**国家标准《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》**

**编制说明（预审稿）**

1. **工作简况**
2. **立项目的和意义**

碳化硅（SiC）作为典型的宽禁带半导体材料，与硅(Si)相比，具有击穿电场高、导热率高、饱和电子漂移速度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。当前，全球半导体产业正处于深度变革，化合物半导体成为产业发展新的关注点，我国正加紧产业布局，抢占发展的主动权。

SiC外延片是在碳化硅单晶抛光片上经过化学气相沉积反应生长一层导电类型、载流子浓度、厚度和晶格结构都符合要求的碳化硅单晶薄膜，SiC同质外延片中存在的缺陷是衡量SiC外延片质量的重要参数，也直接影响SiC基功率半导体器件的成品率和可靠性，准确识别SiC外延片中的缺陷，对于SiC外延片的制备、使用有重要的意义。关于SiC外延片中的缺陷分类及其检测方法，在我国目前均无统一的标准，需制定国家标准，规范SiC外延片的缺陷分类及其检测方法，指导SiC外延片的生产和使用，促进国内SiC半导体材料和SiC基功率半导体器件的发展。

1. **任务来源**

《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》标准制定是2021年第4批国家标准计划项目，计划项目批准文号：国标委发【2021】41号，计划项目代号：20214654-T-469。归口单位为全国半导体设备和材料标准化技术委员会（TC 203），执行单位为全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分会（TC 203/SC2），承办单位为中国电子科技集团公司第十三研究所，项目周期为18个月。

1. **主要工作过程**

**3.1、起草阶段**

2022.1～2022.6: 成立了编制组,查询、收集和分析相关标准资料。编制组由半导体材料的设计人员、工艺人员、检验试验管理人员和标准化人员组成；编制组首先对IEC 63068-3 Ed1.0:2020进行翻译和研究，同时对收集的SiC外延材料相关的标准和资料进行分析，在草案的基础上对标准的内容进行进一步的完善，形成《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》征求意见稿。

1. **标准主要起草单位及人员所做的工作**

中国电子科技集团公司第十三研究所作为本标准的主要承办单位，是国内最早开展SiC同质外延材料生长研究的单位之一，多年从事各种材料的研制工作，目前已实现SiC外延材料工程化生产，形成了碳化硅外延工艺生产和测试平台，掌握了设计仿真、缺陷表征、参数检测以及稳定性控制的全套外延生产技术，SiC外延片产品掺杂浓度不均匀性、厚度不均匀性、缺陷等典型指标达到国内领先水平，技术力量雄厚，测试分析手段丰富，拥有多台套国际先进、全系列的半导体外延材料测试设备，具备制定本标准的技术实力，在标准制定过程中同时也牵头组织了标准的试验验证工作，为标准技术内容的确定奠定了技术基础。

本标准的其他起草单位有之江实验室、浙江大学、安徽长飞先进半导体有限公司、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、中电化合物半导体有限公司。

其中安徽长飞先进半导体有限公司、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参与了实验和复验、标准的不同部分的翻译工作。之江实验室、浙江大学对标准的讨论稿进行校准和修订工作。

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。

1. **标准编制原则及确定标准主要内容的依据**
2. **编制原则**

本标准等同采用IEC 63068-3 Ed1.0:2020《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》。标准编写符合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》、GB/T 1.2-2020 《标准化工作导则 第2部分：以ISO/IEC标准化文件为基础的标准化文件起草规则》的规定。

