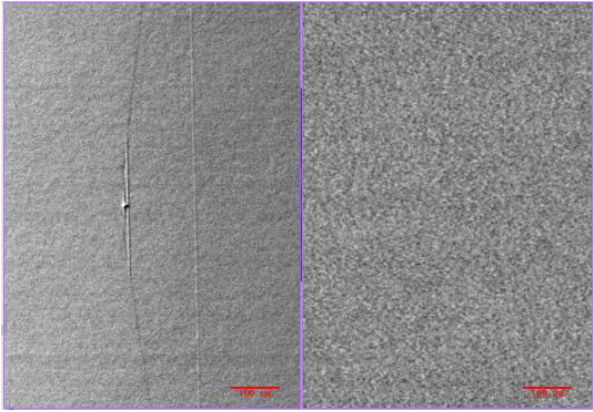


图 84 梯形缺陷 1 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

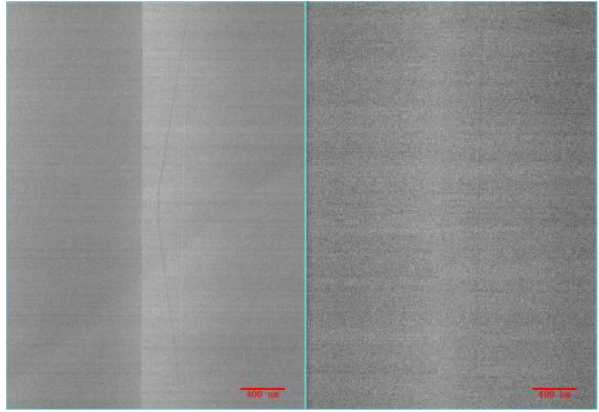


图 85 梯形缺陷 2 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

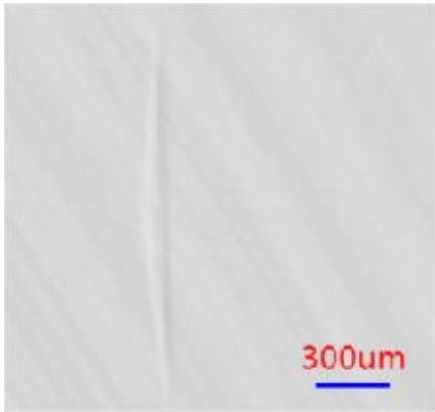


图 86 梯形缺陷 Qzr0 图像（Candela8520，激光散射法）

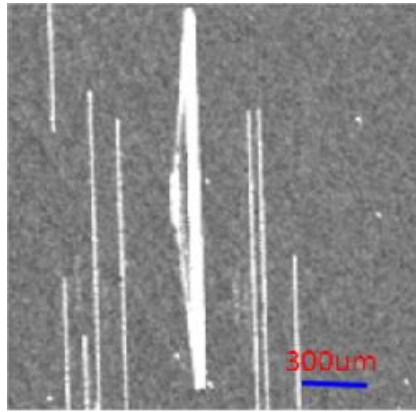


图 87 梯形缺陷 SCN 图像（Candela8520，激光散射法）

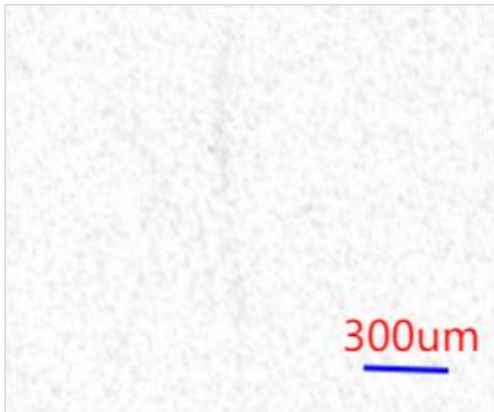


图 88 梯形缺陷 PL 图像（Candela8520，激光散射法）

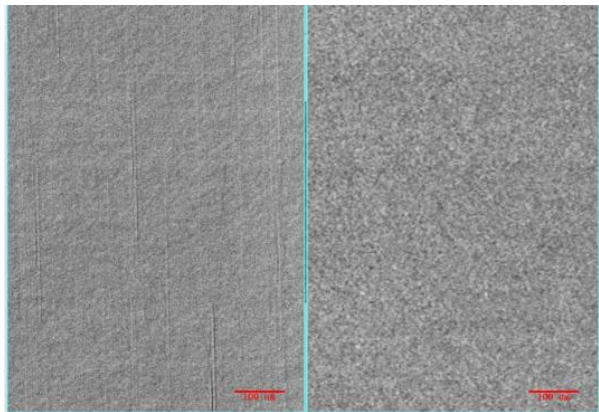


图 89 台阶聚集 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

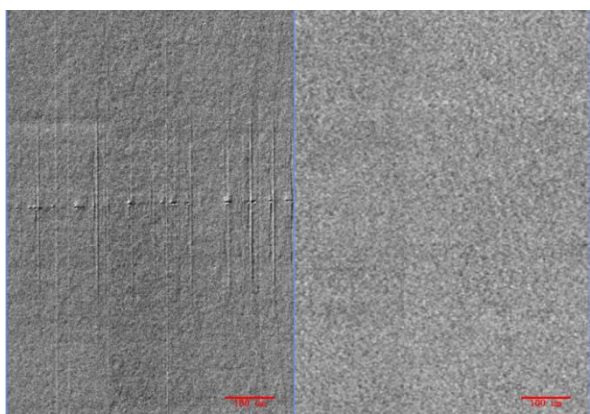


图 90 划痕引起的台阶聚集 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）



图 91 划痕引起的台阶聚集 Qzr0 图像（Candela 8520，激光散射法）

