

国家标准

半导体单晶材料透过率测试方法

编制说明

(讨论稿)

中国电子科技集团公司第四十六研究所

二〇二四年五月

一、 工作简况

1、 制定背景

半导体材料制成的部件、集成电路等是电子工业的重要基础产品，在电子技术的各个方面已大量使用。半导体材料的生产和科研已成为电子工业的重要组成部分。在多个领域有着重要应用，包括：集成电路、微波器件、光电子器件等。且随着应用日益广泛和迅速发展，半导体材料的应用将更加重要和关键。

光学透过率在半导体材料特性表征中已有一定的应用，通过测定透过率，可以方便快捷且无损的针对半导体单晶材料特定应用方向的重要特性进行表征。例如，光电探测器能把光信号转换为电信号。测试半导体材料对光学响应的透射谱及透过率，关系到光电探测器件的响应波长、响应度、光电流等性能；硅集成电路方面，杂质浓度是半导体材料一项至关重要的参数。红外波段透过率可用于表征硅单晶片中的杂质元素浓度，并且其灵敏度高，检出限低至ppb量级。本文件目的在于针对半导体单晶材料的光学透过率，制订一套统一的测试方法，规范从样品处理、检测过程及数据处理等关键步骤，明确适用范围，以提高测试本身的准确度和可靠性，进而为半导体单晶材料特定波长吸收率、透过率、杂质浓度等诸多应用特性的表征奠定基础。

随着电子技术需求和晶片制备技术的发展，晶片面积增大，大尺寸、高透过率、高转换率、高功率输出的半导体单晶材料对相应的光学均匀性也提出了更高的要求，迫切需要一个统一的标准进行规范。

但目前国内外未见此类相关标准或测试方法，相关研究没有统一的测试标准可以依据，不利于相互之间进行数据比对。因此，迫切需要建立本测试方法以适应和促进半导体单晶材料快速发展。

2、 任务来源

根据《国家标准化管理委员会关于下达2023年第三批推荐性国家标准计划及相关标准计划外文版的通知》（国标委发[2023]58号）的要求，由中国电子科技集团公司第四十六研究所牵头修订《半导体单晶材料透过率测试方法》，计划编号为20231111-T-469，要求于2024年12月完成。

经过原国标委工业一部、工业二部认可，半导体材料标准由全国半导体设备和材料标准化技术委员会（SAC/TC 203）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/TC 203/SC2）共同提出并归口，具体见标委工二函[2014]22号。

3、 起草过程

3.1、起草阶段

制订本文件的承担单位中国电子科技集团公司第四十六研究所是中国主要的半导体材料研发生产单位，研究方向几乎涵盖全部半导体材料，包括硅、锗、碳化硅、氮化镓、氧化镓、硒化镉、氮化铝等，建立了多条主流半导体材料生产线，其中包括硅单晶片、锗单晶片、GaAs 单晶片等。任务下达后，中国电子科技集团公司第四十六研究所于成立了《半导体单晶材料透过率测量方法》标准编制组，根据标准制定的原则，落实了标准主要内容、涉及范围、检测、时间节点等工作，开展了相关国内外资料、标准的整理和研讨工作，调研了半导体单晶材料透过率的测试需求，并于 2024 年 3 月完成了标准讨论稿。

4、标准承研单位概况及起草人所做的工作

牵头单位中国电子科技集团公司第四十六研究所是中国主要的半导体材料研发生产单位，经过几十年的发展，研究方向几乎涵盖全部半导体材料，包括硅、锗、碳化硅、氮化镓等，建立了多条主流半导体材料生产线，其中包括硅单晶片、锗单晶片、GaAs 单晶片等。中国电子科技集团公司第四十六研究所质检中心始建于 1988 年，现有工作人员 38 人，本科以上学历人员占 90 %以上，获得计量认证证书、国家实验室资质授权证书、实验室认可证书。质检中心长期从事电子材料的物理性能、化学成分、结构与表面特性的测试工作。在不断强化技术实力和科研工作的基础上，质检中心也十分重视标准化研究以及国家、行业标准的制修订工作，积极承担标准化项目。质检中心拥有完整的半导体材料测量设备和仪器，多年来，凭借自身的技术优势，为国内外客户提供了大量的检测服务。同时拥有一批高素质的科研、生产和管理专业人才，曾制（修）订了多项半导体材料测试标准，填补了多项国内相关测试标准空白，有丰富的制（修）订标准的经验。

