

# 碳化硅衬底的生长加工流程概述

作为第三代半导体材料的典型代表，碳化硅因具备宽带隙、高热导率、高击穿电场以及大电子迁移速率等性能优势，是制作高压、高频、高功率器件的理想材料，可有效突破传统硅基功率半导体器件的物理极限，被誉为带动“新能源革命”的绿色能源材料。在功率器件的生产制造流程中，碳化硅单晶衬底的生长和加工是决定性能和良率的关键环节，下面简要概述其生长和加工过程：

## 一、SiC 单晶晶体生长：

1955 年，Lely 等首次提出了一种用于制备碳化硅晶体的升华技术，自此开启了碳化硅材料制备及器件制造的新局面。遗憾的是，由于该方法所得晶体尺寸有限、形状不规则且容易包含多种晶型，难以应用于实际器件制造。1978 年，Tairov 等通过在石墨坩埚上部低温区引入 SiC 籽晶，成功解决了多晶成核问题，为实现高质量大尺寸碳化硅单晶的可控生长提供了可能，该方法被称为改良 Lely 法或物理气相传输法（简称 PVT 法），是目前工业生产所采用的主要方法。

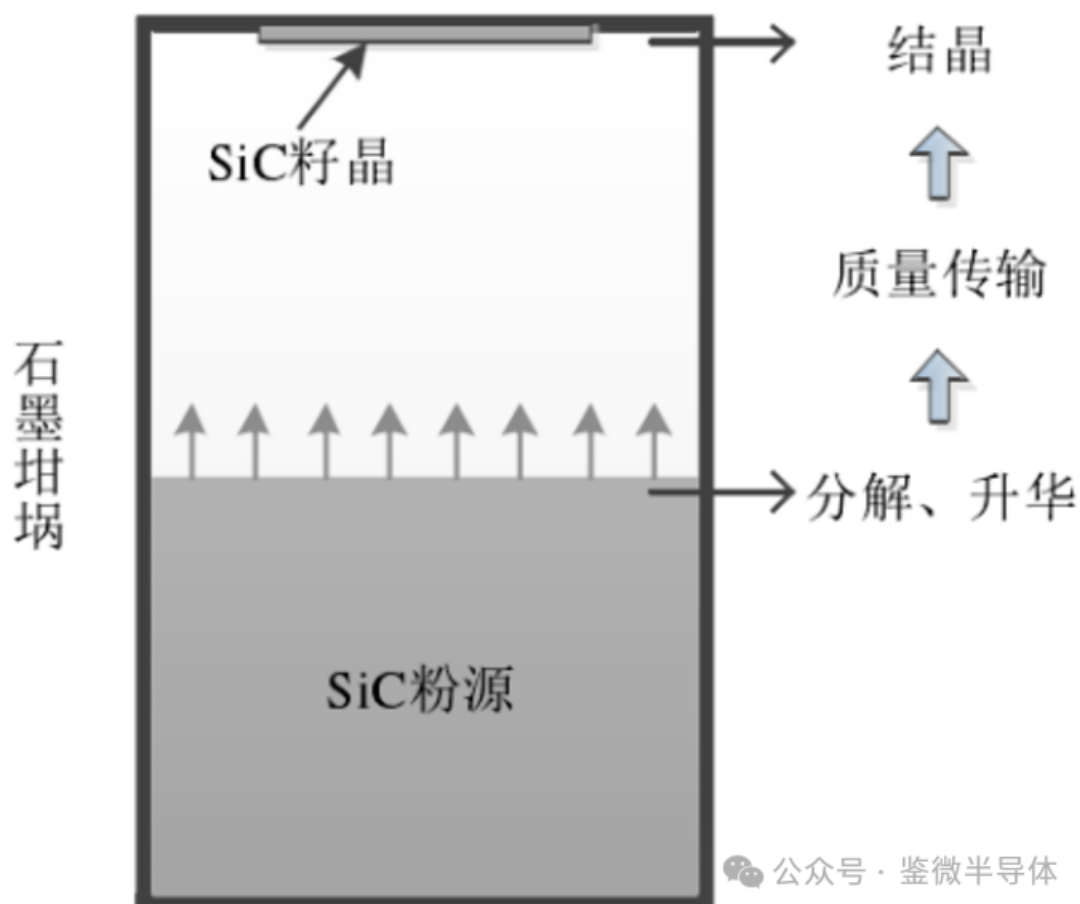


图 1: PVT 法碳化硅晶体生长原理示意图

改良的 Lely 方法最重要的特征是在 SiC 生长过程中引入 SiC 籽晶来保证 SiC 晶型的稳定，故生长中作为“种子”的籽晶显得尤为重要。除了要求籽晶具有特定偏轴角度（一般为  $4^\circ$ ）外，还要求籽晶的面型、电阻率、缺陷等指标要控制在一定范围内。其中，必须管控的缺陷有：微管、多型、包裹、颜色不均、六方空洞等生长缺陷，以及划痕、崩边、裂纹、坑点等加工缺陷。

