



CASA

第三代半导体产业技术创新战略联盟
China advanced semiconductor industry
innovation alliance

第三代半导体电力电子产业 测试条件和能力报告

第三代半导体产业技术创新战略联盟

2018年4月

目录

前言.....	I
第一章 检测检验机构概述与发展趋势.....	0
1.1 概述.....	0
1.2 检测能力资质认证和认可.....	1
1.2.1 CMA 资质认定.....	1
1.2.2 CNAS 实验室认可.....	3
1.2.3 DILAC 国防实验室认可.....	4
1.3 检验检测机构发展趋势.....	4
1.3.1 检验检测行业市场概况.....	4
1.3.2 检验检测行业“供给侧”改革.....	5
第二章 第三代半导体与电力电子测试.....	8
2.1 衬底.....	8
2.1.1 概述.....	8
2.1.2 X 射线衍射.....	10
2.1.3 霍尔效应测试.....	11
2.2 外延片.....	11
2.2.1 概述.....	11
2.2.2 X 射线光电子能谱(XPS).....	13
2.2.3 Raman 散射.....	14
2.2.4 扫描电子显微镜(SEM).....	14
2.2.5 原子力显微镜(AFM).....	15
2.2.6 傅立叶红外干涉测厚法(FTIR).....	15
2.3 芯片和器件.....	15

2.3.1 SiC 电力电子器件	15
2.3.2 GaN 电力电子器件-HEMT	28
2.4 应用部件及系统	36
2.4.1 消费类电子	36
2.4.2 新能源并网	41
2.4.3 不间断电源	49
2.4.4 电动汽车	53
2.4.5 电机控制器	58
2.4.6 轨道交通过电力电子变流器	60
2.4.7 国家电网	63
第三章 测试机构和测试能力	72
3.1 测试机构概述	72
3.2 中国科学院半导体研究所	74
3.2.1 基本情况	74
3.2.2 测试设备	74
3.2.3 测试能力	75
3.3 中国科学院微电子研究所	77
3.3.1 基本情况	77
3.3.2 半导体功率器件测试设备	78
3.4 中国科学院电工研究所	84
3.4.1 高频场控功率器件及装置产品质量检验中心	84
3.4.2 太阳光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心	87
3.5 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所	88
3.5.1 基本情况	88

3.5.2 测试设备.....	89
3.5.3 测试能力.....	90
3.6 中电科第四十六所中世博实验室.....	92
3.6.1 基本情况.....	92
3.6.2 测试设备.....	93
3.6.3 测试能力.....	93
3.7 中国电子科技集团公司第十三研究所检测中心.....	98
3.8 西安电力电子技术研究所电力电子实验室.....	99
3.9 中国电子技术标准化研究所赛西实验室.....	107
3.9.1 基本情况.....	107
3.9.2 元器件测试中心--测试服务能力.....	108
3.10 北京圣涛平试验工程技术研究院有限责任公司中心实验室.....	111
3.11 西安芯派电子科技有限公司测试应用中心.....	112
3.12 中家院（北京）检测认证有限公司.....	113
3.13 上海电器设备检测所.....	113
3.14 广东产品质量监督检验研究院.....	114
3.15 中国电力科学研究院.....	115
3.16 工业和信息化部电信研究院泰尔实验室.....	116
3.17 中汽研汽车检验中心（天津）有限公司.....	117
3.18 天津电气科学研究院有限公司.....	119
3.19 中国铁道科学研究院高速铁路系统试验国家工程实验室.....	120
3.20 中车株洲电机有限公司检测试验中心.....	124
3.21 全球能源互联网有限公司.....	127

第四章 第三代半导体电力电子产业测试服务分析.....	129
4.1 标准体系需要进一步完善，测试服务才能有标可依	129
4.1.1 SiC 器件产业化开始进入成熟期	129
4.1.2 新型技术发展推动下，器件测试方法有待更新和完善	130
4.1.3 器件应用功能化模块环节，标准缺失，测试无标可依	131
4.2 测试设备依赖进口，测试能力建设前期资金需求巨大，且设备到货期比较长 ..	131
4.3 应用规模开启还需时日，测试服务市场前景不明	133
4.4 标准、测试、认证服务于应用市场开启的综合能力有待建立	134
4.4.1 认证概述.....	134
4.4.2 中国质量认证中心.....	134
4.4.3 泰尔认证电源类产品.....	136
4.4.4 中铁检验认证中心.....	136
4.4.5 鉴衡认证.....	137
4.4.6 标准、测试和认证协调发展面临一定的挑战.....	138
第五章 产业测试能力建设建议.....	140
5.1 依托联盟制定标准，以保证测试有标可依	140
5.2 调研测试设备国产化可行性，推动国产测试设备的研发	140
5.3 整合资源，确保产业化进程和测试服务能力并行发展	142
5.4 建立服务于创新技术产业化的标准、测试、认证服务体系	142
5.4.1 自愿性产品认证处于起步阶段.....	142
5.4.2 国家鼓励以联盟标准作为认证依据.....	143
5.4.3 调研联盟标准实施方案，推动建立服务于产业市场开拓的检测认证体系 ..	144

前言

第三代半导体材料是指带隙宽度明显大于 Si (1.1eV) 和 GaAs (1.4eV) 的宽禁带半导体材料，主要包括 III 族氮化物（如氮化镓 (GaN)、氮化铝 (AlN) 等）、碳化硅 (SiC)、氧化物半导体（如氧化锌 (ZnO)、氧化镓 (Ga₂O₃)、钙钛矿 (CaTiO₃) 等）和金刚石等宽禁带半导体材料。由于第三代半导体宽禁带的特点，其具有击穿电场高、热导率高、电子饱和速率高、抗辐射能力强等优越性能，因此特别适用于制作高温、高压、大功率的半导体器件，其中最具代表性和目前产业化进程最快的是 SiC 和 GaN 材料。

电力电子是现代科学、工业和国防的重要支撑技术，半导体器件是电力电子技术的核心和基础，其应用是电力电子技术发展的驱动力。电力电子应用广泛，鉴于第三代半导体的技术优势和现状，应用领域包括消费类电子中的电源适配器、冰箱洗衣机中的变频器，新能源并网的光伏逆变器、风力发电机变流器、储能变流器，电动汽车涉及的非车载充电机、车载充电机、电机控制器，工业电机中的变频器，轨道交通中的变流器、智能电网中的电力电子变压器、电压源换流器等。

本报告梳理了第三代半导体电力电子产业上、中、下游相关的测试单位，分析了标准、测试、认证的现有机制，为产业测试平台建设提供参考。

第一章 检测检验机构概述与发展趋势

1.1 概述

检验检测又称公正检验，是由处于买卖利益之外的第三方，以公正、权威的非当事人身份，根据有关法律、标准或合同所进行的商品检验活动^{*}。检验检测资源是国家经济建设、社会管理和公共事务的重要技术支撑，是承担检验、检测、检疫、鉴定、检查、计量、校准、教学和科研等工作的载体，是国家综合国力、科技、经济、军事能力水平的象征。

2011 年的《国务院办公厅关于加快发展高技术服务业的指导意见》文件，对于检验检测行业具有历史意义。此前，检验检测行业作为轻工、卫生、环保、食药等不同行业的辅助技术支撑部门，而该文件的发布确立了检验检测行业作为独立的行业而存在，同时确定检验检测行业为高技术服务业。同年，国家统计局发文明确了服务业统计制度，其中包含检验检测服务业统计项目。近年，包括发改委等多部门围绕检验检测在内的高技术服务业相继出台了一系列扶持和激励的政策以及措施。另外，认监委组织的检验检测立法研究工作也在有序进行中。种种利好情况表明：检验检测作为一个独立的行业，其各种配套制度正在逐步健全和完善，检验检测行业也迎来了发展机遇期。

2005 年至 2015 年，实验室体制构成发生了根本性的变化，事业单位制比例呈现逐年下降趋势，企业制取代事业单位制成为我国检验

^{*} 浅谈我国检验检测机构资源整合及发展[J]. 翟博洋, 乔东, 谭晓东. 现代测量与实验室管理. 2013(05)

检测机构的构成主体。近几年，检验检测行业的快速发展也吸引了社会资本的关注，一些社会资本开始进入检验检测行业，加之越来越多的检验检测机构深化结构性改革，我国检验检测市场的整体运行方式已经发生根本性变化，由政府主导投资及业务来源带有浓厚行政色彩的传统模式向市场主导的自由竞争模式转变。

1.2 检测能力资质认证和认可

1.2.1 CNAS 实验室认可

中国合格评定国家认可委员会（英文缩写为：CNAS）是根据《中华人民共和国认证认可条例》的规定，由国家认证认可监督管理委员会（CNCA）批准设立并授权的国家认可机构，统一负责对认证机构、实验室和检验机构等相关机构的认可工作。获得认可的实验室可以通过中国合格评定国家认可委员会的网站上查询获得认可的检测能力范围。

国际认可论坛（International Accreditation Forum, 英文缩写 IAF），成立于 1993 年 1 月，是由世界范围内的合格评定认可机构和其他有意在管理体系、产品、服务、人员和其他相似领域内从事合格评定活动的相关机构共同组成的国际合作组织。

IAF 的目标是：遵循世界贸易组织（WTO）贸易技术壁垒协定（TBT）的原则，通过各国认可机构在相关认可制度等方面的广泛交流，促进和实现认证活动和结果的国际互认，减少或消除因认证而导致的国际贸易技术壁垒，促进国际贸易的发展。

IAF 建立了**国际认可论坛多边承认协议**（IAF MLA）。国家认可

机构只有加入了 IAF MLA 集团，才能表明其认可结果是等效的，带有该签约方认可标志的认证证书才具有国际等效性和互认性。

国际实验室认可合作组织（International Laboratory Accreditation Cooperation，英文缩写仍为 **ILAC**）的前身是 1978 年产生的国际实验室认可大会（International Laboratory Accreditation Conference，**ILAC**），其宗旨是通过提高对获认可实验室出具的检测和校准结果的接受程度，以便在促进国际贸易方面建立国际合作。

CNAS 继续保持我国认可机构在 IAF 的中国代表机构，以及 IAF 质量管理体系认证机构认可、环境管理体系认证机构认可、产品认证机构认可三个认可领域的多边互认协议签约方的地位。**CNAS** 继续保持我国认可机构在 **ILAC** 中实验室认可多边互认协议方的地位。

实验室认可的意义体现在：（1）表明具备了按相应认可准则开展检测和校准服务的技术能力；（2）增强市场竞争能力，赢得政府部门、社会各界的信任；（3）获得签署互认协议方国家和地区认可机构的承认；（4）有机会参与国际间合格评定机构认可双边、多边合作交流；（5）可在认可的范围内使用 **CNAS** 国家实验室认可标志和 **ILAC** 国际互认联合标志；（6）列入获准认可机构名录，提高知名度。

1.2.2 CMA 资质认定

为了规范检验检测机构资质认定工作，加强对检验检测机构的监督管理，2015 年，国家质量监督检验检疫总局发布《检验检测机构资质认定管理办法》（总局令第 163 号），“第二条 本办法所称检验检测机构，是指依法成立，依据相关标准或者技术规范，利用仪器设

备、环境设施等技术条件和专业技能，对产品或者法律法规规定的特定对象进行检验检测的专业技术组织。本办法所称资质认定，是指省级以上质量技术监督部门依据有关法律法规和标准、技术规范的规定，对检验检测机构的基本条件和技术能力是否符合法定要求实施的评价许可。资质认定包括检验检测机构计量认证。”

“第三条 检验检测机构从事下列活动，应当取得资质认定：（一）为司法机关作出的裁决出具具有证明作用的数据、结果的；（二）为行政机关作出的行政决定出具具有证明作用的数据、结果的；（三）为仲裁机构作出的仲裁决定出具具有证明作用的数据、结果的；（四）为社会经济、公益活动出具具有证明作用的数据、结果的；（五）其他法律法规规定应当取得资质认定的。”

“第十三条 资质认定证书内容包括：发证机关、获证机构名称和地址、检验检测能力范围、有效期限、证书编号、资质认定标志。检验检测机构资质认定标志，由 China Inspection Body and Laboratory Mandatory Approval 的英文缩写 CMA 形成的图案和资质认定证书编号组成。式样如下：



1.2.3 DILAC 国防实验室认可

根据《国防科技工业实验室认可委员会章程》，国防科技工业实验室认可委员会（以下简称“国防认可委”）是根据《中华人民共和国认可条例》规定，经国防科工委批准设立并授权的实验室认可机构，统一负责承担国防科技工业检测和校准任务的检测和校准实验室认可的相关工作。国防认可委接受国防科工委的领导和监督，认可工作接受国务院认可监督管理部门的指导。

国防科技工业实验室认可工作是根据《中华人民共和国认可条例》的有关规定，为实现“军民结合、寓军于民”的方针，与国家实验室认可工作相结合而产生的一项认可制度，是国家实验室认可工作的重要组成部分，其目的是促进军工实验室为国民经济服务，同时吸收先进的民用实验室参与国防建设。这项工作提升国防科技工业实验室技术能力和管理水平、增强军工科研生产保障能力、适应国防现代化建设发展的重要举措。对增强我国国防科技工业的整体素质、确保武器装备和航天、航空、船舶、核电等民用产品的质量具有重要意义。

1.3 检验检测机构发展趋势

1.3.1 检验检测行业市场概况

目前，我国检验检测行业正在超速发展。据国家认监委发布的数据，2013 年检验检测市场规模为 1678 亿元，2014 年为 2105 亿元，2015 年为 2574 亿元。2013 年至 2015 年，检测机构数量和营业收入增长迅猛，每年均以 12% 以上的速度增长。但值得注意的是，平均每家机构出具的报告份数却呈现逐年下降趋势，这也反映出近几年检测

机构扩张加快，竞争激烈态势加剧。而第三方检测作为我国检测行业的重要组成部分，目前占整体产业规模的 41%左右，2014 年我国第三方检测产业规模约为 1055.3 亿元。

我国检测行业的参与者按照企业性质可划分为**政府检测机构**、**企业内部实验室**与**第三方检测机构**三类。

政府检测机构主要从政府应保护人们生命财产安全的指责出发，业务主要涉及市场准入、监督检验检测、CCC 认证、生产许可证、定检、评优、免检等方面。

企业内部实验室主要为满足企业自身生产过程中的质量控制需求，在来料进厂和成品出厂环节进行把关，并在产品研发过程中提供各项数据以辅助研发工作。

独立第三方检测机构包括**外资独立第三方检测机构**和**民营独立第三方检测机构**两大类。由于独立第三方检测机构处于交易双方的利益之外，所出具的检测数据具有**独立性**及**公正性**的特点，因此已被市场各方所广泛接受。

在全国检测市场中，国有检测机构利用传统垄断优势占据了 55% 以上的市场份额；外资检测机构利用其成熟的市场运作经验及在出口贸易检测业务中的天然优势占据了市场 30% 以上的市场份额；民营检测机构起步晚，资本实力小，经过几年的快速发展，市场份额接近 10%。

1.3.2 检验检测行业“供给侧”改革

检验检测行业也面临“供给侧改革”：去库存、去泡沫、去产能、

去杠杆。如若政府不改革，市场会倒逼，会自行发挥资源重新调配的能力。按照目前的趋势，检测机构数量仍会上升，预计4万余家会达到峰值，趋于饱和。历年的检验检测机构飞行检查中，100家中平均有2家停业，无法实施检查。而在2016年的飞行检查中，100家平均有近10家出现此种情况，说明名存实亡的机构数量增多。

检测机构数量快速增长的背后其实呈现出了“虚假繁荣”的现象。一方面，检测机构尤其是国有机构资源闲置率高。另一方面政府对检验检测投入力度大，但后续效益较低，并且重复建设现象存在。检测机构尤其是体系内的一些机构存在空心化的现象，整体缺乏活力。某些机构保留了之前的“衙门思想”，还未真正做到开放和服务企业，检验检测服务与市场需求脱节。

2016年4月，《质检总局 国家认监委关于提升检验检测机构服务质量的指导意见》从总体要求、促进检验检测行业转型升级、提升检验检测服务质量、保障措施四个方面，提出了产业发展的指导意见。

“检验检测是国家质量发展的重要基础，是国家确定的‘高技术服务业、生产性服务业和科技服务业’，是国务院《质量发展纲要（2011-2020）》所明确的重要工作任务之一，是维护社会公平、保护环境、保护人类和动植物生命健康、促进技术进步和生产发展以及维护民生的重要支撑。……未来五至十年，将是我国社会经济全面快速发展的关键时期，检验检测行业将获得更为广阔的发展空间……”。

“通过五年左右的努力，以检验检测机构资质认定制度为杠杆，推动业务相同相近检验检测机构整合，促进检验检测服务业基本完成

从数量、规模扩张型向质量效益型的转变，市场布局和层次结构更趋合理优化，市场秩序更加公平有序，资源配置更加优质高效；基本完成从服务粗放型向服务品质型和服务创新型的转变，形成一批具有知名品牌的综合性检验检测机构，为社会提供更加诚信透明、经济优质、便捷周到的检验检测服务。”

第二章 第三代半导体与电力电子测试

2.1 衬底

2.1.1 概述

第三代半导体材料是在衬底上通过一定的温度和压力合成出来的。衬底又称基板，也有称之为支撑衬底，衬底主要是外延层生长的基板，在生产和制作过程中，起到支撑和固定的作用。且与外延层的特性配合要求比较严格，否则会影响力到外延层的生长或是芯片的品质。

SiC 电力电子器件基本使用同质的 SiC 衬底；GaN 电力电子器件的衬底多样化，包括蓝宝石、Si、SiC、GaN，各衬底材料的比较如表 2-X 所示。如蓝宝石、Si 衬底的外延、芯片半导体工艺材料与 LED 的一致，而 LED 产业的规模生产，GaN 基器件半导体工艺材料成本已非常低，所以，GaN 相较于 SiC，器件的成本优势明显。电力电子中的低压应用市场，如笔记本电脑充电器和光伏逆变器，将主要应用 GaN 技术。

表 2-1 衬底材料优势比较

衬底材料	衬底成本与衬底技术成熟度	衬底尺寸	衬底导热性	GaN 外延生长技术成熟度
SiC	成本高，技术成熟度中等	2 ~ 4 英寸	导热性很高 (4.0W/cm.K)	较成熟
体 GaN	成本高，技术不成熟	2 ~ 3 英寸	导热性良好 (1.5W/cm.K)	发展中
蓝宝石	成本较低，技术成熟	2 ~ 6 英寸	导热性差 (0.5W/cm.K)	成熟，为现有 GaN LED 的主流产业化技术

Si	成本低, 技术成熟	4 ~ 8 英寸	导热性良好 (1.5W/cm. K)	发展中, 外延生长难度大
----	-----------	----------	-----------------------	--------------

依据器件外延制备的使用, 要求碳化硅单晶抛光片要有高的表面质量: 表面光滑、表面粗糙度低、无缺陷、无损伤, TTV、Warp 等表面参数优良。碳化硅的加工质量和精度的优劣, 直接影响到其器件的性能, 比如当晶片表面有微小缺陷时, 会遗传给外延生长膜而成为器件的致命缺陷。表 2-2 显示了 SiC 单晶抛光片的主要技术指标。

表 2-2 SiC 单晶抛光片主要技术指标示例

序号	指标	参数
1	直径	50.8±0.3mm
2	结晶类型	4H
3	晶向	{0001}
4	晶片厚度	350μm ± 50μm
5	翘曲度 (Warp)	≤ 20μm
6	总厚度变化 (TTV)	≤ 20μm
7	表面粗糙度	≤ 1.0nm
8	单面抛光	抛光表面无崩边、橘皮、划痕、雾等缺陷

在半导体材料制备过程中, 需要测量半导体单晶中含有的微量杂质、缺陷以及表征其物理性能的特征参数。

SiC 的晶片的具体表征示例如下:

(1) 4H 导电型晶体电阻率达到 $0.03\Omega \cdot \text{cm}$ 以下, 6H 导电型晶体电阻率达到 $0.1\Omega \cdot \text{cm}$ 以下。6H 半绝缘型电阻率达到 $10^6\Omega \cdot \text{cm}$ 以上, 最大达到 $10^{12}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

(2) 用 C-V 法测导电型碳化硅的载流子浓度, 结果 6H 晶型晶

体的载流子浓度约为 10^{18}cm^{-3} ，4H 晶型晶体的载流子浓度约为 10^{19}cm^{-3} 。

(3) 用 X 射线衍射法作单晶摇摆曲线和双晶衍射的分析，发现晶体结晶质量好。平均测量晶片表面的 5 个点，结果单晶摇摆曲线的平均半高宽达到 18 弧秒，双晶衍射图谱为同心圆。

(4) 碳化硅产品的微管密度达到 10cm^{-2} 以下，最小达到 1cm^{-2} 。

2.1.2 X 射线衍射

X 射线是指在 $10\text{-}2102\text{\AA}$ 范围内的电磁波。X 射线衍射仪是对物质和材料的组成和原子级结构进行研究和鉴定的基本手段。X 射线衍射测试在晶体/晶片定向、晶体质量分析、应力分析、晶片面型分析等方面具有重要作用。半导体外延膜、量子阱及量子点等材料微结构的 X 射线表征可以在介观或纳米尺度给出各层成分、厚度、界面起伏的局部波动。作为表征薄膜材料结构的扫描探针技术，X 射线衍射和散射等技术有其特别的优点，它可以无损检测单层膜或多层膜内部结构、界面状况以及纵向和横向的共格程度。

通过双晶 X 射线的摇摆曲线半高宽测试方法来判断结晶质量表征，GB/T 32188-2015《氮化镓单晶衬底片 X 射线双晶摇摆曲线半高宽测试方法》规定了利用双晶 X 射线衍射仪测试氮化镓单晶衬底片摇摆曲线半宽高的方法，适用于化学气相沉积及其他方法生长制备的 GaN 单晶衬底片。

高分辨 X 射线衍射主要有一下几个特点：高度平行化和单色化，入射束最小可以达到 $2.5\mu\text{s}$ ，因而具有高分辨率；分辨率最高可达 10^{-8}

测角精度。

2.1.3 霍尔效应测试

霍尔效应测试仪,是用于测量半导体材料的载流子浓度、迁移率、电阻率、霍尔系数等重要参数。半导体霍尔测试主要利用范德堡结构法进行测试。

霍尔效应是半导体中载流子在电场和磁场的作用下所产生的效应,研究霍尔效应对发展半导体理论有着重要的实际意义。利用霍尔效应来测量霍尔系数是研究半导体性质的重要实验方法,它在半导体测试技术中占有重要地位。用它来研究半导体材料导电过程或输运现象,可提供材料的导电类型、载流子浓度、杂质电离能(包括浅、深能级杂质)迁移率及杂质补偿度等信息。

1958 年范德堡提出一种接触点位于晶体边缘的电阻率和霍尔系数的测量方法。此法要求样品厚度均匀成片状、无孤立孔洞,并且接触点位于样品的边缘,触点越小越好。

2.2 外延片

2.2.1 概述

外延薄膜的表面形貌、结晶质量、厚度、浓度、迁移率等结构特性、光学性能和电学性能表征测试方法很多,很多测量结果都是采用其中一种或几种测试方法,没有系统的测试方法和衡量标准。

4H-SiC 同质外延生长的外延片的示例测试结果如下:

(1) 晶体质量: 高分辨率 X 射线衍射、Raman 散射确定所生长的 4H-SiC 外延层为均一的 4H-SiC 物相, 不存在其他包裹物, XRD 的摇摆谱半高宽为 52arcsec, 这表明外延层的结晶质量很高;

(2) 傅里叶红外光谱仪(FTIR)测量外延层膜厚, 片内厚度不均匀性达到 0.09%, 批次间厚度不均匀性为 0.9%;

(3) 汞探针 CV (MCV)测量掺杂浓度分布, 获得片内浓度不均匀性最好为 4.37%, 批次间浓度不均匀性为 5.3%, 二次离子质谱法 (SIMS)对 MCV 测量的 n 型掺杂浓度进行了验证。

方阻仪显示 MESFET 结构的 4H-SiC 材料方阻不均匀性为 2% ~ 5%, 达到国际同行产品水平。

4H-SiC 薄膜的**结晶质量**进行表征: 高分辨率 X 射线衍射法, 主要用于确定 4H-SiC 外延中是否是单一的 4H-SiC 物相, 并且通过摇摆谱确定外延膜层的半高宽大小, 以确认结晶质量; X 射线光电子能谱 (XPS), 主要用于表征 4H-SiC 中掺杂的物相; Raman 散射, 主要用于判定 4H-SiC 中是否为单一物相*。

外延前衬底的**表面形貌**以及**缺陷分布**状态直接关系到外延后晶片表面状态; 同样, 外延后的表面状态以及器件制作工艺过程中的接触面的粗糙程度直接关系到器件的性能和质量。通过一些表面显微分析技术, 主要包括光学显微镜 (OP)、扫描电子显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM) 及时检测出衬底以及外延片表面的缺陷以及粗糙度, 指导外延工艺的改进, 获得高质量表面形貌的外延晶片。