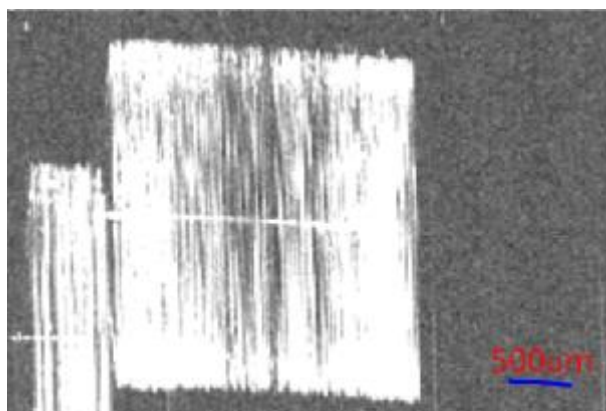


图 92 划痕引起的台阶聚集 SCN 图像（Candela 8520，激光散射法）

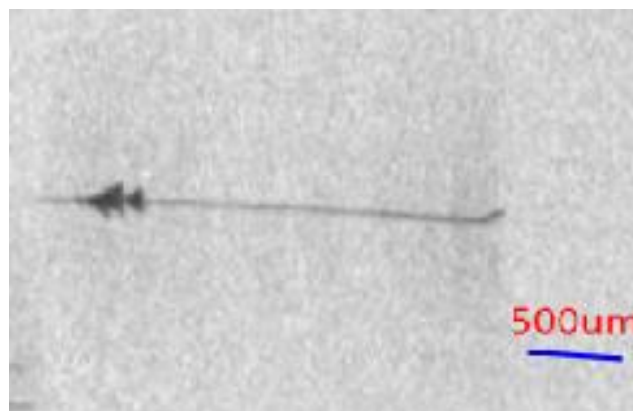


图 93 划痕引起的台阶聚集 PL 图像（Candela 8520，激光散射法）

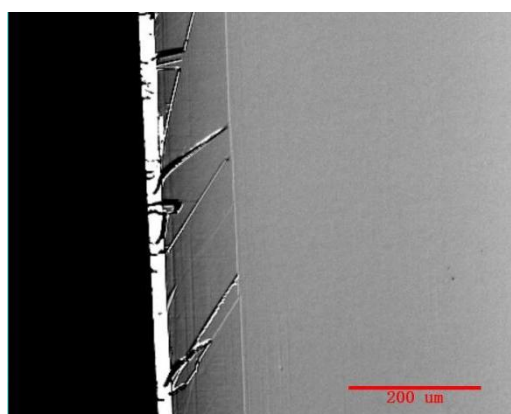


图 94 外延凸起 表面光学图像（Sica 88，微分干涉法）

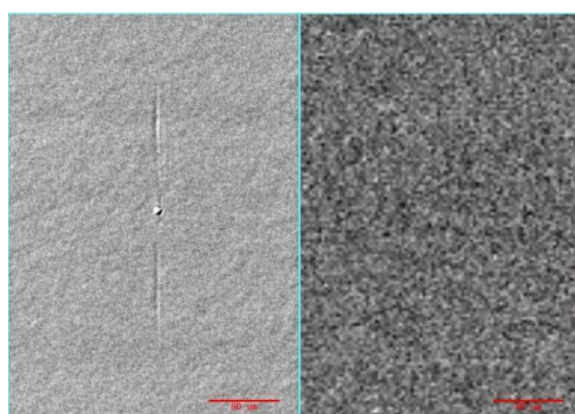


图 95 乳凸 1 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

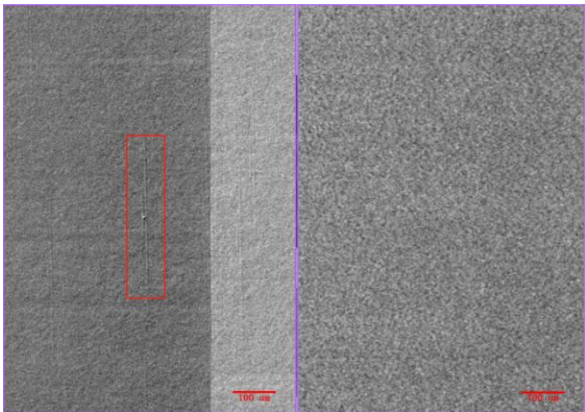


图 96 乳凸 2 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）
（Sica 88，微分干涉法）

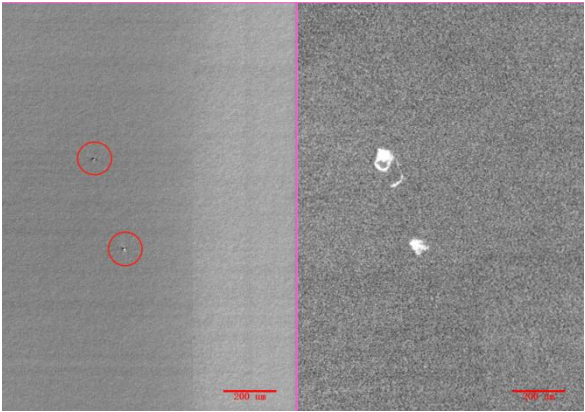


图 97 外延层微管 表面光学图像（左）和 PL 图像
（右）（Sica 88，微分干涉法）

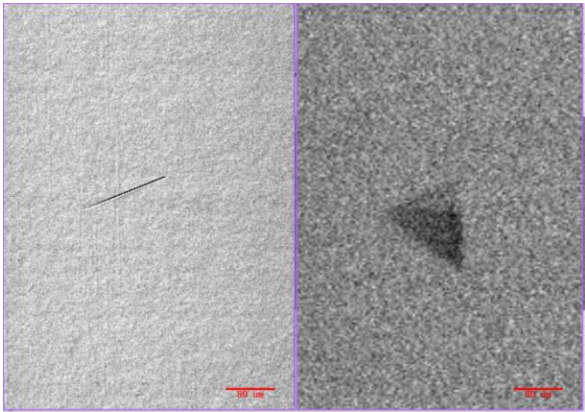


图 98 表面有一条边界的层错 表面光学图像
（左）和 PL 图像（右）（Sica88，微分干
涉法）



图 99 表面有一条边界的层错 Qzr0 图像(Candela
8520，激光散射法)

