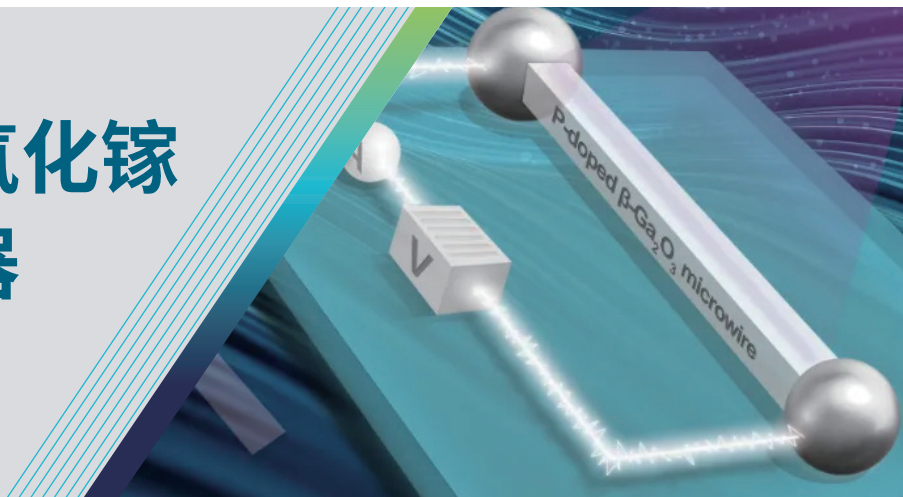


下一代半导体氧化镓 器件光电探测器 应用与测试



氧化镓 (Ga_2O_3) 探测器是一种基于超宽禁带半导体材料的光电探测器，主要用于日盲紫外光的探测。其独特的物理化学特性使其在多个应用领域中展现出广泛的前景。

探测器性能由于材料不同、结构不同、制备工艺以及应用场景的不同的区别会有较大的性能差异。而性能指标之间往往存在制约，例如暗电流和输出电流、灵敏度和响应度、可靠性和灵敏度等需要权衡和折中。对于性能表征也是如此，高响应度一定无法和高精度电流表征同时进行。Tektronix 提供了多种性能、架构的测试仪器仪表，满足探测器在不同极限维度下测试的需求。

氧化镓探测器性能指标及测试方法

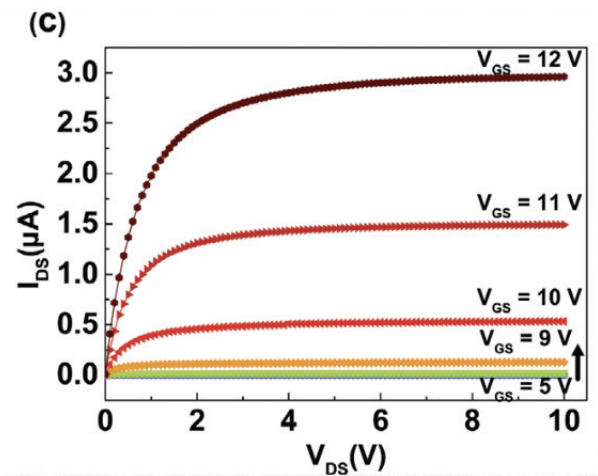
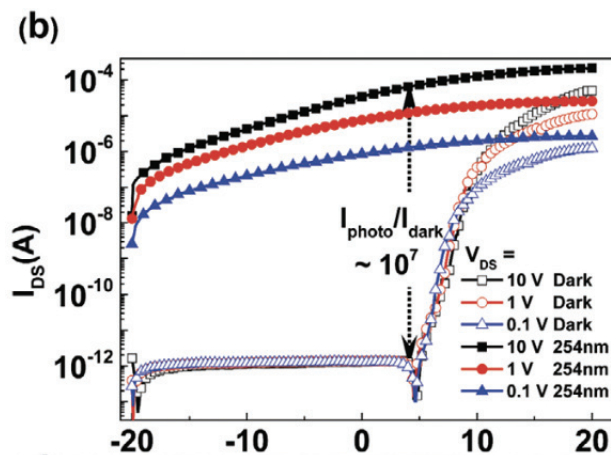
对于氧化镓探测器的测试可以分为材料测试、器件本征分析（静态）以及光电（动态）。材料测试通常利用 TEM、XRD 等分析所制备材料等微观晶体、薄膜结构、表面形貌等特征。本文旨在对电学、光电特性进行简单介绍。

本征分析主要包含：转移特性曲线、输出特征曲线，表征器件的控制以及载流子（电子 - 空穴对）在不同工况下的迁移特性，以及电学输出特性。通过 SMU 源表和 4200A-SCS 参数分析仪可以轻松完成。需要根据扫描的电压范围和载流子的范围确定所需要的仪器的具体参数和型号。