* 4H-SiC 同质外延生长及器件研究[D] 李哲洋 南京大学 2012

薄膜材料的**厚度**关系着材料的力学性能、透光性能、热导率、磁性能、表面结构、电学性能等,测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量指应用测量仪器,通过接触方式直接感应出薄膜的厚度,常见的测量方法有:精密轮廓扫描法(即台阶法)、螺旋测微法、扫描电子显微法等等;间接测量指根据对应的一些物理关系,通过材料本身的一切物理参数经过计算转化为薄膜的厚度,从而达到测量薄膜厚度的目的,常见的测量方法有:电容法、等厚干涉法、电阻法、称重法、变角干涉法、椭圆偏振法等等。

半导体材料的**电学性能**表征可以分为两类:一类是适合体材料和薄层材料的电学测试技术,主要有:电导类型、电阻率、Hall系数等;另一类是以结的耗尽物理过程为基础的电学表针技术,常称为结谱技术。汞探针 CV 法(MCV)对 n 型掺杂的 4H-SiC 外延片进行纵向杂质浓度分布测试,通过多点测试,得到外延片的掺杂浓度均匀性;通过二次离子质谱法(SIMS)测量外延片的纵向浓度分布及掺杂类型;运用方阻仪测量 MESFET 结构器件表面帽层的方阻值及方阻均匀性。

2.2.2 X 射线光电子能谱 (XPS)

X 射线光电子能谱是一种对固体表面进行定性、定量分析和结构鉴定的实用性很强的表面分析方法。XPS 采用 X 射线(一般是 AlK α 1486.6eV 或者 MgK α 1253.6eV,属于软 X 射线)入射到样品表面,所激发产生的逸出电子属于外壳层电子,利用逸出的光电子的能量,可以推导出是什么样的杂质原子。XPS 具有以下特点:可以分析元素周期表中除 H 和 He 以外的所有元素;并且相邻元素的相同能级的谱线

相隔较远，彼此间干扰较少，元素定性的标识性强；并且可以对元素进行定量分析，即可测定元素的相对浓度，还可以测定相同元素的不同氧化态的相对浓度；灵敏度高，可以进行超微量表面分析,样品分析的深度约为 2nm。

2.2.3 Raman 散射

Raman 散射光谱是晶体在入射光的作用下使点阵上的正负离子周围的电子云分布发生畸变，畸变后的电子云反过来又推移点阵上的各正负离子，使它们偏离原来的平衡位置。Raman 散射光谱广泛应用于表征半导体薄层，异质结构，多层膜界面等。利用 Raman 光谱，可以在不破坏表面的情况下进行分析，并且灵敏度很高，测试深度可以从纳米区域扩展到较深的微米埋层。

由于 SiC 的拉曼散射信号容易观测，散射峰的强度、宽度以及频率能够提供大量的 SiC 结构信息，所以成为表征 SiC 晶体结构的非常有力的研究方法。

2.2.4 扫面电子显微镜 (SEM)

扫描电子显微镜 (SEM) 是一种多功能的常规测试设备，使用非常广泛，利用 SEM 可以对半导体表面的特征结构成像，其空间分辨率可以达到亚纳米级。它的基本结构是电子枪，电子透镜系统，扫描线圈，电子接收器构成，典型的工作电压是 1K-30KV。电子枪的种类有很多种，若是场发射式，亮度更大，分辨率更高，成像的质量更好。SEM 成像是由探测器接受从样品上被激发出的二次电子和背散射电子构成。其优点是样品制备比较简单，只要不超过一般腔体能容

纳的尺寸，并且能够导电，就可以观察到表面的基本形貌。此外，如果稍加改装，还可以作为 X 射线能量色散谱，进行元素分析。

2.2.5 原子力显微镜 (AFM)

原子力显微镜 (AFM) 是利用尖锐针尖在样品表面运动，做光栅扫描，或者称行帖扫描，通过测量曲臂的弯曲，从而记录下样品表面结构形貌，有极高的分辨率。AFM 之所以为人们所重视，是因为与传统的扫描电子显微镜相比，它具有非常高的横向分辨率和纵向分辨率。正常情况下，横向分辨率可以达到 0.1~0.2nm，纵向分辨率高达 0.01nm，而且可以空间三维成像，有极大的景深和对比度。

2.2.6 傅立叶红外干涉测厚法 (FTIR)

红外干涉法是利用聚焦后的红外线入射到外延层后又分别从衬底表面和外延表面反射出来，反射光束在满足一定条件下会发生相互加强或消弱的干涉作用，然后由发生加强或减弱的距离差来换算出外延层的厚度。

2.3 芯片和器件

2.3.1 SiC 电力电子器件

2.3.1.1 概述

由于 SiC 器件具有宽禁带、小型化和耐高温等特点，所以其测试过程较 Si 和 GaAs 等半导体器件要求更高的测试电压、更大的测试测试电流、更高的测试温度，SiC 肖特基势垒二极管 (SBD) 和金属-

氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）的测试项目如图 2-1 所示。

测试类别	测试项目	设备名称	测试类别	测试项目	设备名称
功率器件测试	常温器件静态参数	静态参数测试系统	可靠性例行试验	耐湿	程式恒温恒湿试验机
	常温圆片静态参数	功率器件高压探针台		稳态寿命	大功率器件老化系统
	高温静态参数测试	高低温试验箱		间歇寿命	半导体器件功率磨不系统
		小型高温试验箱		稳定性烘培	高温试验箱
	低温静态参数测试	超低温冷冻存储箱		盐雾（腐蚀）	复合式循环腐蚀盐雾试验箱
	开关时间、反向恢复	动态参数测试系统		温度循环	冷热冲击快速温变综合试验机
	栅电荷	栅电荷测试仪		热冲击	液体式冷热冲击试验机
	瞬态热阻	热阻测试仪		密封	氦气氟油加压检漏平台
	稳态热阻	稳态热阻测试系统			密封性粗检漏测试仪
	雪崩耐量	雪崩能量测试仪			密封性细检漏测试仪
	短路耐量	半导体功率器件动态测试系统		老炼试验	高温动态老化系统
	电容	半导体测试系统		恒定加速度	离心测试系统
	图示仪分析	高压静态参数测试仪表		机械冲击	机械冲击试验台
	失效分析	超声扫描显微镜分析		超声扫描显微镜系统	扫频振动
SEM 电镜分析		台式电子扫描显微镜	粒子碰撞噪声检测试验	PIND 测试系统	
EMMI 分析		EMMI 探针台	低温存储	冰柜（低温）	
X射线分析		X射线检测设备			
红外热成像分析		热成像显微镜			
显微镜拍照		实体显微镜			

图 2-1 SiC SBD 和 MOSFET 测试项目参数

2.3.2 SiC SBD

2.3.2.1 SiC SBD 静态参数测试

电力电子器件芯片的测试主要是静态参数测试。封装环节的静态参数测试与芯片环节类似，主要用于对封装质量和封装材料对芯片影响的验证。

静态参数测试包括正向导通特性、反向阻断特性。本部分通过 IWATSU 公司的高压大电流图示仪（设备型号：CT-3200）测试 20 颗 SiC SBD 样品的静态参数，测量仪器如图 2-2 所示。



图 2-2 静态参数测试系统示意图

图 2-3、图 2-4 分别显示了 20 颗 SiC SBD 样品的正向导通特性、反向阻断特性的 I-V 曲线。

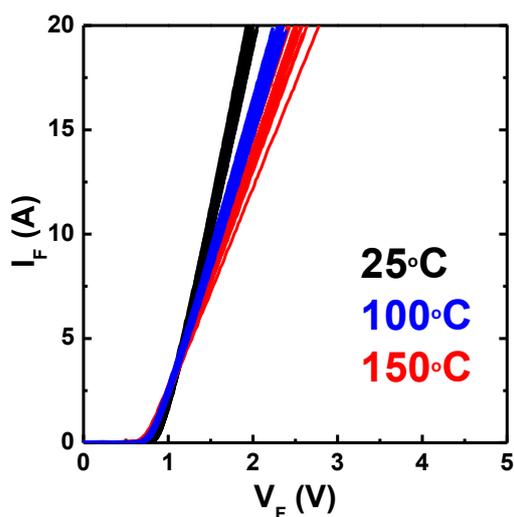


图 2-3 SiC SBD 正向导通特性

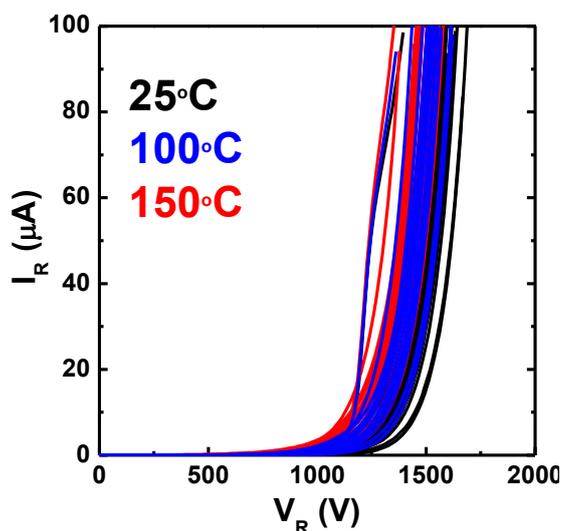


图 2-4 SiC SBD 反向阻断特性

正向导通特性测试内容包括 I-V 曲线、特征导通电阻、开启电压等，从正向导通特性图看出，20 颗器件均一性较好，且温度的改变对于器件特性的影响较小，器件稳定性较好；反向阻断特性测试内容包括 I-V 曲线、击穿电压、阻断漏电流等，从反向阻断特性看出，20 颗样品的反向漏电大约在 $10\mu\text{A}$ 左右，器件均一性有待提升，但温度对器件性能参数的漂移影响不大。

2.3.2.2 SiC SBD 动态参数测试

随着开关频率的不断增加，器件的开关损耗超过静态损耗成为主要功耗来源，器件的动态参数也成为评估器件性能的重要参数。相对于器件的静态参数，动态参数主要表征的是器件在开启或关断瞬间的电学特性参数。SBD 动态参数主要包括反向恢复特性的反向恢复时间、反向恢复电荷；SiC SBD 作为单极性器件，反向恢复电流主要是由于器件内部的结电容、管壳封装电容等充放电引起的。表 2-3 显示了 20 颗 SiC SBD 样品的反向恢复时间、反向恢复电荷以及开关功耗。

表 2-3 20 颗 SiC SBD 的动态参数测试

NO.	Trr (nS)	Qrr (nC)	开关功耗
D2-1	炸裂	炸裂	炸裂
D2-2	炸裂	炸裂	炸裂
D2-3	15.467	14.214	1.14E-05
D2-4	15.2	13.581	1.09E-05
D2-5	15.867	13.778	1.10E-05
D2-6	14.8	13.939	1.12E-05
D2-7	15	13.861	1.11E-05
D2-8	15.533	14.375	1.15E-05
D2-9	14.867	13.574	1.09E-05
D2-10	15.4	13.577	1.09E-05
D2-11	16.133	14.772	1.18E-05
D2-12	15.533	14.203	1.14E-05
D2-13	15.867	14.335	1.15E-05
D2-14	15.333	14.062	1.12E-05
D2-15	16.2	14.079	1.13E-05
D2-16	15.467	13.609	1.09E-05
D2-17	14.8	13.645	1.09E-05
D2-18	16.333	14.725	1.18E-05
D2-19	16.067	14.558	1.16E-05
D2-20	15.533	13.529	1.08E-05

2.3.2.3 SiC SBD 极限雪崩测试

SiC SBD 极限雪崩测试一般通过 E_{AS} 来衡量。 E_{AS} 指的是器件关断瞬间即单次雪崩状态下能够消耗或承受的最大能量， E_{AS} 越大，表示器件承受电路电感引起电压尖峰的能力越强， E_{AS} 与器件内部雪崩电流密度的分布及雪崩面积有关，还与器件的热性能和工作状态相关，其最终的表现就是温升。Teseq 厂家的 Teseq-3702 半导体功率器件雪崩能量测试系统，如图 2-5 所示。

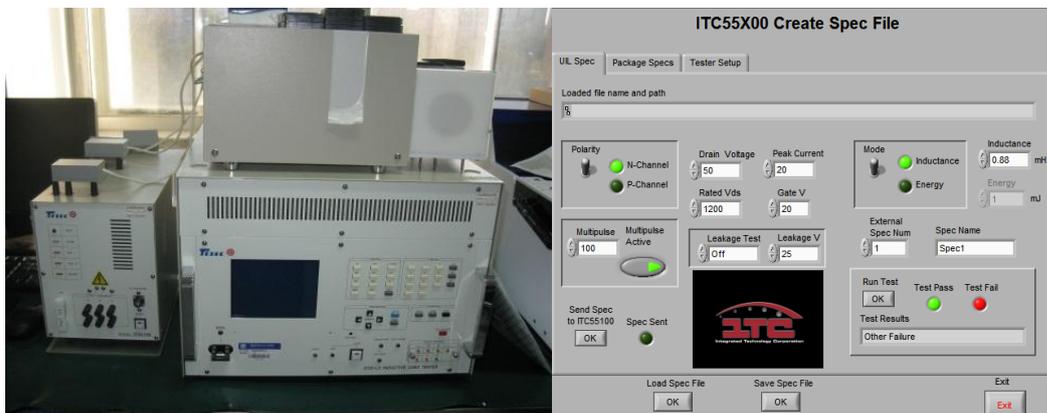


图 2-5 Teseq-3702 半导体功率器件雪崩能量测试系统

极限雪崩的测试方法是电感从 0.1mH 开始，增量为 0.01mH，逐渐增大，直至器件损坏，记录器件测坏前一次的极限雪崩值。图 2-6 即为器件损坏前一刻的测试值，此器件的极限雪崩耐量为 285.57mJ。

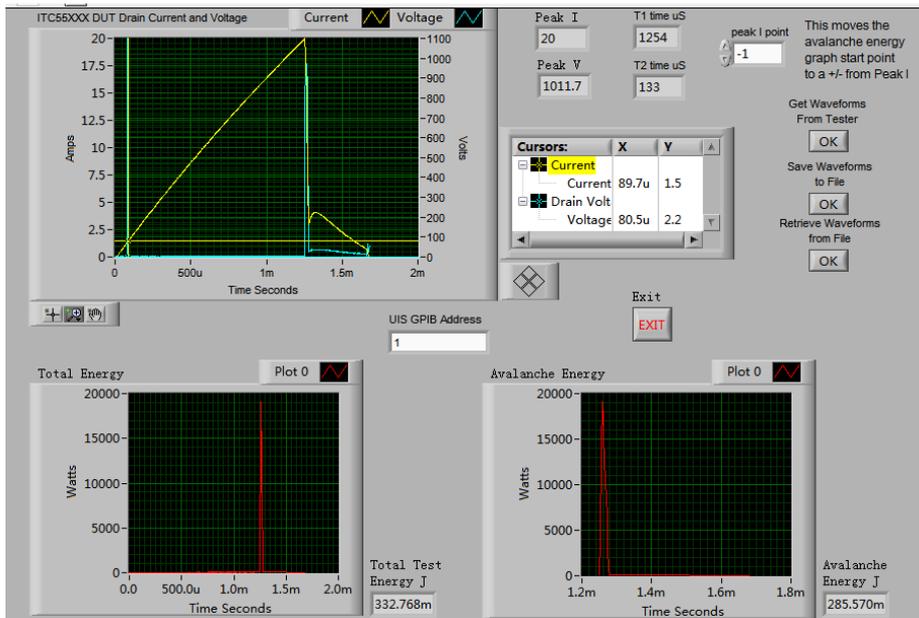


图 2-6 某一 SiC SBD 器件损坏前一刻雪崩耐量测试结果

在极限雪崩测试之后，选取其中一颗进行 1000 次重复雪崩测试，并进行小信号 I-V 对比，对比结果如图 2-7 所示。雪崩前、后的势垒高度 Φ_B 分别为 1.18eV、1.24eV，理想因子 n 分别为 1.02、1.01，器件的肖特基接触特性较好。图 2-8 所示的是 20 颗器件雪崩测试前后大电流测试结果对比，雪崩 1000 次测试前后参数漂移变化较小。

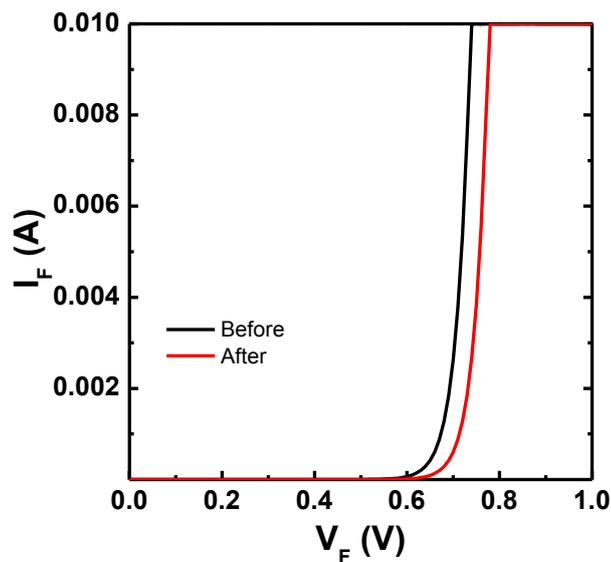


图 2-7 某一 SiC SBD 器件雪崩前后小信号测试结果对比

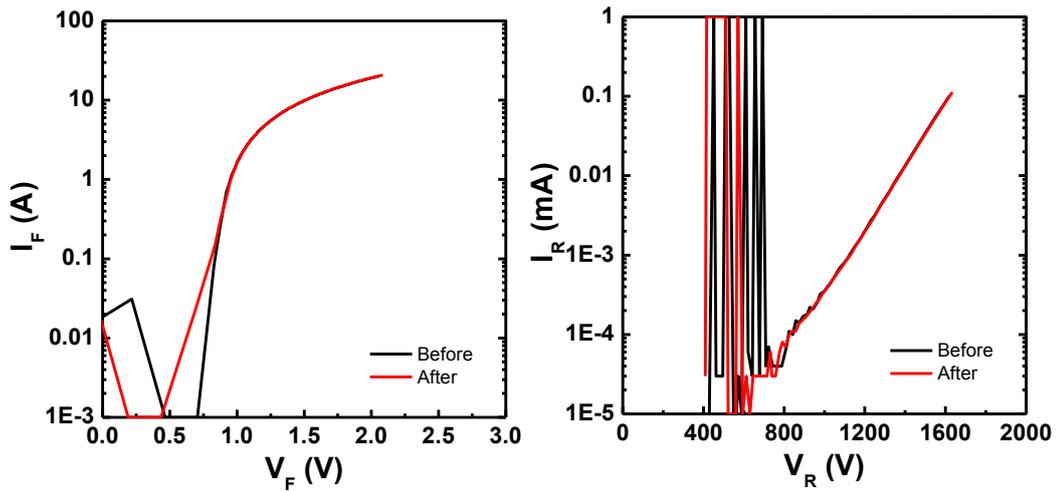


图 2-8 某一 SiC SBD 器件雪崩前后大电流测试结果对比

2.3.2.4 SiC SBD 瞬态热阻测试

为快速、有效地检验半导体器件芯片和外壳之间的烧结质量（烧结热阻），可以采用瞬态热阻（标准中称为瞬态热响应）的筛选方法。该方法向半导体器件施加一个功率脉冲，在脉冲结束后立即测量器件的热敏参数变化，以得到半导体器件芯片的结温升，进而推断半导体器件的烧结热阻（即烧结质量）。从通常意义上讲稳态热阻主要针对的是器件的性能，更多是考核器件的设计，而瞬态热阻主要针对的是器件的可靠性，更多考核的是器件的生产工艺质量。

2.3.2.5 SiC SBD 浪涌试验

在二极管的整流应用中，会承受瞬间的过高电流脉冲。除了必须保证足够的额定通态性能外，还要求能够承受数倍至数十倍的短暂的浪涌过载电流冲击而不被损坏。二极管的抗浪涌过载电流的能力，是其在实际应用中的可靠性的保证。在发生浪涌电流时，器件内部会迅

速达到一个很高的温度，最终导致器件的封装或芯片的失效。

正向浪涌电流 (I_{FSM}) 是指：持续时间短并规定波形的正向脉冲电流。这种电流由电路异常情况（如故障）引起，导致结温超过或可能超过额定最高结温，但假定其极少发生，并在器件工作寿命期内具有限定的发生次数。

非重复峰值正向浪涌电流 (I_{FSM}) 是指在结温 T_j 为某一温度时，给二极管正向施加导通角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，基波宽度为 8.3ms 或者 10ms 的最大不重复的正弦半波脉冲电流。这个参数的测试是一种破坏性测试，目的是检测器件在高电流应力条件下，器件芯片本身以及内外部引线、接触能够承受的浪涌电流能力，并且验证一个器件的抗非重复性浪涌电流等级。

2.3.2.6 SiC SBD 极限可靠性寿命试验

(1) 高温反偏试验

高温反偏试验 (High temperature reverse bias, HTRB) 用于验证长期稳定情况下芯片的泄露电流。在 HTRB 试验中，二极管芯片被施加反向偏压，在极限工作温度下，施加的反向偏压稍微低于器件的阻断电压。通过这一试验可以反映器件在这种长期极限工作条件下的退化效应以及器件的薄弱点。试验后的失效标准为漏电流是否超过许可范围。

(2) 温度循环试验 (Temperature cycling, TC)

在器件应用过程中，温度波动是必然会存在的应力条件。温度

循环试验是通过模拟环境温度波动来检验器件长期可靠性的一种方法。温度循环试验中，器件所处的环境温度被持续加热或冷却到最大或最小试验温度，并且升降温反复进行。由于材料不同的热膨胀系数引起的机械应力，温度循环会产生一定的循环机械形变。在初始和最终的测量中，检查参数的变化必须遵循失效准则。

(3) 非偏置加速应力试验 (Unbiased highly accelerated stress test, UHAST)

非偏置加速应力试验 (或存储试验) 用于验证功率器件在非工作条件下的环境限制。在此试验中通常采用高温 (或低温)、高湿等极端环境因素对器件施加应力来加速器件老化，反映器件在长期处于极限环境条件下的退化效应和器件的薄弱点。

(4) 高温高湿偏置试验 (High humidity and high temperature bias, H3TRB)

高温反偏试验用于验证湿度对功率器件长期特性的影响。常规的封装材料具有良好的透水性，湿度可以浸入封装，达到芯片表面和钝化区。H3TRB 试验的目的是发现芯片钝化时的缺点，了解封装材料与湿度相关的退化过程。在 H3TRB 试验中，芯片被施加阻断电压的 80% 的反向偏压，并长期置于高温度高湿度环境中。

(5) 间歇寿命试验 (Intermittent operating life, IOL)

间歇寿命试验 (IOL) 是对器件间断地施加应力，使器件受到“开”和“关”之间的电应力周期变化，来加速器件内部的物理、化学反应过程，而这种周期变化的电应力又导致器件和外壳温度的周期

性变化，最终得到测定电子器件的典型失效率或证实器件的质量或可靠性。

2.3.3 SiC MOSFET

SiC MOSFET 的特性不仅与传统 Si 基 MOSFET 有很大区别，与 Si 基 IGBT 的器件特性相比，也有很大不同，各个应用企业采用不同的器件测试方法评估来器件性能。

2.3.3.1 SiC MOSFET 静态参数测试

器件的静态参数是指器件在开启或关断状态下的电学特性参数，比如耐压、漏电、通态电阻、跨导等。为了了解器件的高温特性，一般在高温（如 100℃、150℃）下提取器件的特性参数。

器件的转移特性是指器件的输出端电流随输入端电压的变化特性，如图 2-9 所示，3 种型号 SiC MOSFET 与 1 种型号 Si IGBT 的在栅极电压高于阈值电压后，Si IGBT 的曲线斜率明显高于 SiC MOSFET 的，说明前者具有较高的跨导值。

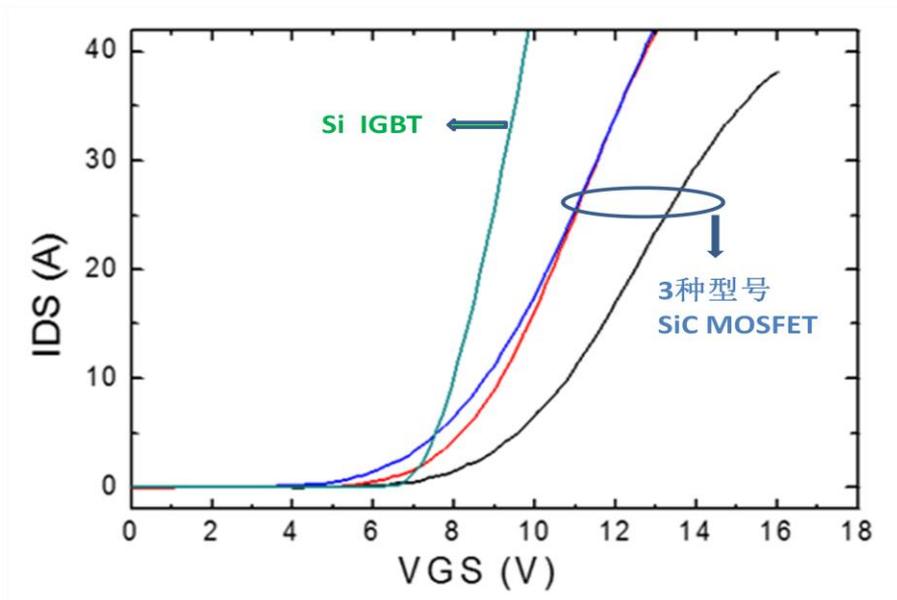


图 2-9 与 Si IGBT 相比的 SiC MOSFET 转移特性曲线

输出特性曲线是指器件在不同栅（基）压下漏极（集电极）电流随电压的变化曲线，图 2-10 显示了与 Si IGBT 相比的 3 种型号 SiC MOSFET 输出特性曲线，相比于 Si IGBT，SiC MOSFET 的输出特性普遍不理想，线性区与过度区所占区间较大，器件很难达到饱和，这就需要提高栅压来保证足够的电流。

