



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX. 3—/IEC 63068-3:2020

半导体器件 功率器件用碳化硅同质外延片缺陷的无损 检测识别判据 第3部分：缺陷的光致发光检测方法

Semiconductor device-Non-destructive recognition criteria of defects in silicon
carbide homoepitaxial wafer for power devices
Part 3: Test method for defects using photoluminescence

(IEC 63068-3:2020, IDT)

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 光致发光法	5
4.1 概述	5
4.2 原理	6
4.3 测试条件	6
4.4 参数设置	9
4.5 步骤	9
4.6 评估	9
4.7 精度	10
4.8 测试报告	10
附录 A（资料性）缺陷的光致发光图像	12
A.1 概述	12
A.2 BPD	12
A.3 堆垛层错	14
A.4 延伸堆垛层错	15
A.5 复合堆垛层错	16
A.6 多型包裹体	17
附录 B（资料性）缺陷的光致发光谱	18
A.1 概述	18
A.2 BPD	18
A.3 堆垛层错	19
A.4 延伸堆垛层错	22
A.5 复合堆垛层错	23
A.6 多型包裹体	24
参考文献	25

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。

本文件是GB/T XXXX《半导体器件 功率器件用碳化硅同质外延片缺陷的无损检测识别判据》的第3部分。GB/T XXXX已经发布了以下部分：

- 第1部分：缺陷分类；
- 第2部分：缺陷的光学检测方法；
- 第3部分：缺陷的光致发光检测方法。

本文件等同采用IEC 63068-3:2020《半导体器件 功率器件用碳化硅同质外延片缺陷的无损检测识别判据 第3部分：缺陷的光致发光检测方法》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布结构不承担识别专利的责任。

本文件由全国半导体设备和材料标准化技术委员会（SAC/TC203）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/TC203/SC2）共同提出并归口。

本文件起草单位：中国电子科技集团公司第十三研究所、中国电子科技集团公司第四十六研究所、山东天岳先进科技股份有限公司、安徽长飞先进半导体有限公司、之江实验室、浙江大学、中电化合物半导体有限公司。

本文件主要起草人：芦伟立、房玉龙、李佳、王健、张冉冉、李丽霞、张建峰、李振廷、徐晨、杨青、殷源、钮应喜、刘立娜、杨世兴、金向军。

引 言

碳化硅（SiC）作为典型的宽禁带半导体材料，与硅（Si）相比，具有击穿电场强度高、导热率高、饱和电子漂移速率高和本征载流子浓度低等优越的物理性能，非常适合在大功率、高温和高频环境下应用，因此广泛应用于新一代功率半导体器件中。SiC基功率半导体器件相对于硅基器件，具有更快的开关速度、低损耗、高阻断电压和耐高温等性能。

SiC功率半导体器件尚未全面得以应用，主要由于成本高，产量低等问题。其中一个严重的问题之一是SiC外延材料的缺陷问题。目前商用SiC外延材料产品仍存在多种缺陷，急需建立一个SiC同质外延片质量评定标准。

本系列标准由5部分组成。本文件名称为《半导体器件 功率器件用碳化硅同质外延片缺陷的无损检测识别判据 第3部分：缺陷的光致发光检测方法》，确立了商用SiC同质外延片产品缺陷的光致发光检测方法。

- 第1部分：缺陷分类；
- 第2部分：缺陷的光学检测方法；
- 第3部分：缺陷的光致发光检测方法；
- 第4部分：缺陷的光学和光致发光同步检测方法。
- 第5部分：缺陷的X射线形貌检测方法。

半导体器件

功率器件用碳化硅同质外延片缺陷的无损检测识别判据

第 3 部分：缺陷的光致发光检测方法

1 范围

本文件规定了商用碳化硅（4H-SiC）同质外延片生长缺陷光致发光检测的定义和方法，并通过光致发光图像示例和发射光谱示例，实现对SiC同质外延片缺陷的检测和分类。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光致发光 photoluminescence; 光致发光 (PL)

材料吸收光子产生电子激发导致发光。

3.2

光致发光成像 photoluminescence imaging; 光致发光 (PL) imaging

使用激发电子的光源，聚焦光学器件，滤光器，光学图像传感器和计算机系统对缺陷图像进行捕获、处理和分析的技术。

3.3

聚焦光学器件 focusing optics

用于放大和捕捉光学图像的镜头系统。

3.4

滤光器 optical filter

阻挡其它波段仅使特定波段的光通过的光学器件。

3.5

光学成像传感器 optical image sensor

将光学图像转换成数字数据的装置。

3.6

图像采集 imaging capturing

建立晶片缺陷的二维原始数字图像的过程。

3.7

原始数字图像 original digital image

由光学图像传感器拍摄的未进行任何图像处理的数字化图像。

注：原始数字图像通过网格划分成像素，并为每个像素分配一个灰阶。

3.8

电荷耦合器件图像传感器 charge-coupled device image sensor; CCD 图像传感器

将探测的光学信号转变为电学信号的光敏集成电路芯片。

注：CCD 可细分为多个元素，每个元素对应原始数字图像的一个像素。

3.9

像素 pixel

给定一个灰度数字值表示原始数字图像中的最小单位。

3.10

分辨率 resolution

原始数字图像中单位长度（或面积）的像素数量。

3.11

空间分辨率 spatial resolution

能够区分两个紧密间隔的点的的能力。

3.12

灰阶 grey level

灰度的亮度等级。

注：亮度等级经常由灰度等级的正整数表示。

3.13

灰度 greyscale

从黑色到白色的灰色调范围。

示例：

8 位灰度有 2 的 8 次方 (=256) 个灰阶值。灰阶值 0（第 1 阶）对应黑色，灰阶值 255（第 256 阶）对应白色。

3.14

图像处理 image processing

对原始数字图像的软件操作（处理），为后续图像分析做准备。

注：例如，图像处理可以用来消除图像捕获（采集）过程中产生的错误，或将图像信息压缩为基本信息。

3.15

二进制图像 binary image

每个像素包含有 0（黑色）或 1（白色）的图像。

3.16

亮度 brightness

光学图像指定部分的平均灰度值。

3.17

对比度 contrast

光学图像两个指定部分的灰阶差。

3.18

阴影校正 shading correction

用于校正晶片表面照明不均匀的软件方法。

3.19

阈值化 thresholding

从灰度图像中创建二进制图像的过程，此过程将值大于给定阈值的像素精确的显示为白色，并将其他像素设置为黑色。

注：建立二进制图像，在原始灰度图像中每个像素的灰度由 0（黑色）和 1（白色）替代，取决于灰度大于或小于或等于阈值。

3.20

边缘检测 edge detection

在给定数字图像中分离和定位缺陷和表面边缘的方法。

3.21

图像分析 image analysis

通过软件在处理后的图像中提取图像信息。

3.22

图像评估 image evaluation

通过缺陷分类方案将一个或多个特征图像的分析结果关联起来的过程。

3.23

参考晶片 reference wafer

已通过评估的用于参数设置、检查缺陷光学检测过程的再现性和重复性的晶片。

3.24

测试晶片 test wafer

用于评估缺陷的 SiC 同质外延片。

3.25

晶向 crystal direction

通常用 $[u\ v\ w]$ 表示，描述 a, b, c 晶轴基本矢量的矢量方向。

注：4H-SiC 属于六方晶系，常用 $[u\ v\ t\ w]$ 来表示晶向。

[来源：ISO 24173: 2009, 3.3, 有修改]

