

## 使用 Explorer One 紧凑型紫外纳秒激光器进行高精度 SiC 和 GaN 打标

SiC 和 GaN 等宽禁带材料在电力电子应用中具有优势,但对其进行激光打标却更具挑战性。

电动汽车、可再生能源系统、工业自动化和大型数据中心等几个正在增长的市场,正在推动对更高效电力电子设备的需求。在上述各个领域,这些应用都需要更高的功率密度、更快的开关速度、更低的能量损耗以及更低的冷却要求,而传统基于硅的器件无法高效满足这些需求。随着工作电压和开关频率的持续增加,传统硅材料的性能极限变得越来越明显。

宽禁带(WBG)半导体材料,如碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN),应运而生以满足这些需求。与硅相比,其器件可在显著更高的电压、温度和开关频率条件下运行,从而实现更紧凑、更高能效的电子系统,同时提升性能并降低功率损耗。因此,宽禁带半导体正加速应用于广泛的先进功率电子领域。

然而,正是宽禁带半导体如此具有优势的那些材料特性,同时也带来了新的制造挑战。这一点在激光打标领域尤为明显。

与硅相比,宽禁带材料在许多工业激光器波长下的吸收率较低,需要更高的局部能量密度才能引发烧蚀。此外,其极高的机械硬度和脆性晶体结构,使其在激光加工过程中对局部热应力和机械应力更为敏感。

所有这些因素共同导致了打标工艺窗口大幅缩窄。一端是打标效果不足,另一端则是材料损伤,例如微裂纹或过大的热影响区。随着设备结构的微型化以及打标空间的日益受限,应对宽禁带材料打标的挑战变得愈发关键。为评估针对宽禁带材料的有效标记策略,MKS 在公司专用的工业应用实验室中,使用一台紧凑型紫外激光器(Spectra-Physics Explorer One HP HE 355-200)进行了一系列测试。

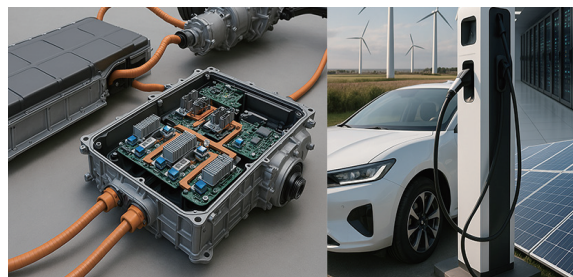


图 1. 碳化硅(SiC)等宽禁带(WBG)半导体材料在电力电子领域的重要性日益凸显。

### 半导体晶圆厂的打标要求

半导体生产中的晶圆标记系统必须生成永久性标识,这些标识在多个工艺阶段中始终保持可读。这些标识用于跟踪、检查和工艺验证。它们通常以字母数字字符串或紧凑的矩阵码的形式直接应用于晶片表面。点尺寸、间距和均匀性直接影响最终字符的质量。

激光打标通常采用工作于绿光或紫外波长的二极管泵浦固体激光器 (DPSS)。这类激光器能够提供适宜的光斑尺寸、稳定的脉冲输出以及较小的热影响区,从而满足相关应用需求。

然而,不同的工艺阶段对打标有不同的要求。所谓的“深标记”必须能够经受住研磨、涂层或其他后处理操作。对于传统的硅材料,深标记通常由直径为 25 – 110  $\mu\text{m}$  的点组成,这些点向材料内部穿透 50 – 150  $\mu\text{m}$ 。

在其他情况下,特别是在抛光晶片上,会采用“软标记”以最大限度地减少表面损伤和污染风险,同时仍保持光学对比度和机器可读性。通常,此类标记的点直径约为 30 – 70  $\mu\text{m}$ ,但深度仅为 0.3 – 5  $\mu\text{m}$ 。

## 宽带禁带(WBG)材料的挑战

对于 SiC 和 GaN 材料,满足这些要求变得困难得多。可用的工艺窗口更窄,通量或脉冲重叠的微小变化都会严重影响标记质量。激光工艺必须产生一致的点几何形状,同时避免边缘断裂、过多的重熔材料或特征周围的局部损伤。与此同时,设备尺寸的不断缩小,也持续减少了可用于可追溯性标记的有效面积。

为研究这些工艺限制,MKS 利用 Spectra-Physics Explorer One HP HE 355-200 激光平台,对 SiC 晶圆上的紫外纳秒激光标记进行了评估。紫外 DPSS 激光器是理想的选择,因为它们在提供高空间精度的同时,热相互作用有限。