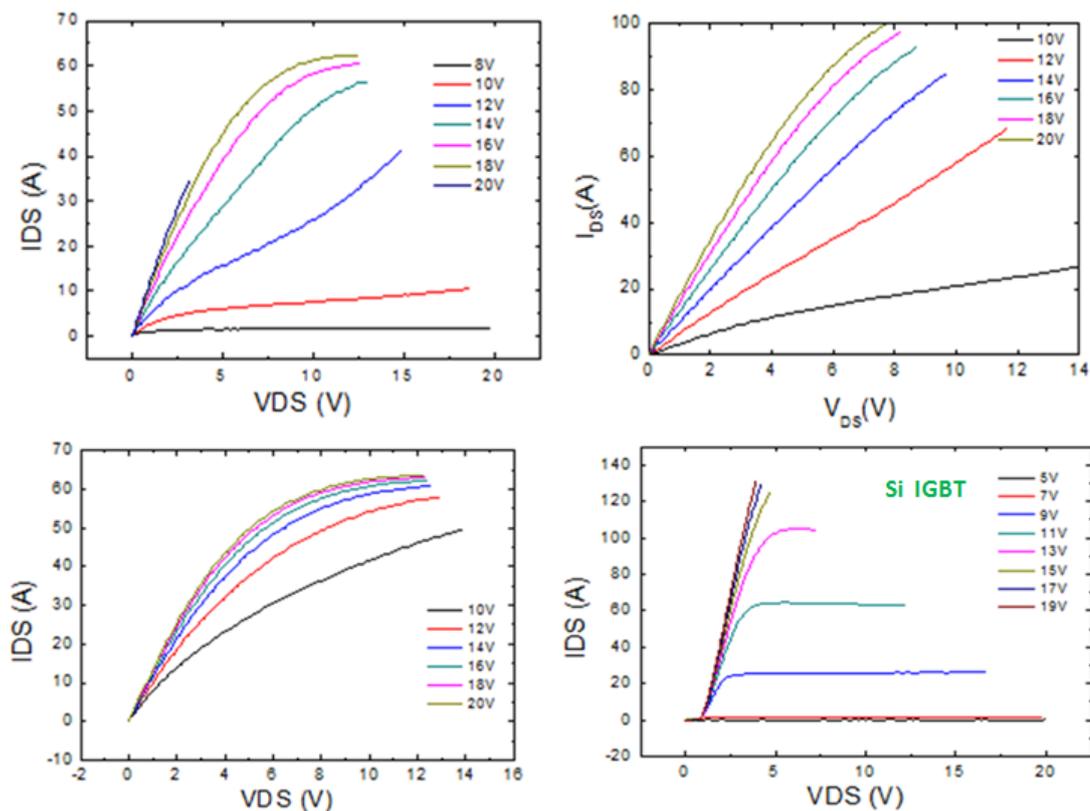


图 2-10 与 Si IGBT 相比的 SiC MOSFET 输出特性曲线

2.3.3.2 SiC MOSFET 动态参数测试

功率 MOSFET 以及 IGBT 在电路中通常作为功率开关用于能源转换及管理应用，随着开关频率的不断增加，器件的开关损耗超过静态损耗成为主要功耗来源，器件的动态参数也成为评估器件性能的重要参数。相对于器件的静态参数，动态参数主要表征的是器件在开启或关断瞬间的电学特性参数。动态参数主要包括栅电荷、阻性负载及感性负载下的开关特性、反向恢复特性、雪崩特性以及短路耐量。

2.3.3.3 极限可靠性寿命试验

(1) 高温反偏试验（High temperature reverse bias, HTRB）

高温反偏试验用于验证长期稳定情况下芯片的泄露电流。在

HTRB 试验中，MOSFET 芯片在关断状态下被施加反向偏压，在极限工作温度下，施加的反向偏压稍微低于器件的阻断电压。通过这一试验可以反映器件在这种长期极限工作条件下的退化效应以及器件的薄弱点。试验后的失效标准为漏电流是否超过许可范围。

(2) 高温栅偏试验 (High temperature gate bias, HTGB)

高温栅极偏置试验 (或高温栅极应力试验) 用于证明 MOSFET 器件栅极泄露电流的稳定性。通常栅氧化层厚度小于 100nm, 即便栅压限制在 $\pm 20V$ 以内, 栅氧化层也会产生高达 2MV/cm 的电场, 因此对栅氧化层直流及其泄露电流有很高的要求。在 HTGB 的试验中, 在接近极限工作温度下施加极限栅压 (正压或负压)。通过这一试验可以反映器件在长期极限工作条件下栅氧化层的退化、泄露电流的最大。试验后的失效标准为泄露电流是否超过许可范围。

(3) 功率循环试验 (Power cycling, PC)

在器件应用过程中, 器件工作产生功耗造成器件的升温, 器件在关断状态下会因外界温度或冷却系统而降温, 功率循环试验通过模拟器件实际的发热机制来检验器件的长期可靠性。在功率循环试验中, 器件通过正常工作的功耗加热到最大试验温度, 然后关断负载电流并冷却到最低试验温度, 该过程反复进行。由于材料间不同的热膨胀系数, 循环过程的温度波动会造成不同材料界面的机械应力。失效限制为正向压降 VC 增加、热阻增加或者器件某一功能失效。

(4) 温度循环试验 (Temperature cycling, TC)

在器件应用过程中, 温度波动是必然会存在的应力条件。温度循

环试验是听过模拟环境温度波动来检验器件长期可靠性的一种方法。温度循环试验中，器件所处的环境温度被持续加热或冷却到最大或最小试验温度，并且升降温反复进行。由于材料不同的热膨胀系数引起的机械应力，温度循环会产生一定的循环机械形变。在初始和最终的测量中，检查参数的变化必须遵循失效准则。

(5) 间歇寿命试验 (Intermittent operating life, IOL)

间歇寿命试验(IOL)是对器件间断地施加应力，使器件受到“开”和“关”之间的电应力周期变化，来加速器件内部的物理、化学反应过程，而这种周期变化的电应力又导致器件和外壳温度的周期性变化，最终得到测定电子器件的典型失效率或证实器件的质量或可靠性。

2.3.4 GaN 电力电子器件-HEMT

2.3.4.1 概述

GaN 基新型电力电子器件是继 LED、射频器件之后的第三个 GaN 研究热点。GaN 电力电子器件的发展晚于微波功率器件，可以依托微波器件的材料制备方法与制造工艺，但相对也有两个突出的技术难点。一是为降低生产成本，用于电力电子的外延材料必须在硅衬底上生长；二是电力电子系统要求增强型的器件形态。

增强型 GaN 晶体管为高电子迁移率晶体管 (HEMT)，具有横向结构，一般采用 Si 材料作为基底材料，AlN 隔离层用于将基底与器件的结构部分隔离，在 AlN 隔离层上生长 GaN 层，在 GaN 厚层上生

长 AlGa_N 层，AlGa_N/Ga_N 异质结形成导电的二维电子气（2DEG），具有高电子迁移率。

GaN HEMT 相关性能测试包括 I-V 曲线、C-V 曲线等，因衡量芯片各方面性能时一般是封装成器件后测试，芯片生产分拣时，可能会用探针简单测试部分参数，所以这部分以封装之后的分立器件的测试为主。

表 2-4 GaN HEMT 测试参数和相关设备

序号	项目	参数	相关测试设备
1	静态	BV_{DSS}	KeySight B1505A Keithley 4200 Tektronix 371A/370
2		I_{DSS}	
3		I_{GSS}	
4		$V_{GS(th)}$	
5		$R_{DS(on)}$	
6		V_{SD}	
7	动态	C_{ISS}	ITC57300, KeySight B1505A
8		C_{OSS}	
9		C_{RSS}	
10		Q_G	
11		Q_{GD}	
12		Q_{GS}	
13		Q_{OSS}	
14		Q_{RR}	
15		$T_d(on)$	
16		T_r	
17		$T_d(off)$	
18	T_f		
19	热阻	$R_{\theta JC}$	PHASE 11
20		$R_{\theta JB}$	
21		$R_{\theta JB}$	
22	安全区域 测试	SOA	PHASE 11
23		FBSOA	
24		RBSOA	
25		SCSOA	
26		SSOA	

2.3.4.2 静态参数测试系统

静态参数测试系统是功率器件分析不可缺少的测试设备。GaN HEMT 器件的静态参数主要有极限参数击穿电压 BV_{DSS} 、源漏最大电流 I_D 以及导通电阻 $R_{DS(ON)}$ 、阈值电压 $V_{GS(th)}$ 、栅源漏电流 I_{GSS} 、源漏漏电流 I_{DSS} 、源漏正向电压 V_{SD} 等。KeySight B1505A、Keithley 4200 与 Tektronix 371A/370 为目前使用较多的静态参数测试系统。

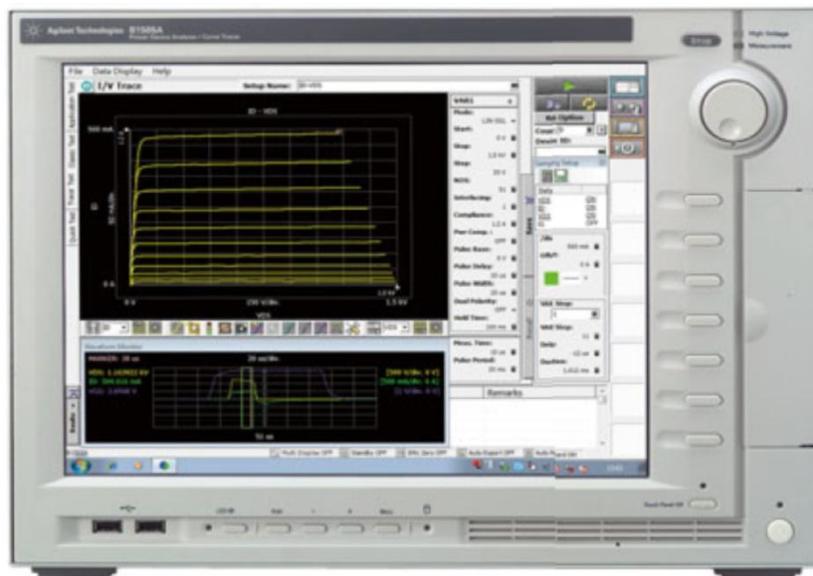


图 2-11 KeySight B1505A 图示

Keysight B1505A是目前国内各个实验室与企业拥有较多的研究型测试设备，其最大电压测试能力可达10KV，电流测试能力1500A，快脉冲能力10 μ s， $\mu\Omega$ 级导通电阻测量分辨率，以及亚pA级电流测量能力（不同测试范围需要用户根据实际需求选配），可以自动测试动态参数如电容（ C_{iss} 、 C_{oss} 、 C_{rss} 、 C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 等）。同时可以配置栅极电荷 Q_g 测试模块，是目前使用比较广泛的设备。Keysight B1505A可以配置探针台以及夹具，支持圆片（手动与自动）以及封装器件的测试。



图2-12 Keithley 4200

升级后的keithley 4200也满足高压大电流GaN HEMT器件静态测试需求。其也可以支持Cascade Microtech Summit 12K系列、Karl Suss PA-200和PA-300, Micromanipulator 的8860自动和手动探针台, 进行手动和自动测试。



图2-13 Tektronix 370&371A

Tektronix是早期使用较多的高压大电流测试示波器, 多用于研发。其中370测试电压范围2000V, 最大电流20A, 可以同时支持圆片与封

装器件的测试。371A可以测试电压3000V，电流400A，并且带有脉冲测试模式，主要用于封装器件的测试。

2.3.4.3 动态参数测试系统

功率分立器件的另一个重要特性就是其动态特性。动态参数的优良决定着器件的开关性能。器件的动态参数主要是寄生电阻和寄生电容，在动态应用中，会引起充、放电过程，因此给电路带来一些限制，甚至有的电路中会将精确把握此动态过程作为电路设计的重点。与MOSFET类似，影响GaN HEMT开关性能的动态参数有输入电容 C_{ISS} 、输出电容 C_{OSS} 、反向输出电容 C_{RSS} 、栅极内阻 R_G 、栅极电荷 Q_G 、 Q_{GD} 、 Q_{GS} 、 Q_{OSS} 、 Q_{RR} 等。目前使用比较多的设备为ITC57300动态参数测试系统。ITC57300具有57210、57220、57230、57240、57250五个测试头，用于不同的动态参数测试。其测试能力为1200Vdc、200A条件下时间测试精度为1ns，并可抓取测试波形，主要用于研发测试。



图 2-14 ITC 57300 动态测试系统

2.3.4.4 热阻与安全工作区域测试系统

功率半导体器件的热阻测试是反映产品封装后散热性能等重要参数，功率晶体管工作在大电流状态下其散热能力决定了器件的使用可靠性，散热能力不好，即使开始时晶体管的各项参数合格，在工作一段时间后由于结温上升超过额定范围，会导致器件失效或烧毁，从而导致整个电子设备的失效，其后果不堪设想。必须对功率晶体管的热阻特性进行考核。

与 MOSFET 功率器件一样，GaNHEMT 器件的热阻也主要有三个关键参数结壳热阻 $R_{\theta JC}$ 、管壳热阻 $R_{\theta JB}$ 以及结环热阻 $R_{\theta ja}$ 。目前使用比较主流的热阻测试仪主要有美国 Analysis Tech InC 公司的

PHASE 11D 等，其测试符合美军标和 JEDEC 标准。



图 2-15 PHASE 11 热阻与安全工作区域测试系统

安全工作区是器件能安全工作的范围，安全工作区统称 SOA。根据工作状态，分为正偏安全工作区 FBSOA、反偏安全工作区 RBSOA、短路安全工作区 SCSOA 一级开关安全工作区 SSOA。安全工作区主要与器件源漏最大电流 I_D 、源漏最大脉冲电流 I_{DM} 、击穿电压 BV_{DSS} 以及耗散功率 P_D 相关，其中 I_D 、 I_{DM} 、 BV_{DSS} 与 P_D 均为器件极限参数。PHASE 11 可以测试出 SOA 曲线。

2.3.4.5 可靠性测试

可靠性是器件实现应用的先决条件，而对于 GaNHEMT 器件而言，可靠性是制约其走向大规模应用的核心之一。由于衬底材料与外延直接存在的大的热失配与晶格失配，使得外延中存在高的缺陷密度，这些缺陷在高电场、高温以及高应力等条件下，会导致器件性能发生漂移甚至失效。目前国际上还未对 GaNHEMT 可靠性形成明确的系统评价体系，大部分测试条目参考 MOSFET 测试，但需要根据其自身的特殊性质，引入特殊评价体系。可以借鉴的可靠性测试易环境试

验与加速寿命试验为主。加速寿命试验主要有高温栅偏（HTGB）、高温反偏（HTRB）等。环境试验包括温度循环（TC）、高加速应力试验（HAST）、湿度偏置（THB）等。此外还针对 GaNHEMT 特有性质，进行动态导通电阻等可靠性的测试。

2.3.4.6 失效分析

失效分析是对失效样品、可靠试验失效样品、筛选失效样品的解剖分析，在此基础上得出失效模式和失效机理，并判断失效原因，可以为提高器件可靠性提供科学依据与理论指导。对于 GaN HEMT 器件而言，由于其特殊性，其失效模式与失效机理也比 MOSFET 更复杂多样。其失效分析包括测试、外观检查、开封、解剖后观察与分析。

2.4 应用部件及系统

2.4.1 消费类电子

2.4.1.1 电源适配器

电源适配器（Power adapter）是小型便携式电子设备及电子电器的供电电源变换设备，一般由外壳、变压器、电感、电容、控制 IC、PCB 板等元器件组成，它的工作原理由交流输入转换为直流输出，一般需要提供多重安全保护机制，如过压保护、过流保护、短路保护等。输出规格示例为 5V/2A、9V/0.6A、12V/2A 等；广泛配套于笔记本电脑、手机、安防摄像头、机顶盒、路由器、灯条、按摩仪等设备中。

电源适配器的电磁兼容要求中，电源端子传导骚扰电压要求的验

证方法及标准要求符合 GB9254 第 5 章节，需满足 B 级限制要求；辐射骚扰场强要求的验证方法及标准要求符合 GB9254 第 6 章节，需满足 B 级限制要求。

安全要求方面，耐压强度测试的验证方法及标准要求符合 GB4943.1 第 5.2 章节；安全距离测试符合 GB4943.1 第 2.10 章节；机械强度符合 GB4943.1 第 4.2 章节；防火测试符合 GB4943.1 第 4.7 章节。

性能要求方面的测试一般包括时序测试、静态负载测试、能效测试、负载调整率测试、源调整率测试、电压骤升骤降测试、耐压测试；功能要求测试一般包括短路保护测试、输出过流保护测试、输出过压保护测试；环境适应性要求一般包括低温存储测试、高温存储测试、低温工作测试、高温高湿工作测试、跌落测试，测试方法标准 GB/T2423.1、GB/T2423.2、GB/T2423.3。

2.4.1.2 空调、冰箱等变频控制器

空调、冰箱等变频控制器一般作为家用电器的部件，B2B 的销售模式比较多。这种家用器具及类似用途的其它器具微电脑控制器，是以集成电路为核心、电信号为基础，继电器、可控硅等半导体驱动器为执行装置组成的电子式控制器。本部分的测试以某一产品的测试为例，供相关的产品测试做参考。

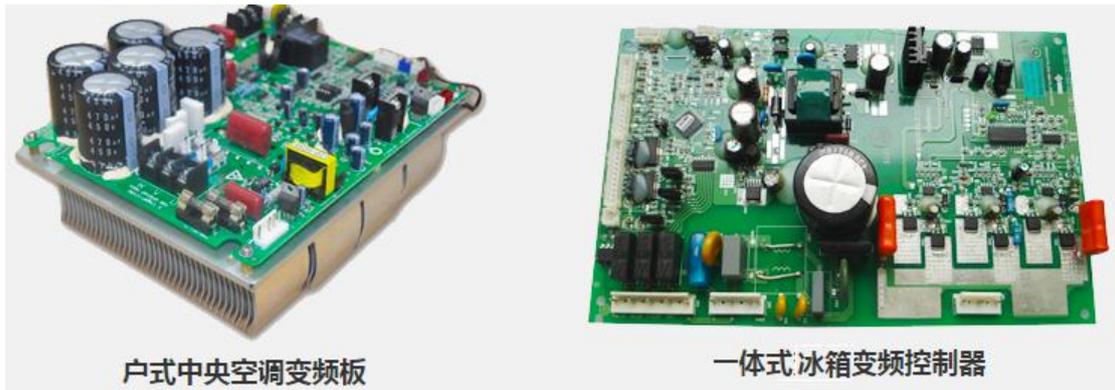


图 2-16 厦门华联生产的变频控制其产品外观图

在电磁兼容方面，符合 GB4343.1、GB4343.2、GB17625.1、GB17625.2 相关要求，测试方法参照 GB/T17626.2、GB/T17626.3、GB/T17626.4、GB/T17626.5、GB/T17626.6、GB/T17626.8、GB/T17626.11 等相关内容，测试项目包括静电放电敏感度、电脉冲快速瞬变、浪涌（冲击）、射频场感应的传导辐射、抗扰度、电压暂降和短时中断、射频场感应的传导骚扰抗扰度、工频磁场抗扰、传导干扰电压、连续干扰功率、电磁场辐射骚扰特性、谐波、断续骚扰、电压波动和闪烁等。

在电气安全方面，需要符合 GB 4706.1-2005《家用和类似用途电器的安全第 1 部分：通用要求》，绝缘电阻要求“常温常湿条件下，带电部件与绝缘材料或接地端之间的绝缘电阻 $> 100M\Omega$ ”；电气强度要求“常温常湿条件下，对带电部件与绝缘材料或接地端之间施加频率为 50Hz 的基本正弦波，试验电压为 1250V，持续时间为 1min，不得发生击穿或闪络现象”；泄漏电流要求“控制器泄漏电流应符合 GB 4706.1-2005 第 16 章要求，泄漏电流 $< 0.5mA$ ”；爬电距离和电气间隙应符合 GB 4706.1-2005 第 29 章要求；耐热和耐燃，控制器

应符合“球压试验:控制器的主要非金属材料进行 125℃的球压试验,压痕直径 < 2mm”,“灼热丝试验:一般通过电流 0.5A(特殊情况除外)及以上的连接件的绝缘材料支撑件或距离在 3mm 以内的绝缘材料应经受住 750℃的灼热丝试验,其他绝缘零件则应经受住 550℃的灼热丝试验”。

环境适应性方面,测试方法参考GB/T2423电工电子产品环境试验系列标准,控制器一般测试项目包括高低温冲击、耐湿热、耐高温、耐低温、耐盐雾、振动、跌落等。高低温冲击将控制器按GB/T 2423.22-2012 规定,不通电放置在温度为 $-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 低温箱中保存1h,然后取出,在5min 内将其放入 $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的保温箱中继续保存1h,按以上方法重复5 个周期,立即施加额定工作电压,控制器各方面功能和性能指标满足要求;耐湿热方面,按GB/T 2423.3-2016 规定,在温度 55°C ,湿度95%的环境中通以额定电压48h 后,室温下放置2 小时后检测,绝缘电阻、电气强度、外观和功能指标仍然满足产品要求;耐高温方面,控制器在 $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的环境中通以额定电压,工作48h 后,室温下放置2 小时后,控制器功能和外观仍满足要求;耐低温方面,将控制器放在 $-25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的环境中通以额定电压,工作48h 后,室温下放置2 小时后,控制器功能和外观仍满足要求;耐盐雾方面,控制器按GB/T 2423.17-2008 规定,在 $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、质量比为 $(5 \pm 1)\%$ 氯化钠、PH 值6.5 ~ 7.2之间,盐雾沉降量(1-2) ml/小时,喷雾压力0.4Mpa 条件下试验48h,取出后冲去表面盐积物,试验后金属件不应出现明显锈蚀,功能和外观仍满足要求;振动方面,控制器包装装箱

后,按GB/T 2423.10-2008 规定进行正弦扫频振动试验,振幅1.5mm,频率10Hz-55Hz-10Hz,前后、左右、上下各振动10min,试验后外观和功能仍满足要求,将控制器固定在振动台上,按GB/T 2423.10-2008 规定进行正弦扫频振动试验,频率10Hz-60Hz,振幅0.15mm;频率60Hz-500Hz,加速度2g,前后、左右、上下各振动6min,试验后外观和功能仍满足要求;跌落方面,控制器包装装箱后,按GB/T 2423.8-1995 规定试验高度为0.8m 自由跌落在混凝土地上,按一角三边六面共10 个方向各进行一次,试验后外观和功能仍满足要求。

控制器的**可靠性**测试方面,温升按GB 4706.1-2005 第11 章规定,在额定负载下施以额定工作电压的1.06 倍连续运行,待温度稳定后,测量发热器件表面最高温度;发热元件的温升应符合GB 4706.1-2005 中表3 的要求,且最热发热元件极限允许温升应 $\leq 60^{\circ}\text{C}$ 。短路发热方面,控制器所属变压器、继电器、可控硅及电路中连接的电动机等主要电器可分别模拟如下故障进行试验:短路绕组、继电器失控(粘连)、可控硅击穿、电动机堵转等,主要易发热元件出现短路或出现不能控制发热的开路现象时,不应出现冒烟、金属融化和着火现象。高低电压工作特性,将控制器的电源电压从额定电压以1V/s 速度慢慢降至额定电压的75%并保持3min,控制器各项功能指标应仍满足要求,继电器不应产生抖动;将控制器的电源电压从额定电压以1V/s 速度慢慢升至额定电压的1.25 倍并保持3min,控制器不得有打火现象。电源突变适应能力方面,将控制器与所属产品或测试仪相连,运行正常工作程序,使电源电压在1s 内从额定电压的上限突变到额定电压的

下限,然后以同样速率上升到额定电压的上限,如此反复进行20次,控制器不应发生程序混乱、存储器内容消失及复位现象。

在性能和功能方面,相关特征检测项目包括启动特性、转速精度与转速关系、加减速速率、空载功耗、动态损耗、保护功能、压机启动/运行/停机电流波形、共振点屏蔽区、控制器关键信号波形、关键元器件温升、高低压高低频运行实验、电源测试、主变一体板逻辑软件测试等。因各控制器的性能和功能要求差异比较大,多为定制要求,在此不详述测试具体条款。