3.26

缺陷 defect

晶体的不完美部分。

3.27

微管 micropipe

沿近似垂直基面方向延伸的中空管。

3.28

穿透型螺位错 threading screw dislocation; TSD

在近似垂直基面方向穿透晶体的螺位错。

3.29

穿透型刃位错 threading edge dislocation; TED

在近似垂直基面方向穿透晶体的刃位错。

3.30

基平面位错 basal plane dislocation; BPD

平行于基面的位错。

3.31

划痕 scratch trace

由衬底表面的机械损伤而产生的密集位错线。

3.32

堆垛层错 stacking fault

晶面的叠加序列异常造成的单晶材料中的平面晶体缺陷。

3.33

延伸堆垛层错 propagated stacking fault

从衬底向外延层表面延伸的堆垛层错。

3.34

复合堆垛层错 stacking fault complex

由一个基面堆垛层错和一个棱柱面堆垛层错组合而成的层错。

3.35

多型包裹体 polytype inclusion

和同质外延材料晶型不同的体缺陷。

3.36

颗粒包裹体 particle inclusion

存在于同质外延层中的微米级的颗粒。

3.37

台阶聚集簇 bunched-step segment

由台阶聚集组成的表面形貌粗糙形貌缺陷。

3.38

表面颗粒 surface particle

外延结束后沉积在外延层表面的颗粒。

4 光致发光法

4.1 概述

通过光致发光 (PL) 检测方法评估具有典型光致发光 (PL) 特征的缺陷。以下列出了沿 $[11\bar{2}0]$ 晶

向偏晶向 4° 的 n/n+型 4H-SiC 同质外延片中的缺陷,其光致发光(PL)图像的检测激发波长大于 650 nm:

- 部分线缺陷显示为明亮的线形图像,如基平面位错(BPD);
 - 部分面缺陷显示为暗反差图像,如堆垛层错、延伸堆垛层错、复合堆垛层错以及多型包裹体。
- 使用波长 400nm 到 500nm 的激发光检测缺陷时,堆垛层错表现出明亮的反差图像。

没有典型光致发光(PL)特征的缺陷,或具有弱的光致发光(PL)反差图像的缺陷,将通过其他方法如光学检测和 X 射线形貌图像评估。这些缺陷包括微管、穿透型螺位错(TSDs)、穿透型刃位错(TEDs)、划痕、颗粒包裹体、台阶聚集簇以及表面颗粒。

4.2 原理

捕获缺陷的光致发光(PL)图像并转换为数字格式。在此过程中,用能量远大于 4H-SiC 晶体禁带宽度的激发光照射 SiC 同质外延片,所得到的光致发光(PL)被收集并记录为包含缺陷的晶片指定区域的光致发光(PL)图像。光致发光(PL)通过光学图像传感器进行检测,如 CCD 图像传感器,光致发光(PL)图像通常利用光学滤光器获取,滤光器透过特定波段范围的 PL 光,以适合每种缺陷类型的检测。然后获得的光致发光(PL)图像(数字图像)经过图像的灰度处理。经过特定的图像分析,图像信息被简化为专用于描述检测到的缺陷的一组值。

灰度图像由晶片中缺陷的初始数字图像产生。此图像可以转换为二进制图像(阈值)。可测量缺陷的大小和形状,同时计算获得晶片特定区域的缺陷分布和数量。

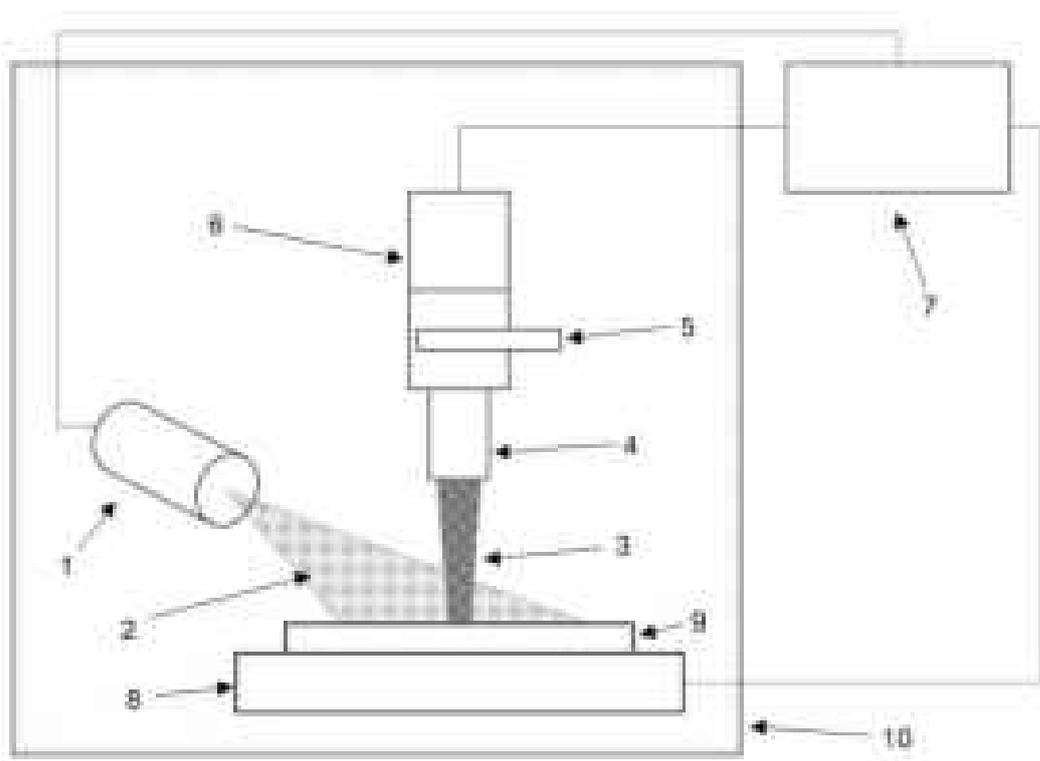
注:沿斜切方向延伸的面缺陷和体缺陷的大小和同质外延层厚度相关。这类缺陷的细节和光致发光(PL)图像尺寸的检测方法将在附录 A 和 4.6.2 进行描述。