特别选用了 Explorer One HP HE 355-200 机型,因为其尺寸小、功耗低且发热极少,使其非常适合集成到敏

感的半导体制造环境。该激光器波长为 355 nm,脉冲能量高达 200  $\mu\text{J}$ ,不仅能提供受控紫外烧蚀所需的高峰值强度,还能保持短脉冲持续时间和稳定的脉冲间能量输出。该系统还集成了主动脉冲能量稳定功能,以支持微加工操作过程中的精确工艺控制。

本研究的目的是确定此类紧凑型紫外激光器能否在可靠生成高对比度 SiC 标记的同时,对点几何形状、标记深度和热影响进行可接受的控制。特别关注了工艺重复性、单脉冲打标性能,以及在不造成过度表面损伤的情况下调节标记深度的能力。

## 实验设置与结果

初步测试重点在于确定 SiC 的紫外线烧蚀阈值。确定该值至关重要,因为它定义了在保证工艺稳定性的同时,单脉冲可靠去除材料所需的最小激光通量。

激光器配置为生成  $18 \times 9$  点阵图案,目标点直径约为 44  $\mu\text{m}$ 。这些数值代表了常见的半导体标记尺寸。

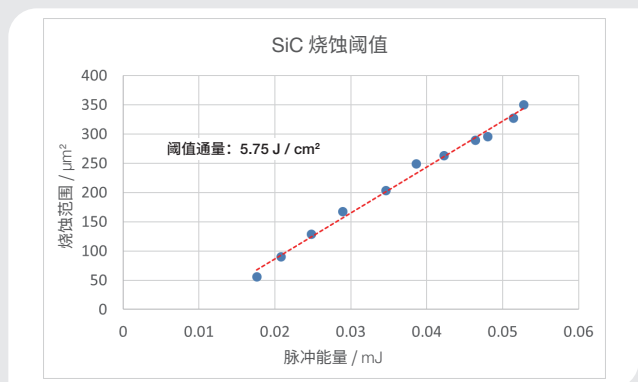


图 2. 要从 SiC 晶圆上去除材料,所需的最小通量必须超过 5.75  $\text{J}/\text{cm}^2$

为确定烧蚀阈值，将入射脉冲能量在 15 至 55  $\mu\text{J}$  范围内进行调节。随后测量所得烧蚀斑点直径，并采用回归分析技术进行分析。

该过程确定了 SiC 表面紫外光烧蚀的阈值通量约为  $5.75 \text{ J/cm}^2$ 。该数值为后续的打标实验和工艺优化提供了依据。

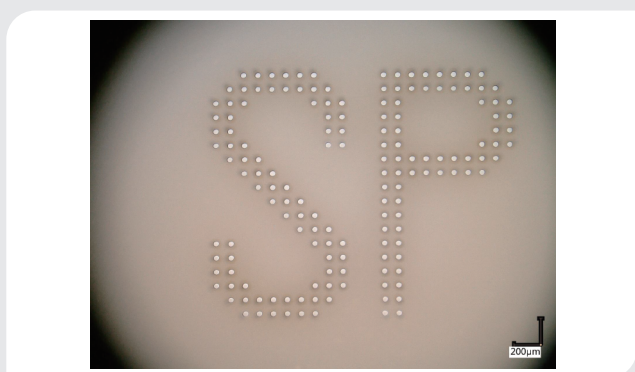


图 3. 柔性标记呈现结构化点阵，在显微镜下可清晰辨识。

为进一步评估特征均匀性，采用白光干涉测量法对标记进行了分析。二维表面轮廓和三维形貌测量结果均证实了点状结构的平滑与均匀。测量结果还显示出良好的脉冲间重复精度。这对在大批量生产中保持机器读取的一致性至关重要。

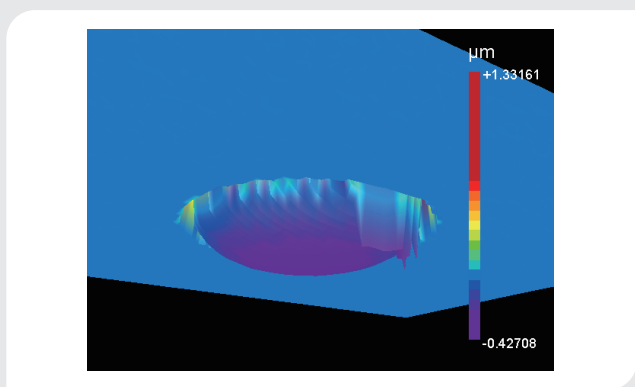


图 4. 基于白光干涉测量数据生成的单脉冲打标点的 3D 模型。

由于 Explorer One 已经清楚地证明了仅使用单次激光脉冲即可在每个点上产生柔性标记的能力，因此研究的下一阶段考察了其进行深层打标功能。特别是，针对每个点分别进行了两次测量，并据此开展了一系列测试。