2.4.2 新能源并网

2.4.2.1 光伏逆变器

逆变器又称电源调整器,根据逆变器在光伏发电系统中的用途可分为独立型电源用和并网用二种。根据波形调制方式又可分为方波逆变器、阶梯波逆变器、正弦波逆变器和组合式三相逆变器。对于用于并网系统的逆变器,根据有无变压器又可分为变压器型逆变器和无变压器型逆变器。

在**电气安全**方面,测试内容包括绝缘电阻、介质强度、电气间隙和爬电距离测试。绝缘电阻要求“在正常试验大气条件下,逆变器各独立电路与外露的可导电部分之间,以及与各独立电路之间的绝缘电阻应不小于 $1M\Omega$ ”。介质强度要求“在正常试验大气条件下,逆变器应能承受频率为50Hz,历时1min的工频交流电压或等效直流电压,试验时,逆变器应无内部或外部的绝缘闪络和击穿或任何破坏性放电

现象，但允许辉光放电”。电气间隙和爬电距离要求“逆变器各带电电路之间以及带电部件、导电部件、接地部件之间的电气间隙和爬电距离应符 GB/T 16935.1 的规定”。

在**电磁兼容**方面，测试项目包括静电放电抗扰度检测、电快速瞬变脉冲群抗扰度测试、射频电磁场辐射抗扰度测试、浪涌（冲击）抗扰度测试、射频场感应的传导骚扰抗扰度测试、电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验、工频磁场抗扰度试验、阻尼振动波抗扰度试验、电压波动抗扰度试验、传导发射、辐射发射。静电放电抗扰度检测要求“逆变器可在轻载状态下运行，按照 GB/T 17626.2 抗扰度等级 3 的要求，即空气放电 8kV 和接触放电 6kV, 试验结果应符合 b 类要求”。电快速脉冲群抗扰度测试要求“逆变器可在轻载状态下运行，按照 GB/T 17626.4 试验等级 3 的要求，即电源端 $\pm 2\text{kV}$, 信号端 $\pm 1\text{kV}$, 试验结果应符合 b 类要求”。射频电磁场辐射抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.3 试验等级 3 的要求，试验场强 10V/m , 试验结果应符合 a 类要求”。浪涌（冲击）抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.5 的试验要求，对电源端口施加 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 的浪涌信号，试验等级为线对线 $\pm 1\text{kV}$, 线对地 $\pm 2\text{kV}$, 试验结果应符合 b 类要求”。射频场感应的传导骚扰抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.6 试验等级 3 的要求，试验场强 10V/m , 试验结果应符合 a 类要求”。电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.11 试验等级 3 的要求，电压暂降等级：0%持续 0.5 周期，0%持续 1 周期，40%持续 10 周期，70%持续 25 周期，80%持续 250 周期；电压中断等级：0%持续 250

周期。试验结果应符合 b 类要求”。工频磁场抗扰度测试要求“逆变器可在轻载状态下运行,按照 GB/T 17626.8 的试验要求,等级 3A/m~10A/m(家用或直接连接到住宅低压供电网设施中使用的逆变器)或等级 4A/m~30A/m(非家用或连接到工业电网设施中使用的逆变器),试验结果应符合 a 类要求”。阻尼振荡波抗扰度测试要求“逆变器可在轻载状态下运行,按照 GB/T 17626.12 的试验要求,等级 2(与控制室和继电器室内设备电缆相连使用的逆变器)或等级 3(与安装在继电器室内的设备电缆相连使用的逆变器),试验结果应符合 a 类要求”。电压波动抗扰度测试要求“逆变器可在轻载状态下运行,按照 GB/T 17626.14 的试验要求,等级 2(家用或直接连接到住宅低压供电网设施中使用的逆变器)或等级 3(非家用或连接到工业电网设施中使用的逆变器),试验结果应符合 a 类要求”。传导发射要求“逆变器应在满载状态下运行,按照 GB 4824 规定进行并满足组 A 类或 B 类限值”。辐射发射要求“逆变器应在满载状态下运行,按照 GB 4824 规定进行并满足组 A 类或 B 类限值”。

在**环境应力**方面,测试项目包括低温工作试验、高温工作试验、湿热试验、振动试验、紫外线暴露。低温工作试验要求“按照 GB/T 2423.1 中规定的方法进行检测,在试验温度为工作温度下限且稳定后,产品应能正常启动运行,持续额定负载运行时间 2h。试验结束后在恢复至常温 2h 后,变流器仍能正常工作”。高温工作试验要求“按照 GB/T 2423.2 中规定的方法进行检测,在试验温度为工作温度上限且稳定后,产品应能正常启动运行,持续额定负载运行时间 2h。试

验结束后在恢复至常温 2h 后，变流器仍能正常工作”。湿热试验根据试验条件和使用环境，选择交变湿热试验和恒定湿热试验中的一种。交变湿热试验要求“按照 GB/T 2423.4 中规定的方法进行检测，试验持续时间为 48h，试验后，在正常环境条件下恢复 2h 后，逆变器应能正常工作”。恒定湿热检测要求“按照 GB/T 2423.3 中规定的方法进行检测，试验持续时间为 48h，试验后，在正常环境条件下恢复 2h 后，逆变器应能正常工作”。振动试验要求“按照 GB/T 2423.10 中规定的方法进行检测，频率范围 10Hz~150Hz，振幅 0.075mm，加速度 1g，3 个互相垂直的轴方向，10 个扫描周期。振动试验后，逆变器应能正常启动工作”。紫外线暴露要求“使用炭弧灯或氙弧灯照射装置，逆变器垂直安装在辐照装置圆柱面的内侧，并使得最大比例的样品表面朝向光源”。

在**功能与性能**方面，测试项目包括自动开关机、软启动、恢复并网、通信功能验证、温升、有功功率控制试验、电压/无功调节试验、光伏方阵绝缘阻抗检测试验、光伏方阵残余电流检验试验、转换效率、MPPT 效率、谐波和波形畸变、功率因数、三相不平衡度、直流分量、过电压/欠电压保护、过/欠频保护、极性或相序错误保护、直流输入过载保护、短路保护、防反放电保护、防孤岛效应保护、低电压穿越等。各光伏逆变器的功能和性能要求存在差异，在此不详述测试具体条款。

2.4.2.2 风电变流器

双馈风力发电机变流器与双馈风力发电机配套，连接与转子绕组之间的交直交电压源型静止变流器，用于为发电机转子提供交流励磁或将转子能量送入交流电网，以及实现发电机定子绕组并网控制等功能。主要由电机侧变流器、直流环节、电网侧变流器及其控制系统组成，具有能量双向流动的特点。永磁风力发电机变流器与永磁风力发电机配套，连接于定子绕组与电网之间的交直交电压源型静止变流器，用于将定子绕组能量送入电网等功能，主要由电机侧变流器、直流环节、电网侧变流器及其控制系统组成。有的类型能量可以双向流动，而有的仅能向电网侧流动。

在**电气安全**方面，测试内容包括绝缘电阻、介质强度、电气间隙和爬电距离测试。绝缘电阻要求“在正常试验大气条件下，变流器各独立电路与外露的可导电部分之间，以及与各独立电路之间的绝缘电阻应不小于 $1\text{M}\Omega$ ”。介质强度要求“在正常试验大气条件下，变流器应能承受频率为 50Hz ，历时 1min 的工频交流电压或等效直流电压，而无击穿闪络及元件损坏现象”。电气间隙和爬电距离要求“变流器各带电电路之间以及带电部件、导电部件、接地部件之间的电气间隙和爬电距离应符 GB/T 14048 的规定”。

在**电磁兼容**方面，测试项目包括静电放电抗扰度试验、电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。静电放电抗扰度试验要求“按照 GB/T 12688.3 中的规定，在人体能够靠近或触摸到的机壳端口（如端口、按钮、触摸屏等）采用 6kV 接触放电，若不存在接触放电可能时，采用 8kV 空

气放电。测试时装置内元器件应补损坏，试验期间及试验后装置的性能符合验收准则 B 的要求”。电快速瞬变脉冲群抗扰度试验要求“按照 GB/T 12688.3 中的规定，针对控制电路供电电源端口，在保护接地的情况下，采用 2kV 脉冲电压，重复频率 5kHz 进行试验；针对 I/O (输入/输出) 信号、数据和控制端口，采用 1kV 脉冲电压，重复频率 5kHz 进行试验。测试时装置内元器件应补损坏，试验期间及试验后装置的性能符合验收准则 B 的要求”。

在**环境应力**方面，测试项目包括低温环境检测、高温环境检测、耐湿热环境检测。低温环境检测要求“按照 GB/T 2423.1 中规定的方法进行检测，在试验温度为工作温度下限且稳定后，产品应能正常启动运行，持续运行时间 2h。试验结束后在恢复至常温 2h 后，变流器仍能正常工作”。高温环境检测要求“按照 GB/T 2423.2 中规定的方法进行检测，在试验温度为工作温度上限且稳定后，产品应能正常启动运行，持续运行时间 2h。试验结束后在恢复至常温 2h 后，变流器仍能正常工作”。耐湿热环境检测根据试验条件和使用环境，选择交变湿热环境检测和恒定湿热检测中的一种。交变湿热环境检测要求“按照 GB/T 2423.4 中规定的方法进行检测，试验持续时间为 48h，试验后，测量其绝缘电阻不应小于 $0.5\text{M}\Omega$ ，介质强度不应低于试验电压值的 75%”。恒定湿热检测要求“按照 GB/T 2423.3 中规定的方法进行检测，试验持续时间为 48h，试验后，测量其绝缘电阻不应小于 $0.5\text{M}\Omega$ ，介质强度不应低于试验电压值的 75%”

在**功能与性能**方面，测试项目包括负载控制功能、过载能力、总

谐波畸变系数（THD）、电网适应能力、效率、温升、并网切入电流、保护功能等。各变流器的功能和性能要求存在差异，在此不详述测试具体条款。

2.4.2.3 储能变流器

储能变流器（PCS）可控制蓄电池的充电和放电过程，进行交直流的变换，在无电网情况下可以直接为交流负荷供电。PCS 由 DC/AC 双向变流器、控制单元等构成。PCS 控制器通过通讯接收后台控制指令，根据功率指令的符号及大小控制变流器对电池进行充电或放电，实现对电网有功功率及无功功率的调节。

在**电气安全**方面，绝缘电阻、介质强度、电气间隙和爬电距离测试按照 GB/T 7251.1 中的规定进行检测。绝缘电阻要求“在正常试验大气条件下，储能变流器各独立电路与外露的可导电部分之间，以及与各独立电路之间的绝缘电阻应不小于 $1M\Omega$ ”。介质强度要求“在正常试验大气条件下，储能变流器应能承受频率为 50Hz，历时 1min 的工频交流电压或等效直流电压，试验过程中要保证不击穿，不飞狐，漏电流 $< 20mA$ ”。电气间隙和爬电距离要求“储能变流器各带电电路之间以及带电部件、导电部件、接地部件之间的电气间隙和爬电距离应符合 GB/T 7251.1 的规定”。

在**电磁兼容**方面，测试项目包括静电放电抗扰度检测、电快速瞬变脉冲群抗扰度测试、射频电磁场辐射抗扰度测试、浪涌（冲击）抗扰度测试、射频场感应的传导骚扰抗扰度测试、传导发射、辐射发射。

静电放电抗扰度检测要求“储能变流器可在轻载状态下运行，按照 GB/T 17626.2 抗扰度等级 3 的要求，即空气放电 8kV 和接触放电 6kV，试验结果应符合 b 类要求”。电快速脉冲群抗扰度测试要求“储能变流器可在轻载状态下运行，按照 GB/T 17626.4 试验等级 3 的要求，即电源端 $\pm 2\text{kV}$ ，信号端 $\pm 1\text{kV}$ ，试验结果应符合 b 类要求”。射频电磁场辐射抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.3 试验等级 3 的要求，试验场强 10V/m ，试验结果应符合 a 类要求”。浪涌（冲击）抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.5 的试验要求，对电源端口施加 $1.2/50\mu\text{s}$ 的浪涌信号，试验等级为线对线 $\pm 1\text{kV}$ ，线对地 $\pm 2\text{kV}$ ，试验结果应符合 b 类要求”。射频场感应的传导骚扰抗扰度测试要求“按照 GB/T 17626.6 试验等级 3 的要求，试验场强 10V/m ，试验结果应符合 a 类要求”。传导发射要求“储能变流器应在满载状态下运行，按照 GB 4824 规定进行并满足组 A 类或 B 类限值”。辐射发射要求“储能变流器应在满载状态下运行，按照 GB 4824 规定进行并满足组 A 类或 B 类限值”。

在**环境应力**方面，测试项目包括低温环境检测、高温环境检测、耐湿热环境检测。低温环境检测要求“按照 GB/T 2423.1 中规定的方法进行检测，在试验温度为工作温度下限且稳定后，产品应能正常启动运行，且持续额定运行时间不应低于 72h”。高温环境检测要求“按照 GB/T 2423.2 中规定的方法进行检测，在试验温度为工作温度上限且稳定后，产品应能正常启动运行，且持续额定运行时间不应低于 72h”。耐湿热环境检测根据试验条件和使用环境，选择交变湿热环境检测和恒定湿热检测中的一种。交变湿热环境检测要求“按照 GB/T

2423.4 中规定的方法进行检测，试验后，测量其绝缘电阻不应小于 $0.5\text{M}\Omega$ ，介质强度不应低于试验电压值的 75%”。恒定湿热检测要求“按照 GB/T 2423.3 中规定的方法进行检测，试验后，测量其绝缘电阻不应小于 $0.5\text{M}\Omega$ ，介质强度不应低于试验电压值的 75%”

在**功能与性能**方面，测试项目包括充放电转换时间检测、直流充电性能检测、并离网切换检测、效率检测、温升检测、过载能力检测、电流谐波检测、电压谐波检测、电流间谐波检测、电压间谐波检测、闪变检测、三相不平衡度检测、直流分量检测、输出电压偏差检测、输出频率偏差检测、电压动态瞬变值检测、有功功率控制检测、无功功率调节功能检测、功率因数检测、频率适应性检测、电压适应性检测、低电压穿越能力检测、防孤岛保护性能检测、短路保护检测、极性反接保护检测、直流过欠压保护检测、离网过流保护检测、过温保护检测、交流进线相序保护检测、通讯故障保护检测、冷却系统故障保护检测等。各储能变流器的功能和性能要求存在差异，在此不详述测试具体条款

2.4.3 不间断电源

不间断电源设备（uninterruptible power system, UPS）是指“由变流器、开关和储能装置（如蓄电池）组合构成的，在输入电源故障时，维持负载电力连续性的电源设备”。由中国电器工业协会作为主管部门，全国电力电力系统和设备标准化委员会作为归口单位制定的 GB/T 7260 不间断电源设备系列标准是目前 UPS 参考使用的重要文件。UPS 的基本功能是确保交流电源的连续供电，也可用于改善电源

质量，使其保持在预定的特性范围之内。

GB/T 7260.1-2008《不间断电源设备 第 1-1 部分：操作人员触及区使用的 UPS 的一般规定和安全要求》适用于预定安装在操作人员触及区内、用于低压配电系统的移动式、驻立式、固定式或嵌装式的 UPS，以保证操作人员和可能触及设备的外行人员的安全，保证按制造商规定的方法安装、操作和维修 UPS 的安全。GB/T 7260.4-2008《不间断电源设备 第 1-2 部分：限制触及区使用的 UPS 的一般规定和安全要求》，与 GB/T 7260.1-2008 相比，是适用于预定安装在限制触及区内的 UPS。

GB7260.2-2009《不间断电源设备(UPS)第 2 部分：电磁兼容性(EMC)要求》适用于“单台 UPS 或由数台 UPS 互连与相关控制器/开关装置构成单一电源组成的 UPS 系统”、“连接至工业、住宅、商业和轻工业的低压供电系统的任何操作者可触及及区域独立电气场所的 UPS”；标准规定了 EMC 要求、试验方法、最低性能的电平。

GB/T7260.3-2003《不间断电源设备(UPS)第 3 部分 确定性能的方法和试验要求》规定了确定 UPS 性能的方法和试验要求，适用于直流环节有电储能装置的电子间接交流变流系统。“4 一般环境使用条件”包括 4.1 正常环境和气候使用条件、4.2 由买主确定的非正常使用条件；“5 电气使用条件和性能”包括 5.1 概述(对所有 UPS)、5.2UPS 输入的规定、5.3 UPS 输出的规定、5.4 UPS 中间直流电路和/或蓄电池电路的技术要求、5.5UPS 开关的额定值和性能、5.6 冗余和并联 UPS 系统、5.7 电磁兼容性、5.8 信号电路；“6 UPS 的电气试验”

包括 6.1 概述、6.2 UPS 功能单元的试验、6.3 按制造厂商声明的特性进行的整体 UPS 型式试验、(6.4、6.5 为以后保留) 6.6 工厂验证试验/现场试验、6.7 UPS 开关试验方法; “7 非电气试验” 包括 7.1 环境和运输试验方法、7.2 环境储存和运行试验方法、7.3 噪声。

GB/T 7260.3-2003 标准中, 6.6 部分规定工厂验证试验/现场试验应由制造厂商与购买者协商, 表 4 显示了完整的 UPS 可在工厂进行的型式或出厂试验, 这些试验通常是购买合同的一部分, 关系到在发货前, 制造厂商对 UPS 或 UPS 功能单元进行试验的程度。

序号	UPS 试验	出厂试验	非强制性试验,特殊应用要求时进行	试验要求
1	互连电缆检验	×		6.6.1
2	轻载试验	×		6.6.3
3	UPS 辅助装置试验	×		6.6.4
4	同步试验		×	6.6.5
5	交流输入故障试验	×		6.6.6
6	交流输入恢复试验	×		6.6.7
7	并联冗余 UPS 故障的模拟试验	×		6.6.8
8	转换试验	×		6.6.9
9	满载试验	×		6.6.10
10	UPS 效率试验		×	6.6.11
11	不平衡负载试验		×	6.6.12
12	平衡负载试验		×	6.6.13
13	并联或并联冗余 UPS 电流分配试验		×	6.6.14
14	额定储能供电时间试验		×	6.6.15
15	额定能量恢复时间试验		×	6.6.16
16	蓄电池纹波电流试验		×	6.6.17
17	过载能力试验		×	6.6.18
18	短路试验		×	6.6.19
19	短路保护装置试验		×	6.6.20
20	再起动试验		×	6.6.21
21	输出过电压试验		×	6.6.22
22	输出电压周期性变化试验		×	6.6.23
23	频率变化试验		×	6.6.24
24	射频骚扰和传导噪声试验		×	6.6.25
25	谐波分量试验		×	6.6.26
26	接地故障试验		×	6.6.27
27	现场通风试验		×	6.6.28
28	环境试验		×	7.1
29	振动和冲击试验		×	7.2
30	噪声测试		×	7.3
31	备用发电机兼容性试验		×	6.6.29

图 2-X GB/T 7260.3-2003 标准表 4 的 UPS 试验一览表

2.4.4 电动汽车

2.4.4.1 非车载充电机

NB/T 33001-2010《电动汽车非车载传导式充电机技术条件》规定了电动汽车用非车载传导式充电机的基本构成、功能要求、技术要求、试验方法、检验规则及标识。充电机基本构成包括：功率单元、控制单元、计量单元、充电接口、供电接口及人机交互界面等。NB/T 33001-2010 标准的表 7 列出了充电机的出厂试验与型式试验项目，表 7 截图如图 2-X 所示。

NB/T 33008.1-2013《电动汽车充电设备检验试验规范 第 1 部分：非车载充电机》规定了电动汽车非车载充电机试验条件、检验仪器、检验规则、检验项目、试验方法。

序号	试验项目	技术要求	型式试验	出厂试验
1	环境试验			
	低温试验	6.1.1	√	—
	高温试验	6.1.1	√	—
	湿热试验	6.1.2	√	—
2	防护等级试验	6.3.1	√	—
3	温升试验	6.4	√	—
4	电击防护试验	6.5.2	√	√
5	绝缘性能试验			
	绝缘电阻试验	6.6.1	√	√
	工频耐压试验	6.6.2	√	√
	冲击耐压试验	6.6.3	√	—
6	安全性能试验			
	输入过压保护试验	6.7.1	√	√
	输入欠压报警试验	6.7.1	√	√
	输出过压、过流保护试验	6.7.2	√	√
	绝缘检查及接地保护试验	6.7.3	√	√
	软启动试验	6.7.6	√	√
7	充电输出试验			
	稳流精度试验	6.8.2	√	√
	稳压精度试验	6.8.3	√	√
	纹波试验	6.8.4	√	√
	输出电流误差试验	6.8.5	√	√
	输出电压误差试验	6.8.6	√	√
	输出限压、限流特性试验	6.8.7	√	√
8	效率及功率因数试验	6.9	√	√
9	均流不平衡度试验	6.10	√	—
10	谐波电流试验	6.11	√	—
11	电磁兼容性试验	6.12	√	—
	静电放电抗扰度试验	6.12.1.1	√	—
	射频电磁场辐射抗扰度试验	6.12.1.2	√	—
	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	6.12.1.3	√	—
	浪涌(冲击)抗扰度试验	6.12.1.4	√	—
	辐射骚扰试验	6.12.2.1	√	—
	传导骚扰试验	6.12.2.2	√	—
12	机械强度试验	6.13	√	—
13	噪声试验	6.14	√	—

图 2-X NB/T 33001-2010 表 7 非车载充电机出厂试验与型式试验项目

2.4.4.2 车载充电机

QC/T 895-2011 《电动汽车用传导式车载充电机》规定了电动汽车传导式车载充电机的基本构成、参数、要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输和储存。车载充电机指固定安装在电动汽车上，将公共电网的电能变换为车载储能装置所要求的直流电，并给车载储能装置充电的装置。车载充电机由交流输入接口、功率单元、控制单元、直流输出接口等部分组成，充电过程中宜由车载充电机提供电池管理系统（BMS）、充电接触器、仪表盘、冷却系统等低压用电电源。

车载充电机出厂检验中的性能试验项目包括输入电压、限压特性和限流特性、过压保护、电位均衡和接地保护、低压供电功能、输出电压误差、输出电流误差、功率因数、充电效率、绝缘性能。

车载充电机进行型式检验的产品，应从出厂检验合格的能够覆盖整个加工工艺的产品中随机抽取，共抽取 12 个样本，全部完成性能试验，合格后分成 6 组，每组 2 个样本。每组样本的检验项目和检验顺序应符合 QC/T 895-2011 表 9 的规定，如图 2-X 所示。

序号	检验项目	技术要求	试验方法	组别					
				I	II	III	IV	V	VI
1	基本高压性能试验	6.5	7.5	√	√	√	√	√	√
2	湿度试验	6.2.1	7.2.1	—	—	—	—	√	—
3	温度试验	6.2.2	7.2.2	—	—	—	√	—	—
4	短路保护	6.4.3.3	7.4.3.3	—	—	—	√	—	—
5	过温保护	6.4.3.4	7.4.3.4	—	—	—	√	—	—
6	反接保护	6.4.3.5	7.4.3.5	—	—	—	√	—	—
7	断电保护	6.4.3.7	7.4.3.7	—	—	—	√	—	—
8	电压纹波系数	6.5.4	7.5.4	—	—	—	√	—	—
9	输出响应时间	6.5.6	7.5.6	—	—	—	√	—	—
10	介电强度	6.6.2	7.6.2	—	—	√	—	—	—
11	电气间隙和爬电距离	6.6.3	7.6.3	—	√	—	—	—	—
12	抗电磁干扰	6.7.1	7.7.1	√	—	—	—	—	—
13	产生的电磁骚扰	6.7.2	7.7.2	√	—	—	—	—	—
14	谐波电流含量	6.7.3	7.7.3	√	—	—	—	—	—
15	振动试验	6.8.1	7.8.1	—	√	—	—	—	—
16	冲击试验	6.8.2	7.8.2	—	—	√	—	—	—
17	耐工业溶剂性能试验	6.8.3	7.8.3	—	—	—	—	√	—
18	IP 防护等级试验	6.8.4	7.8.4	—	√	—	—	—	—
19	盐雾试验	6.8.5	7.8.5	—	—	—	—	√	—
20	噪声	6.9	7.9	—	—	—	√	—	—
21	耐久试验	6.10	7.10	—	—	—	—	—	√

图 2-X QC/T 895-2011 的表 9 车载充电机需进行的型式试验

2.4.4.3 车用电机控制器

根据 GB/T 18488.1-2015《电动汽车用电机及其控制器第 1 部分：技术条件》对电机控制器的定义，电机控制器就是控制主牵引电源与电机之间能量传输的装置，由外界控制信号接口电路、电机控制电路