本文件的主要起草单位为中国电子科技集团公司第四十六研究所、有色金属技术经济研究院有限责任公司等，其中中国电子科技集团公司第四十六研究所为牵头单位，组织了标准起草和试验工作，有色金属技术经济研究院有限责任公司对标准各环节的稿件进行了审查修改，确保标准符合 GB/T 1.1 的要求，*****等单位提供测试样品或参与了复验工作，同时在标准研制过程中积极反馈意见，为标准文本的完善做出了贡献。

本文件的主要起草人及工作职责见表 1。

序号	起草人	工作职责
1	李静、何焯坤	全面负责标准的工作指导，标准审核，标准框架的制定、标准的起草、试验方案的制定，组织协调等

二、 国家标准编制原则、主要内容及其确定依据

1、 编制原则

(1) 本文件编制主要依据 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 20001.4-2015《标准编写规则 第 4 部分：试验方法标准》的原则进行起草。

(2) 本文件编制过程中充分考虑了国内生产企业的生产、测试现状及技术发展趋势。

2、 主要内容及其确定依据

半导体材料制成的部件、集成电路等是电子工业的重要基础产品，通过调研国内电子技术各个方面的需求和半导体材料制备技术发展的基础上，确定了本文件的范围、方法原理、规范性引用文件、干扰因素等内容，以下对此次文件编制过程中的主要技术内容进行说明。

2.1 范围

半导体材料从第一代半导体硅、锗材料；第二代砷化镓、磷化铟材料；第三代碳化硅、氮化镓；发展到第四代氮化铝、氧化镓，这些材料制成的部件、集成电路等是电子工业的重要基础产品。硅集成电路方面，杂质浓度是半导体材料一项至关重要的参数，红外波段透过率可用于表征硅单晶片中的杂质元素浓度；砷化镓量子阱中红外光电探测器响应波长 $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 把光信号转换为电信号，测试半导体材料对光学响应的透射谱及透过率，关系到光电探测器件的响应波长、响应度、光电流等性能；制备紫外探测器用的氮化铝单晶，要求材料在紫外特定波段有高的透过率；红外固体激光器用硒化镉单晶材料，其吸收系数影响器件的转换效率，要求材料在 $2.0\mu\text{m}$ 、 $2.6\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 吸收系数均不大于 0.05cm^{-1} ，根据朗伯-比耳定律透过率与吸收系数之间的对应关系，通过测试透过率可计算其吸收系数。

半导体多晶材料晶粒多，抛光效果不好散射会很厉害，影响其透过率的准确性，本测量方法不适用于半导体多晶材料的透过率测试。故本文件规定测试范围为“利用红外光谱仪、紫外可见近红外分光光度计测量半导体单晶材料的透过率，该测试方法不适用半导体多晶材料。”

2.2 规范性引用文件

为规范该文件术语和定义，参考了 GB/T 14264 和 GB/T 13962 两个标准；仪器设备波数准确度和波数重复性参考了 GB/T 21186、测试原理和测试设备的校对参考了 JJG 178、

