



团 体 标 准

T/CASAS 056—2026

半导体材料紫外光电子产额谱测试方法

Ultraviolet photoelectron yield spectroscopy test methods for
semiconductor materials

2026 – 09 – 28 发布

2026 – 09 – 28 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发 布

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 测试原理..... 1

 4.1 脉冲法..... 1

 4.2 电流法..... 2

5 测试要求..... 2

 5.1 实验室环境..... 2

 5.2 测试环境..... 3

 5.3 测试仪器..... 3

6 标准材料..... 3

 6.1 总则..... 3

 6.2 参考标准材料..... 3

 6.3 工作标准材料..... 3

7 样品制备..... 3

 7.1 制备要求..... 3

 7.2 清洁要求..... 3

 7.3 储存要求..... 4

 7.4 样品处理..... 4

8 测试程序..... 4

9 数据处理..... 4

 9.1 试样性能测量结果处理..... 4

 9.2 不确定度来源..... 4

10 结果计算..... 4

 10.1 电离势的计算..... 4

 10.2 态密度的计算..... 5

11 测试报告..... 5

 11.1 测试材料..... 5

 11.2 测试条件..... 5

 11.3 光电子产额测试结果..... 6

 11.4 测试人员及日期..... 6

附录 A（资料性） 测试报告参考格式..... 7

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）制定发布，版权归CASA所有，未经CASA许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经CASA允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件主要起草单位：西安交通大学、中国科学院半导体研究所、西北大学、北京卫星环境工程研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院高能物理研究所、陕西测控技术产业研究院有限公司、北京玉研精密仪器有限公司、上海恒益光学精密机械有限公司、常州玉宇电光器件有限公司、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：陈玉、魏学成、王双、张敏、闫丹、侯潇涵、童柏豪、魏麟欢、郭雅丽、张浩、张思超、毛佳乐、刘鑫、白洁、钟辉、王妍、谭奥、李振璇、王以宁、周嘉杰、刘京宜、张浩业、赵亚林、尚世博、沈自才、黄煜、刘术林、吕永卫、洪才浩、范有余、殷尧平、刘康、高伟。

引 言

半导体材料紫外光电子产额谱测试方法旨在建立一套系统、规范的测试流程和技术标准,用于准确评估半导体材料在紫外光照射下的光电子产额特性。该技术方法利用紫外光电子产额谱技术,结合光电效应原理,分析半导体材料在特定波长紫外光照射下的光电子发射产额及其相关性质。紫外光电子产额谱测试方法可以通过对样品施加偏置电压来检测光电子的电流,从而准确测定高度绝缘材料的离化能;紫外光电子产额谱测试方法还可以利用紫外光电子产额谱对光子能量的导数给出被占据电子态相对于能量的变化,进而揭示被占据态电子价带形状及其态密度(DOS)。

半导体材料紫外光电子产额谱测试方法

1 范围

本文件描述了第三代半导体材料紫外光电子发射产额测试的方法，包括目的、原理、要求、标准材料、样品制备、程序、数据处理、报告。

本文件适用于半导体领域常用第三代半导体材料的紫外光电子发射产额测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 41072—2021 表面化学分析 电子能谱紫外光电子能谱分析指南

3 术语和定义

GB/T 41072界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

光电子发射产额 photoelectron emission yield

在一定波长的入射光下，单位时间单位面积内材料表面逸出的光电子数目与入射光子数目的比值。

3.2

光电子发射产额谱 photoelectron emission yield spectroscopy;PYS

光电子发射产额随不同入射光波长变化（或随不同入射光子能量变化）的函数。

4 测试原理

4.1 脉冲法

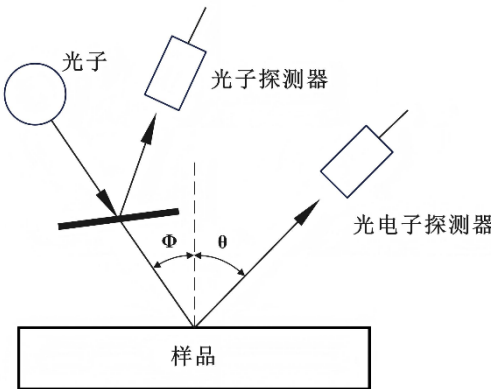


图1 脉冲法测试原理示意图

以紫外光作为激发光源，出射的光子经分光镜作用分解为透射光与反射光，透射光照射至样品单位表面积上，逃逸的光电子被光电探测器单元采集，并形成脉冲信号由脉冲计数器进行计数；反射光被光子探测器单元采集，光电子发射产额可由公式（1）计算得到：