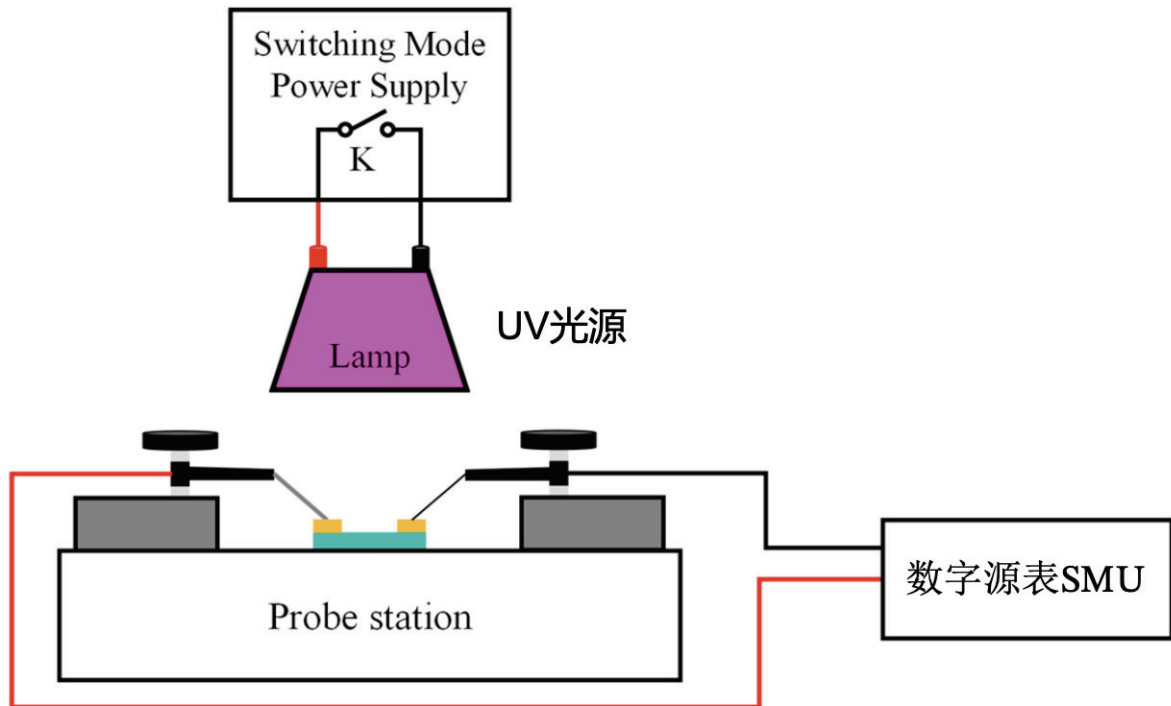


SMU 源表系列：24 系列、26 系列满足不同测试精度的需求，特别针对于氧化镓衬底、异质结等新型、创新性制备、结构设计等，高通量的载流子表征。

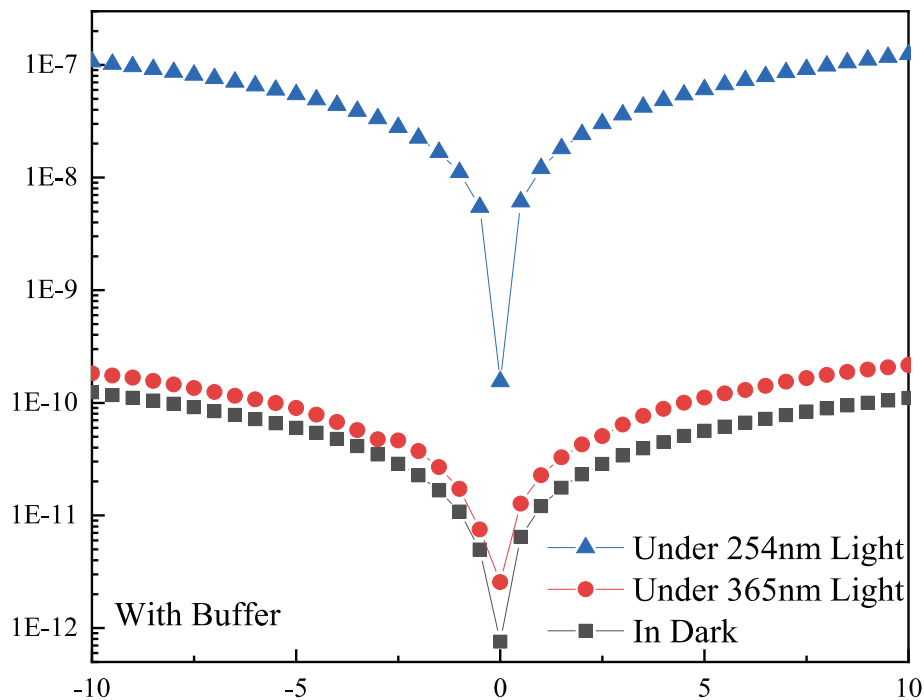
4200A-SCS 参数分析仪：器件测试的利器，内建了氧化镓光电测试模块，覆盖静态、动态测试，同时可以增配 CVU 模块，增加 CV 测试能力，可以对器件界面进行缺陷的定量测量。并且，可以控制外部脉冲源、示波器等，完成动态响应度测试。