JJF1319；试样制备内容参考了 SJ 21447、SJ20387。

2.3 术语和定义

各向异性介质中的个别方向，沿此方向在其中传播的自然光不会发生双折射现象，此方向称为晶体光轴；与晶体光轴垂直的平面叫光轴面；被物质透过的辐射能通量与入射的辐射能通量比值为透过率；红外光是一种波长介于可见光和微波区之间的电磁波谱。红外光的波长范围为 $0.78\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ ，分为三个区域，即：近红外区、中红外区、远红外区；透过率均匀性指样品一定区域内透过率的分布情况，单一测试区域尺度为毫米量级到微米量级，根据实验测试结果由相关公式计算得出透过率均匀性数值；测量不确定度表征合理赋予被测量值的分散性，与测量结果相联系的参数；单光束红外光谱仪，设备发出的单光束要分别先后测试背景光谱和样品光谱，扣除背景光谱后才能得到样品光谱；双光束红外光谱仪，设备发出两束平行光可以同时测试背景光谱、样品光谱，测试完毕后仪器自动扣除背景光谱得到样品光谱。背景光谱一般指仪器不放样品时，仪器样品室内的测试环境，包括空气或吹扫设备湿气的氮气等。

2.4 方法原理

当光线通过均匀半导体材料时，透过率可以用入射光通过样品的光通量与入射光起始光通量的百分比来表征。朗伯-比耳定律是光吸收的基本定律，适用于所有电磁辐射和所有吸光物质，包括气体、固体、液体、分子、原子和离子，定量描述物质对某一波长光吸收的强弱与吸光物质的浓度及物质的厚度间的关系。光线通过一定厚度的半导体材料，半导体材料吸收和反射损失会使透射光强度衰减。

当一定频率的红外光、可见光、紫外光通过半导体单晶时，由于材料的本征吸收，表面散射、以及其内部存在的晶格点阵缺陷、自由载流子对入射光的吸收，导致入射光能量出现损失，光强度降低，采集对应波长光强，得到测试样品谱图，扣除背景光谱后得到测试样品的透过率谱图，入射光透过样品后的光通量与入射初始光通量的百分比来表征透过率。

2.5 干扰因素

2.5.1 双折射晶体的干扰因素

具有光学各向异性的双折射晶体，非偏振入射光通过双折射晶体时会发生偏光化，入射光会分解为两种振动方向互相垂直且传播速度不等的偏光。在仪器光路没有配置偏振片减偏的情况下，会造成透过样品的光通量发生损失，影响透过率测试数值的准确性。

2.5.2 测试设备的干扰因素

测试设备本身波长（或波数）的示值误差和重复性、透过率重复性等因素，都会影响透过率测试数值的准确性。

2.5.3 半导体材料厚度的干扰因素

朗伯-比耳定律是光吸收的基本定律，适用于所有电磁辐射和所有吸光物质；当光线通过一定厚度的半导体材料时，产生吸收和反射损失会使透射光强度衰减。半导体材料的厚度因素会影响其透过率数值。样品厚度越厚折射损失越大，影响其透过率测试的准确性，本文件规定测试样品厚度不超过 10mm。

2.5.4 半导体材料样品表面平行度的干扰因素

样品表面平行度，会影响检测器收集样品透过信号的准确性；

2.5.5 半导体材料样品表面粗糙度的干扰因素

样品表面的粗糙会产生很厉害的散射，影响其透过率的准确性，通过降低样品表面粗糙度可以减少散射损失。

2.6 试验条件

实验室环境中的水汽会在 3400cm^{-1} 和 1600cm^{-1} 附近出现红外吸收峰；空气中二氧化碳会在 2300cm^{-1} 和 660cm^{-1} 附近出现红外吸收峰，这些杂峰会干扰样品透过率谱图带来测试误差。

如果放置测试设备的实验室有振动或者机械冲击干扰，会影响设备的稳定性；测试半导体材料透过率的光学设备，如果接触腐蚀性气体，会损坏设备部件。

结合目前行业实际测试情况，最终确定环境温度为 $24^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度小于 60%；测试实验室应清洁、无机械冲击、振动、电磁干扰、腐蚀性气体。

2.7 仪器设备

测试半导体透过率的设备，其透过率的重复性和测试波数的准确性，会影响透过率测试数值的准确性。限定这些影响因素数值，可以减少测试透过率的误差。

依据朗伯-比耳定律光吸收基本定律，半导体材料厚度是测试透过率的影响因素之一，需要用精确的量具准确量取样品的厚度；测试半导体材料透过率均匀性，需要用精确的量具确定测试位置，采用精度优于 0.01mm 的量具测量待测样品尺寸和厚度。