和驱动电路组成，电机控制器作为电动汽车的主要部件，在电动汽车整车系统中起着非常重要的作用。GB/T 18488.1 规定了电动汽车用驱动电机系统的工作制、电压等级、型号命名、要求、检验规则以及标志与标识等，GB/T 18488.2 则规定了电动汽车用电机系统试验用的仪器仪表、试验准备及各项试验方法。在电气安全方面，需要满足 GB/T 18488.1-2015 中对于绝缘电阻的规定，“驱动电机控制器动力端子与外壳、信号端子与外壳、动力端子与信号端子之间的冷态及热态绝缘电阻应不小于 $1\text{M}\Omega$ ”，工频耐电压应满足 GB/T 18488.1-2015 中 5.2.8.2.3 的要求，并进行安全接地检查，要求“驱动电机控制器中能初级的可导电部分与外壳接地点处的电阻不应大于 0.1Ω ，接地点应有明显的接地标志。若无特定的接地点，应在有代表性的位置设置接地标志”。同时，GB/T 18488.1-2015 中 5.5.2 还规定了“控制器应具有短路、过电流、过电压、欠电压和过热的保护功能”。

在环境适应性方面，要求通过的检测项目包括：低温（低温贮存、低温工作）、高温（高温贮存、高温工作）湿热、耐振动（扫频振动、随机振动）、防水防尘、盐雾等要求。进行高温贮存试验时，需将驱动电机控制器放入高温箱内，按照 GB/T 2423.2-2008 的规定，使箱内温度升至 85°C ，并保持 2 h，试验过程中，控制器处于非通电状态。进行高温工作试验时，将控制器正确连接，按照 GB/T 2423.2-2008 的规定，放入高温箱内，按照 GB/T 18488.1-2015 中 5.6.2.2 的要求设置高温箱内的试验环境温度，驱动电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压，检查是否能正常工作。湿热试验方面，将驱动电机控制

器放入温度为 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 90%~95%的试验环境条件下，保持 48 h，48 h 后，按照 GB/T 18488.2-2015 中 5.7 的方法复测绝缘电阻。耐振动方面，被试样品固定在振动台上并处于正常安装位置，进行扫频振动试验时，按照 GB/T 18488.1-2015 中 5.6.4.1.1 的要求设置严酷度等级，并按照 GB/T 2423.10-2008 的规定进行试验。进行随机振动试验时，按照 GB/T 18488.1-2015 中 5.6.4.2.1 的要求设置严酷度等级，并按照 GB/T 2423.3-2008 的规定进行试验。防水、防尘方面，按照 GB/T 4942.1-2006 和 GB 4208-2008 中所规定的方法进行试验。盐雾方面，按照 GB/T 2423.17-2008 的规定进行试验，控制器在盐雾箱内处于正常安装状态，试验周期不低于 48 小时，试验后，控制器恢复 1 h~2 h 后，应能正常工作。

车用电机控制器的可靠性测试应按照 GB/T 29307-2012《电动汽车用驱动电机系统可靠性试验方法》的规定进行试验。

2.4.5 电机控制器

GB /T 30843 系列标准、GB /T 30844 系列标准分别适用于 1kV 以上不超过 35kV 的通用变频调速设备、1kV 及以下通用变频调速设备；两个系列标准均包括“第 1 部分：技术条件”、“第 2 部分：试验方法”、“第 3 部分：安全规程”。这部分以 GB /T 30843 系列标准为例阐述电机控制器的相关测试内容。

GB /T 30843.1-2014《1kV 以上不超过 35kV 的通用变频调速设备 第 1 部分：技术条件》规定了调速设备的分类、使用条件、技术要求、试验项目及标志、包装、运输与贮存。GB /T 30843.1-2014 中表 14

为试验项目一览表，如图 2-X 所示，除非另有协议，试验应包括全部标示“×”的项目，“(×)”的项目只在合同要求时进行。

序号	试验项目	型式试验	出厂试验	专门试验	条款号
1	一般检查	×	×	—	7.1、7.2
2	绝缘试验	×	×	—	7.3.1、7.3.2
3	电气间隙和爬电距离	×	×	—	7.3.3
4	接地保护连续性	×	×	—	7.3.4
5	输出额定容量	×	—	—	7.4
6	轻载运行	×	×	—	7.5
7	运行频率范围内的输出能力	×	—	—	7.6
8	效率	×	—	—	7.7
9	功率因数	—	—	(×)	7.8
10	温升	×	—	—	7.9
11	噪声	—	—	(×)	7.10
12	频率分辨率	×	—	—	7.11
13	输出电压不对称率	×	—	—	7.12
14	过载能力	—	—	(×)	7.13
15	保护功能	×	×	—	7.14
16	环境适应性	—	—	(×)	7.15
17	电磁兼容性	×	—	—	7.16
18	防护等级	×	—	(×)	7.17

图 2-X GB/T 30843.1-2014 中表 14 变频调速设备的试验项目

GB/T 30843.2《1kV 以上不超过 35kV 的通用变频调速设备 第 2 部分：试验方法》规定了调速设备的试验方法，“4 试验要求”规定了正常试验环境条件、正常试验电气条件、其他要求以及试验安全；“5 试验项目及方法”包括 5.1 一般检查、5.2 通电与预置、5.3 绝缘试验、5.4 最小电气间隙和爬电距离、5.5 保护接地连续性、5.6 防护等级试验、5.7 噪声测量、5.8 保护功能、5.9 谐波测量、5.10 输出电压不对称的测量、5.11 频率分辨率、5.12 效率测量、5.13 温升试验、

5.14 启动特性试验、5.15 过载能力试验、5.16 连续运行试验、5.17 控制电源供电稳定性、5.18 环境试验、5.19 电磁兼容性试验。

GB/T 30843.3《1kV 以上不超过 35kV 的通用变频调速设备 第 3 部分：安全规程》规定了通用变频调速设备或其元件有关电气、热和能量等除供电电源以外安全方面的要求。该标准中“4 设计和制造的安全要求”部分，包括 4.1 一般要求、4.2 故障状态下危险的防护、4.3 电击危险的防护、4.4 热危险防护、4.5 机械危险的防护、4.6 运行危险的防护、4.7 其他危险的防护、4.8 安全功能；“5 检验与验证”部分包括 5.1 一般要求、5.2 试验技术要求；“6 资料和标志的要求”包括 6.1 一般要求、6.2 选用信息、6.3 安装与现场调试信息、6.4 使用信息、6.5 维护信息。

2.4.6 轨道交通用电力电子变流器

GB/T 25122.1-2010《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第 1 部分：特性和试验方法》修改采用了 IEC61287.1-2005，起草单位是株洲南车时代电气股份有限公司。这个标准规定了机车车辆用电力电子变流器的术语和定义、使用条件、一般特性和试验方法，适用于为机车车辆（电力机车、内燃机车、动车、客车及拖车等）牵引电路与辅助电路供电的电力电子变流器，也适用于其他牵引机车车辆（例如有轨电车、地铁、城市轨道交通车辆）的电力电子变流器。

电力电子变流器是指，“基于功率半导体来改变它的电能的一个或多个参数（包括电压、电流、频率和/或相数）的电子设备”。变流器可以是一台分立的整流器、斩波器或逆变器，也可以由它们组合而

成，且可以不在一个柜体内；变流器是牵引（或辅助）设备的一个组成部分，它可包括主断路器、滤波器、变压器、冷却系统。牵引变流器是指“为牵引电动机供电的变流器”；辅助变流器是指“向辅助设备（如辅助电路、电池充电、空调、冷却、控制电路等）供电的变流器”。

对于变流器来说，试验包括三种，型式试验、例行试验、研究性试验。型式试验是用来检验产品是否满足制造商和用户商定的要求；例行试验用于验证变流器的组装是否正确，所有的部件功能是否正常和安全；研究性试验是为了获得有关变流器使用的附件信息，它受制造商与用户的协议制约。验证变流器的一般特性的型式试验和例行试验按照 GB/T 25122.1-2010 的表 3 规定和 4.5.3.1~4.5.3.23 的具体内容进行，GB/T 25122.1-2010 的表 3 如图 2-X 所示，这些一般试验的项目和分类由至少要执行的试验构成。主电路的半导体器件应符合 IEC60747 中的规定，在现有标准规定的工作条件下，应能保证它们的功能。

试验类型	试验地点	型式试验	例行试验	条款
目检	工厂		√	4.5.3.1
验证尺寸和公差	工厂	√		4.5.3.2
称重	工厂	√		4.5.3.3
标志检查	工厂		√	4.5.3.4
冷却系统性能试验	工厂/车上	√		4.5.3.5
空气过滤器的有效性检查	工厂/车上	√ ^a		4.5.3.5.4
泄漏试验	工厂/车上		√	4.5.3.5.5
机械、电气保护和测量设备的试验	工厂	√	√	4.5.3.6
轻载试验	工厂		√	4.5.3.7
防护等级试验	工厂	√ ^a		4.5.3.8
换流试验	工厂/车上	√		4.5.3.9
噪声测量	工厂	√		4.5.3.10
温升试验	工厂	√		4.5.3.11
功率损耗测定	工厂	√		4.5.3.12
供电过电压和瞬态能量试验	工厂/车上	√		4.5.3.13
负载突变	工厂/车上	√ ^a		4.5.3.14
绝缘电阻试验	工厂		√ ^a	4.5.3.15
介电强度试验	工厂		√	4.5.3.16
局部放电试验	工厂	√ ^a		4.5.3.17
安全性要求检查	工厂	√		4.5.3.18
冲击和振动试验	工厂	√		4.5.3.19
电磁兼容试验	工厂/车上	√		4.5.3.20
网压跳变试验	工厂/车上	√		4.5.3.21
供电短时中断试验	工厂/车上	√		4.5.3.22
均流试验	工厂/车上	√ ^a		4.5.3.23
注：表中列出的试验并在车上进行的试验认为是变流器试验，但也可作为综合试验的一部分。				
^a 试验的执行受制造商和用户之间协议的制约。				
^b 某些尺寸和公差可以根据技术规范的要求由例行试验检查。				

图 2-X GB/T 25122.1-2010 中表 3 变流器试验一览表

GB/T 25122.2《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第 2 部分:补充技术资料》说明了机车车辆电力电子变流器（例如外部换相整流器、自换相整流器、斩波器和逆变器）的基本电路结构、控制方法、工作方式和性能。该标准列出了典型的图表和例子进行论述，但并没有论述变流器的所有方面，主要内容是计算电气参数，如输入/输出电压、输入/输出电流、电流和电压的的频谱、纹波电流和电压以及谐波电

流和电压。

2.4.7 电网

在电力系统中碳化硅电力电子器件在电力电子变压器、固态断路器、柔性交流输电系统、直流输电技术等方面将得到广泛的应用。

2.4.7.1 电力电子变压器

近年来分布式发电系统和智能电网技术不断发展，碳化硅基于其很好的性能在当前的电力电子变压器（即固态变压器）中具有广泛的应用。固态变压器是电力电子变流器 and 高压变压器中能量转换的关键装置。固态变压器相较于传统变压器具有体积较小、供电质量较高、供电效率比较高、工作性能稳定的特点。

电力电子变压器是一种将电力电子变换器(整流器、逆变器)和高频变压器相结合，实现传统电力变压器电气量变换、能量传递以及系统隔离等基本功能的输配电装置。由于目前应用于电力系统的功率器件，无论在容量还是耐压等级方面，都较输电系统低，所以预计电力电子变压器未来在电力系统应用应首先在配电领域实现。图 2-X 为电力电子变压器的基本原理图。

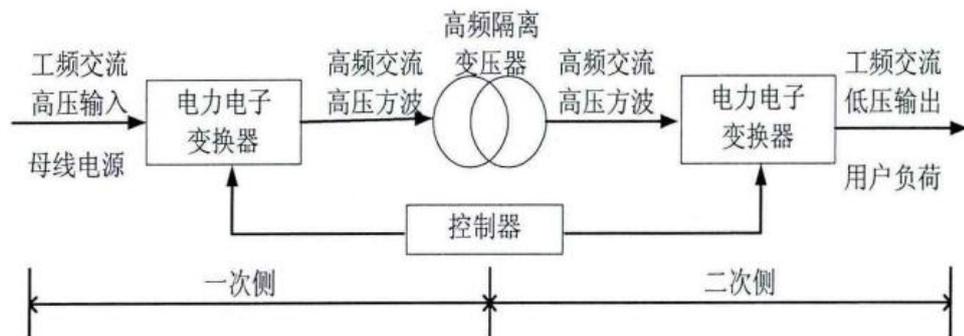


图 2-17 配电用电力电子变压器基本原理

如图 2-17 所示，电力电子变压器的电力电子变换器(整流、逆变器)应包括主电路和控制电路两部分组成。对于配电系统的变压器，为了与常规电力变压器一致，所以将与电源侧相连的电力电子变换器及与其对应的高频变压器的相应绕组定义为一次侧；将与负荷侧相连的电力电子变换器及与其对应的高频变压器的相应绕组定义为二次侧。二者之间通过高频变压器相连。

PET 工作原理为:在一次侧，工频母线高压通过电力电子变换器的作用变成高频交流方波，即一次侧将电压的频率提高，实现升频的作用。由于变压器的体积与铁芯材料饱和磁通密度和绕组最大容许温升有关，饱和磁通密度大的变压器的体积也大。而铁芯材料的饱和磁通密度又和变压器的工作频率成反比，所以一次侧电力电子变换器的升频作用，可以提升铁芯材料的利用率，以减小变压器的体积，节省变压器所占空间。这也是电力电子变压器相比于传统电力变压器的一大优点。

高频方波经过高频隔离变压器变压之后，被耦合到 PETI 狗二次侧。二次侧的电力电子变换器将经过变压之后的高频方波还原成工频低压交流电能，向负荷供电。一次侧母线电源电压幅值与二次侧输出电压幅值之比称为电力电子变压器的变比。

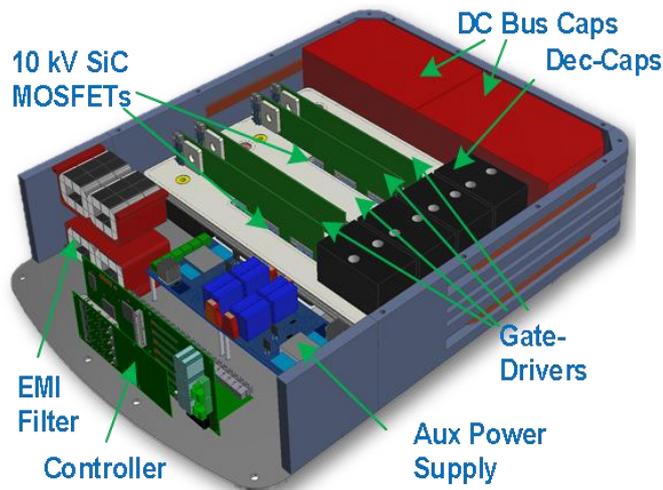


图 2-18 高功率密度电力电子变压器应用

图 2-18 是高功率密度电力电子变压器内部结构。电力电子变压器实现传统电力变压器的基本功能的关键在于:电力电子变换器实现电压或电流幅值、频率等波形的控制;高频变压器实现传统变压器电气隔离的作用。

电力电子变压器的**电磁兼容试验**要求中,在操作冲击试验时,验证变压器对外部事件操作所产生的电磁辐射的灵敏度。作为电磁辐射结果,这项试验必须说明:a)不产生变压器开关元器件的误触发;b)开关元器件的故障信息或错误信号不通过电路中电子传递给变压器的控制和保护系统。

电力电子变压器的**型式试验**方面,变压器对地间的绝缘强度试验一般包括交流试验和雷电冲击试验;变压器端间绝缘强度试验一般包括交流试验、换流链节端间局部放电测量以及操作冲击试验;变压器运行试验一般包括空载时链节电容器电压平衡试验、周期触发和熄灭试验、功率损耗试验、温升试验、过电流试验和快速放电试验。相关验证方法及标准参照 GB 311、GB/T 7354 等要求。

电力电子变压器的**产品试验**包括外观检查、连接检查、耐压检查、辅助部件检查、触发检查和冷却系统试验。

2.4.7.2 固态断路器

固态断路器是一种电力电子电路，不是依靠机械装置的运动来完成负载的通断，而是依靠改变半导体的导电性能来实现负载的接通与断开及故障电流的分断。固态断路器的开通与关断是依靠半导体内部载流子的运动来实现的，速度快，随着半导体器件的发展，开断速度能实现微妙甚至纳秒级，短路故障电流可大幅限制，且无电弧产生，具有广泛应用前景。但目前受限于器件的电压电流等级限制，还未广泛推广，急需高压大电流半导体器件来推动该装置的技术发展。

图 2-19 是固态断路器的结构，图 2-X 为断路器实物图。

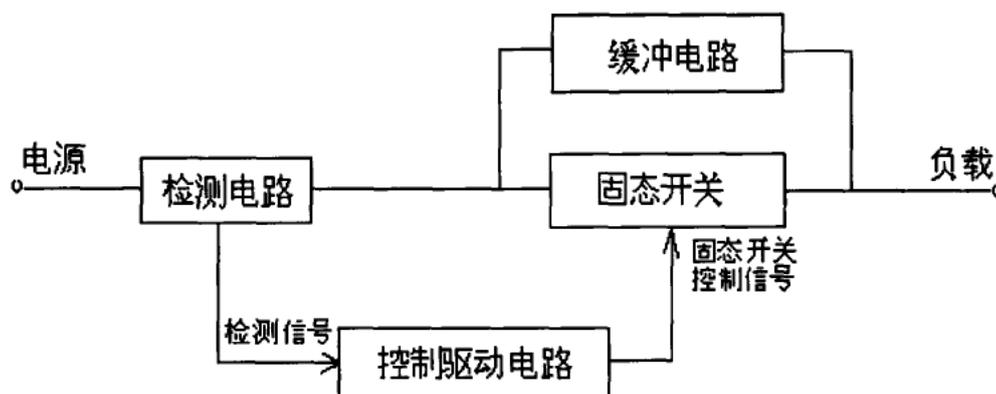


图 2-19 固态断路器结构图



图 2-20 断路器实物图

该装置主要由以下几个部分组成：

(1) 固态开关

由电力电子器件构成单相或三相固态交流开关，实现对主电路的通、断控制。

(2) 检测电路

装置的检测电路完成对线路上电流及电压的即时检测，并根据电流及电压的变化进行相应的判断，并最终输出相应的检测信号。

(3) 控制驱动电路

主要以 DSP 芯片为核心，配以复杂可编程逻辑器件 CPLD 以及驱动保护电路构成，负责整个装置动作的正确完成和电力电子回路的保护等。根据检测电路测量的主电路电压、电流的模拟量，处理成开关量送入 DSP 处理器。DSP 处理器将得到的信号经过数值计算、数字滤波、逻辑处理后送到驱动电路，经驱动电路功率放大后发出正确的控制驱动信号给固态开关。

(4) 缓冲电路

固态开关上并联缓冲电路，是由于 IGBT 在关断的时候会产生较大的反相关断电压。因此设计了由电容、电阻、二极管等构成的缓冲回路来吸收关断时的能量以保护电力电子器件，防止固态开关因开关动作产生的冲击而损坏，同时也减少了电力电子器件的开关损耗。

固态断路器的工作原理:当断路器控制回路得电后，测控装置通过人机接口下达合闸命令，DSP 经过检测断路器的各种信号，当符合条件时使一个开出量变成高电平，该高电平送到电力电子器件的驱动电路使其导通。当断路器接通后测控装置会通过传感器、A/D 器件检测线路上的交流信号并且同时将转换后的数据送 DSP 处理，计算出各交流信号的有效值、频率、功率等。当检测到故障的时候或者进行分闸的时候，DSP 经过检测断路器的各种信号，使开出量变为低电平，该低电平送到电力电子器件的驱动电路使其关断并发出故障信号，使电力电子固态开关迅速分断。

固态断路器的电磁兼容要求中，安装在装置内的电子设备（例如控制器、切换开关、电力电子阀等）应满足国标有关抗干扰和辐射的要求。试验方法按 GB/T 17626.2、GB/T 17626.3、GB/T 17626.4、GB/T 17626.5 的规定进行试验，结果应符合以下要求：浪涌（冲击）抗扰度，应符合 GB/T 17626.5 中 3 级要求；电快速瞬变脉冲群抗扰度，应符合 GB/T 17626.4 中 3 级要求；射频电磁场抗扰度，应符合 GB/T 17626.3 中 3 级要求；静态放电抗扰度，应符合 GB/T 17626.2 中 3 级要求。

安全要求方面，绝缘试验中，快速开关的绝缘试验方法参照 GB 311.1 的规定进行，电力电子阀的绝缘试验方法参照 DL/T 1010.2 的规定进行，成套装置的绝缘试验方法参照 GB 311.1 的规定进行；装置内不同相的裸露带电导体之间以及它们与外壳之间的电气间隙和爬电距离应满足规定的等级防护要求；外壳防护等级检查按照 GB4208 的规定，应满足规定的防护等级要求。

性能要求方面的测试：额定短时耐受电流测试试验，试验方法参照 GB/T 11022 6.6 的要求进行，试验中应无任何热和机械损伤，无部件和功率器件发生损坏；额定峰值耐受电流测试试验，试验方法参照 GB/T 11022 6.6 的要求进行，试验中无任何热和机械损伤，无部件和功率器件发生损坏。

2.4.7.3 柔性交流输电系统

柔性交流输电系统（flexible AC transmission system, FACTS）是当前交流电网先进的技术之一。FACTS 有着高压输电以及大功率的特性，碳化硅电力电子器件由于其固有的高耐压等特性，将能够科学、高效的实现系统电压、功率和输电品质的控制，并有效降低输电的损耗，随着器件水平的不断发展，在 FACTS 技术中必然越来越受到重视。

电力系统中静止无功补偿器（static synchronous compensator, STATCOM）、统一潮流控制器（UPFC）等主要用于潮流控制和无功补偿，碳化硅电力电子器件应该有效提高其系统的稳定性和响应速度，

碳化硅电力电子器件在灵活交流输电装置的应用，将能够使拓扑结构大幅简化，装置损耗显著降低，占地面积也大大减少。且由于碳化硅电力电子器件开关频率得到有效的提高，电力系统中电能质量也能够得到有效的提升。

2.4.7.4 直流输电技术

碳化硅电力电子器件能够促进高压直流的输电技术快速的发展。例如柔性直流输电换流阀工作时承受高达几百千伏的电压以及高达几千安培的电流，需要众多元件的串联并存在导通损耗大的问题。碳化硅电力电子器件耐压性能良好，这种特性能够有效减少电力系统中需要的器件数量，大大简化直流输电电力系统的结构，并能够有效降低电能传输中的能耗，促进高压直流输电技术的发展和进步。随着碳化硅器件的快速发展，未来能在直流换流阀、高压直流断路器、直流 DC-DC 变流器等得到广泛应用。

国家电网公司企业标准 Q/GDW 1889-2013《高压直流输电电压源换流器（VSC）阀-电气试验》规定了针对空气绝缘的 VSC 阀的，其他类型绝缘的阀同样必须遵守这个标准的试验要求和验收标准，适用于高压直流输电或作为背靠背系统一部分的三相桥式电压源换流器（VSC）阀，只限于电气型式试验和出厂试验。Q/GDW 1889-2013 标准表 3 给出了 VSC 的型式试验，如图 2-21 所示。

试验类型	条款或子条款	试验对象
最大持续运行负荷试验	6.4	阀或阀段
最大暂时过负荷运行试验	6.5	阀或阀段
最小直流电压试验	6.6	阀或阀段
阀支架直流电压试验	7.3.1	阀支架
阀支架交流电压试验	7.3.2	阀支架
阀支架操作冲击试验	7.3.3	阀支架
阀支架雷电冲击试验	7.3.4	阀支架
多重阀单元对地直流电压试验	8.3.1	多重阀单元
多重阀单元交流电压试验	8.3.2	多重阀单元
多重阀单元操作冲击试验	8.3.3	多重阀单元
多重阀单元雷电冲击试验	8.3.4	多重阀单元
阀交流-直流电压试验	9.3.1	阀（在购买方与供货方达成一致的情况下，可在阀段上进行试验）
阀操作冲击试验	9.3.3	
阀雷电冲击试验	9.3.4	
IGBT 过电流关断试验	10	阀或阀段
短路电流试验	11	阀或阀段
阀抗电磁干扰试验	12	阀（在购买方与供货方达成一致的情况下，可在阀段上进行试验）

图 2-21 Q/GDW 1889-2013 标准表 3 的 VSC 型式试验

Q/GDW 1889-2013 “13 出厂试验”包括组装部件的试验，这些部件包括阀、阀段或它们的保护、控制和监测辅助电路部分，不包括阀、阀支架或阀结构中使用的独立部件的试验。出厂试验的内容包括视觉检查、接线检查、均压电路检查、控制保护和检测电路检查、耐受电压检查、局部放电检查、开通和关断检查、压力检查等。

第三章 测试机构和测试能力

3.1 测试机构概述

我国目前已经建立了一定的第三代半导体器件测试能力。已经初步形成较完整的第三代半导体电力电子创新研发和产业化体系，相关的科研机构基于科研任务，会有相应的测试能力，如中科院半导体所、中科院微电子所、中电五十五所等，对高压、高频、高温等特点的第三代半导体器件的检测方面积累了一定的经验，但相比于已有的专业检测机构，规模化、专业化检测服务能力有待提升。