图：典型的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 探测器的转移和输出特性曲线^[3]



图：测试框图 [2]



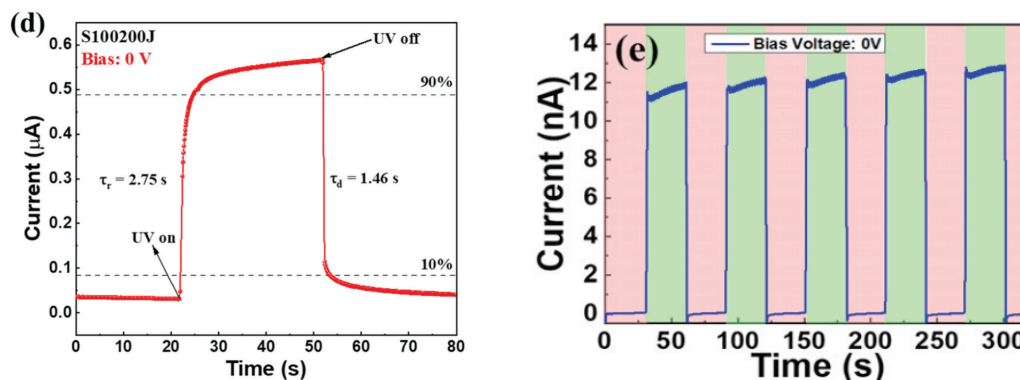
特别对于光电类型的器件，需要表征输入光到输出电流的响应度特性。加之光电器件在没有光照的时候，存在随机的电子 - 空穴对的飘移所产生的暗电流，特别对于 MSM 和异质结类型的器件，暗电流的性能直接决定了不同材料之间在制备中的缺陷。

$$\text{光响应度 } R = (J_{\text{Photo}} - J_{\text{Dark}})/P$$

其中 R 是光响应度，JPhoto 是光电流密度，JDark 是暗电流密度，P 是入射光功率。

可以看到暗电流的测试对于测试仪器还是有很高要求的，电流在 pA 量级，需要高精度源表配合低漏流的探针台才能做到该水平。推荐 Keithley 2600 系列源表，或 4200A-SCS 上增配 PA 模块以达到 pA 的量级的精度、aA 量级的分辨率。在测试系统中，光源的选择决定于应用场景。可以改变激励光源，实现波长依赖度的测试。不同的光源类型也决定了测试系统的成本。通常可以选 UV LED，包含了丰富的 UV 光谱，成本低廉，但是无法实现确定的波长；激光器、单色仪，波长选择强，但是成本高。

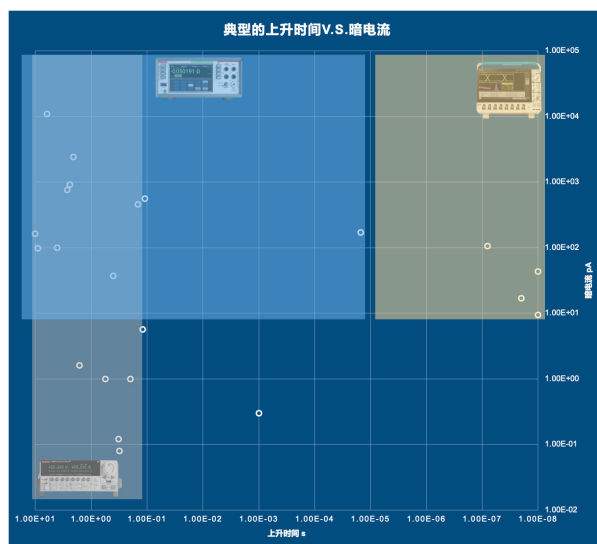
氧化镓动态参数测试所表征的主要是光电响应速度、响应稳定度（光暗循环）等。响应时间指探测器从接收光信号到输出电信号的时间。较短的响应时间意味着探测器能够更快地检测到光信号的变化，这对于需要实时监控或高速通信的应用至关重要。响应稳定度测试可以评估探测器在不同工作条件下（如温度变化、长时间运行等）的性能一致性。确保探测器在各种环境下都能保持稳定的响应时间和灵敏度，对于实际应用至关重要。