1. **标准主要内容的确定依据**

除编辑性修改外，标准的结构和内容与IEC 63068-3:2020保持一致。本标准包含范围、引用文件、术语和定义和缺陷分类四章内容。具体说明如下：

* 1. **范围**

本文件确立了利用光致发光检测商用4H-SiC外延晶圆缺陷的定义和方法。通过列举光致发光图谱和发射光谱等对SiC外延晶圆的缺陷做了鉴定和分类。

**2.2、规范性引用文件**

本文件没有规范性引用文件。

**2.3、术语和定义**

本文件给出了光致发光、光致发光成像、光学聚焦、光学滤光片、光学成像传感器、图像捕捉、初始数字化图像、电荷耦合器件图像传感器、像素、分辨率、空间分辨率、灰度、灰度等级、图像处理、二进制映像、亮度、对比、阴影校正、阈值、边界检测、图像分析、图像评估、标准晶片、测试晶片、晶向、缺陷、微管、螺旋螺位错、螺旋刃位错、基矢面位错、划痕、堆垛层错、延伸堆垛层错、复合堆垛层错、多型包裹体、颗粒包裹体、台阶聚集簇、表面颗粒的术语和定义，其中晶向、颗粒等术语在GB/T 14264-2009《半导体材料术语》也有定义，本文件中术语主要参考IEC标准原文翻译，尽量和IEC原文件保持一致。

**2.4、光致发光法**

**2.4.1、概况**

本文件指出具有典型光致发光特征的缺陷将通过光致发光法评估。部分线位错显示为明亮的线形图像，包括BPD；部分面位错显示为暗反差图像，包括堆垛层错，延伸堆垛层错，复合堆垛层错，以及多型包裹体。

**2.4.2、原理**

本测试方法的原理是利用碳化硅同质外延片的缺陷可被光致发光的图像捕捉，进而转换为数字模式。SiC同质外延晶片受能量大于4H-SiC禁带宽度的激发光照射，其结果是PL被收集并且记录为包含缺陷的特定区域的PL图像。PL是通过光学图像传感器如CCD图像传感器检测，同时PL图像经常由光学滤光器获得，光学波光器传导适用于检测到的不同缺陷种类的特定PL波长范围。然后获得的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，图像信息被简化为特定检测缺陷的设定值。

**2.4.3、测试条件**

**2.4.3.1、测试设备**

本测试方法所需的测试设备有部分组成，包括PL成像系统、光源、物镜和滤光器。不同的晶片说明和缺陷类型需要最合适的光源，光学聚焦以及滤波片，因此需要配备特定应用的光源，光学聚焦以及滤波片的组合体。同时应保持激发光的光谱和能量分布在整个测试周期内稳定不变。

**2.4.3.2、晶片放置和调焦**

晶片被放置在互相成直角的X轴和Y轴确定的平面内。Z轴是图像捕捉系统的光轴。光学图像捕捉的前端和晶片表面的距离是固定的，与晶片的厚度无关，因此调焦和放大率相互不产生影响。

**2.4.3.3、图像捕捉**

经典的图像捕捉系统由光源，光学调焦，作为光学数字传感器的CCD图像传感器，光路校正系统，载物台以及束缚光的外壳构成。暗箱或齿条罩被用来阻挡外部光线的干扰。

**2.4.3.4、图像处理**

利用二进制（黑/白）分析和灰度两种方法分析图像。采用阈值程序能够从灰度图像获得二进制图像。图像分析使用合适的运算法则能够成功检测出测试衬底的缺陷。

**2.4.3.5、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。

**2.4.3.6、图像评估**

图像分析的结果设定为特定应用的相应值。

**2.4.3.7、记录**

PL成像系统的相关参数将被记录。包括：光源的激发光波长、光学图像传感器经过滤光片检测的波长范围及PL成像系统的空间分辨率。

**2.4.4、参数设置**

**2.4.4.1、概况**

参数设置的目的在于确定图像捕获系统的参数，经此过程，图像分析会通过标准晶片识别测试晶片缺陷的表面特征。测试晶片应与标准晶片做对比。标准晶片的结构和说明应尽可能接近测试晶片，因此准备的标准晶片和测试晶片来自同一个实验室或工厂，采用相同的设备和程序。

**2.4.4.2、参数设置过程**

参数设置应该在使用标准晶片的设置后生效。

使用选定的PL成像系统在测试晶片上获得每个缺陷的图像。测试晶片上缺陷的图像应该与标准晶片上缺陷的图像进行视觉比较。

**2.5、步骤**

使用参数最优的PL成像系统建立测试晶片的图像。一旦确定合适的阈值，数字化图像提供，分析，对比相关的缺陷结构。

**2.6、评估**

**2.6.1、概况**

PL成像系统能通过典型PL特征确定缺陷的尺寸和形状。图像分析提供数据识别缺陷的位置和种类。测试晶片的边缘去除应小于5mm。

**2.6.2、****面缺陷和体缺陷的平均宽度**

给出了根据已知的外延层厚度及切片偏角计算平行于切片方向的面缺陷和体缺陷的平均宽度的计算公式。但是这个计算公式不适用于颗粒包裹体和表面颗粒的面和体缺陷。

**2.6.3、评估过程**

形成缺陷mapping图，该mapping图标示缺陷在整个晶片上的位置（平面坐标）。此图中，晶片的平边或V型凹槽的方向同样被标出。相比晶片的主边缘，该地图的初始坐标应该在圆心。坐标的纵轴应该平行于晶片的主方向平面。