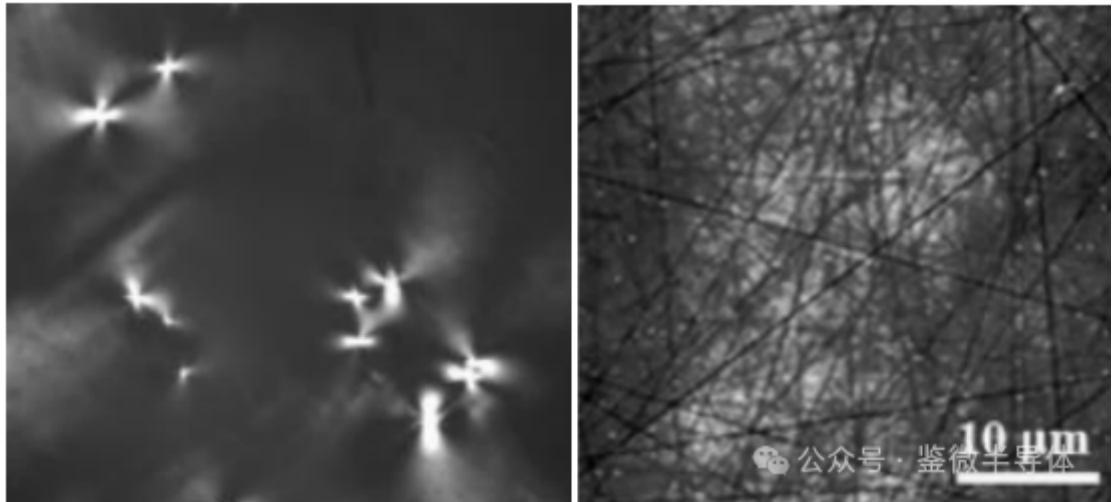


图 2：微管（左）划伤（右）

经过层层选拔的合格籽晶，进行粘接、装炉。碳化硅原料在高温下经过分解与升华，从料面传输至上部籽晶表面，进而在籽晶生长面沉积并结晶，最终形成碳化硅单晶晶锭。

## 二、SiC 晶锭加工：



图 3：PVT 法生长碳化硅晶体实物照片

出炉的碳化硅晶锭，其表面及四周并不规则，要先经过 X 射线定向、滚外圆和磨平面，将晶锭加工成标准尺寸形状的光滑圆柱体，才能进入晶锭加工的关键步骤：切割，即使用精密的切割技术将 SiC 晶锭分割成多个薄片。

目前主要的切割技术包括砂浆线切割、金刚线切割和激光剥离技术。其中，砂浆线切割利用含有磨料的线和砂浆来切割 SiC 晶锭。在几种方式中是最为传统的方法，成本较低，但切割速度较慢，且可能在衬底表面留下较深的损伤层。这些深层损伤即使经过后续的研磨和 CMP 工艺，也无法良好去除，容易在外延工艺中继承、产生划痕，台阶线等缺陷。如下图所示：



图 4：深层划痕（左图竖线）特征：光致发光通道可见（左图）表面形貌通道不可见（右图）

金刚线切割技术采用金刚石颗粒为磨料，通过高速旋转的线来切割 SiC 晶锭。这种方法的切割速度快，表面损伤层较浅，有助于提高衬底的质量和成品率。但其与砂浆切割同样存在 SiC 材料损耗大的问题。而激光剥离技术通过激光束的热效应来分离 SiC 晶锭，可提供非常精确的切割，减

少衬底的损伤，具有速度和损耗等优势。但该切割方法成本较高，技术还有待完善，尚未在 SiC 领域实现规模化应用。

碳化硅晶锭经过上述定向、滚外圆、磨平及切割后，变成翘曲度小、厚度均匀的晶体薄片。原来在晶锭中不可观测的缺陷，此时即可进行初步过程检测，这是判定晶片是否继续加工的重要依据。主要检测的缺陷有：杂晶、微管、六方空洞、包裹物、小面颜色异常、多型等。