图：氧化镓典型的响应速度和稳定性^[3]

根据文献^[1]对各类镓基氧化物薄膜日盲紫外探测器性能对比，响应上升时间范围在纳秒级到秒级别，跨越了 9 个数量级，暗电流的范围在皮安到纳安量级。

通常在测试 ms 量级的电流变化时，可以使用 SMU，利用 SMU 的 autoscale，如果需要 us 量级的时间测试，可以使用 DMM6500，连接到测试系统中，进行高速的电流采样。同时兼容的较小的电流测试量程和测试精度。如果电流变化在 ns 量级，需要使用示波器来完成，但通常示波器的电流测试能力在 mA 量级，需要外部使用固定稳定增益的 TIA 进行放大。



图：不用特性光电转换器响应时间测试所需的设备

氧化镓材料和器件背景知识

氧化镓的特性与应用

氧化镓具有 4.4 到 5.3 eV 的超宽带隙，能够有效地覆盖日盲波段（200-280 nm）的紫外光。这一特性使得氧化镓成为理想的日盲紫外探测材料，因为该波段的光在大气中受到臭氧层的强烈吸收，地面背景干扰较小，能够提供更高的探测精度。同时，氧化镓最稳定的异构体， β - Ga_2O_3 的禁带宽度达到 4.8 eV，理论击穿电场约 8 MV/cm。由此，巴利加优值 (Baliga's Figure of Merit) 高达 3444，远超氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC)，这意味着其用于功率器件的潜力巨大，使其成为下一代半导体功率电子的候选材料。由于应用场景的不同，对于氧化镓的单体以及参杂和器件制备及测试的思路都不用，本文重点谈论氧化镓在光电探测器的应用以及测试的方法。

探测器结构与类型

氧化镓探测器的结构主要分为以下几种类型：

金属 - 半导体 - 金属 (MSM) 型：这种结构简单，响应度高，适合大规模集成，但有效光吸收面积较小。

肖特基结型：通过金属和氧化镓之间形成的肖特基势垒，具有较快的响应速度和较低的暗电流。

薄膜晶体管 (TFT) 型：能够在抑制暗电流的同时放大增益，适用于高响应速度的应用。

阵列型：主要用于大面积成像，适合需要广泛覆盖的应用场景。

氧化镓探测器的分类^[1]

MSM 型器件：由光敏材料及背靠背的两个肖特基接触（具有整流电压电流特性的金属半导体接触）电极构成，当外加偏压施加在器件上时，其中一个肖特基结为正向偏置，另一个结为反向偏置，因此暗电流较小。同时器件还具有结构简单、容易制备、结电容小等优点。

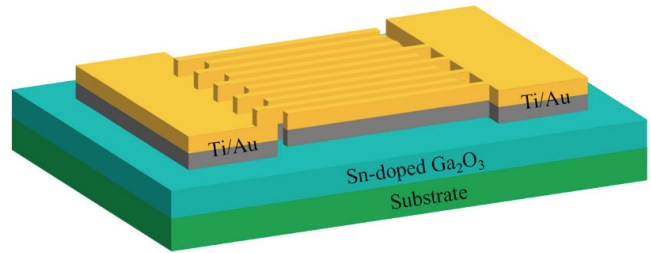


图 1: 掺锡 Ga_2O_3 MSM 探测器原理图^[2]

肖特基结型器件：由光敏材料与分别形成肖特基接触和欧姆接触（具有非整流电压电流特性的金属半导体接触）的两个电极构成，肖特基结型器件的光响应来源于光伏效应，可以在 0V 偏压下工作。同时由于空间电荷区与电极紧邻，更靠近表面，因此器件通常具有较高的外量子效率和较快的响应速度。

异质结：由于 Ga_2O_3 高质量稳定的 p 型掺杂还存在很大困难，限制了其 pn 同质结型器件的发展，因此通过将 n 型的 Ga_2O_3 和 p 型或 n 型的其他材料结合构成异质结型器件，可显著降低暗电流，提高响应度。

引用：

- [1] DOI: 10. 37188/CJL. 20230146 镓基氧化物薄膜日盲紫外探测器研究进展
- [2] Liu, Y.; Huang, R.; Lin, T.; Dang, J.; Huang, H.; Shi, J.; Chen, S. Preparation of Sn-Doped Ga_2O_3 Thin Films and MSM Ultraviolet Detectors Using Magnetron Co-Sputtering. Materials 2024, 17, 3227. <https://doi.org/10.3390/ma17133227>
- [3] <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101380> Enhancement of photodetection performance of $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Si}$ heterojunction solar-blind photodetector using high resistance homogeneous interlayer