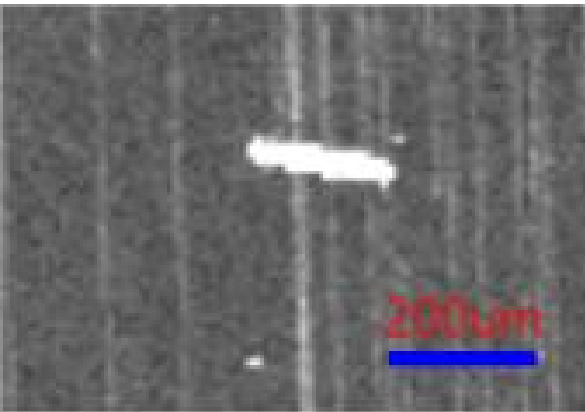


图 100 表面有一条边界的层错 SCN 图像
（Candela 8520，激光散射法）

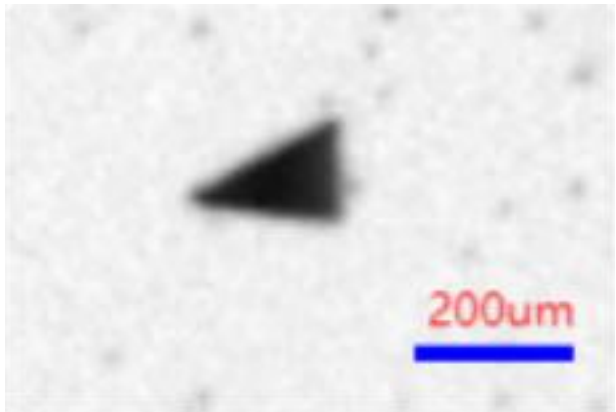


图 101 表面有一条边界的层错 PL 图像（Candela
8520，激光散射法）

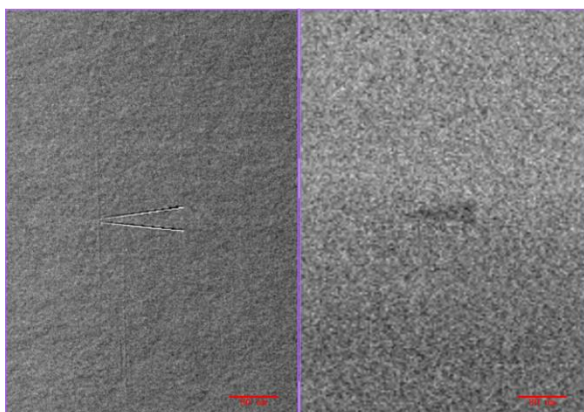


图 102 表面有两条边界的层错 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica88，微分干涉法）