4.3 测试条件

4.3.1 测试设备

4.3.1.1 光致发光(PL)成像系统

4H-SiC 同质外延片中缺陷的光致发光(PL)图像测试设备如图 1 所示。测试设备包括光源、聚焦光学器件、滤光器、CCD、载物台、控制/处理器以及暗箱。每个部件应具有以下规定的性能,不同的晶片规格和缺陷类型需要最佳设置的光源、聚焦光学器件以及滤光器,以获取要分析的明显的光致发光特征。因此,需要准备特定应用的光源、聚焦光学器件和滤光器的组合。



标引序号说明：

- 1——光源；
- 2——激发光；
- 3——光致发光；
- 4——聚焦光学器件；
- 5——滤光器；
- 6——CCD；
- 7——控制器/处理器；
- 8——晶片载台；
- 9——测试晶片或参考晶片；
- 10——暗箱或机架外壳。

图 1 光致发光 (PL) 成像系统结构示意图

4.3.1.2 光源

气体放电灯如汞-氙气灯和规定激发波长的二极管激光器可以用作电子激发的典型光源。当气体放电灯的白光用于电子激发,应使用适合光源的光学滤光器来获取具有合适波段的激发光以进行光致发光 (PL) 成像。选择的激发光波长等于或高于 4H-SiC 的带隙能量。例如,汞-氙气灯的 313 nm 或 365 nm 发射光适合用于 4H-SiC 的电子激发。

4.3.1.3 物镜

应选择物镜来调整检测区域和焦深以消除来自晶片背面的影响。

4.3.1.4 滤光器

选择满足检测同质外延片特定缺陷的滤光器。

注：缺陷的典型光致发光（PL）光谱在附录 B 中描述

4.3.1.5 一致性和稳定性

应优化光源和聚焦光学器件的组合，以实现晶片表面上激发光强度的一致性。在适当的范围内调整外延层上每个点的光致发光（PL）强度，以便清晰地检测到缺陷。激发光强度的一致性可通过硬件和/或软件获得。

保持激发光的光谱和能量分布在测试周期内稳定不变。

4.3.2 晶片位置和聚焦

晶片应位于笛卡尔坐标系（X - Y）或圆柱坐标系（R - θ ）的平面上。第三轴（Z）是图像采集系统的光轴。Z 轴垂直于平面，其与平面的交点应为焦点。图像捕获光学器件的前端和晶片表面的距离是固定的，与晶片的厚度无关，因此聚焦和放大率相互不产生影响。

4.3.3 图像采集

光致发光（PL）成像系统通常由光源、聚焦光学器件、作为光学数字传感器的 CCD 图像传感器、照明几何调整系统、晶片载台和不透光外壳组成。暗箱或机架外壳被用来阻挡外部光线的干扰。光致发光（PL）成像系统应具有足够高的空间分辨率，以捕捉小尺寸缺陷的清晰特征。图像信息在光学图像传感器单元可直接数字化。

为了保证图像采集过程的重复性和再现性，应定期进行参数校准。使用指定的参考晶片来执行校准，例如硅或碳化硅晶片。

4.3.4 图像处理

图像处理涵盖了许多功能，如亮度、对比度、边缘检测、阴影校正和反演等。

不同的软件解决方案应该采用不同的数学算法进行相似处理。不同的图像处理算法所产生的处理后的图像也不会完全相同，使用参考晶片来进行参数设置，以确保测试结果具有可比性。

4.3.5 图像分析

图像分析有两种方法：二进制（黑/白）分析和灰度分析。采用阈值程序能够从灰度图像获得二进制图像。

为成功检测测试晶片中的缺陷应使用适当的算法进行图像分析。

4.3.6 图像评价

图像分析的结果是与特定应用相关的一组值，根据缺陷分类方案将这组值转换成一个或多个特征值。

4.3.7 文档

记录光致发光（PL）成像系统的相关参数：

- a) 光源的激发光波长；
- b) 光学图像传感器通过滤光器检测的波长范围；
- c) 光致发光（PL）成像系统的空间分辨率。

4.4 参数设置

4.4.1 概述

测试晶片应与参考晶片进行对比分析。

参数设置的目的是为了固定图像采集参数，使图像分析能够通过参考晶片来识别测试晶片的缺陷的表面特征。进行观察比较以确认参考晶片和测试晶片之间检测到的缺陷具有相关性。

在结构上参考晶片宜与测试晶片相似，最好在同一实验室或工厂使用相同的设备和工艺获得参考晶片和测试晶片。

4.4.2 参数设置过程

使用一组参考晶片进行如下参数设置。

使用选定的光学成像系统对测试晶片上的每个缺陷进行成像。测试晶片上的缺陷图像应与参考晶片上的缺陷图像进行视觉比较。

4.5 步骤

准备用于光致发光（PL）成像的测试晶片，方法如下。

使用选定的光致发光（PL）成像系统对测试晶片上的每个缺陷进行成像。测试晶片上的缺陷图像应与参考晶片上的缺陷图像进行视觉比较。

4.6 评估

4.6.1 概述

与人工评估缺陷相比，光致发光（PL）成像系统能通过典型光致发光（PL）特征确定缺陷的尺寸和形状（见 4.1 和附录 A）。

图像分析提供数据识别缺陷的位置和种类。测试晶片的去边应小于 5mm。

4.6.2 面缺陷和体缺陷的平均宽度

已知的同质外延层厚度 d ，单位为微米，斜切角为 4° ，可以使用以下公式计算除颗粒包裹体和表面颗粒外的面缺陷和体缺陷的平均宽度 l

$$l = \frac{d}{\tan(4^\circ)}$$

例如，同质外延层厚度为 10 μm 和 30 μm 的上述缺陷的平均宽度 l 分别约为 145 μm 和 430 μm 。

当面缺陷和体缺陷成核于外延生长过程中时，缺陷宽度小于上述公式的计算值。

4.6.3 评估过程

如果识别出的目标缺陷是延伸缺陷或表面缺陷，则所有这些缺陷的数量应逐项计算。

生成缺陷图，显示晶片整个表面所检测到的缺陷的位置，晶片的定向平面或缺口的位置也应在图中注明。缺陷图的坐标原点应该是晶片的中心。坐标的水平轴应该平行于晶片的主参考边。