### 三、SiC 晶片加工：

由于切割片边缘存在应力，若直接进行后续加工、转运，晶片边缘应力集中容易导致崩边、裂纹等现象。同时，为了减小后续工艺中研磨垫、抛光垫等器材的损耗，需要将切割后锋利的晶片边缘磨削成指定形状，即倒角。

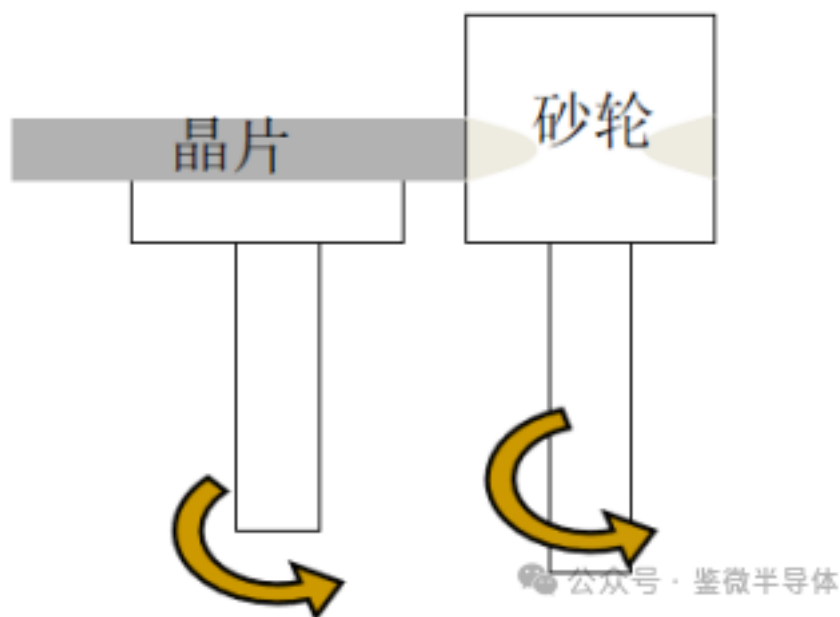


图 5：倒角示意图

倒角后的切割片，其表面平坦度及粗糙度还远达不到中下游外延和器件生产的要求，需进行进一步的研磨、抛光，去除切割留下的锯纹、损伤层。

研磨分为粗磨和精磨，使用粒径越来越小的碳化硼或金刚石磨料，更低的去除速率，以去除前道加工工艺中未能去除的损伤及新引入的损伤。

研磨工艺成本相对较低，但工序繁琐（在 CMP 之前还需要 DMP 加工），灵活性低，自动化水平不高，对于大尺寸晶圆的加工，存在较高的破片风险。此外，由于需要使用研磨液，对环境也会产生一定的影响。减薄工艺的出现，使替代传统研磨工艺成为了可能。由于无需 DMP 加工，减薄工艺采用磨轮加工，使得生产速度更快，面型控制能力更强，适合大尺寸晶圆加工。由于其灵活性更好，可以实现单片加工。工艺过程中无需采用研磨液，因此加工过程也更环保。但目前，磨轮耗材的成本依然较高，限制了该工艺的大规模使用。