$$Y(h\nu) = k(h\nu) \frac{N_e(h\nu)}{N_p(h\nu)} \quad (1)$$

式中：

$h\nu$ ——入射光子能量，单位为电子伏（eV）；

$k(h\nu)$ ——分光比，为参考光路与主光路光子数之比，无量纲；

$N_e(h\nu)$ ——样品每秒内出射光电子数目，无量纲；

$N_p(h\nu)$ ——参考光路每秒内入射光子数目，无量纲；

$Y(h\nu)$ ——样品光电子发射产额，无量纲。

利用单色仪设置一定步长，连续调节入射光波长 λ 并记录下采集到的光子数与光电子数，即可得到样品的光电子发射产额谱。

4.2 电流法

样品台电流是指在光照条件下，由样品向外发射电子并通过外电路补偿所形成的净电流，等于单位时间内从样品逸出的总电荷量。紫外光电子发射产额电流法测试原理如图2所示。

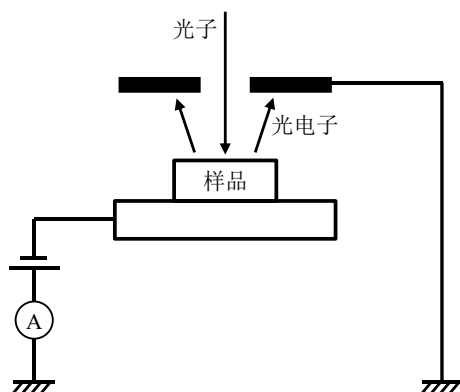


图2 电流法测试原理示意图

经过分光镜作用后的透射光照射至样品单位表面积上，逃逸的光电子会被一块平板电极收集获得，而由于电子的移动会产生微弱的样品台电流，并用高精度电流计进行测量。此时样品每秒出射的光电子数目可以由公式（2）计算得到：

$$N_e(h\nu) = \frac{I_e(h\nu)}{e} \quad (2)$$

式中：

$I_e(h\nu)$ ——样品台电流，单位为安培（A）；

e ——基本电荷，单位为库仑（C），通常取 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

$N_e(h\nu)$ ——样品每秒内出射光电子数目，无量纲。

后续的光电子发射产额仍然由公式（1）计算得到，利用单色仪设置一定步长，连续调节入射光波长 λ 并记录下采集到的光子数与光电子数，即可得到样品的光电子发射产额谱。

5 测试要求

5.1 实验室环境

除非另有规定，工作区域的环境条件如下：

a) 温度：15℃～25℃；

b) 相对湿度：20%～65%。

5.2 测试环境

除非另有规定，测试环境要求如下：

- a) 应在真空、氮气、大气氛围下测试；
- b) 通常在真空氛围下测试时分析室的本底真空优于 $3 \times 10^{-7} \text{Pa}$ ；
- c) 通常在氮气氛围下测试时分析室的本底真空优于 100Pa ；
- d) 样品温度宜为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ；
- e) 外界无强光。

5.3 测试仪器

测试仪器主要组成及要求如下：

- a) 发射产额测试范围： $10^{-6} \sim 10^{-1} \text{el/ph}$ ；
- b) 表面分析能量范围（入射光子）： $3.2 \sim 10 \text{eV}$ ；
- c) 表面分析能量分辨率（入射光子）： $\leq 0.01 \text{eV}$ 。

6 标准材料

6.1 总则

一般要求如下：

- a) 宜选用耐用的材料；
- b) 应在干净、清洁的条件下进行处理和存储。

6.2 参考标准材料

参考标准材料要求如下：

- a) 应为用于校准仪器和工作标准的主要标准材料；
- b) 参考标准应追溯到具有管辖权的国家或国际主管部门。

6.3 工作标准材料

工作标准材料要求如下：

- a) 仪器的日常操作中应使用工作标准材料来提供比较曲线以减少数据误差；
- b) 应每年通过测量相对于适当参考标准材料的性能来校准工作标准；
- c) 如出现明显污染，则应对材料进行清洁、更新或更换。

7 样品制备

7.1 制备要求

- a) 尺寸规格：不小于 $10 \text{mm} \times 10 \text{mm}$ ；
- b) 应尽可能准确地代表工件；
- c) 对于不同形态的材料需按照GB/T 41072-2021中第6章的规定进行实验前的制备与处理。

7.2 清洁要求

- a) 样品放入真空室前，在不改变样品性能的前提下，可以采用无水乙醇、蒸馏水、清洁空气等进行清洗或吹洗；
- b) 样品放入真空室后，可以采用稀有气体离子（如氩离子）进行处理。

7.3 储存要求

- a) 应使用无尘手套进行操作，并样品一般宜储存在真空或充氮存储柜或室温为15℃、相对湿度为20%的干燥柜；
- b) 样品应包装在干净、无尘且无绒的材料中，避免机械损坏；
- c) 有寿命要求的材料，应标明保存期、生产批次等信息。