4.7 精度

目前尚无关于该测试方法精度的信息。

4.8 测试报告

4.8.1 必备要素

测试报告应该包含以下信息：

- a) 检测结果：光致发光（PL）成像检测到的缺陷种类的数量；
- b) 测试晶片：
 - 1) 制造商；
 - 2) 产品名称；
 - 3) 晶片编号；
- c) 参考标准文件；
- d) 光致发光（PL）成像系统：
 - 1) 光源的激发光波长；
 - 2) 晶片表面激发光强度；
 - 3) 光学成像传感器经过滤光器的波长范围；
 - 4) 光致发光（PL）成像系统的分辨率；
- e) 测试数据。

4.8.2 可选要素

测试报告中可包含以下信息：

- a) 检测结果：
 - 1) 所有检测缺陷的位置（平面坐标）；
 - 2) 缺陷分布图；
- b) 程序中的任何偏差；

c) 测试过程中的异常情况。

附录 A
(资料性)
缺陷的光致发光图像

A.1 概述

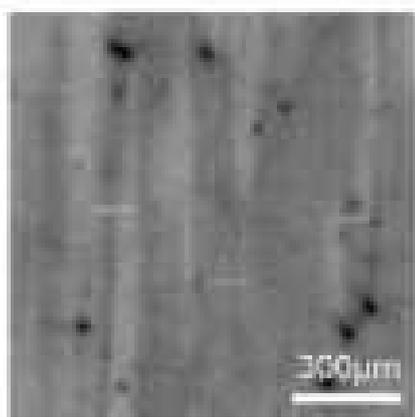
本附录给出了4H-SiC同质外延片（外延层厚度为 $10\ \mu\text{m}$ ）缺陷的典型光致发光（PL）图像和特征，光致发光（PL）成像系统所用的激发光波长为 $365\ \text{nm}$ ，使用 $650\ \text{nm}$ 滤波器检测缺陷，图像的像素分辨率为 $2\ \mu\text{m}$ 。图A.1到图A.5中，左边分图为光致发光（PL）图像，右边分图为缺陷平面观察图像的示意图。

A.2 基平面位错（BPD）

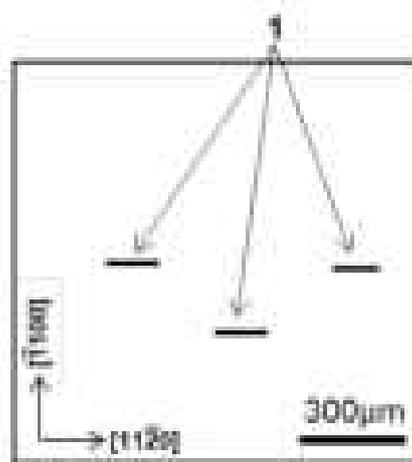
基平面位错（BPD）在光致发光（PL）图像中显示为明亮的线，在激发波长大于 $650\ \text{nm}$ 下捕获。

注1：平均宽度 l ，单位为微米，本类型缺陷由外延层厚度 d （单位为微米）确定（见4.6.2）。

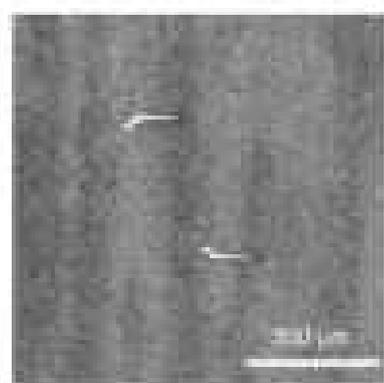
注2：BPDs延伸方向一般平行或近似的平行于台阶流方向。也有一些基平面位错（BPD）延伸沿着其他方向或者延伸方向发生弯曲。



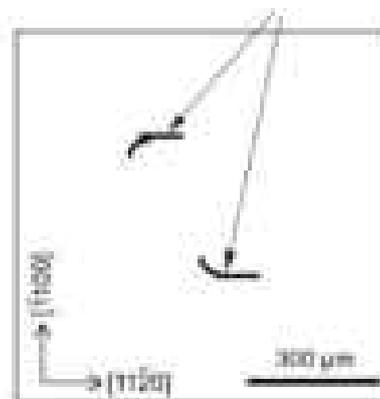
a) BPD 示例 1- 光致发光（PL）图像



b) BPD 示例 1- 示意图



c) BPD 示例 2 - 光致发光（PL）图像



d) BPD 示例 2 - 示意图

标引序号说明：

1 ——BPD。

图 A. 1 BPD

A.3 堆垛层错

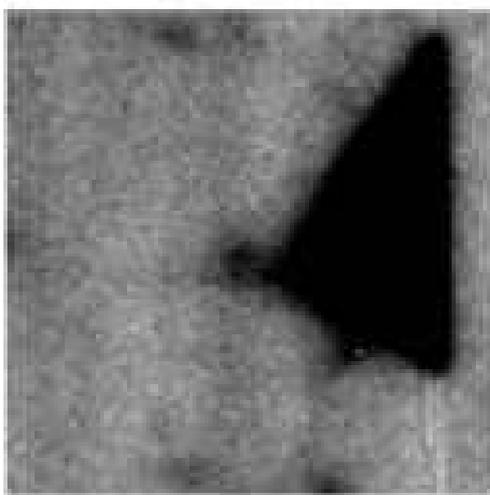
堆垛层错展示了4H-SiC同质外延层的光致发光(PL)图像的典型特征。其显示的典型光致发光(PL)光谱由其堆垛次序决定。

注1: 堆垛层错的类型可以通过检测辐射光谱辨识。

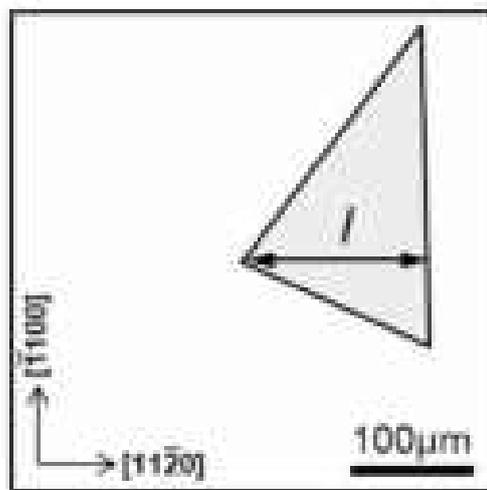
注2: 弗兰克型堆垛层错的三种类型可在常温下的可见光波长范围检测获得(见图B.2)。