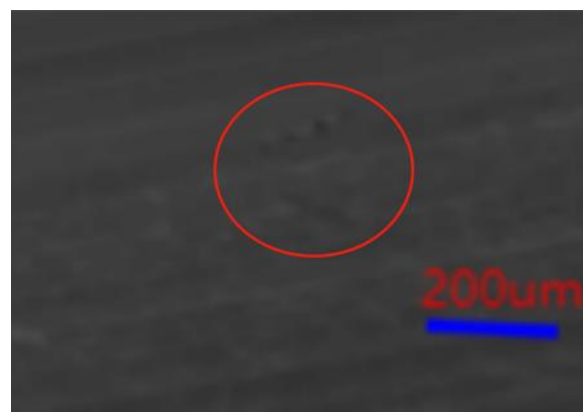


图 103 表面有两条边界的层错 Qzr0 图像（Candela 8520，激光散射法）

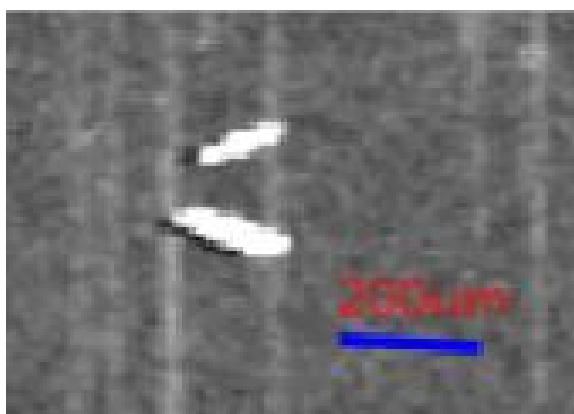


图 104 表面有两条边界的层错 SCN 图像（Candela 8520，激光散射法）

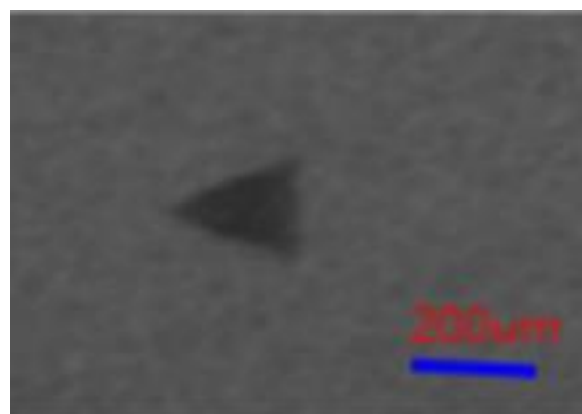


图 105 表面有两条边界的层错 PL 图像（Candela 8520，激光散射法）

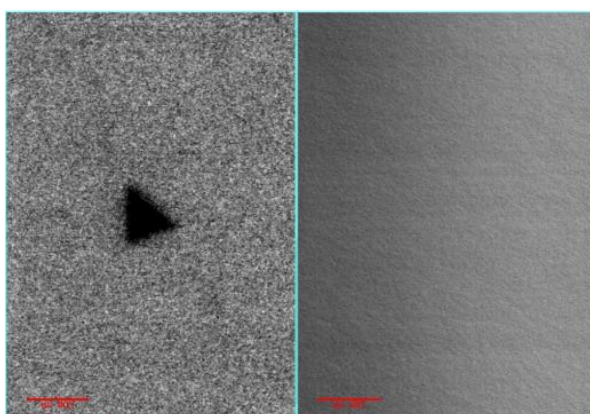


图 106 表面无边界的层错 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

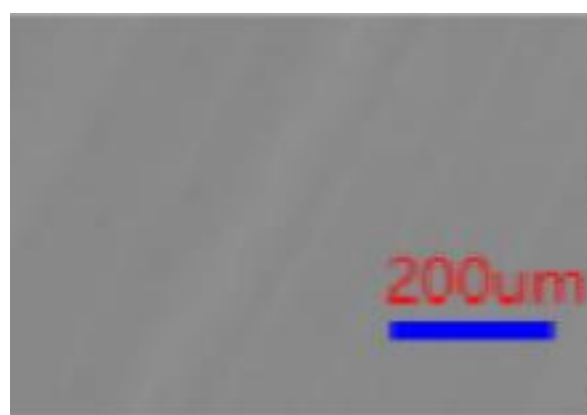


图 107 表面无边界的层错 Qzr0 图像（Candela 8520，激光散射法）

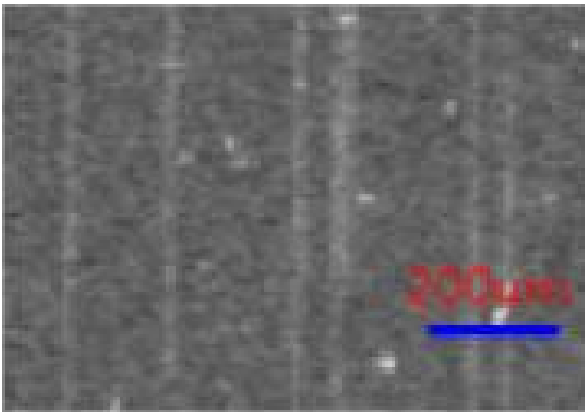


图 108 表面无边界的层错 SCN 图像（Candela 8520，激光散射法）

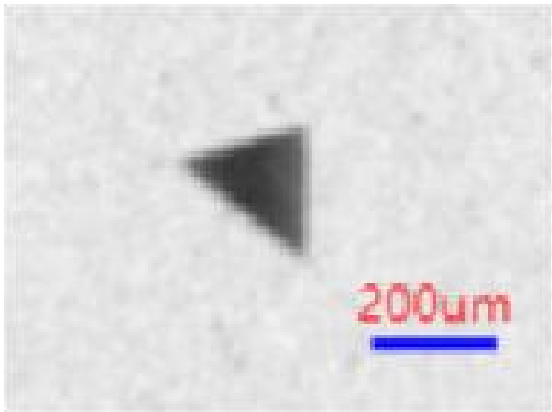


图 109 表面无形边界的层错 PL 图像（Candela 8520，激光散射法）

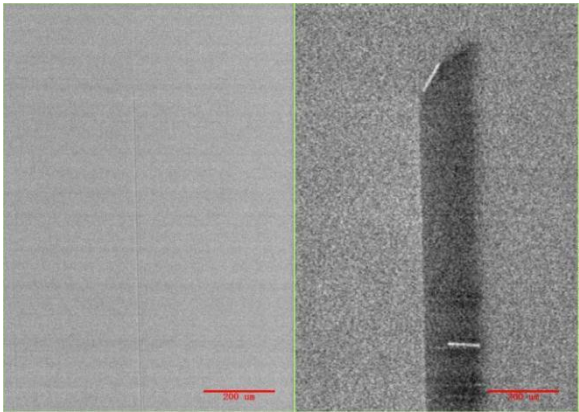