普通红外光谱仪当光束入射到样品表面时，测量数据会因仪器在测试过程中光束的平移产生误差。需要把样品架放在垂直或基本垂直于红外光束的轴线方向，让光束垂直

入射到样品上减少测试误差。如果样品尺寸小于光束直径，测试时会发生漏光，使仪器的能量值降低，影响测试的准确性。

2.8 样品

根据半导体材料制成的部件、集成电路等实际需求，需要把半导体材料加工成晶片和晶块。样品表面平行度，会影响检测器收集样品透过信号的准确性，规定了晶片样品两面的平行度；晶块样品，通光面不平行度视实际产品而定，一般应优于 20" 或更小。依据朗伯-比耳定律光吸收基本定律，半导体材料厚度是测试透过率的影响因素之一，规定了整个样品的厚度差和测试样品的最大厚度；样品表面的粗糙度不好，散射会很厉害，影响其透过率的准确性，规定了测试样品表面的粗糙度。

透过率均匀性测试点的数量和选点方式，需要根据样品的尺寸和均匀性精度要求来确定。晶片测试微区均匀性，采用五点方案、线扫描方案、面扫描方案；晶块样品保证测试光斑不叠加的情况下，根据样品大小调整样品光阑孔径。

2.9 试验步骤

2.9.1 仪器检查

2.9.1.1 通过测试单光束或者双光束仪器的 100%基线，可以检查测试设备的稳定性和噪声情况，确保测试设备的正常使用，不影响测试数据的准确性。

2.9.1.2 用已知透过率的双面抛光本征区熔硅单晶片，测试其在固定波数范围内的透光率数值是否满足 $53.8\% \pm 2\%$ ，验证测试样品与测试仪器红外光线入射的轴向角度，保证硅样品表面与测试仪器光学元件间的反射降到最低。

2.9.1.3 为保证测试仪器的波数/波长准确度、重复性和透射比重复性等指标，每年必须由计量单位分别依据 JJF1319 和 JJG 178 校对测试仪器。

2.9.1.4 测试仪器的有些光学部件不耐潮气，如果测试环境湿度超过了仪器的使用要求，会对仪器的光学部件造成损坏。

2.9.2 测试过程

2.9.2.1 开机稳定半小时以后，设置仪器的分辨率、波长范围、扫描次数等测试参数。

2.9.2.2 对于单光束仪器，需要在仪器光路空着时，测试仪器的背景光谱。

2.9.2.3 将测试样品放入样品室，保证仪器光束通过样品的中心位置，然后测试样品光谱；具有光学各向异性的双折射晶体，非偏振入射光通过双折射晶体时会发生偏光化，入射光会分解为两种振动方向互相垂直且传播速度不等的偏光。在仪器光路没有配置偏振片减偏的情况下，会造成透过样品的光通量发生损失，影响透过率测试数值的准确性。

具有光学各向异性的双折射晶体，测试样品需要标注其光轴面，让仪器入射光垂直于被测样品的光轴面，沿此方向在样品中传播的光不会发生双折射现象，会减少对透过率测试得影响。

2.9.2.3 为保证测试数据的准确性，需要重复测试三次取平均。

2.9.3 透过率均匀性测试

根据确定的选点方式，每点按照 2.9.2 的测试过程进行测量，并记录。

2.10 精密度

三、试验验证的分析、综述报告、技术经济论证、预期经济效益、社会效益和生态效益

1、试验验证的分析、综述报告

试验验证分析及综述报告见附件。

2、技术经济论证

硅集成电路方面，杂质浓度是半导体材料一项至关重要的参数，红外波段透过率可用于表征硅单晶片中的杂质元素浓度；砷化镓量子阱中红外光电探测器响应波长 $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 把光信号转换为电信号，测试半导体材料对光学响应的透射谱及透过率，关系到光电探测器件的响应波长、响应度、光电流等性能；制备紫外探测器用的氮化铝单晶，要求材料在紫外特定波段有高的透过率；红外固体激光器用硒化镉单晶材料，其吸收系数影响器件的转换效率，要求材料在 $2.0\mu\text{m}$ 、 $2.6\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 吸收系数均不大于 0.05cm^{-1} ，根据朗伯-比耳定律透过率与吸收系数之间的对应关系，通过测试透过率可计算其吸收系数。