注3: 肖克莱型堆垛层错的四种类型可在常温下的可见光波长范围检测获得(见图B.3)。

注4: 此种类型缺陷的平均宽度在微米级, 由外延层厚度 d 决定。



a) 堆垛层错示例-光致发光(PL)图像



b) 堆垛层错示例-示意图

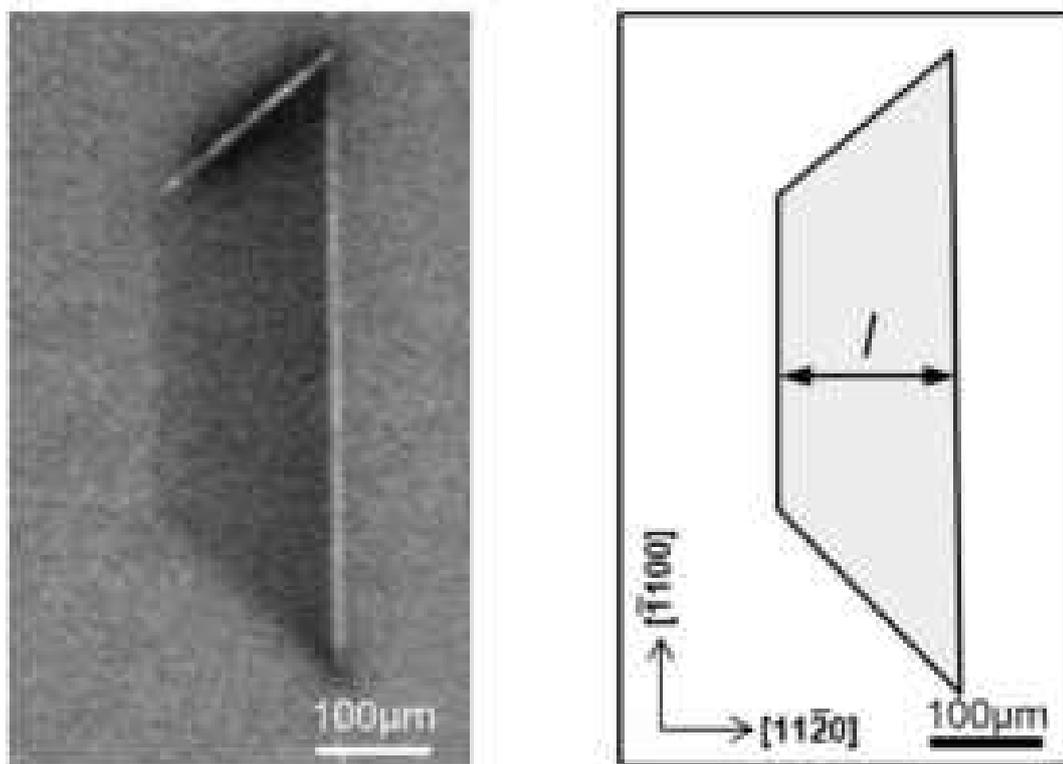
图 A.2-堆垛层错

A.4 延伸堆垛层错

同质外延层中的堆垛层错，由衬底中的堆垛层错延伸而来。延伸堆垛层错显示的光致发光（PL）特征由堆垛次序决定，如示意图“A.3延伸堆垛层错”。

注1：此类型缺陷的平均宽度 l 在微米级，取决于同质外延层厚度 d 。

注2：此类型缺陷常被称为“条状堆垛层错”。



a) 延伸堆垛层错示例-光致发光（PL）图像

b) 延伸堆垛层错示例-示意图

图 A.3-延伸堆垛层错

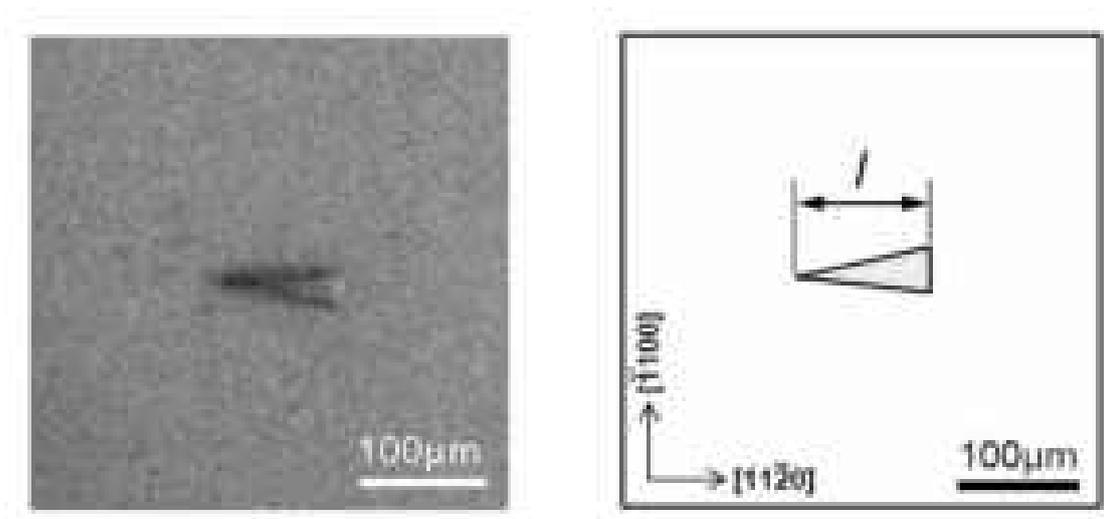
A.5 复合堆垛层错

复合堆垛层错显示4H-SiC同质外延晶片光致发光(PL)图像的典型特征:例如,辐射波长大于650 nm时沿着切片方向检测到暗针(针状)形貌特征。

注1:辐射波长为420nm时捕获到明亮对比图像的堆垛层错复合物,其具有与弗兰克型堆垛层错相似的堆垛次序(见图B.5)。

注2:此类型缺陷的平均宽度 l ,微米级,取决于同质外延层厚度 d (见4.6.2)。

注3:这种缺陷常被称作“胡萝卜缺陷”。



a) 复合堆垛层错示例-光致发光(PL)图像

b) 复合堆垛层错示例-示意图

图 A.4-复合堆垛层错

A.6 多型包裹体

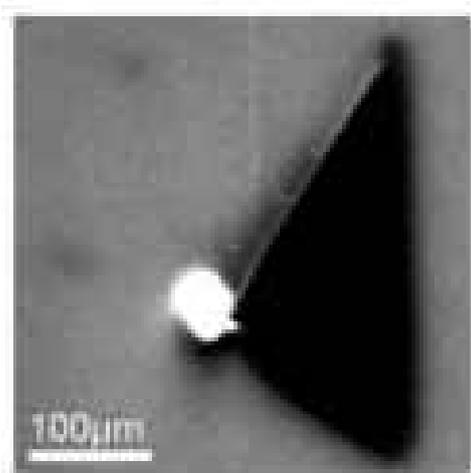