图 110 PL 呈条状的层错 表面光学图像（左）和 PL 图像（右）（Sica 88，微分干涉法）

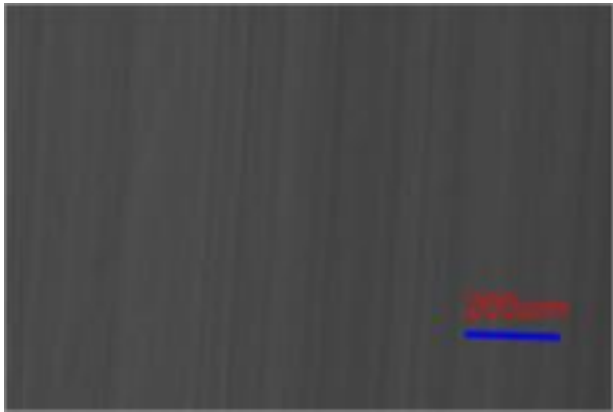


图 111 PL 呈条状的层错 Qzr0 图像（Candela 8520，激光散射法）

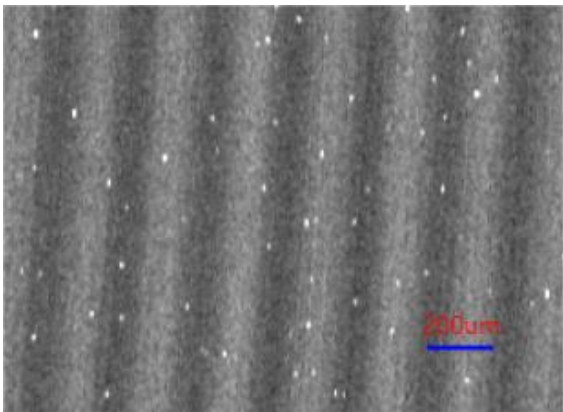


图 112 PL 呈条状的层错 SCN 图像（Candela 8520，激光散射法）

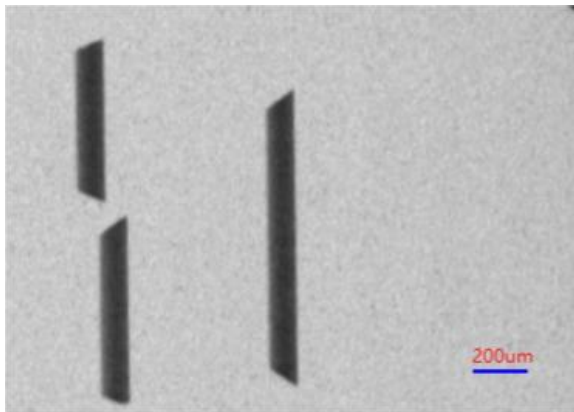


图 113 PL 呈条状的层错 PL 图像（Candela 8520，激光散射法）

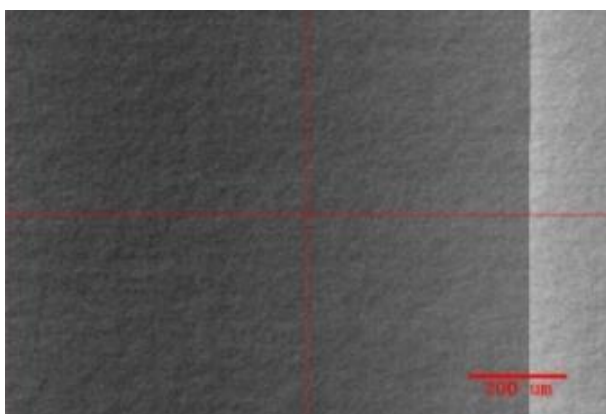


图 114 外延层 TSD 和 TED 表面光学图像 (Sica 88, 微分干涉法)

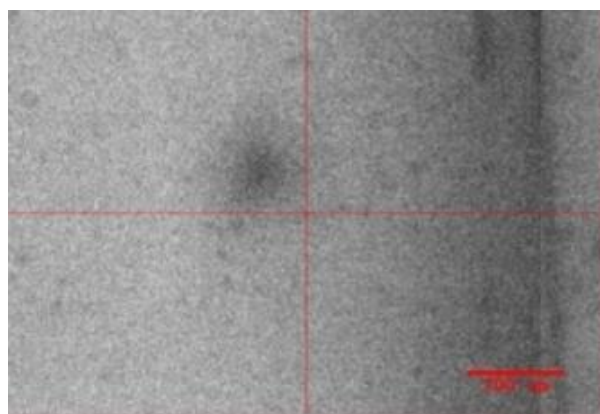


图 115 外延层 TSD 和 TED PL 图像 (Sica 88, 微分干涉法)

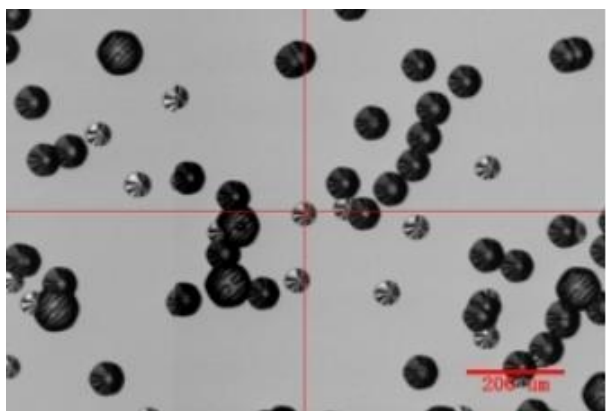


图 116 外延层 TSD 和 TED 经过 KOH 腐蚀后的表面光学图像 (Sica 88, 微分干涉法)

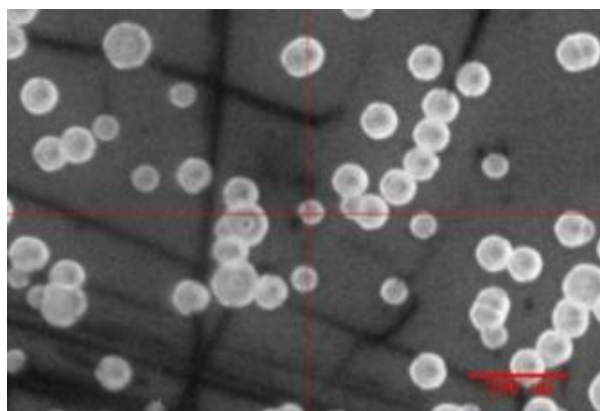


图 117 外延层 TSD 和 TED 经过 KOH 腐蚀后的 PL 图像 (Sica 88, 微分干涉法)