**2.7、精确度**

尚未建立衡量该测试精确度的方法。

**2.8、测试报告**

给出了测试报告所需要包含的内容，其中必须包含的有PL成像检测到的缺陷种类的数量；测试晶片的制造商、产品名称、晶片编号；参考IEC63068-3标准；PL成像系统的光源激发光波长、晶圆表面激发光强度、光学成像传感器经过滤光器的波长范围、PL成像系统的分辨率；测试数据。另外也给出了部分可选内容，包括所有检测缺陷的位置（平面坐标）、缺陷分布图、部分程序中的偏差、部分观察到的独特特征等。

**2.9、****缺陷的光致发光图像**

在附录A中给出了4H-SiC同质外延晶片（外延层厚度：10um）缺陷典型PL图像和特征。PL成像系统所用的激发光波长为365 nm。使用650 nm滤波器检测缺陷。

在附录B中给出了具有典型PL特征的缺陷在常温下获得的PL谱。采用32cm焦距的分光计获得PL谱。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2μm左右的光斑，能量密度一般为30kW/cm2-100kW/cm2。

1. **试验情况**

本标准中规定的碳化硅缺陷的光致发光检测方法

参加巡回测试的厂家有：中国电子科技集团公司第十三研究所、安徽长飞先进半导体有限公司、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。其中中国电子科技集团公司第十三研究所进行了实验验证，使用光学和光致发光检测方法对SiC外延片样品进行测试，各类缺陷统计和各种缺陷的典型图像和IEC标准中一致。完成验证该标准的内容验证。

安徽长飞先进半导体有限公司、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分别进行了复验验证。复验结果良好。

**三、标准水平分析**

本标准等同采用IEC 63068-3 Ed1.0:2020 《Semiconductor device-Non-destructive recognition criteria of defects in silicon carbide homoepitaxial wafer for power devices –Part 3: Test method for defects using photoluminescence》，标准内容与国际标准保持一致。

本次标准的制定对碳化硅同质外延片制备技术的提高，规范碳化硅外延片产业的发展起到巨大的推动作用，同时实现了与国际标准的接轨。本标准为推荐性国家标准，达到了国际一般水平。

**四、与现行法律、法规、强制性国家标准及相关标准协调配套情况**

关于功率器件用碳化硅同质外延片的缺陷分类和检测方法，目前国内无相关标准。本标准与现行的法律、法规及国家标准、国家军用标准、行业标准没有冲突，不涉及知识产权纠纷。

**五、重大分歧意见的处理经过和依据**

编制组根据起草前确定的编制原则进行了标准起草，标准起草小组前期进行了充分的准备和调研，并做了大量调查论证、信息分析和试验工作，标准在主要技术内容上，行业内取得了较为一致的意见，标准起草过程中未发生重大分歧意见。

**六、标准作为强制性标准或推荐性标准的建议**

建议本标准将作为推荐性国家标准实施。

**七、废止现行有关标准的建议**

无替代或废止现行相关标准。

**八、贯彻国家标准的要求和措施建议**

本标准的实施与现有的其他标准没有冲突之处。本标准的制定和推广，有利于规范行业的发展，有利于国内半导体材料、符合大尺寸半导体样品的质量监控与品质提升的需求，有利于提高国内半导体样品的国内与国际市场竞争能力，实现高端半导体材料的民族自主可控。标准发布后建议组织标准宣贯推广会，促进标准的实施。

**九、其他需要说明的事项**

本标准作为推荐性国家标准供大家使用，若对结果有疑义，以供需双方商议的测试方法为准。

标准编制组

2023年3月