多型包裹体展示4H-SiC同质外延晶片光致发光（PL）图像的典型形貌：例如，多种形状的暗三角，辐射波长大于650 nm时延切片方向捕获。

注1：辐射波长在500-600nm时捕获多型包裹体，显示为明亮对比图像（见图B.6）；

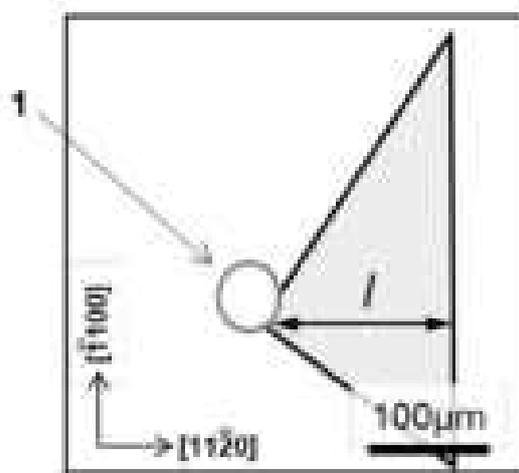
注2：此类型缺陷的平均宽度 l 为微米级，取决于同质外延层厚度 d （见4.6.2）。

注3：此类缺陷的形成原因一般是颗粒物造成，也可能是机械抛光在衬底表面造成的损伤造成。

注4：此类缺陷常被称为“三角包裹体”、“三角型缺陷”或“彗星型缺陷”。



a) 多型包裹体示例-光致发光（PL）图像



b) 多型包裹体示例-示意图

标引序号说明：

1 —— 颗粒。

图 A.5-多型包裹体

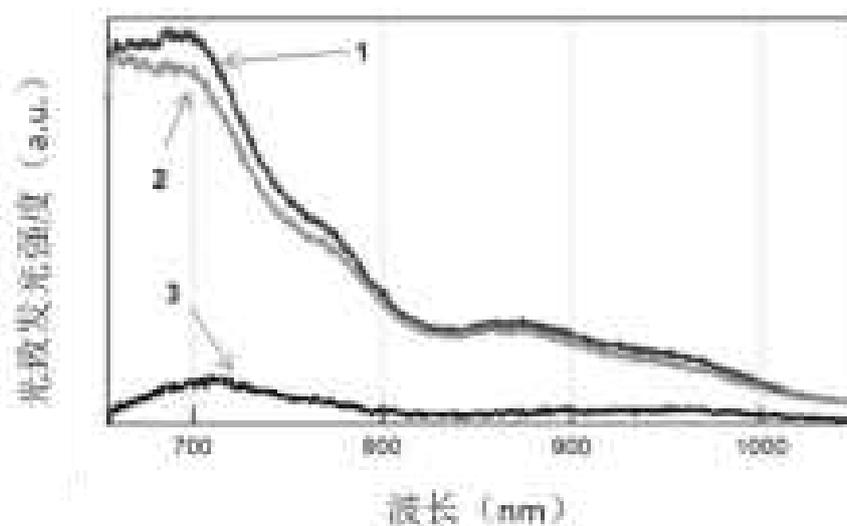
附录 B
(资料性)
缺陷的光致发光谱

A.1 概述

本附录描述了典型光致发光 (PL) 特征的缺陷在常温下获得的光致发光 (PL) 谱。光致发光 (PL) 谱的获得采用了焦距为32cm的分光计, 使用325nm He-Cd激光器作为激发光源, 采用具有150线/mm格栅的分光计, 并用CCD捕捉。激光束进入显微镜并通过物镜聚焦。激光束在样品晶片表面被聚焦为2 μm 左右的光斑, 能量密度一般为30kW/cm²~100kW/cm²。

A.2 BPD

“有或无BPD的差值”表示有BPD的光致发光 (PL) 光谱减去没有BPD的光致发光 (PL) 光谱。这种情况下, BPD在光致发光 (PL) 图像中显示为明亮的点。



标引序号说明:

1——有 BPD;

2——无 BPD;