使用两次脉冲将打标深度增加到约  $0.9 \mu\text{m}$ ，同时仍保持了平滑且对称的特征几何形状。这表明，可以在一个有用的范围内调整打标深度，而不会造成过度的热损伤或降低特征质量。

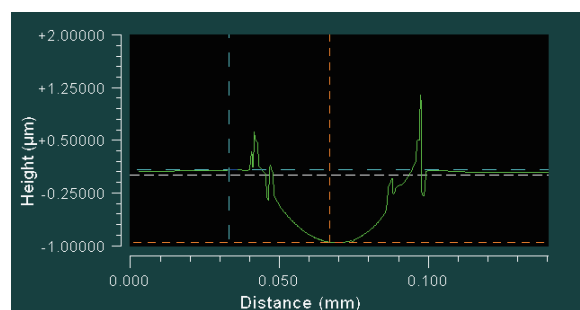


图 5: 采用两次激光射击形成的孔洞的 3D 轮廓图——通过白光干涉测量法测得——形成的孔洞更深，但仍保持对称。

这种深度控制的可扩展性使激光打标工艺具有极高的通用性。它既能在 SiC 晶圆上实现热影响极小的柔性打标，又能在需要时提供足够的工艺灵活性以制作更深的追溯标记。

## 结论

与传统的硅材料相比，碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等宽禁带半导体材料对激光打标工艺提出了更为严格的要求。这些材料的光吸收率较低、硬度更高且脆性较大，这大大缩小了精密晶圆打标的可用工艺窗口。

本文呈现的结果表明,紧凑型紫外 DPSS 激光技术能够成功满足这些要求。利用 Spectra-Physics Explorer One HP HE 355-200 激光器,实现了高对比度的 SiC 标记,其几何均匀性良好,热影响极小,且脉冲间重复精度极高。

测试还表明,在保持特征质量的同时,可对打标深度进行可控调节。这些功能使得此类紧凑型紫外纳秒激光器非常适合新一代半导体制造环境。



图 5. MKS Spectra-Physics Explorer 系列是紧凑型、多功能 DPSS 激光器。

## 产品

### Explorer One

Explorer One 激光器系列是功率范围最高达 6 W (紫外光) 和 5 W (532 nm) 的激光器中,体积最紧凑的主动调 Q 激光器系列。其卓越的性能标准,例如典型 M2 值为 1.1 的非凡模式质量、短脉冲和高峰值功率,以及快速功率调制和快速上升时间

的能力,确保了客户应用中最佳的工艺质量。高质量标准包括严格的系统间一致性、长寿命以及坚固耐用的设计,确保了最低的拥有成本。软件功能和尺寸紧凑的设计使得集成快速且经济高效,并确保客户能够快速将自己的产品推向市场。

|      | Explorer One HP<br>HE 355-200 | Explorer One HP<br>355-4 | Explorer One HP<br>355-6 | Explorer One HE<br>355-100 | Explorer One HE<br>532-200 | Explorer One XP<br>532-5 |
|------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 波长   | 355 nm                        | 355 nm                   | 355 nm                   | 355 nm                     | 532 nm                     | 532 nm                   |
| 功率   | >4 W @ 20 kHz                 | >4 W @ 80 kHz            | >6 W @ 100 kHz           | 800 mW @ 10 kHz            | 1.8 W @ 10 kHz             | 5 W @ 80 kHz             |
| 脉冲能量 | >200 $\mu$ J @ 20 kHz         | >50 $\mu$ J @ 80 kHz     | >60 $\mu$ J @ 100 kHz    | 80 $\mu$ J @ 10 kHz        | 180 $\mu$ J @ 10 kHz       | 63 $\mu$ J @ 80 kHz      |
| 重复频率 | 单脉冲至 200 kHz                  | 单脉冲至 500 kHz             | 单脉冲至 500 kHz             | 单脉冲至 60 kHz                | 单脉冲至 60 kHz                | 单脉冲至 500 kHz             |