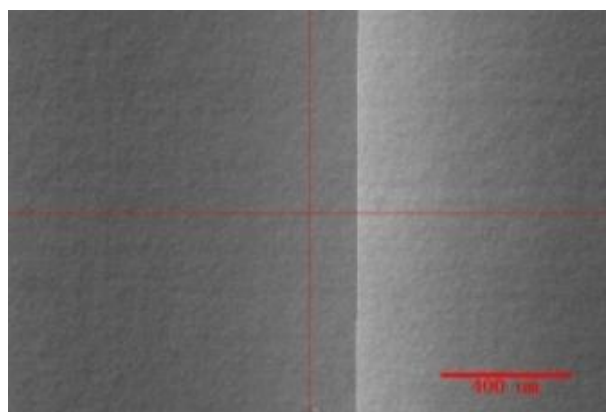


图 118 外延层 BPD 表面光学图像 (Sica 88, 微分干涉法)

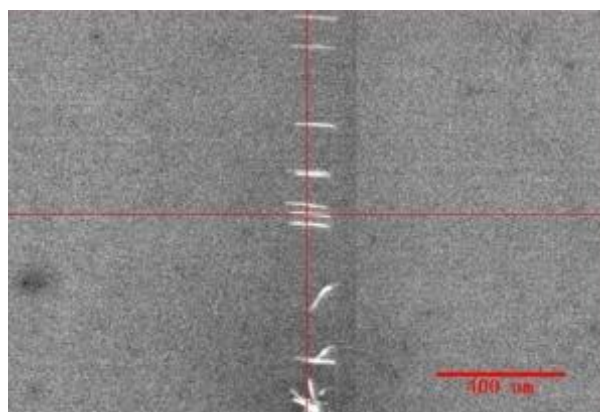


图 119 外延层 BPD PL 图像 (Sica 88, 微分干涉法)