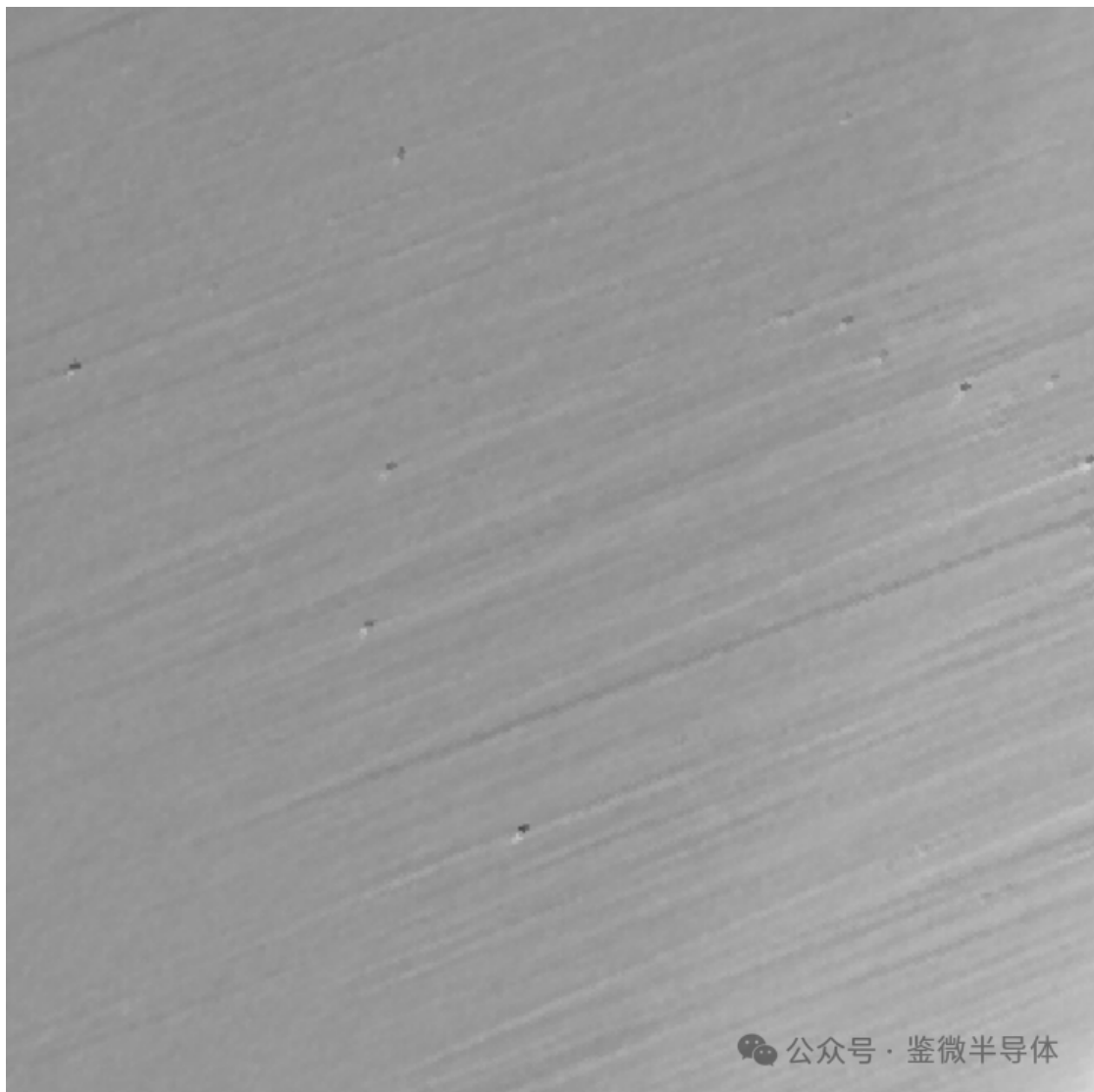


图 6：研磨后表面情况（依然存在浅表损伤）

碳化硅切割片经过减薄或研磨后，SiC 衬底表面损伤变浅，但依然存在，需要通过抛光工艺来获得粗糙度 $<0.1\text{nm}$ 的超光滑表面。化学机械抛光（CMP）是当前最为普及且认可度最高的抛光工艺。首先使用高锰酸钾或双氧水对 SiC 损伤层表面进行氧化。借助氧化铝或氧化硅磨粒与抛光垫的机械摩擦，去除软化后的氧化层。CMP 后，衬底表面基本不存在划痕和亚表面损伤，粗糙度 $<0.1\text{nm}$ ，呈镜面效果，是实现 4H-SiC 衬底表面超光滑无损伤的关键工艺。但较低的材料去除率仍然是 CMP 的主要问题，导致该工序需要大量的加工时间和成本。因此，业内开始搭配辅助增效技术，如等