应用端的测试机构对第三代半导体的认识比较薄弱。目前，我国检测市场上存在国有检测机构、民营检测机构、外资检测机构三股主要力量并存的竞争格局。受我国产品质量法保护，目前隶属于卫生、质检、食药监、农业、检验检疫等行政机构门下的国有检测机构，大多数从有关政府机构得到强制性检验检测业务，具备行业管理、标准归口、强制认证检测等优势资源，但是对第三代半导体器件的认识有待提升。

表 3-1 汇集了目前一些主要的第三代半导体电力电子器件和应用方面的影响范围比较大的单位，以便整体了解产业测试单位布局。从这 16 家单位的位置来看，8 家在北京，3 家在天津、2 家在西安，所以，北京除了具备第三代半导体研发创新能力以外，在测试服务能力方面的资源也是得天独厚。

表 3-1 第三代半导体电力电子相关测试机构

No.	类别	单位名称	衬底	外延	器件	应用	备注
1	中国科学院	中科院半导体所		★	★		
2		中科院微电子所			★		
3		中科院苏州纳米所	★	★	★		
4		中科院电工所		★	★	★	CNAS 认可检测实验室，偏重于大功率电力电子模块、电机控制器等
5	中电科集团	中电科四十六所	★				CNAS 认可检测实验室
6		中电科十三所			★		国家半导体器件质量监督检验中心依托单位，CNAS 认可检测实验室
7		中电科五十五所			★		
8	电力电子测试单位	西安电力电子研究所			★		国家电力电子产品质量监督检验中心挂靠单位，偏重于电力电子器件、变流技术
9		中电标院赛西实验室			★		工信部四院下属企业，半导体器件电压范围较低，如 GB/T 4023 正向电压 0-10V，反向击穿电压 0-500V
10		北京圣涛平			★		民营企业，具有 DILAC 资质、美军标、国军标
11		西安芯派			★		CNAS 认可检测能力范围覆盖 Jedec 相关标准检测能力、美军标、国军标等
12	应用设备测试	中家院（北京）检测认证有限公司				★	国家家用电器质量监督检验中心依托单位
13		上海电器设备检测所				★	国家低压电器质量监督检验中心、国家中小电机质量监督检验中心、国家智能电网用户端产品（系统）质量监督检验中心依托单位
14		中国电力科学研究院				★	3 个国家级和 14 个电力行业质检中心的依托单位，构建了 9 个检验/检测/校准机构组成的管理体系
15		中汽研汽车检验中心（天津）				★	国家轿车质量监督检验中心
16		中国铁道科学研究院				★	国家铁路产品质量监督检验中心

3.2 中国科学院半导体研究所

3.2.1 基本情况

中国科学院半导体所元器件检测中心是半导体所可靠性试验部门，主要负责电工电子产品的环境和可靠性试验工作。

元器件检测中心资质齐全：具有 CNAS 检测实验室和校准实验室能力认可证书，DILAC 检测实验室和校准实验室能力认可证书；B2725A-2001 军用校准和测试实验室能力认可证书。

中心现有各类环境模拟试验设备 30 余台(套)，可依据 GJB548B、GJB128A、GJB360A、GB/T 2423 等试验方法标准的要求开展相关试验，试验项目包括机械冲击、振动、恒定加速度、耐湿、盐雾、芯片剪切、键合拉力、粒子碰撞噪声(PIND)、粗细检漏以及高低温循环、贮存、老练、寿命、热冲击等，并可提供相应的试验报告及数据。

中心现有人员 10 人，其中博士 5 人，硕士 2 人，可进行元器件的摸底试验、筛选试验、质量一致性检验等工作。同时，可开展元器件的失效机理分析方面的工作。

3.2.2 测试设备

中心主要设备包括 Royce 650 键合拉力与芯片剪切力测试仪、SM-105-MP AVEX 机械冲击台、TIRA 电磁变频振动台、WEB9051 离心机、UL1000 氮质谱检漏仪、EDA 407 内部水汽检测仪、TE-05-70-WH 高低温(湿热)快速温度变化试验箱、内引线拉力、芯片剪切应力测试仪、PIND 4511L 颗粒碰撞噪声检测仪、充氮充氦氟油加压检漏装置、离心机、电动振动试验系统、冲击台、盐雾腐蚀试验

箱、高温试验箱、高低温试验箱、高低温交变湿热试验箱、氦质谱检漏仪等。

3.2.3 测试能力

元器件检测中心测试范围包括破坏性物理分析(DPA)试验、环境试验和机械试验。其 CNAS 认可检测能力如表 3-2 所示。

破坏性物理分析(DPA)试验包括：开封、外部目检、内部目检、密封细检漏、密封粗检漏、粒子碰撞噪声、键合强度、芯片剪切强度等；环境试验包括温度循环、高温贮存、低温贮存、盐雾、耐湿、热冲击、稳定性烘焙、老练、寿命、可焊性等；机械试验包括恒定加速度、机械冲击、扫频振动、随机振动、定频振动、水平振动冲击、垂直振动冲击、机动抖振、挂机振动、自主飞行振动等。

表 3-2 中科院半导体所元器件检测中心 CNAS 认可检测能力

检测对象	编号	测试/项目	检测标准（方法）名称及编号（含年号）
电工电子产品、军用设备、电子及电气元件、半导体分立器件、微电子器件	1	低温	军用设备环境试验方法 低温试验 GJB150.4A-2009
			电工电子产品环境试验 试验 A：低温 GB/T 2423.1-2008
	2	高温	军用设备环境试验方法 高温试验 GJB150.3A-2009
			半导体分立器件试验方法 方法 1032 高温寿命(非工作) GJB128A-1997
			电工电子产品基本环境试验 试验 B：高温试验方法 GB/T2423.2-2008
			微电子器件试验方法 方法 1008.1 稳定性烘焙 GJB548B-2005
	3	湿度	电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法试验 Db 交变湿热（12h+12h 循环 GB/T 2423.4-2008）
			电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法 Z/AD:温度/湿度组合循环试验 GB/T 2423.34-2005
			电子及电气元件试验方法 103 稳态湿热试验 GJB360B-2009
			半导体分立器件试验方法 方法 1021 耐湿 GJB128A-1997
			微电子器件试验方法 方法 1004.1 耐湿 GJB548B-2005
	4	冲击	电工电子产品环境试验 第 2 部分试验方法试验 Ea 和导则：冲击；GB/T 2423.5-1995
半导体分立器件试验方法 方法 2016 冲击试验方法 GJB128A-1997			

检测对象	编号	测试/项目	检测标准(方法)名称及编号(含年号)
			电子及电气元件试验方法 213 冲击(规定脉冲)试验 GJB360B-2009
			微电子器件试验方法 方法 2002.1 机械冲击 GJB548B-2005
	5	振动试验	军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分振动试验 GJB 150.16A-2009
			电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Fc:振动(正弦) GB/T 2423.10-2008
			电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Fh:宽带随机振动(数字控制)和导则 GB/T 2423.56-2006
			电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Fi:机振动 混合模式 GB/T 2423.58-2008
			微电子器件试验方法 方法 2005 振动疲劳 GJB548B-2005
			微电子器件试验方法 方法 2007 扫频振动 GJB548B-2005
			微电子器件试验方法 方法 2026.1 随机振动 GJB548B-2005
			半导体分立器件试验方法 方法 2046 振动疲劳 GJB128A-1997
			半导体分立器件试验方法 方法 2056 扫频振动试验方法 GJB128A-1197
			电子及电气元件试验方法 方法 201 低频振动试验 GJB360B-2009
			电子及电气元件试验方法 方法 204 高频振动试验 GJB360B-2009
			电子及电气元件试验方法 方法 214 随机振动 GJB360B-2009
电工电子产品、军用设备、电子及电气元件、半导体分立器件、微电子器件	6	恒定加速试验	半导体分立器件试验方法 方法 2006 恒定加速度 GJB128A-1997
			电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Ga 和导则:稳态加速度 GB/T2423.15-2008
			电子及电气元件试验方法 方法 212 稳态加速度试验 GJB360B-2009
			微电子器件试验方法 方法 2001.1 恒定加速度 GJB548B-2005
	7	耐腐蚀试验	微电子器件试验方法 方法 1009.2
			盐雾(盐汽) GJB548B-2005
	8	温度循环试验	半导体分立器件试验方法 方法 1051 温度循环(空气-空气)
			微电子器件试验方法 方法 1010.1
	9	密封性试验	温度循环 GJB548B-2005
			电工电子产品环境试验试验 Q: 密封 GB/T2423.23-1995
			半导体分立器件试验方法 方法 1071 密封 GJB128A-1997
			电子及电气元件试验方法 方法 112 密封试验 GJB360B-2009
	10	焊接试验	微电子器件试验方法 方法 1014.2
			密封 GJB548B-2005
半导体分立器件试验方法 方法 2026 可焊性 GJB128A-1997			
11	终端牢固性试验	半导体分立器件试验方法 方法 2031 耐焊接热 GJB128A-1997	
		半导体分立器件试验方法 方法 2036 引出端强度 GJB128A-1997	

检测对象	编号	测试/项目	检测标准（方法）名称及编号（含年号）	
	1	芯片粘附强度	半导体分立器件试验方法 方法 2017 芯片粘附强度试验 GJB128A-1997	
	2		微电子器件试验方法 方法 2019.2 芯片剪切强度 GJB548B-2005	
	1	键和强度	半导体分立器件试验方法 方法 2037 键和强度试验 GJB128A-1997	
			微电子器件试验方法 方法 2011.1 键和强度（破坏性键和拉力试验）	
			GJB548B-2005	
	1	物理尺寸	半导体分立器件试验方法 方法 2066 物理尺寸试验 GJB128A-1997	
			4	微电子器件试验方法 方法 2016 外形尺寸 GJB548B-2005
	1	粒子碰撞噪声检测	半导体分立器件试验方法 方法 2052 粒子碰撞噪声检测 GJB128A-1997	
			5	电子及电气元件试验方法 方法 217 粒子碰撞噪声试验 GJB360B-2009
				微电子器件试验方法 方法 2020.1 粒子碰撞噪声检测试验 GJB548B-2005

3.3 中国科学院微电子研究所

3.3.1 基本情况

中科院微电子所级公共技术服务中心从 2009 年 6 月成立初始，就成立了专门的管理部门，挂靠在微电子所科技处，设置专职管理人员一名。同时在所层面设立管理委员会，管理委员会成员由所领导、研究室负责人和机关管理部门负责人组成。微电子所共开放各类大型设备共计 104 台，价值共计 89064026.58 元，都是一些高精度的测试设备，且每台设备都配有相应的技术支撑人员进行操作和维护，这些设备现已全部对外开放提供服务，所内外的用户通过中国科学院仪器共享管理系统（<http://samp.cas.cn>）进行预约和使用。

中国科学院微电子研究所半导体功率器件全参数实验室组建于

2008 年，该实验室从国外引进了目前世界最先进大功率器件全套参数测试系统，建立了能完成功率半导体器件全参数测试的标准化平台。目前已具备 wafer 级产品静态参数的自动测试能力，功率半导体器件多种封装形式全参数综合快速测试能力。在多年大功率半导体器件研发过程中积累了丰富的理论经验，掌握了功率器件产品测试分析关键技术，培育了一批掌握测试技术理论、熟悉测试标准、精通测试实践的专业人才队伍。可完成各类功率器件测试分析需求，包括功率 MOS、IGBT、二极管、三极管等器件的全参数测试工作。

3.3.2 半导体功率器件测试设备

3.3.2.1 静态参数测试系统

静态参数测试系统是功率器件分析不可缺少的测试设备。该进口静态参数测试系统就是专门针对功率器件在大电压、大电流下准确测量毫欧姆级电阻、皮安级电流必须使用的专业测试系统。该设备为 TESEC 公司生产的 1.2Kv、200A 半导体分立器件静态参数测试设备，如图 3-1 所示，包括测试主机、高压接口箱、200A 电流源、高压大电流测试站（含适配器）、常规精度检测仪及一些小配件等，是一种为分析功率器件直流静态参数所必备的高性能测试系统。它的特点是最大可提供 1200V 电压，200A 电流；测试精度可达 10mV/3pA，测试电阻范围 $1\text{m}\Omega \sim 999.9\text{M}\Omega$ 。可以准确快速测试功率的直流静态参数。

该仪器设备可测三极管、二极管、MOSFET、IGBT 等功率器件静态参数；测试功率器件参数：击穿电压、阈值、导通电阻、栅极漏电、漏极漏电、跨导、脉冲电流、源漏二极管正向压降；测试能力

1200V/200A, 测试精度 1mV/3pA; 电阻 1mΩ~999.9MΩ; 四位数据精度; 测试数据可保存打印; 支持各种功率器件封装形式。



图 3-1 TESEEC 公司
静态参数测试设备



图 3-2 TESEEC 公司
动态参数测试设备

3.3.2.2 动态参数测试系统

动态开关参数测试系统是功率半导体器件不可缺少的分析测试设备。动态开关参数测试系统就是专门针对功率器件在大电压、大电流下准确测量纳安级开关时间必须使用的专业测试系统。该设备为 TESEEC 公司生产的半导体分立器件动态开关参数测试设备, 如图 3-2 所示, 包括测试主机、开关时间参数测试接口箱、反向恢复时间测试接口箱及一些小配件等, 是一种为测试功率器件动态时间参数所必备的测试系统。它的特点是最大可提供 1500V 电压, 300A 电流; 采用原装高精度示波器测量波形, 具备短路电流过流保护功能。时间测试精度可达 2nS, 可以准确快速测试功率晶体管的动态时间参数。

该设备测试功率 MOSFET、IGBT 动态开关参数, 包括开启延迟 $t_d(\text{on})$ 、关段延迟 $t_d(\text{off})$ 、上升时间 t_r 、下降时间 t_f ; 二极管反向恢复时间 T_{rr} 、反向恢复电荷 Q_{rr} 参数; 测试能力 1500V/300A, 测试精度 2nS; 可测阻性负载、感性负载开关时间参数; 可测二极管反向恢复

时间参数；支持各种功率器件封装形式。

3.3.2.3 热阻测试系统

功率半导体器件的热阻测试是反映产品封装后散热性能等重要参数，功率晶体管工作在大电流状态下其散热能力决定了器件的使用可靠性，散热能力不好，即使开始时晶体管的各项参数合格，在工作一段时间后由于结温上升超过额定范围，会导致器件失效或烧毁，从而导致整个电子设备的失效，其后果不堪设想。必须对功率晶体管的热阻特性进行考核。

热阻测试仪就是专门考核功率器件热阻特性的专业测试系统。该设备为 TESEC 公司生产的半导体分立器件热阻参数测试仪，包括热阻测试主机、参数测试接口箱（含适配器）及一些小配件等，是一种为测试功率器件热阻参数所必备的测试系统。它的特点是最大可提供 200V 电压，50A 电流，信号可加到最大 9.99S，具备短路电流过流保护功能。可以有效测试功率晶体管的热阻参数，分析产品安全工作区。

3.3.2.4 雪崩测试系统

功率晶体管的雪崩能量反映了产品在感性负载使用中器件高速开关时产品所能承受的最大能量，是反映器件工作可靠性的重要指标之一，如果不能准确掌握这项参数，将会引起器件在使用过程中不可控制的失效或烧毁，由此引起整个电子设备失效，后果不堪设想。雪崩能量参数测试仪就是专门考核测量功率器件雪崩能量特性必须使用的专业测试设备。

该设备为 TESEC 公司生产的半导体分立器件雪崩能量参数测试

设备，包括测试主机（含适配器）、雪崩能量测试固定线圈及可变电感等一些小配件，是一种为测试功率器件雪崩能量参数所必备的测试设备。它的特点是最大可提供 200V 电压，100A 电流；具备短路电流过流保护功能。可以准确快速测试功率晶体管的雪崩能量参数。

3.3.2.5 栅电荷测试系统

栅电荷参数测试是不可缺少的分析测试设备。进口测试系统就是专门针对功率器件大电压、大电流下准确测量栅极电荷、栅极电阻必须使用的专业测试系统。

图 3-3 设备为 ITC 公司生产的 100V、100A 栅电荷参数测试设备，包括 ITC59100 测试主机、精度检测配件等，是一种为测试功率器件栅电荷参数所必备的测试系统。它的特点是最大可提供 100V 电压，50A 电流；测试精度可达 0.5V/0.1A,测试电荷 0.5 ~ 500nC。功率器件封成品通过测试夹具与该测试系统后面板引出信号线相连，通过产品前面板 LCD 触摸屏进行参数条件设置，对产品进行测试，测试完成后数据结果及测试曲线在 LCD 屏幕显示，并可存盘打印。保证准确快速测试功率晶体管的栅电荷参数。



图 3-3 栅电荷测试系统



图 3-4 高低温试验箱

3.3.2.6 高低温试验箱

VTM7004 型高低温试验箱是一台高低温环境模拟设备，如图 3-4 所示，可进行芯片的高低温环境下的测试。具备大约 37 升有效内量，并让进行在 -70°C 到 $+180^{\circ}\text{C}$ 温度范围内操作（ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 温度定位精度）。设定直到 3000 deg/sec 角速率（0.001% 精度(per 1 revolution)）。它的有效负载能力是 20 公斤，而它的桌面直径是 250 毫米。

3.3.2.7 半导体参数测试仪 4200

本测试仪可用于半导体器件静态参数的测试，并提取保存数据如图 3-5 所示。具有直观的、点击式 Windows 操作环境；独特的远端前置放大器，将 SMU 的分辨率扩展至 0.1fA；内置 PC 提供快速的测试设置、强大的数据分析、制图与打印、以及测试结果的大容量存储；独特的浏览器风格的软件界面，根据器件的类型来安排测试，可以执行多项测试并提供；测试序列与循环控制功能；支持 Keithley590 型与 Agilent 4284 型 C-V 仪、Keithley 开关矩阵与 Agilent 81110 脉冲发生器等多种外围设备；硬件由 Keithley 交互式测试环境（KITE）来控制；用户测试模块功能，可用于外接仪表控制与测试平台集成，是 KITE 功能的扩充；包括驱动软件，支持手动探针台。



图 3-5 半导体参数测试仪 4200



图 3-6 PW-800 手动探针台

3.3.2.8 PW-800 手动探针台

PW-800 手动探针台，如图 3-6 所示，与 4200 测试仪一起使用，测量硅片，提取特性参数。可实现 X-Y-Z 移动精度：100 线/英寸（0.7 微米）；真空底座，可免费升级至磁性反转底座；X-Y-Z 移动距离 12mm*12mm* 12mm；人性化流线型设计，防止长时间使用导致操作者疲劳；具有防待设置，保证探针线性移动；搭配三轴线缆锁定装置；可使用探针或探卡；配合 CCD 系统，可在笔记本电脑上输出微观图像。

3.3.2.9 PA300 半自动探针台

PA300 半自动探针台是一台高低温半自动步进探针台，如图 3-7 所示，测试芯片尺寸：单管 ~ 300mm wafer；高低温测试范围：-60℃ ~ 150℃；半自动步进测试；步进精度：X-Y:0.5um, Z:0.25um；底盘(chuck) 电极加压测试。



图 3-7 PA300 半自动探针台



图 3-8 MSO 4104 型示波器

3.3.2.10 MSO 4104 型示波器

MSO 4104 型示波器用于信号的分析及测量，如图 3-8 所示，带宽 1000MHz，4 条示波器通道+16 条数字通道，采样率：5GS/s，50000wfms 的最大波形；捕获率在所有通道上提供 10M 样点记录长度；“波形巡检”功能提供了前所未有的波形分析效率；I2C、SPI、CAN 和 RS232 串行总线触发和分析；并行总线显示；逻辑触发；MagniVu 60.6ps 技术提供了更精细的定时分辨率；每条通道设置单独门限；多通道建立时间和保持时间触发；10.4 英寸 XGA 大屏幕彩色显示器；USB 接口、CompactFlash 驱动器（CF 卡端口）；内置以太网口。

3.4 中国科学院电工研究所

3.4.1 高频场控功率器件及装置产品质量检验中心

为了满足国内对于高频场控功率器件质量检测的迫切需求，中国科学院电工研究所于 2013 年 4 月，正式成立了“中国科学院电工研

究所高频场控功率器件及装置产品质量检验中心”。检验中心拥有近30台套专业检测设备，重点开展高频场控半导体器件，如绝缘栅双极晶体管（IGBT）、场效应晶体管（MOSFET）、功率二极管等器件的技术参数检测、可靠性检测以及失效分析检测，如图3-9所示，是国内首家专门针对高频场控器件的综合性检测机构。2014年10月，检验中心获得国家实验室认可（CNAS）和国家计量认证（CMA）二合一认证。

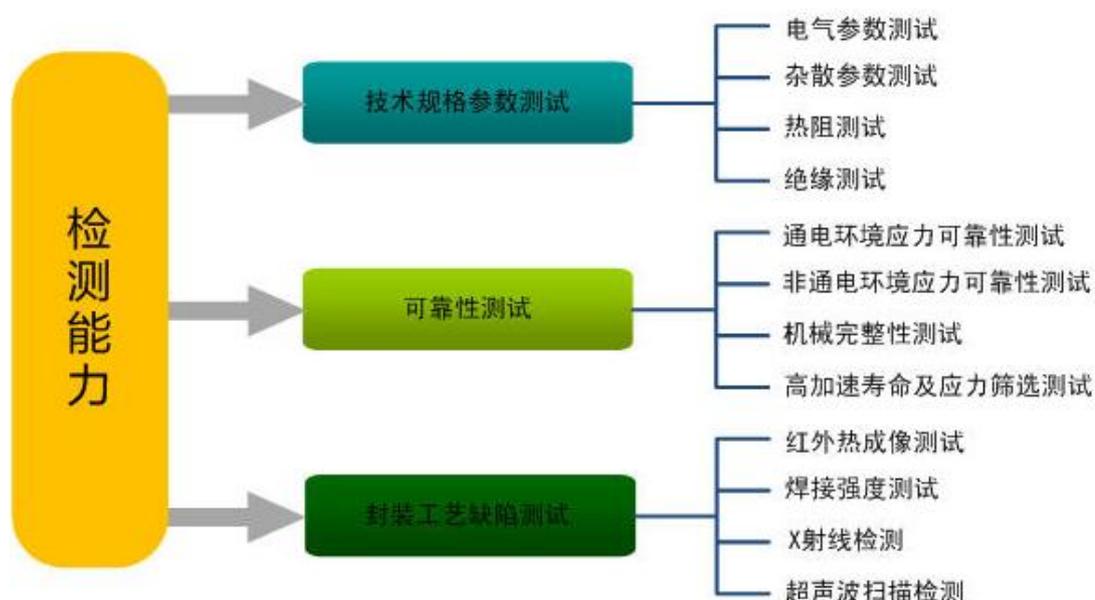


图 3-9 中科院电工所高频场控功率器件及装置产品质量检验中心

表 3-3 中科院电工所电力电子器件测试能力与设备

No.	类别	项目	设备名称	规格型号	测试能力
1	参数测试能力	静态及动态参数测试	动静态参数测试设备	LEMSYS TRds4045-4070 (瑞士)	静态特性、开关特性、短路特性、反向恢复特性、栅电荷测试(最高7000 V, 4000 A)
2			半自动探针台	Wentworth S200 (英国)	晶圆静态参数测试, 最大 8英寸
3			移动式高低温试验箱	ESPEC MT3065 (中国)	温度范围: -70度到150度
4		结电容测试	精密LCR表	Agilent E4980A (美国)	器件结电容及杂散电感测试, 最高2MHz, 最高电压2kV。
5		热阻测试	热性能测试仪	MicRed T3ster (匈牙利)	稳态热阻及瞬态热阻抗测试, 最大加热电流 100A。
6		绝缘耐压测试	绝缘耐压测试仪	菊水 TOS5300 (日本) 吉时利 2290-10(美国)	绝缘耐压测试(最高 5500 VAC, 10kVDC)
7	可靠性测试能力	二极管浪涌电流	浪涌电流测试台	RH DBC-101-10KA (中国)	二极管正向最大浪涌电流 IFSM 测试, I^2t 测试, 最大电流峰值 10kA, 持续时间 10ms)
8		抗静电能力测试	抗静电能力测试仪	Tokyo Electron ECDM800E (日本)	人体模式静电测试(最高 8000 V), 机器模型静电测试(最高 2000 V), 器件充电模型静电测试(最高 2000V)
9		短时功率循环测试	短时功率循环测试机	Hirel PC2400A-IGBT (中国)	芯片焊层及键合线疲劳寿命测试(最高 2400 A)
10		长时功率循环测试	长时功率循环测试机	Hirel PC500A-IGBT (中国)	底板焊层疲劳寿命测试(最高 500 A)
11		高温反偏测试	高温阻断测试机	Hirel HTRB-IGBT-6kV (中国)	集电极-发射极高温阻断能力耐久性测试(最高 6000 V, 200C)
12		高温栅极反偏测试	高温栅极反偏测试机	Hirel HTGB-IGBT-30V (中国)	栅极-发射极高温阻断能力耐久性测试(最高 30 V, 200C)
13		高温高湿反偏测试	高温高湿反偏测试机	Hirel H3TRB201 (中国)	集电极-发射极高温高湿环境下阻断能力耐久性测试(最高 600 V, 150 度, 湿度范围 25 ~ 98%RH)
14		高加速应力	高加速应力	Hirayama	集电极-发射极极高温(大于