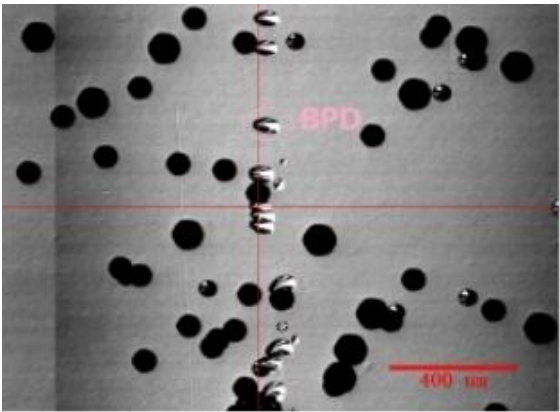


图 120 外延层 BPD 经过 KOH 腐蚀后的表面光学图像（Sica 88，微分干涉法）

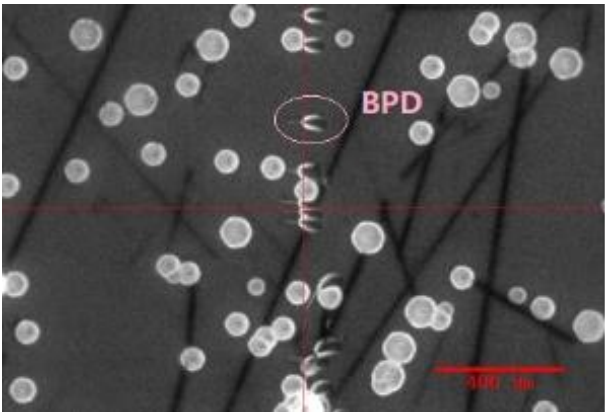


图 121 外延层 BPD 经过 KOH 腐蚀后的 PL 图像（Sica 88，微分干涉法）

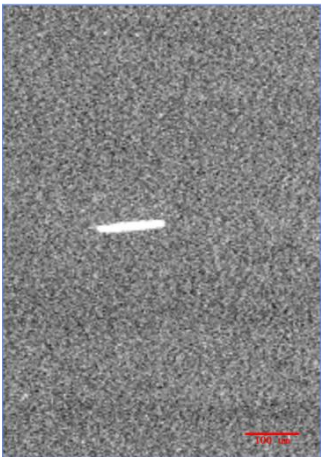


图 122 衬底贯穿到外延层 BPD 的 PL 图像（Sica 88，微分干涉法）

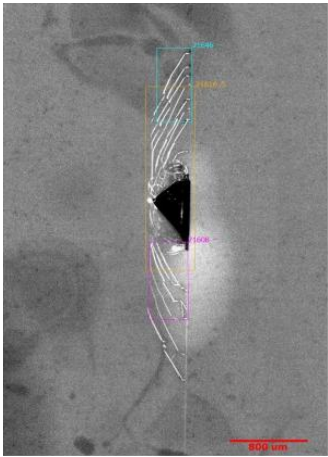


图 123 三角形缺陷引起外延层 BPD 的 PL 图像（Sica 88，微分干涉法）

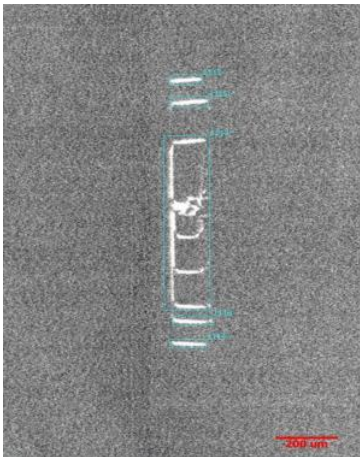


图 124 微管引起外延层 BPD 的 PL 图像（Sica88，微分干涉法）

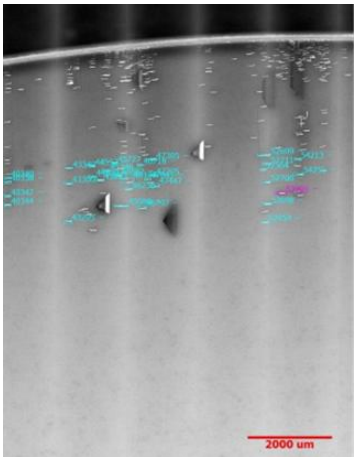


图 125 晶片边缘应力引起外延层 BPD 的 PL 图像（Sica 88，微分干涉法）

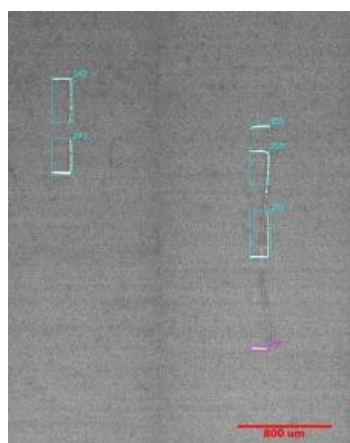


图 126 热应力引起外延层 BPD 的 PL 图像 (Sica 88, 微分干涉法)

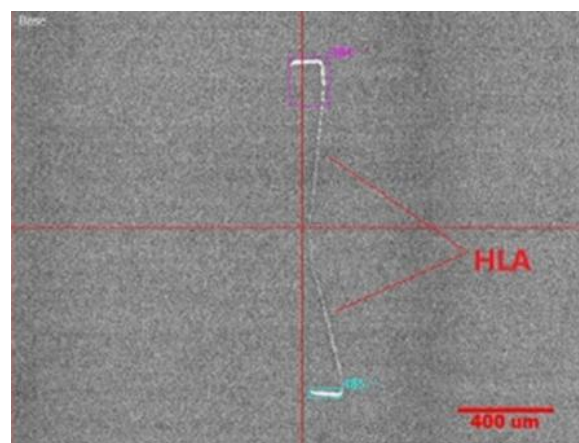


图 127 外延层 HLA 的 PL 图像 (Sica 88, 微分干涉法)

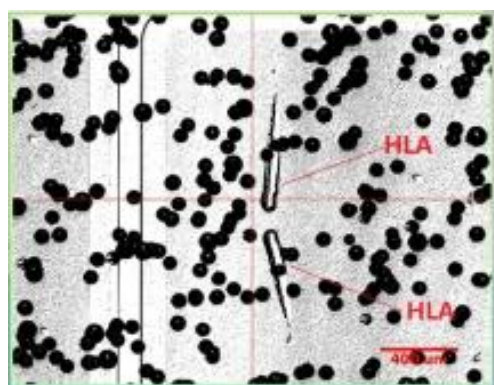


图 128 外延层 HLA 经过 KOH 腐蚀后的表面光学图像

5.4 工艺缺陷

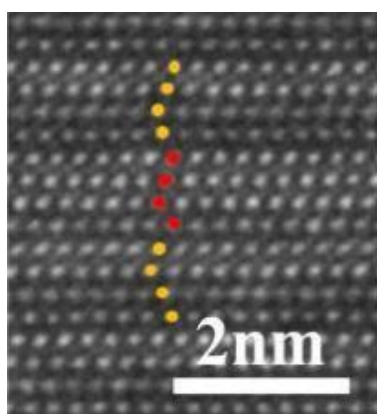


图 129 高温氧化诱导层错的高分辨 TEM 图 (Zhdanov 标记为 (1, 3), 1SSF 层错)

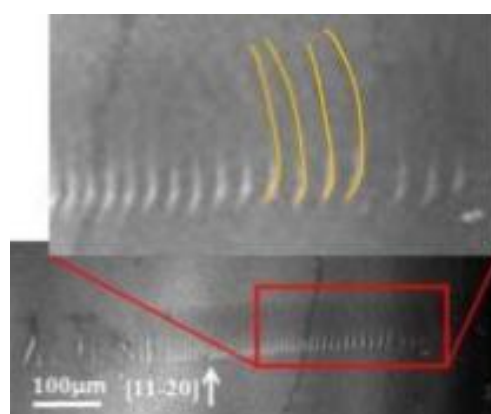


图 130 高温氧化诱导层错的 PL 图 (高温氧化使得位错向 [1-100] 或 [-1100] 方向发生变形)