7.4 样品处理

应使用电荷中和枪中和，去除样品表面所带电荷。

8 测试程序

- a) 接通设备电源，紫外激发光源预热约20min；
- b) 预热期间关闭电子快门，防止测试前紫外光照射样品，使样品表面带电；
- c) 确认测试条件：真空度优于 $3 \times 10^{-7} \text{Pa}$ （真空氛围）或100Pa（氮气氛围），并记录；
- d) 进行工作标准材料测试，与参考标准材料性能进行对比，校准仪器工作指标，调整并确认仪器处于工作状态；
- e) 把待测样品放置在合适位置，在仪器规定的参数范围内进行测试；
- f) 打开电子快门，使紫外光照射至待测样品处，计算机控制改变单色仪分光波长；
- g) 使用光子探测器单元测量光子数，光电子探测器单元或样品台高精度电流计测量光电子数，并记录测试数据；
- h) 为减少测试误差，同一样品至少测试3次；
- i) 更换入射波长，继续进行测试，直至完成全部波长范围的光电子产额测试；
- j) 测试结束后，将样品移除分析室并存放至干燥柜，关闭单色仪与紫外激发光源；
- k) 进行数据处理与不确定度分析。

9 数据处理

9.1 试样性能测量结果处理

对各次数据取算术平均值并作为测试结果，计算公式见公式（3）。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- x ——性能算术平均测量结果；
 x_i ——第*i*次测量所得到的性能测量结果；
 n ——测量次数， $n \geq 3$ 。

9.2 不确定度来源

测试结果的不确定度主要由测试仪器的不确定度、样品表面的均匀性、测试环境等带来。

10 结果计算

10.1 电离势的计算

电离势IP是指将电子从价带顶（VBM）/HOMO能级上激发到真空能级所需要的能量。

在光电发射阈值附近,紫外光电子产额与电离势IP关系如公式(4)所示,电离势IP可以通过 $Y^{1/n}$ 与 $h\nu$ 的线性拟合来计算。

$$Y(h\nu)^{\frac{1}{n}} = b^{\frac{1}{n}}(h\nu - IP) \cdots \cdots \cdots (4)$$

式中:

$Y(h\nu)$ ——样品光电子发射产额,无量纲;

$h\nu$ ——入射光子能量,单位为电子伏(eV);

IP ——电离势,单位为电子伏(eV)。

b ——拟合系数,无量纲;

n ——系数,无量纲。

对于半导体材料, $n=1$ (直接带隙材料,纯净单晶结构), $n=2$ (直接带隙材料,晶格中存在大量杂质或缺陷), $n=2.5$ (间接带隙材料);对于有机物, $n=3$ 。

10.2 态密度的计算

态密度 $N(E)$ 是电子在特定能级上被允许占据的不同电子态的数目,即单位能量单位体积的电子数目。紫外光电子发射产额谱测试是收集所有出射能量的光电子,即对不同能级的电子能量进行积分,如公式(5)所示,固定出射能量 E 的电子跃迁几率相同,因此材料态密度 $N(E)$ 可以通过光电子产额 Y 对光子能量 $h\nu$ 求得,如公式(6)所示。

$$Y(h\nu) = \int_{E_{sv}}^{h\nu} N(E) dE \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$N(E) = \frac{dY(h\nu)}{d(h\nu)} \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中:

$Y(h\nu)$ ——样品光电子发射产额,无量纲;

$h\nu$ ——入射光子能量,单位为电子伏(eV);

E_{sv} ——出射电子的最小动能,单位为电子伏(eV);

$N(E)$ ——态密度,无量纲。

11 测试报告

11.1 测试材料

测试材料的信息应包含但不限于以下内容:

- a) 被测材料的名称;
- b) 被测材料的制备参数(如果有);
- c) 样品尺寸和厚度、各层的涂层厚度(如果有)、表面轮廓(如果有)等。

11.2 测试条件

测试条件应包含但不限于以下内容:

- a) 测试方法;
- b) 测试日期;
- c) 所用仪器;
- d) 标准材料;
- e) 环境温度和相关湿度;
- f) 样品温度(室温或控制一定温度);

g) 在测量过程中发现的任何明显事件应予以记录。

11.3 光电子产额测试结果

光电子产额测试结果应包含但不限于以下内容：

- a) 测量值；
- b) 性能平均值（如有）。

11.4 测试人员及日期

测试人员及日期应包含但不限于以下内容，格式参考附录B：

- a) 测试人员；
- b) 测试日期；
- c) 测试单位。

附 录 A
(资料性)
测试报告参考格式

测试报告参考格式如表B.1所示。

表A.1 测试报告参考格式

测试样品							
名称				批号			
制造商/供应商				制备参数			
样品尺寸				表面形貌			
测试参数							
测试方法				所用仪器			
环境温度				相对湿度			
样品温度				真空度			
测试中的明显事件				质量记录			
测试结果							
样品编号	初始数据	测试数据1	测试数据2	测试数据3	平均值	绝对变化	相对变化
测试人员和日期							
测试人员				测试日期			
测试单位							