		力测试	试验箱	PC422-R8 (日本)	100 度) 高湿环境下阻断能力 耐久性测试 (最高 120 V, 温度范围 105 ~ 130C, 湿度范围 65 ~ 100%RH)
15		温度循环 测试	快速温变试 验箱	Giant force ECT-225-70 (中国)	焊层温度循环寿命测试 (温度范围-70~180℃, 最大温 度速率: 15℃/min)
16		温度冲击 测试	三箱式温度 冲击试验箱	Espec TSG-71S-A (中国)	温度冲击试验 (温度范围-70~200℃, 温变速 率>50℃/min)
17		机械振动 测试	机械振动试 验台	STI DC-1000-15 (中国)	机械振动试验 (最大加速度 50g, 最大推力 1000 kg, 频率范围 5 ~ 1500Hz)
18		机械冲击 测试	落体式冲击 试验台	King design DP-201-60 (中国)	机械冲击试验 (冲击: 15~100g, 6~18ms, 弹 跳: 0~40g, 6~16ms, 最高 60 次/分钟)
19		三维 X 射 线检测	X 光探伤机	GE Microme (美国)	器件焊层缺陷快速检查 (最高管电压 180kV, 3 维扫描)
20	失效分析 测试能力	超声波扫 描显微镜 测试	超声波扫描 显微镜	Sonoscan D9600 (美国)	焊接缺陷检测 (探头频率范围: 25MHz-230MHz, 具备喷水式扫 描功能, 器件不用没入水中)
21		焊接强度 测试	推拉力测试 仪	XYZTEC Conder150-3HF (荷兰)	芯片焊接强度及键合线结合强 度测试 (最大推力 500 kgf)
22		温度场测 试	制冷型高速 红外热像仪	Infratec 8325 (德国)	温度场测试 (像素: 640X512 pixel, 温度 分辨率 0.2℃, 最快成像速率 1200 Hz)

3.4.2 太阳光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心

中国科学院太阳光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心成立于 1999 年, 是经中国科学院批准建立, 是具有第三方公正地位的权威性光伏/风力检测机构。检测中心依照国际 ISO/IEC 17025: 2005 建立了严格的质量控制体系, 具有符合中国实验室国家认可 (CNAL)

和计量认证（CMA）资质要求。

该检测中心下设的检测实验室分为：光伏部件检测实验室、光伏/风力系统检测实验室和风力部件检测实验室。目前，检测中心的各实验室所提供的检测服务内容主要包括：光伏电池片的检测（I-V特性、光谱响应等）、光伏组件的检测（I-V特性、温度系数、额定工作温度等）、光伏组件环境试验（热循环、湿-冷、湿-热、热斑、引线端牢固度、冰雹等）、光伏系统检测实验、风力发电机及部件测试。

3.5 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

3.5.1 基本情况

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所测试分析平台（简称纳米所测试分析平台）主要是构建布局合理、开放高效、技术先进的大型科学仪器设备资源和信息共享系统，如图 3-10 所示，为研究所和企业提供测试、咨询与培训服务，目标是建成国内一流、国际先进的测试平台；有效改善江苏省的产业科研环境和企业的综合实力，全面提高江苏省高新企业的自主创新能力。现有固定人员 34 人，其中高级职称 16 人，具有博士学位人员占平台总人数的接近 53%，其中 5 人从国外著名机构招聘回来，并且积聚了国内名牌院校的优秀毕业生。



图 3-10 纳米所测试分析平台的建设目标和布局

3.5.2 测试设备

纳米所测试分析平台的测试设备总值达 8000 万元，如表 3-4 所示，包括 3 台高分辨透射电子显微镜、1 台 FIB 聚焦离子束系统、5 台扫描电镜、2 台 X 射线衍射仪和自主研发的扫描近场光电探针系统等大型设备 30 余台（套）。

表 3-4 纳米所测试分析平台主要大型设备清单

序号	设备名称	数量	序号	设备名称	数量
1	Talos 200KV 场发射透射电子显微镜	1 台	16	ICON 原子力显微镜	1 台
2	Tecnai 200KV 场发射透射电子显微镜	1 台	17	Nanophox 激光粒度仪、zeta 电位仪	1 套
3	HT7700 120 KV 透射电子显微镜	1 台	18	MTS G200 纳米压痕仪	1 台
4	SCIOS 聚焦离子束系统	1 台	19	扫描近场光电探针系统	1 套
5	NanoSEM 热场发射扫描电子显微镜	1 台	20	深紫外超高真空近场光电探针系统	1 套

6	Quanta400FEG 热场发射扫描电子显微镜	1 台	21	Keithley 4200 半导体特性分析系统	1 套
7	Quanta250FEG 热场发射扫描电子显微镜	1 台	22	变温 Hall 测试系统	1 套
8	S4800 冷场发射扫描电子显微镜	1 台	23	CA-10021-000 LED 综合光电测量系统	1 套
9	Inspects 钨灯丝扫描电子显微镜	1 台	24	Nikon AI 激光共聚焦显微镜	1 套
10	MonoCL3+/Smart EBIC 系统	1 套	25	变温光谱测试系统 (3K)	1 套
11	全套透射电镜制样设备 (10 台设备)	1 套	26	太阳光伏测试系统	1 套
12	D8 Discover 高分辨 X 射线衍射仪	1 台	27	Labram HR 800 激光共聚焦拉曼光谱仪	1 台
13	D8 Advance 高功率转靶 X 射线衍射仪	1 台	28	高分辨率荧光光谱仪	1 台
14	Veeco Multimode 3D 原子力显微镜	1 台	29	MD2000D 型椭偏光谱仪	1 台
15	Veeco Dimension 3100 原子力显微镜	1 台	30	Nicolet 6700 型傅里叶变换红外光谱仪	1 台

3.5.3 测试能力

纳米所测试平台对外测试服务有明确的收费标准, 现全年服务机时约 23000 小时, 为所内外 235 个用户提供了测试分析和技术培训服务。从 2012 年-2016 年的用户数和服务收入如图 3-11 所示。

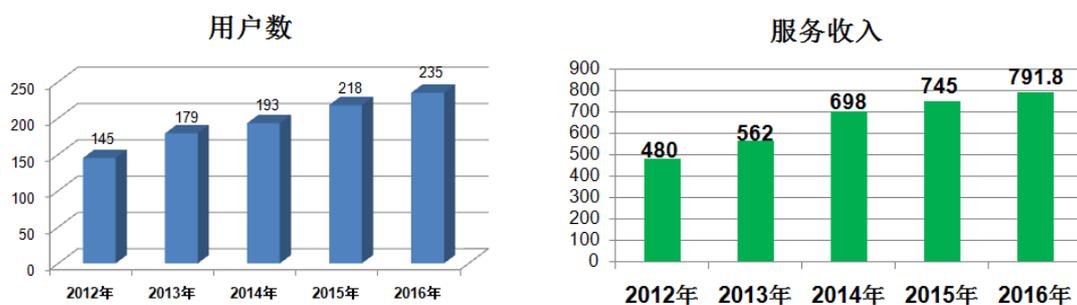


图 3-11 纳米所测试平台的近 5 年测试服务情况

纳米所测试平台目前的资质包括 ISO9001 国际质量体系认证、中国合格评定国家认可委员会实验室认可(CNAS)、国家计量认证(CMA)等。其中,中国合格评定国家认可委员会认可证书附件(注册号: CNAS L7180)中,认可的检测能力范围如表 3-5 所示。

表 3-5 中科院纳米所测试平台 CNAS 认可的检测能力范围

序号	检测对象	项目/参数		检测标准(方法)名称及编号(含年号)	限制范围
		序号	名称		
1	固 体 材 料	1.1	粒度	粒度分析 光子相干光谱法 GB/T 19627-2005 粒度分析 动态光散射法 GB/T 29022-2012	仅测 1- 10000nm
		1.2	长度	纳米级长度的扫描电镜测量方法通则 GB/T 20307-2006 微米级长度的扫描电镜测量方法通则 GB/T16594-2008	仅测 10-10000nm
		1.3	微观形貌	分析型扫描电子显微镜方法通则 JY/T 010-1996	
		1.4	显微结构	透射电子显微镜方法通则 JY/T 011-1996	仅测质厚衬度像、衍射衬度明场像和暗场像、高分辨像、选区电子衍射。
		1.5	微区元素能谱分析	分析型扫描电子显微镜方法通则 JY/T 010-1996 微束分析 能谱法定量分析 GB/T 17359-2012	仅测 Be-U
		1.6	定性物相分析	转靶多晶体 X射线衍射方法通则 JY/T009-1996	适用于金属与合金、矿物与土壤、陶瓷与建筑材料、有机与无机化合物, 药物与聚合物。
		1.7	位错密度	氮化镓单晶位错密度的测量 阴极荧光显微镜法 GB/T 32282-2015	适用于位错密度为每平方厘米 $1E3$ 至 $5E8$ 的氮化镓单晶
		1.8	粗糙度	氮化镓单晶衬底表面粗糙度的原子力显微镜检验法 GB/T 32189-2015	适用于粗糙度小于10nm的氮化镓单晶衬底
	原子力显微镜测量溅射薄膜表面粗糙度的方法 GB/T 31227-2014	适用于溅射成膜方法生成的、平均粗糙度小于100nm的薄			

序号	检测对象	项目/参数		检测标准(方法)名称及编号(含年号)	限制范围
		序号	名称		
		1.9	X射线双晶摇摆曲线半高宽	LED 发光用氮化镓基外延片. 附录E 高分辨x射线衍射仪测量氮化镓基外延片结晶质量和	适用于氮化镓基外延片
			氮化镓单晶衬底片 X 射线双晶摇摆曲线半高宽测试方法 GB/T 32188-2015	适用于氮化镓单晶衬底	
		1.10	薄膜厚度	硅衬底上绝缘体薄膜厚度及折射率的椭圆偏振测试方法 YS/T 839-2012	适用于绝缘体薄膜
2	有机化合物	2.1	定性分析特征吸收	红外光谱分析方法通则 GB/T 6040-2002	仅测 400-4000 cm ⁻¹

3.6 中电科第四十六所中世博实验室

3.6.1 基本情况

中国电子科技集团公司第四十六研究所(简称中电集团四十六所)是中国电子科技集团公司下属的二级成员单位,始建于1958年,是中国电子科技集团公司内唯一从事电子材料研制的工程化专业研究所。四十六研究所是全民所有制的国家重点军工电子材料研究机构,是国家二级保密资格单位。主要专业领域涵盖电子功能材料、光导纤维及光纤器件、电子材料理化检测分析及可靠性研究、电子仪表及专用设备产品开发及生产等,如图3-12所示。



图 3-12 中电集团四十六所主要专业领域

3.6.2 测试设备

中电集团四十六所的测试设备能力在半导体材料方面“全覆盖”，包括晶体、晶片、外延层以及相关配套材料，主要设备包括：电感耦合等离子体光谱仪；电感耦合等离子体质谱仪；场发射扫描电子显微镜；数字电压表；金相显微镜；微欧表；电子万能试验机；数字式四探针测试仪；直流电阻电桥；非接触电阻率测试仪；精密测厚仪；平面度测量仪；恒温恒湿试验箱；高低温温度冲击试验箱；盐雾腐蚀试验箱。

3.6.3 测试能力

中国电子科技集团公司第四十六研究所中世博实验室获得 CNAS 认可资质的检测项目超过 700 项，重点包括电子信息产品有毒有害物质的标准符合性、金属材料、半导体材料、绝缘材料、矿石、焊接材料、印制板、引线材料、食品、化学品材料的理化性能、环境试验、热学试验的标准符合性及材料分析。其中表 3-6 显示了部分与半导体材料和设备相关的 CNAS 认可检测能力。

表 3-6 中电集团第四十六所中世博实验室部分 CNAS 认可检测能力

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）	
		序号	名称		
1	电子材料	1	晶向	半导体单晶晶向测定方法 GB/T1555-2009	
		2	霍尔系数	非本征半导体单晶霍尔迁移率和霍尔系数测量方法 GB/T4326-2006	
		3	硅单晶完整性	硅晶体完整性化学择优腐蚀检验方法 GB/T1554-2009	
		4	硅材料缺陷	硅材料原生缺陷图谱 GB/T30453-2013	
		5	硅外延层厚度	重掺杂衬底上轻掺杂硅外延层厚度的红外反射测量方法 GB/T14847-2010	
		6	硅晶体中氧含量	硅晶体中间隙氧含量的红外吸收测量方法 GB/T1557-2006	
		7	硅晶体中碳含量	硅中代位碳原子含量红外吸收测量方法 GB/T1558-2009	
		8	砷化镓和磷化铟材料霍尔系数	砷化镓、磷化铟半导体材料参数测试方法 SJ3244.1-1989	
		9	砷化镓单晶位错密度	砷化镓单晶位错密度的测量方法 GB/T8760-2006	
		10	砷化镓单晶 AB 微缺陷	砷化镓单晶 AB 微缺陷检验方法 GB/T18032-2000	
		11	砷化镓材料杂质浓度	半绝缘砷化镓剩余杂质浓度微区试验方法 SJ20635-1997 方法 101	
				半绝缘砷化镓剩余杂质浓度微区试验方法 SJ20635-1997 方法 102	
				半绝缘砷化镓剩余杂质浓度微区试验方法 SJ20635-1997 方法 104	
		12	砷化镓单晶 EL2 浓度	非掺杂半绝缘砷化镓单晶深能级 EL2 浓度红外吸收测试方法 GB/T17170-2015	
		13	硅单晶电阻率	硅单晶电阻率测定方法 GB/T 1551-2009	
		14	导电类型	非本征半导体材料导电类型测试方法 GB/T 1550-1997	
		15	径向电阻率变化	硅片径向电阻率变化的测量方法 GB/T11073-2007	
16	多晶硅表面金属	酸浸取-电感耦合等离子质谱仪测定多晶硅表面金属杂质 GB/T24582-2009			
17	硼含量	重掺 n 型硅衬底中硼沾污的二次离子质谱检测方法 GB/T24580-2009			

		18	砷化镓材料霍尔迁移率	砷化镓单晶材料测试方法 GJB1927-1994 方法 101
		19	砷化镓材料霍尔迁移率、电阻率均匀性	砷化镓单晶材料测试方法 GJB1927-1994 方法 102
		20	砷化镓材料热稳定性	砷化镓单晶材料测试方法 GJB1927-1994 方法 103
		21	砷化镓材料杂质均匀性	砷化镓单晶材料测试方法 GJB1927-1994 方法 104
		22	少子寿命	硅和锗体内少数载流子寿命测定光电导衰减法 GB/T1553-2009
		23	晶片弯曲度	硅片弯曲度测试方法 GB/T6619-2009
		24	晶片翘曲度	硅片翘曲度非接触式测试方法 GB/T6620-2009
		25	磷化铟位错	磷化铟单晶位错的测量方法 SJ3245-1989
		26	电阻率与掺杂剂浓度换算	掺硼掺磷掺砷硅单晶电阻率与掺杂剂浓度换算规程 GB/T13389-2014
		27	硅片直径测量	硅片直径测量方法 GB/T14140-2009
		28	硅外延层电阻	硅外延层电阻 GB/T14141-2009
		29	硅外延层晶体完整性	硅外延层晶体完整性检查方法 腐蚀法 GB/T14142-1993
		30	硅晶体中间隙氧含量径向变化	硅晶体中间隙氧含量径向变化测量方法 GB/T14144-2009
		31	硅多晶断面夹层	硅多晶断面夹层化学腐蚀检验方法 GB/T4061-2009
		32	硅抛光片氧化诱生缺陷	硅抛光片氧化诱生缺陷的检验方法 GB/T4058-2009
		33	硅片厚度和总厚度变化	硅片厚度和总厚度变化测试方法 GB/T6618-2009
		34	硅抛光片表面质量	硅抛光片表面质量目测检验方法 GB/T6624-2009
		35	半绝缘砷化镓单晶中碳浓度	半绝缘砷化镓单晶中碳浓度的红外吸收测试方法 GB/T19199-2015
		36	锗单晶位错	锗单晶位错腐蚀坑密度测量方法 GB/T5252-2006
		37	表面粗糙度	产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值 GB/T 1031-2009
		38	硅片电阻率	半导体硅片电阻率及硅薄膜薄层电阻测试方法 非接触涡流法 GB/T6616-2009

		39	工业硅中杂质元素含量	工业硅化学分析方法 第4部分: 杂质元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法 GB/T14849.4-2014
		40	碳化硅单晶抛光片表面粗糙度	碳化硅单晶抛光片表面粗糙度的测试方法 SJ/T11503-2015
		41	碳化硅单晶抛光片表面质量	碳化硅单晶抛光片表面质量的测试方法 SJ/T11504-2015
		42	碳化硅单晶片微管密度	碳化硅单晶片微管密度的测定 化学腐蚀法 GB/T30868-2014
		43	碳化硅单晶片直径	碳化硅单晶片直径测试方法 GB/T30866-2014
		44	碳化硅单晶片厚度和总厚度变化	碳化硅单晶片厚度和总厚度变化测试方法 GB/T30867-2014
		45	光伏电池用硅材料表面金属杂质含量	光伏电池用硅材料表面金属杂质含量的电感耦合等离子体质谱测量方法 GB/T29849-2013
2	硅单晶		部分参数	硅单晶 GB/T12962-2015
		1	导电类型	硅单晶 GB/T12962-2015 6.2
		2	电阻率	硅单晶 GB/T12962-2015 6.3
		3	径向电阻率变化	硅单晶 GB/T12962-2015 6.4
		4	晶向及晶向偏离度	硅单晶 GB/T12962-2015 6.7
		5	晶体完整性	硅单晶 GB/T12962-2015 6.6
		6	直径	硅单晶 GB/T12962-2015 6.1
		7	氧含量	硅单晶 GB/T12962-2015 6.11
		8	碳含量	硅单晶 GB/T12962-2015 6.12
3	硅单晶抛光片		部分参数	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003
		1	导电类型	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.1
		2	电阻率	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.2
		3	径向电阻率变化	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.3
		4	晶向	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.4
		5	主参考面晶向	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.6
		6	晶体完整性	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.9
		7	氧化诱生缺陷	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.10
		8	直径	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.11

		9	间隙氧含量	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.12
		10	翘曲度	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.14
		11	厚度和总厚度变化	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.13
		12	表面质量	硅单晶抛光片 GB/T12964-2003 6.16
4	硅单晶切割片和研磨片		部分参数	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005
		1	导电类型	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.1
		2	电阻率	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.2
		3	径向电阻率变化	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.3
		4	晶向	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.4
5	硅单晶切割片和研磨片	5	主参考面晶向	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.6
		6	晶体完整性	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.9
		7	直径	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.10
		8	厚度和总厚度变化	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.11
		9	翘曲度	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.12
		10	表面质量	硅单晶切割片和研磨片 GB/T12965-2005 6.14
6	电子产品	1	盐雾试验	人造气氛腐蚀试验 盐雾试验 GB/T10125-2012
				电子及电气元件试验方法 GJB 360B-2009 方法 101
				环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 Kb：盐雾，交变（氯化钠溶液） GB/T 2423.18-2012
		2	低温试验	电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 A：低温 GB/T2423.1-2008
		3	高温试验	电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 B：高温 GB/T2423.2-2008
4	高低温试验	环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 N：温度变化 GB/T2423.22-2012		
7	固体及液体材料： 限在无产品标准和参数标准	1	俄歇分析深度剖析	俄歇电子能谱术深度剖析标准导则 SJ/T10457-1993
		2	俄歇和 X 射线光电子能谱分析	俄歇电子能谱术和 X 射线光电子能谱术的样品处理导则 SJ/T10458-1993

时使用	3	电子显微镜分析	分析型扫描电子显微镜方法通则 JY/T010-1996
	4	金相显微镜分析	金相显微镜分析方法通则 JY/T012-1996
	5	电子能谱分析	电子能谱仪方法通则 JY/T013-1996
	6	X 射线衍射分析	转靶多晶体 X 射线衍射方法通则 JY/T009-1996
	7	光电子能谱分析	X 射线光电子能谱分析方法通则 GB/T19500-2004
	8	原子吸收分析	化学试剂火焰原子吸收光谱法通则 GB/T9723-2007
	9	电感耦合等离子体原子发射光谱分析	电感耦合等离子体原子发射光谱方法通则 JY/T015-1996
	10	傅里叶变换红外光谱分析	傅里叶变换红外光谱方法通则 JY/T001-1996
	11	电位滴定分析	化学试剂电位滴定法通则 GB/T9725-2007
	12	粒度分析	粒度分布 激光衍射法 GB/T19077-2016
	13	比表面积分析	气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积 GB/T19587-2004

3.7 中国电子科技集团公司第十三研究所检测中心

中电科十三所拥有多专业综合性优势，研发涉及微电子、光电子、半导体高端传感器、光机电集成微系统、微机械电子系统（MEMS）五大领域以及材料、封装、设备仪器等支撑领域。十三所是国家半导体器件质量监督检验中心的依托单位，是 SAC/TC78 全国半导体器件标准化技术委员会的秘书处单位。

中心曾多次承担以高频、超高频低噪声晶体管和微波晶体管为主的半导体分立器件的生产许可证确认试验，仲裁试验，创优试验和鉴

定试验。同时还是全国半导体标准委员会主任单位，IEC/TC 47 的国内技术归口单位，国际标准化工作网秘书单位，曾多次承担或参与国家标准和专业标准的制订、修订及标准的验证工作。

中心检测工作面积 2420 平方米，其中中央空调面积 2150 平方米。中心具有先进的检测仪器和失效分析设备 610 台套。中心可靠性试验设备基本上以进口为主，可按照 GB、GJB、SJ、IEC、MIL 标准对半导体器件、集成电路、微波组件、小整机、微型计算机、印制电路板等进行测试、筛选、DPA 试验、老化试验以及鉴定检验和质量一致性检验。

中心相关检测项目包括：二极管、双极型晶体管、场效应晶体管、闸流晶体管、微波组件、微波元器件、DC/DC 变换器、电子元器件及设备、半导体集成电路失效分析、聚光型光伏模块和组件、发光二极管、照明工程、荧光粉、灯和灯系统、电器设备安全试验。

3.8 西安电力电子技术研究所电力电子实验室

西安电力电子技术研究所，是我国在电力电子行业领域的技术归口研究所，是本行业的全国学会、协会、国家重要核心期刊、国际 IEC T42 专委会和全国电力电子学标准化技术委员会秘书处所在地，国家电力电子产品质量监督检验中心挂靠单位。是我国唯一一所从事电力半导体器件工艺技术、变流技术研究的专业研究所。建所 40 余年来，为我国电力半导体器件及其应用技术研究奠定了技术基础，作出了一定的贡献，我国七大整流器厂的技术基础和发展都与该研究所息息相关。

研究所目前的主营业务是：5000A/8500V 及以下电力半导体分立器件、电力电子变流装置及电力半导体器件测试技术和设备的设计、开发生产和服务。

研究所以超（特）大功率电力电子器件以及新型电力电子器件的工艺技术及电力电子变流应用技术研究为未来的发展核心。通过与国内外知名企业技术合作与交流，通过与高校产学研结合等渠道，实现我们的创新目标，将研究所发展成为中国功率电力半导体器件研发和产业基地。

西安电力电子技术研究所电力电子实验室(注册号: CNAS L1562) 的 CNAS 认可检测能力如表 3-7 所示。

表 3-7 西安电力电子技术研究所电力电子实验室 CNAS 认可检测能力

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）	说明
		序号	名称		
一	电力半导体器件				
1	晶 闸 管	1	通态电压	半导体器件 第 6 部分 晶闸管 GB/T 15291-1994 半导体器件 第 6 部分 晶闸管 GB/T 15291-2015 反向阻断三极晶闸管测 试方法 JB/T 7626-2013	不测反向 导通晶闸 管和门极 关断晶闸 管
		2	反向电流		
		3	断态电流		
		4	擎住电流		
		5	维持电流		
		6	门极触发电流/电压		
		7	门极不触发电压/电流		
		8	门极控制延迟时间、开通时间		
		9	关断时间		
		10	断态电压临界上升率		
		11	换向电压临界上升率		
		12	通态伏安特性		
		13	恢复电荷、反向恢复时间		
		14	热阻		
		15	瞬态热阻抗		
		16	反向重复/不重复峰值电压		
		17	断态重复/不重复峰值电压		
		18	通态浪涌电流		
		19	I _{2t} 值		
		20	快开关晶闸管的通态电流		
		21	通态电流临界上升率		
		22	门极平均功率		
		23	门极正向峰值功率/ 峰值电流/峰值电压		
		24	门极反向峰值电压		
		25	热循环负载		
		26	高温交流阻断		
2	普通 晶 闸 管		部分项目	普通晶闸管 第 1 部分： 螺栓形器件 JB/T 8950.1-2013 普通晶闸管 第 2 部分： 平板形器件 JB/T 8950.2-2013	不测振动