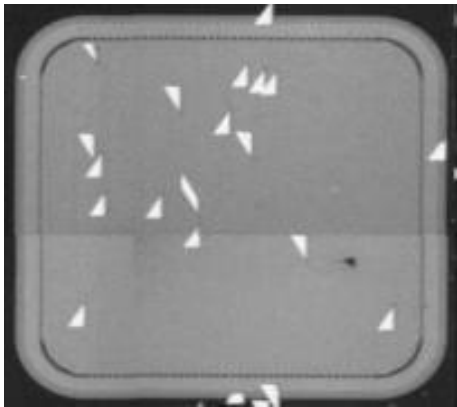


图 131 电流应力后 PiN 二极管中三角形层错的 PL 图像

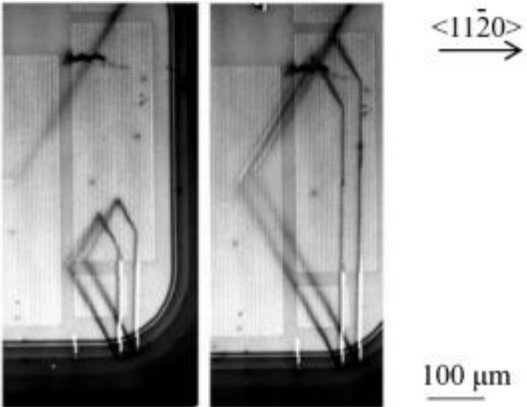


图 132 电流应力后 SiC 双极性器件三角形层错的 EL 图像

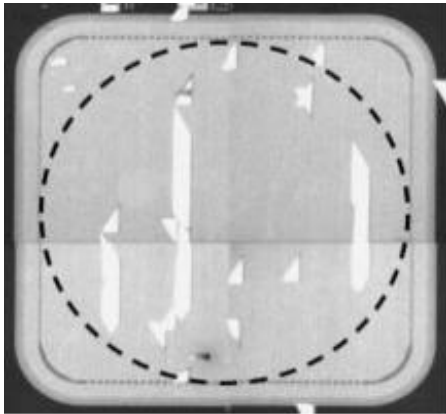


图 133 电流应力后 PiN 二极管中条形层错的 PL 图像

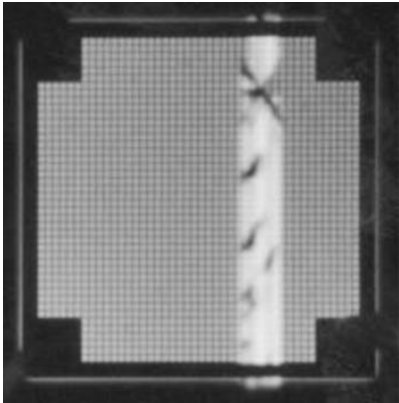


图 134 薄缓冲层 PiN 中条形层错的 EL 图像

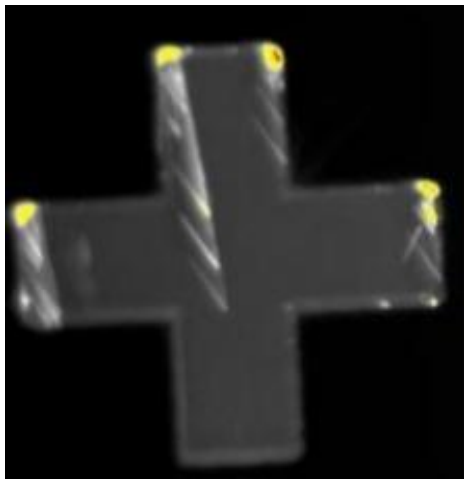


图 135 源于台面侧壁的缺陷传播 (p+nn+二极管, 10 min)

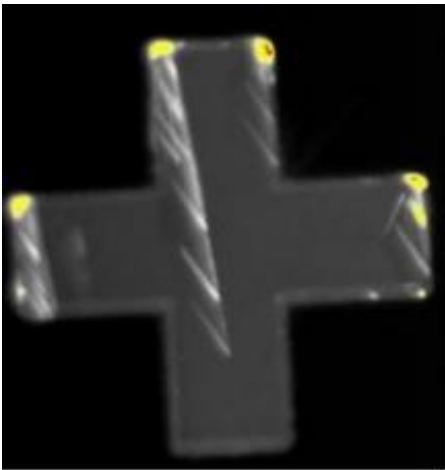


图 136 源于台面侧壁的缺陷传播 (p+nn+二极管, 20 min)



图 137 源于台面侧壁的缺陷传播 (p+nn+二极管, 30 min)

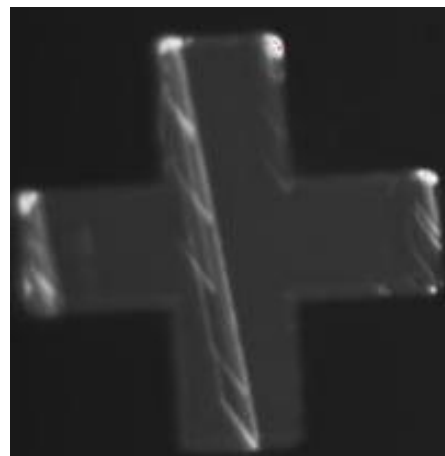


图 138 源于台面侧壁的缺陷传播 (p+nn+二极管, 40 min)

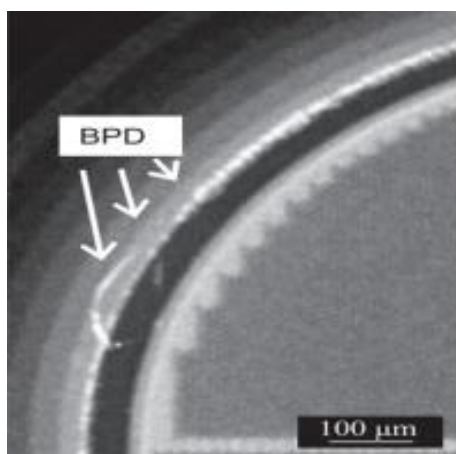


图 139 高温注入、退火后的 BPD 位错

6 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

- BPD: 基平面位错 (basal plane dislocation)
- CMP: 化学机械抛光 (chemical mechanical polish)
- CVD: 化学气相沉积 (chemical vapor deposition)
- HLA: 半环列阵 (half loop array)
- ICP: 电感耦合等离子体蚀刻 (inductively coupled plasma)
- MP: 微管缺陷 (micropipe)
- PD: 不全位错 (partial dislocation)
- RIE: 反应离子刻蚀 (reactive ion etch)
- SF: 层错 (stacking fault)
- TED: 刃位错 (threading edge dislocation)
- TSD: 螺位错 (threading screw dislocation)

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, 2018.
-