3、预期经济效益、社会效益和生态效益

3.1、经济效益

半导体材料制成的部件、集成电路等是电子工业的重要基础产品，在电子技术的各个方面已大量使用。半导体材料的生产和科研已成为电子工业的重要组成部分。在该文件制定过程中，充分调研了我国目前的半导体单晶材料生产企业及用户，使制订后的标准具有充分的先进性、科学性、广泛性和应用性，完全满足国内外客户、市场需求，有利于提高我国半导体单晶材料的质量。该文件测试方法为半导体单晶材料特定波长吸收率、透过率、杂质浓度等诸多应用特性的表征奠定基础，预期企业收入可实现每年10%的增长。

3.2、社会效益

目前国内外还没有基于半导体材料透过率的测试标准，本标准填补了国内“半导体单晶材料透过率”测试方法的空白。本标准将成为覆盖硅、锗、砷化镓、氮化镓、碳化硅、氮化铝、金刚石等半导体材料透过率测试基准。使得半导体材料透过率检测和验证等方面具有统一的标准规范，进而促进国内半导体材料行业发展。

3.3 生态效益

本文件的制定是维护半导体行业可持续发展的必要保障，可降低资源的过度开发利用和环境的污染，使资源达到最大限度的使用，节能减排，使企业内部达到低投入高产出的生产，对企业内部的生产、生活条件和环境条件产生有益影响和有利效果，达到良性、高效的循环体系。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况

随着电子技术需求和晶片制备技术的发展，晶片面积增大，大尺寸、高透过率、高转换率、高功率输出的半导体单晶材料对相应的光学均匀性也提出了更高的要求。目前国内外没有针对“半导体材料透过率”的测试标准，迫切需要一个统一的标准进行规范。

本文件目的在于，制订一套统一的测试方法，规范从样品处理、检测过程及数据处理等关键步骤，明确适用范围，以提高测试本身的准确度和可靠性，进而为半导体单晶材料特定波长吸收率、透过率、杂质浓度等诸多应用特性的表征奠定基础。

该文件测试方法可以方便快捷且无损的针对半导体单晶材料特定应用方向的重要特性进行表征，适应和促进半导体单晶材料快速发展。填补了国内“半导体单晶材料透过率”测试方法的空白，本文件达到了国内领先水平。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国标标准的原因

本文件制订过程中未采用国际标准或国外先进标准，目前国外没有针对“半导体材料透过率”的测试标准。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

针对半导体单晶材料光学透过率，目前国内外未见此类相关标准或测试方法；制订该标准的测试技术内容和标准结构、格式，与现行的法律、法规及国家标准、国家军用标准、行业标准等均没有冲突。

七、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。

八、涉及专利的有关说明

本文件中未涉及专利问题。

九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

本文件是目前国内唯一“半导体单晶材料透过率”的测试方法，建议将本文件作为推荐性国家标准实施。建议发布后即实施。

本文件的制定和推广，有利于规范行业的发展，有利于半导体单晶材料的质量监控与品质提升的需求，有利于提高国内半导体单晶材料与国际市场竞争能力。标准发布后建议组织标准宣贯推广会，促进标准的实施。

十、其他需要说明的事项

本文件通过调研国内电子技术各个方面的需求和半导体材料制备技术发展的基础上，确定了标准的范围、方法原理、规范性引用文件、干扰因素等内容，如果以后该项测试技术和测试设备有较大更新，可在下一版中进行补充修订。本文件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。