3——有或无 BPD 的差值。

图 B.1 BPD 的光致发光 (PL) 光谱

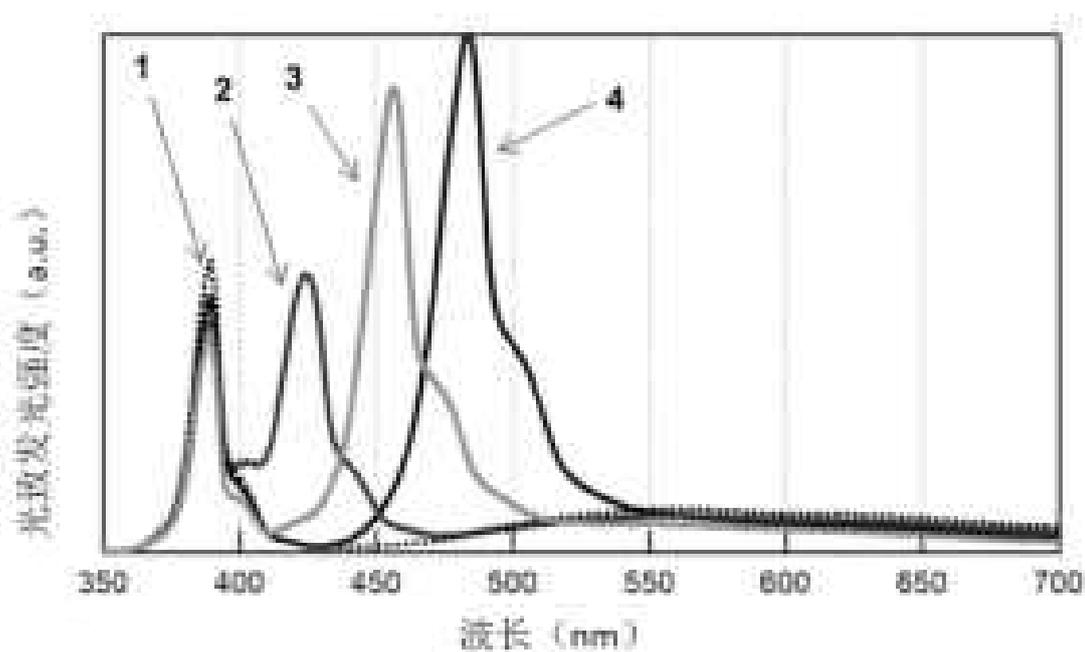
A.3 堆垛层错

堆垛层错的类型可通过检测其辐射光谱辨别。

注1：弗兰克型堆垛层错的三种类型，常温下可在激发波长为488 nm（内部），457 nm（多层）和424 nm（外部）检测[2]（见图B.2）。

注2：肖克莱型堆垛层错的四种类型，常温下可在激发波长为420 nm（单层）[3]，455nm（四层）[4]，480 nm（三层）[5]，和500 nm（双层）[6]检测（见图B.3）。

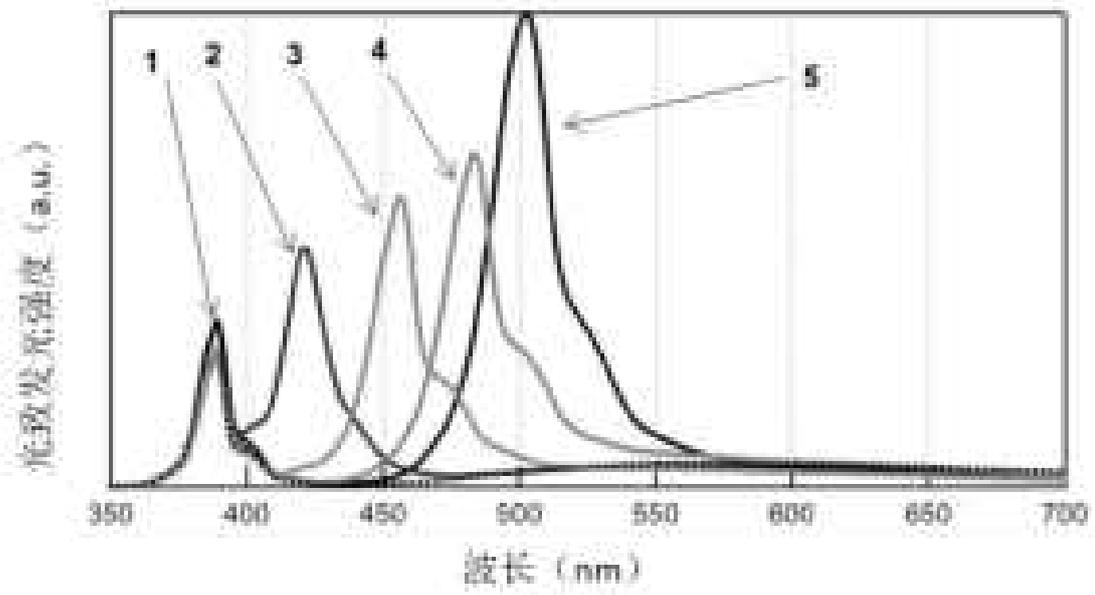
注3：堆垛层错的所有类型在大于650 nm激发波长下检测时显示为暗对比图像（见图B.4）。



标引序号说明：

- 1 —— 无缺陷区域；
- 2 —— 外部；
- 3 —— 多层；
- 4 —— 内部。

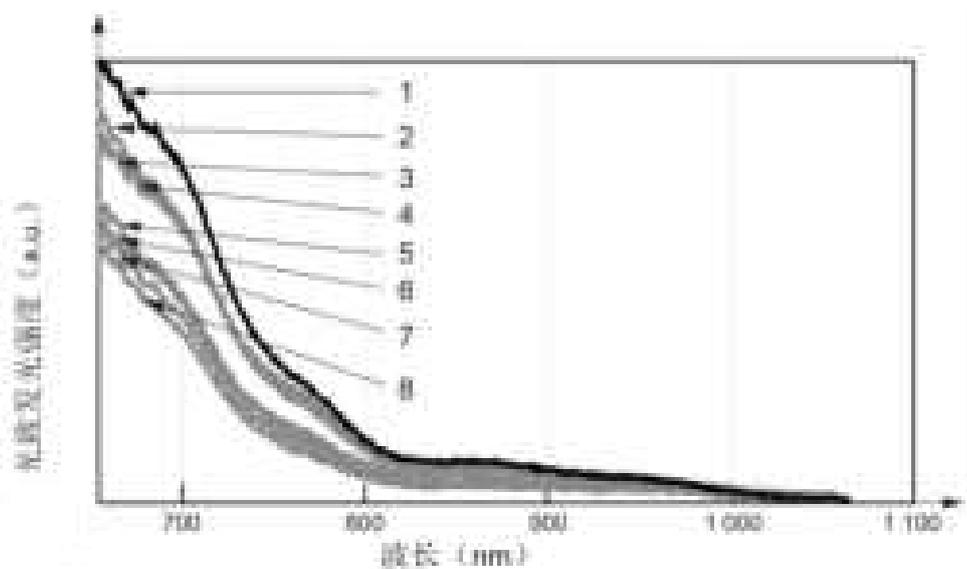
图 B. 2-弗兰克型堆垛层错的光致发光（PL）光谱



标引序号说明：

- 1 —— 无缺陷区域；
- 2 —— 单层；
- 3 —— 四层；
- 4 —— 三层；
- 5 —— 双层。

图 B. 3-肖克莱型堆垛层错的光致发光 (PL) 光谱



标引序号说明：

- 1—— 无缺陷区域；
- 2 —— 弗兰克型（外部）；
- 3 —— 肖克莱型（单层）；
- 4 —— 肖克莱型（三层）；
- 5 —— 弗兰克型（多层）；
- 6 —— 肖克莱型（四层）；
- 7—— 弗兰克型（内部）；
- 8 —— 肖克莱型（双层）。