离子体辅助、催化剂辅助、紫外光辅助、电场辅助等，来提高该工序的生产效率。

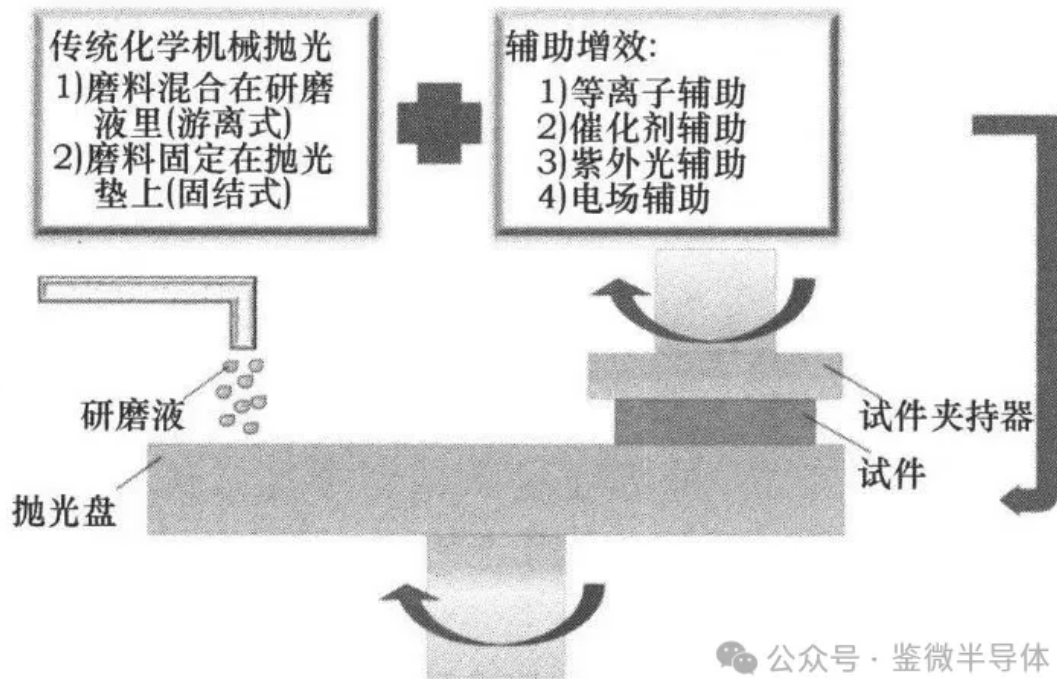


图 7：化学机械抛光工艺示意图

CMP 结束后，碳化硅晶圆表面的断裂键力场很强，极易吸附颗粒、金属、有机物、湿气分子和氧化膜等污染物。需要经过预清洗，对晶片进行宏观检测，对其质量进行初步判级。检测缺陷主要包括：微管、划伤、杂晶、多型/颜色异常、未磨平、崩边、裂纹、包裹物等。

经过层层筛选的准合格晶片，再经过终端清洗（通常采用 RCA）去除表面颗粒、金属、有机物等污染物，以满足外延生长、器件加工的质量要求。湿法清洗所用的清洗液主要有硫酸清洗液（SPM）、碱清洗液（APM）、DHF 等。RCA 的清洗效果需要进一步用表面缺陷测试仪（终检）进行颗粒检测的验证。



目前采用的测试方法主要有激光散射法和共聚焦显微法两种。除了可以检测颗粒，还可以验证 CMP 后的精细划痕，以及前道工序无法观测到的小微管、凹坑、堆叠层错等。终测合格的碳化硅衬底晶片即可打包出货，用于外延生长，进而用于器件加工等各类应用。

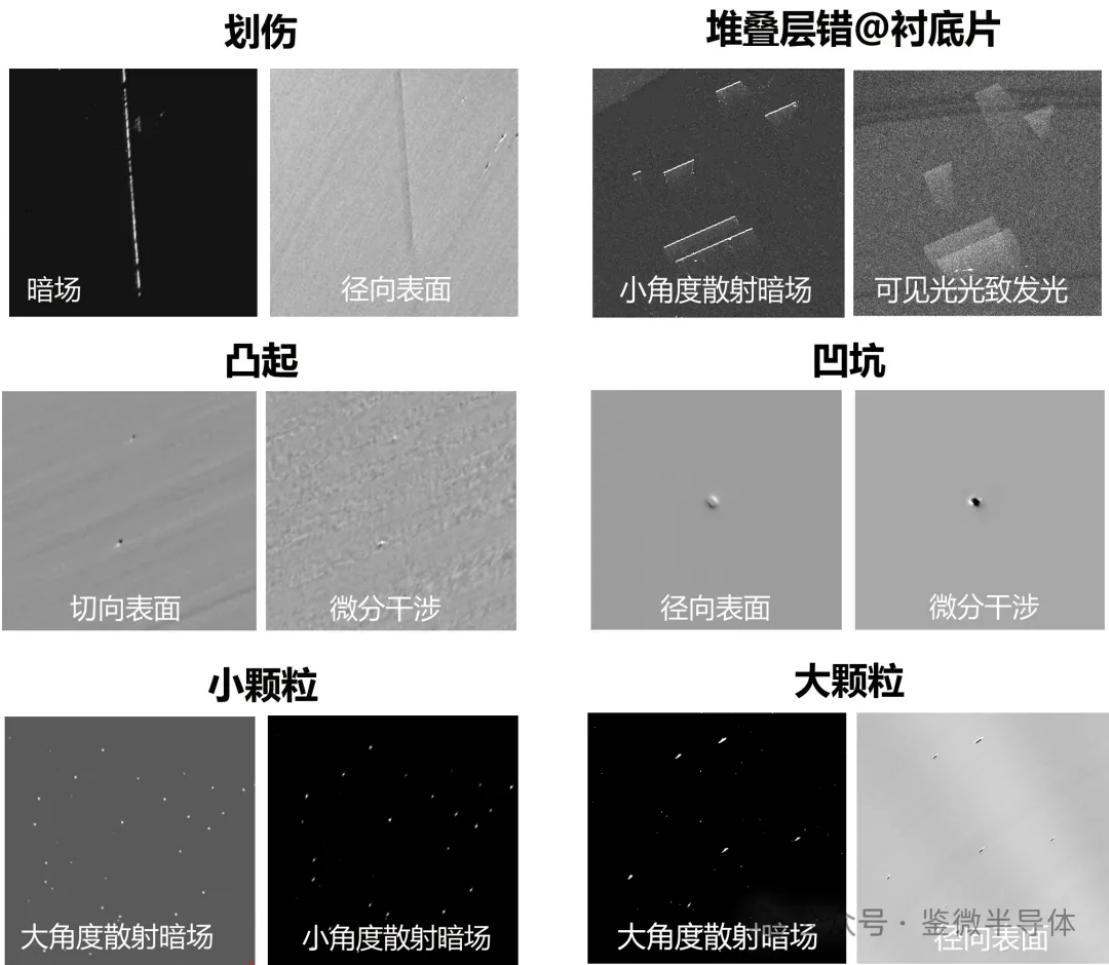
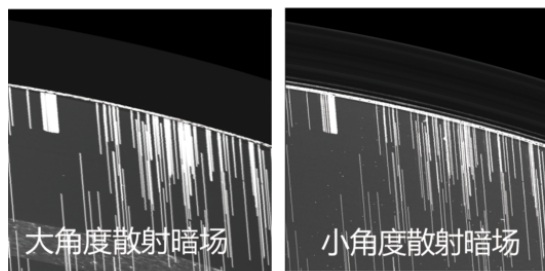
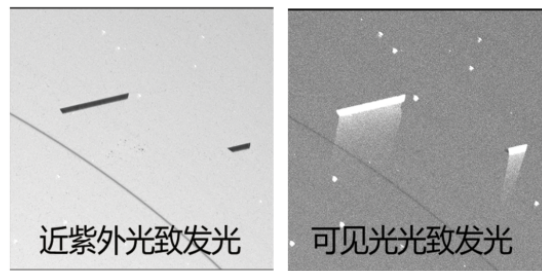


图 8：衬底终检典型缺陷

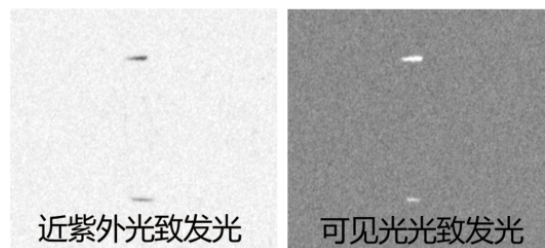
### 台阶线密集



### 堆叠层错@外延片



### 基平面位错



### 三角形

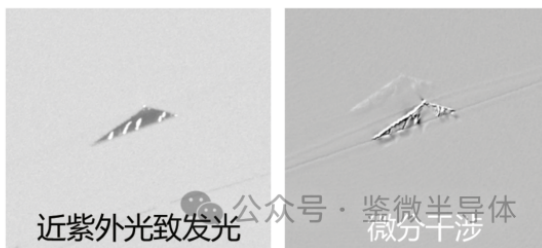


图 9：相关外延缺陷