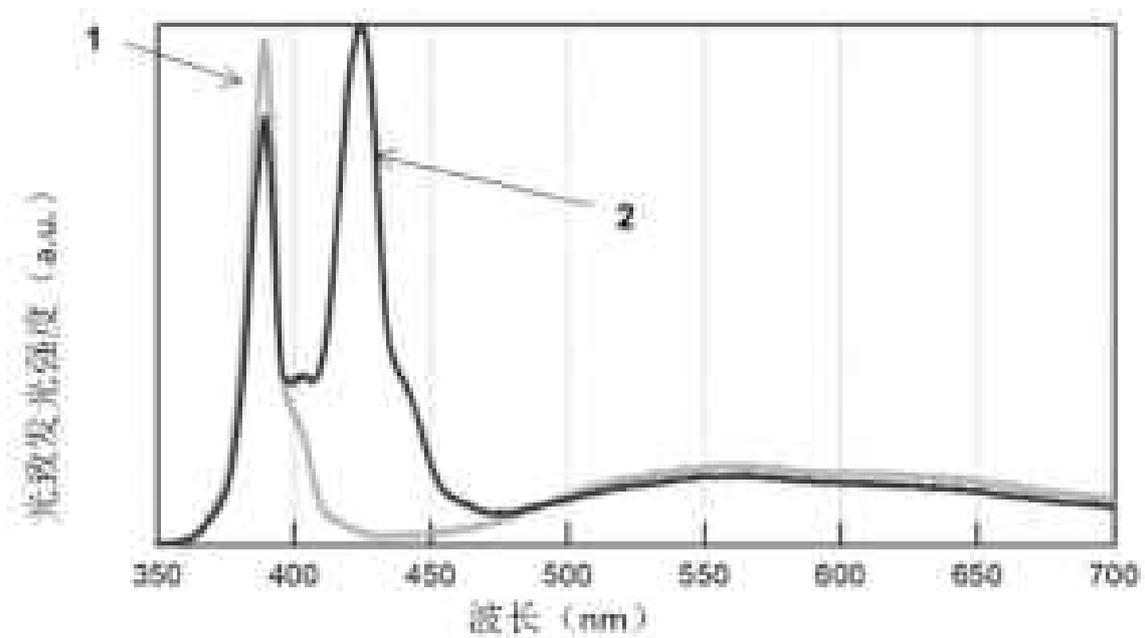
图 B. 4-波长范围大于 650 nm 的多种堆垛层错的光致发光（PL）光谱

A.4 延伸堆垛层错

延伸堆垛层错显示的光致发光（PL）光谱取决于其堆垛次序，同“B.3 堆垛层错”示意图。

A.5 复合堆垛层错

复合堆垛层错显示光致发光 (PL) 光谱在激发波长为420 nm, 起源于类似弗兰克型堆垛层错 (外部) 的堆垛次序。



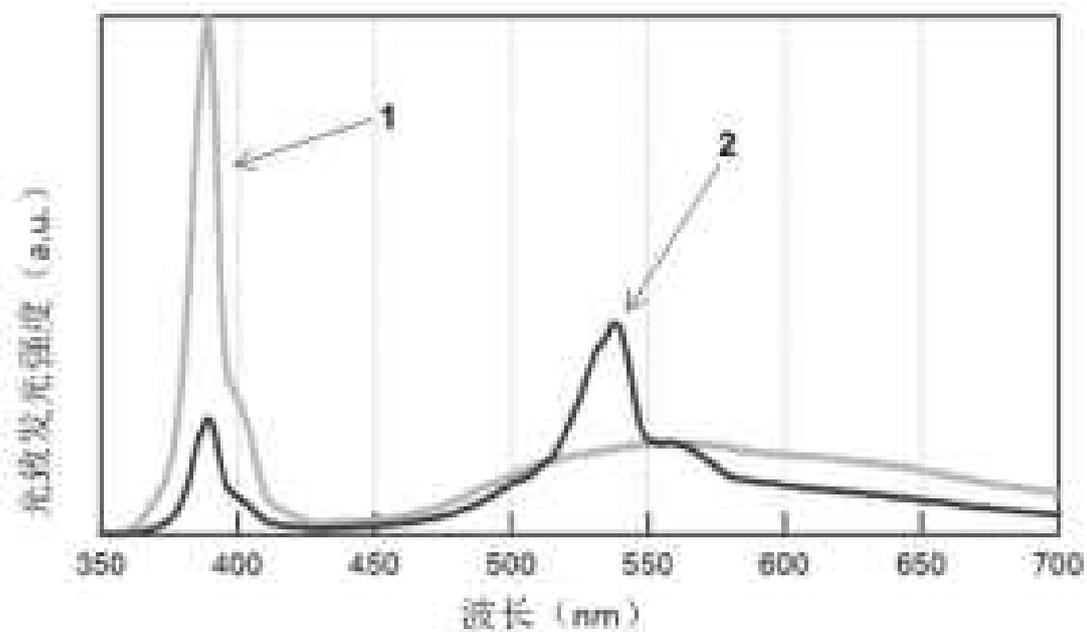
标引序号说明:

- 1 —— 无缺陷区域;
- 2 —— 复合堆垛层错中的弗兰克型堆垛层错。

图 B.5-复合堆垛层错的光致发光 (PL) 光谱

A. 6 多型包裹体

多型包裹体显示光致发光（PL）光谱在激发波长为500-600 nm，起源于类似报道的3C-SiC层[7]的堆垛次序。



标引序号说明：

- 1 —— 无缺陷区域；
- 2 —— 多型包裹体。

图 B. 6-多型包裹体的光致发光（PL）光谱

参考文献

- [1] ISO 24173:2009, Microbeam analysis – Guidelines for orientation measurement using electron backscatter diffraction.
- [2] I. Kamata, X. Zhang, H. Tsuchida, *Applied Physics Letters*, 97, 172107 (2010)
- [3] J. Hassan, J. P. Bergman, *Materials Science Forum*, 645- 648, 327 (2010)
- [4] S. Izumi, H. Tsuchida, I. Kamata, T. Tawara, *Applied Physics Letters*, 86, 202108 (2005)
- [5] G. Feng, J. Suda, T. Kimoto, *Applied Physics Letters*, 94, 091910(2009)
- [6] G. Feng, J. Suda, T. Kimoto, *Applied Physics Letters*, 92, 221906(2008)
- [7] N. A. Mahadik, R. E. Stahlbush, S. B. Qadri, O. J. Glembocki, D. A. Alexson, K. D. Hobart, J. D. Caldwell, R. L. Myers-Ward, J. L. Tedesco, C. R. Eddy Jr., D. K. Gaskill, *Journal of Electronic Materials*, 40, 413 (2011)
-