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）	说明
		序号	名称		
3	快速晶闸管		部分项目	快速晶闸管 JB/T 4193-2013	不测振动
4	双向晶闸管		部分项目	双向三极晶闸管测试方法 JB/T 7619-1994 双向晶闸管 JB/T 4192-1997	不测振动
5	整流二极管	1	正向电压	半导体器件 分立器件和集成电路 第2部分：整流二极管 GB/T 4023-2015 整流二极管测试方法 JB/T 7624-2013	
		2	正向（伏安）特性		
		3	正向恢复时间/峰值电压		
		4	反向电流		
		5	恢复电荷、反向恢复时间		
		6	雪崩整流管和可控雪崩整流管的击穿电压		
		7	热阻		
		8	瞬态热阻抗		
		9	反向重复/不重复峰值电压		
		10	雪崩整流管和可控雪崩整流管的反向功率		
		11	正向浪涌电流		
		12	I ² t 值		
		13	热循环负载		
6	普通整流管		部分项目	普通整流管 第1部分：螺栓形器件 JB/T 8949.1-2013 普通整流管 第2部分：平板形器件 JB/T 8949.2-2013	不测振动
7	快恢复二		部分项目	ZK系列5A以上管壳额定快恢复整流二极管	不测振动

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）	说明
		序号	名称		
8	电力整流模块		部分项目	电力整流模块 MDC、MDA 和 MDK 系列 25A 以上整流桥臂模块 JB/T 5834.1-1991 电力整流模块 MDQ 系列 5A 以上单相桥式整流模块 JB/T 5834.2-1991 电力整流模块 MDS 系	不测交变湿热试验
9	晶闸管模块		部分项目	MT、MF 系列臂对晶闸管模块 JB/T 7826.1-1995 MTQ（MFQ）系列晶闸管单相桥模块 JB/T 7826.2-1996	不测交变湿热试验
二	电力半导体器件用附件				
10	电力半导体器件用管壳		全部项目	电力半导体器件用管壳 JB/T 10097-2000	
三	电力电子设备（半导体变流器、变流装置）				
11	电力电子设备		外壳防护等级	外壳防护等级（IP 代码） GB 4208-2008	只测 IP20
12	半导体变流器	1	外观	半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第 1-1 部分：基本要求 规范 GB/T 3859.1-2013	
2		绝缘电阻、绝缘电压			
3		轻载和功能			
4		额定电流			
5		过电流能力			
6		固有电压调整值			
7		纹波电压和电流			

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）	说明				
		序号	名称						
		8	谐波电压/电流	半导体变流器 电气试验方法 GB/T 13422-2013					
		9	功率损耗						
		10	温升						
		11	功率因数						
		12	辅助装置						
		13	控制设备性能						
		14	保护装置						
		15	可听噪声						
		16	电压均衡度（均压因数）						
		17	电流均衡度（均流因数）						
		18	负载						
		19	效率						
		20	过电压						
		21	输出电压						
		22	过载						
		23	短路						
		24	触发设备性能						
		25	直流输出电压/电流稳态偏差						
		26	直流输出电压/电流整定范围						
		27	直流输出电压瞬态偏差和电压恢复时间						
		28	纹波因数						
		29	变流器并联						
		30	交流输出电压稳态偏差						
		31	交流输出电压整定范围						
		32	交流输出电压瞬态偏差和电压恢复时间						
		33	交流输出电压变化范围						
		34	交流输出电压的频率及其稳态偏差						
		35	交流输出电压的频率变化范围						
		36	交流输出电压与频率的关系						
		37	交流电压畸变因数						
		38	三相电压不平衡						
		13	电池充电				部分项目	工业电池用充电设备 JB/T 10095-2010	不测电磁兼容性和
		14	电化 学用				全部项目	电化学用整流器 JB/T 8740-1998	

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）	说明
		序号	名称		
15	不间断电源设		部分项目	不间断电源设备（UPS） 第3部分：确定性能的方法和试验要求	不测电磁兼容性试验
16	晶闸管交			晶闸管交流电力控制器 JB/T 3283-2010	
17	同步电动机半导体励磁装置			同步电动机半导体励磁装置 GB/T 12667-2012	不测电磁兼容性试验
18	交流电动机半导体		全部项目	调速电气传动系统 第2部分：一般要求 低压交流变频电气传动系统额定值的规定	负载试验在原地点（朱雀大街94号）
19	中频感应加热		部分项目	中频感应加热用半导体变频装置 JB/T 8669-1997	
20	交流电动机电		部分项目	交流电动机电力电子软起动装置 JB/T 10251-2001	
21	低压有源电力		全部项目	低压有源电力滤波装置（APF） JB/T 11067-2011	不测电磁兼容性试验
22	恒流调光器	1	全部项目*	恒流调光器 MH/T 6010-1999	
		2	部分项目*		
		3	介电强度检验		
		4	恒流性能试验		
		5	效率和功率因数试验		
		6	保护电路试验		
		7	控制和监视试验		
		8	连续运行试验		
23	飞机	1	外观	飞机地面静变电源	

序号	检测对象	项目/参数		检测标准(方法)	说明				
		序号	名称						
	地面 静变 电源	2	质量	MH/T 6018-2014					
		3	外形尺寸						
		4	应急按钮						
		5	输入供电						
		6	交流静变电源负载能力						
		7	直流静变电源负载能力						
		8	启动冲击电流						
		9	效率						
		10	测量功率因数						
		11	单相和三相平均电压						
		12	相电压不平衡						
		13	相移						
		14	电压调制幅度						
		15	波峰系数						
		16	畸变系数						
		17	直流分量						
		18	稳态频率						
		19	相序						
		23				20	交流瞬态电压特性		
						21	交流瞬态频率特性		
22	不中断电力传输限制								
23	直流电压								
24	脉动幅值								
25	畸变系数								
26	直流瞬态电压特性								
27	发动机启动特性								
23		28	交流过电压保护功能						
		29	交流欠电压保护功能						
		30	过频保护功能						
		31	欠频保护功能						
		32	交流过电流保护功能						
		33	交流短路保护功能						
		34	相序保护功能						
		35	直流分量保护功能						
23		36	中线开路保护功能						
		37	接地故障保护功能						
		38	直流过电压保护功能						
		39	直流欠电压保护功能						

序号	检测对象	项目/参数		检测标准(方法)	说明
		序号	名称		
		40	直流过电流保护功能		
		41	直流短路保护功能		
		42	反极性保护功能		
		43	反流保护功能		
		44	飞机联锁供电功能		
		45	监测功能		
		46	防护等级		
		47	耐电压试验		
		48	绝缘电阻		
		49	噪声级		

3.9 中国电子技术标准化研究所赛西实验室

3.9.1 基本情况

中国赛西实验室是中国电子技术标准化研究院(工业和信息化部电子工业标准化研究院,工业和信息化部电子第四研究院)在标准试验验证、检测和校准领域的综合机构,由电子元器件检测中心,集成电路测试验证实验室,电子工业安全与电磁兼容检测中心,原信息产业部电子计量中心、信息处理产品标准符合性检测中心和数字电视标准符合性检测中心等整合发展而来。

相关检测项目包括:电子元器件通用电子产品、电感、电容、电阻器、连接器、晶体管、场效应管、二极管、滤波器、振荡器、DC/DC变换器、集成电路、半导体发光二极管、数字集成电路、模拟集成电路、集成电路A/D和D/A转换器、处理器评测、数字电视、信息技术、安全(不间断电源系统、测量、控制和试验室用电气设备、变压器等)、电工电子产品、微小型计算机系统设备用开关电源、信息技术设备用

不间断电源、军用设备、军用通信设备、舰船电子设备、军用电子测试设备、移动通信调频无线电话、太阳能光伏电源系统、电池、电视、电磁兼容、电子电气产品、半导体分立器件、集成运算放大器、功率交流电源。

中国电子技术标准化研究院赛西实验室电子元器件检测中心承担 7 个全国电子元器件标准化技术委员会、2 个工业和信息化部标准工作组秘书工作，负责 IEC/TC39、IEC/TC40、IEC/TC46、IEC/TC47、IEC/TC48、IEC/TC49、IEC/TC51、IEC/TC86、IEC/TC91、IEC/TC94、IEC/TC110、IEC/TC119 等 12 个 IEC 技术委员会的国内技术对口工作。

3.9.2 元器件测试中心--测试服务能力

元器件检测中心具备按照国标、国军标、国际标准、美军标、行业标准、企业标准，对半导体集成电路、混合电路、微电路模块、半导体分立器件、通用元件、特种元件、机电组件、光电器件、微波器件等开展鉴定检验、质量一致性检验、筛选试验、DPA 试验、单项检测、失效分析、标准培训与咨询、试验方案咨询与制订的各种能力。

1、分析试验（DPA 和 FA）

本检测中心自成立以来，完成了数千批元器件的破坏性物理分析（DPA）和失效分析（FA），先后为国家重点工程提供失效分析服务；承担了 GJB 4027 “军用电子元器件破坏性物理分析方法”的制修订，该标准作为电子元器件 DPA 领域的权威标准，在电子元器件质量保证中起着重要的作用；此外，还承担了 GJB 4152 “多层瓷介电容器及其类似元器件剖面制备及检验方法”、GJB × × × “塑封集成电路

的潮湿敏感度分级试验方法”等标准的制定。

2、电性能测试

半导体分立器件静态参数测试：1、测试电压 10V ~ 3000V，分辨率 1mV；2、测试电流 100pA ~ 200A，分辨率 3pA。

射频微波测试：1、S 参数测试：频率范围 100kHz ~ 8.5GHz；2、功率放大器、低噪声放大器、滤波器、VCO、PLL 等器件，频率范围 100kHz ~ 6GHz，最大测试功率 44dBm。

混合集成电路、模块电路、滤波器、晶体元件等测试：1、信号激励能力：DC ~ 120MHz，幅度 10VP-P ~ 50Ω；2、电源激励能力：330V/100A；3、电压基准：±1020V，5 个量程，精度 7 位半；4、电流基准：最大 20A，7 个量程，精度 7 位半；5、电压测试范围：±1000VDC、750VAC，5 量程，精度 8 位半；6、电流测试范围：15ADC、15AAC，8 个量程，精度 8 位半；7、电阻测试范围：10Ω ~ 1GΩ，7 个量程，精度 7 位半；8、时间测试范围：最小 1ns，分辨率 250ps；9、频率测试范围：最大 12.4GHz、精度 10⁻⁹、分辨率 12 位。

运算放大器（含功率运放）、脉宽调制器 PWM、电压比较器、电压跟随器、精密电压基准、时基电路、达林顿晶体管阵列等各类模拟器件的交、直流参数测试：1、DUT 电流范围高达 ±10A，满足功率运放的测试要求；2、可进行压摆率 SR⁺/SR⁻、增益带宽积 BW 等动态参数的测试；3、失调电压测试分辨力高达 0.01uV，偏置电流测试分辨力高达 0.05pA；4、可在 ±40V 的共模电压上叠加 uV、mV 级精密差模电压；5、支持输入微小精密电压扫描测试方法，测试失调

电压与滞回电压。

阻容感等元件测试。

3、寿命试验

开展高温/常温稳态寿命、分立器件高温反偏、间歇寿命及阻容老化等试验。配备大功率分立器件寿命试验台，模块高温老化系统，集成电路高温动态老化系统及高温综合试验系统等。

4、物理试验

球栅阵列（BGA）焊球剪切、焊球拉脱试验；镀层厚度测试；物理尺寸、高精度激光尺寸测量（平面度、焊球共面性）；耐溶剂性；可焊性、耐焊接热试验；化学腐蚀、机械开封；累积氦密封试验；PIND；引线牢固性试验；引线涂覆附着试验；玻璃熔封盖板扭矩试验；连接器的各种试验。

5、极限环境试验

气候试验：温度循环(空气-空气)、热冲击(液体-液体)、低气压、盐雾/盐气、交变/稳态湿热、高温贮存、低温贮存、强加速稳态湿热(高压蒸汽)、霉菌、浸渍等。

机械试验：随机振动、扫频振动、低频振动、高频振动、振动疲劳、振动噪声、机械冲击、恒定加速度等。

6、模拟空间试验

热真空试验、热真空释气试验。

3.10 北京圣涛平试验工程技术研究院有限责任公司中心实验室

北京圣涛平试验工程技术研究院是专业从事航空航天、信息电子、汽车电子、船舶、国防相关试验工程领域新理论、新方法、新技术和创新模式服务的国家高新技术企业，是中国领先的第三方检验、检测和认证机构，拥有 60 多项试验方法国家发明专利，获得中国合格评定国家认可委（CNAS）和军方资质认可，是国家 A 类检验机构，国际 IEC 和国家标准组织成员。

北京圣涛平试验工程技术研究院响应国家“双创”战略，联合国内 36 家大中型试验室于 2016 年发起成立“超级试验室”，采用互联网+检测模式(www.superlabx.com)，致力于为广大军民融合中小企业提供最专业、最快捷、最经济的“一站式”试验解决方案。目前超级试验室覆盖全国 20 个主要城市 200 家专业试验室和 9000 多台套先进仪器设备，可为众多行业和产品提供一站式的全面试验技术解决方案，提升企业竞争优势，满足您对可靠性、安全性、环境适应性、可测性、维修性、保障性的更高要求，是不同地域、不同行业军民融合企业外包试验的首选品牌！至今圣涛平研究院有幸为中国航天、航空、兵器、核工业、中船重工、电科、电信集团及其研究院所，京东方、振华科技、火箭股份、航天电器、天津力神、深圳国微、华为公司、丰田汽车、经纬恒润、兆亿创新、华东电子、华天电子等 500 多家著名企业服务，出具专业报告。

北京圣涛平试验工程技术研究院有限责任公司中心实验室具有 CNAS 认可资质，主要面向电气电子产品，其检测能力覆盖低温试验、高温试验、恒定湿热试验、交变湿热试验、冲击试验、碰撞试验、振动试验等，试验对象包括军用设备、舰船电子设备、军用通讯设备、军用地面雷达、机载设备等。在器件方面的检测能力涉及的标准有 GJB 548B-2005《微电子器件试验方法和程序》、GJB128A-1997《半导体分立器件试验方法》、MIL-STD-883K :2016《微电子器件试验方法标准》

3.11 西安芯派电子科技有限公司测试应用中心

西安芯派电子科技有限公司(简称芯派科技)是一家专业从事中大功率场效应管(MOSFET，自高压至低压全系列产品)、特殊用途整流器(含快速恢复二极管及肖特基二极管)、桥堆以及电源管理 IC 开发设计，集研发、生产和销售为一体的高新技术企业。

芯派科技拥有的自主品牌 SAMWIN 系列产品已在手持装置(手机、平板、电子书)充电器、UPS 电源系统、笔记本及台式计算机与服务器及云端主机电源系统、汽车逆变电源系统、HID 汽车照明系统、LED 照明系统以及电动车与电动机车之充电桩用电源系统、手持电动工具、网通产品(机顶盒)、太阳能逆变电源系统、医疗器材等多个领域得到广泛应用。

芯派科技总部位于西安，设于西安的国家级功率器件测试应用中心，主要业务含括功率器件参数检测、可靠性检测、系统分析、失效分析等领域，共耗资 3500 万人民币建成，除配合内部之设计、制

造、出货等质量检测与验证等业务，同时对外为中国认可之第三方公正检测实验单位，提供检测与验证等服务。

3.12 中家院（北京）检测认证有限公司

中国家用电器检测所，是中国国家认证认可监督管理委员会指定的强制性产品认证检测机构；是中国质量认证中心、中国环境标志认证中心、中国方圆标志认证中心、北京中轻联认证中心、中国消费者协会、北京市消费者协会的签约实验室；获香港机电署 EMSD 认可核证团体资格。

中国家用电器检测所同时又是国家家用电器质量监督检验中心、北京市家用电器质量监督检验站，是由国家认证认可机构、北京市质量技术监督局依据相关法律和要求审查、批准、并授权的检验机构，它们根据各自的授权承担着国家、地方产品质量监督抽查及生产许可证的产品检验工作。

中国家用电器检测所承担着国家强制性产品认证、CB 认证、CE 认证、NEMKO 认证、自愿性产品认证范围内的家用电器、商用电器、照明器具、金融机具（人民币伪钞鉴别仪）、IT 及 AV 设备、电动工具、小功率电动机、办公器具、电器附件及家用电器配件、玩具等产品的安全、性能、RoHS 和电磁兼容检测等工作。

3.13 上海电器设备检测所

上海电器设备检测所 (STIEE) 作为国家低压电器质量监督检验中心、国家中小电机质量监督检验中心、国家智能电网用户端产品（系

统)质量监督检验中心承担了产品质量国家监督抽查、中国强制性产品认证(CCC)认证、科技成果鉴定、性能试验、可靠性试验、自愿性产品认证、节能产品认证测试、电磁兼容性(EMC)测试、环境适应性试验及各类委托检验。STIEE 作为中国国家进出口商品检验(CCIB)认可实验室,IECEE 组织的 CB 实验室,UL 数据交换合作体系(TPTDP)实验室,美国 NVLAP 认可实验室(NVLAP Lab. Code: 200407-0),TüV、CSA、IMQ 等国际认可机构的签约实验室,VDE、KEMA、ITS 的合作实验室,可提供全方位、量身定做的一站式服务。

相关检测项目包括:低压电器、电机、变压器、电焊机、泵、家用电器、绝缘材料、电声、环境试验、电磁兼容、光伏产品、通信(软件)测试、智能电表、电能质量、电动汽车检测项目。

3.14 广东产品质量监督检验研究院

广东产品质量监督检验研究院(简称广东质检院、英文简称GQI)检测实验室和检验机构满足国际标准 ISO/IEC 17025 和 ISO/IEC 17020 的要求,通过中国合格评定国家认可委员会实验室 CNAS 认可、国家认监委和广东省质量技术监督局的 CAL 和 CMA 资质认定,出具的检验报告获得国际实验室认可合作组织多边互认协议(ILAC-MRA)50 多个成员互认。

广东质检院目前拥有 10 个国家产品质量监督检验中心、15 个省产品质量监督检验站和 5 个广东省工程技术研究中心,与电力电子相关的检验中心包括:国家智能电网输配电设备质量监督检验中心(广东)、国家太阳能光伏产品质量监督检验中心(广东)等。

3.15 中国电力科学研究院

中国电科院是我国特高压直流、特高压交流、特高压杆塔、高低压电气、输变电线路设备及材料的电气性能和机械力学性能、大型风电并网系统和太阳能发电检测试验基地。所辖质检机构，是经国家能源局、国家电网公司批准，中国国家认证认可监督管理委员会、中国合格评定国家认可委员会、国家计量认证电力评审组授权的电力产品检测实验室，是电力行业产品质量检验/检测/校准/法定计量的权威机构。

中国电科院作为 3 个国家级和 14 个电力行业质检中心的依托单位，构建了 9 个检验/检测/校准机构组成的管理体系，集中优势科研、试验和检测资源，以全方位提升检验/检测/校准管理水平和试验技术能力，并最终实现与国际著名检测机构合作、对标、互认，成为具有国际影响力的第三方权威质检认证机构。

中电赛普检验认证(北京)有限公司作为中国电科院全资子公司，具备产品认证、服务认证等 2 个类别、三个领域的认证资质，可开展新能源、大容量储能、信息通信、继电保护、电动汽车充电设备、电力一次设备等共 14 个项目的认证工作。

现拥有 12 个具有认证认可资质的检验/检测/校准/法定计量机构，与电力电子相关的中心有中国电力科学研究院有限公司(证书号：CNAS-No. L0699; CNAS-IB0554; CMA-150020252265)、国家风电技术与检测研究中心(证书号：CNAS-No. L0699; CMA-150021253235)、电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心(证书号：CNAS-No. L0699; CMA-150008250674)、电力工业电气设备质量检验测试中心(证

书号： CNAS-No. L0699； CMA-150008250711)、中电赛普检验认证(北京)有限公司(批准号： CNCA-R-2015-176； 证书号： CNAS-No. L8110； CMA-150021253645)等。

3.16 工业和信息化部电信研究院泰尔实验室

中国泰尔实验室经历了不断的发展和融合，成为集信息通信技术发展研究，信息通信产品标准、测试方法、通信计量标准、计量方法研究，国内外产品的测试、验证、技术评估、测试仪表计量、通信软件的评估、验证为一体的高科技组织。

实验室定位以**电子信息通信产业**为主要领域，以工程技术研究为主，兼顾相关基础理论的研究，以市场需求为导向，向政府组织、运营企业、产品设计制造业以及社会公众提供多方位技术支撑和服务为宗旨的发展策略，实验室的主要任务是电子信息通信科学新技术发展研究、相关标准研究与制定、技术可行性和标准符合性技术实验和测试。

实验室建立了以 ISO/IEC 17025 为标准的**质量体系**，并通过了中国合格评定国家认可委员会(CNAS)以及德国国家认可机构(DakkS)的能力认可；获得国家认监委的中国强制性认证检验机构和国家统一推行的电子信息产品污染控制自愿性认证检验机构授权；开展电信设备进网检验；做为第三方实验室，是中国质量认证中心、泰尔认证中心、鉴衡认证中心、中国环境标志认证中心等众多国内认证机构的签约实验室；同时也是美国的 FCC、欧盟的 CE、加拿大的 IC、日本的 JATE、埃及的 NTRA 等国际准入制度的授权(列表)实验室；为国内

外各大电信运营商提供多类通信产品的选型、抽样和委托测试服务。

实验室**检测能力**覆盖了各类电子信息通信终端、接入设备、传输设备、交换设备、IP 网络设备、多媒体通信设备、网关、服务器、电子芯片、汽车电子以及线缆、电源、抗震、电磁兼容、电气安全、产品可靠性、节能环保、有害物质检测、软件测评、信息安全等众多领域。实验室已成为中国面向国内外的综合性、规模化电子信息通信设备检验和试验的基地。中国泰尔实验室是中国实施 APEC-TEL-MRA 的指定实验室，也是中国 APEC 电信设备互认可工作组秘书处所在地。中国泰尔实验室是电信终端测试技术协会（TAF）的核心成员。

3.17 中汽研汽车检验中心（天津）有限公司

中国汽车技术研究中心(简称中汽中心)是 1985 年根据国家对汽车行业管理的需要，经国家批准成立的科研院所，现隶属于国务院国有资产监督管理委员会，是在国内外汽车行业具有广泛影响力的综合性技术服务机构。中汽中心业务涵盖：行业服务、标准业务、政策研究、检测试验、工程技术研发、认证业务、大数据、工程设计与总包、咨询业务、新能源、产业化和战略新兴业务等。中汽中心是 SAC/TC114 全国汽车标准化技术委员会的秘书处单位，SAC/TC114 负责全国载货汽车、越野汽车、自卸汽车、牵引汽车、专用汽车、客车、轿车及汽车列车（包括半挂车和全挂车）、摩托车和电动汽车和名词术语、产品分类、技术要求、试验方法等专业领域标准化工作。

中汽研汽车检验中心（天津）有限公司是由中汽中心投资建立，具有独立法人地位的汽车产品检测机构，被国家认证认可监督管理委

员会（CNCA）授权为国家轿车质量监督检验中心，是经 CNCA 资质认定、CNAS 认可的独立第三方检测实验室。已获得政府部门认可授权的资质有：国家轿车质量监督检验中心、国家汽车新产品申报公告检测机构、国家强制性产品认证（CCC）检测机构和免于强制性产品认证的特殊用途进口产品检测的机构、国家科技成果鉴定试验机构、道路运输车辆燃料消耗量检测机构。

目前具有对汽车整车、地盘、发动机、灯具、车身附件、汽车电器等全系列产品试验能力，如图 3-13 所示，能够承担汽车产品质量监督检查、产品定型试验、型式认证、强制性产品认证检验、出口认证、委托检验、技术咨询等多项工作，是国内唯一的中国新车评价规程（C-NCAP）评价试验检测机构。



图 3-13 中汽研汽车检验中心的检测能力示意图

3.18 天津电气科学研究院有限公司

天津电气科学研究院有限公司（原天津电气传动设计研究所）是原国家机械工业部直属研究所，现为中国机械工业集团有限公司所属科技型企业，主要从事电气传动自动化系统工程、中小型水力发电设备成套、低压电控配电装置和新能源电控设备的科研开发、生产制造和检测认证。

国家电控配电设备质量监督检验中心建于 1985 年，是电控配电设备检测、验收、产品认证及产品质量仲裁检验、产品开发试验的国家级实验室。我国首批百个国家级实验室之一；具有高、低压变频调速设备检验资质；国家认监委批准的国家低压配电产品强制性（3C）认证检测机构；2MW 中压变频实验室，能够实施中压变频全项试验；500kW 光伏逆变器检测平台，具有“金太阳”认证资格；与施耐德、ABB 等国际知名企业保持良好合作；与 Intertek(天祥)集团、TÜV 莱茵、TÜV 南德、BV、UL 等国际知名认证机构建立战略合作。

检测范围包括：1、电控及传动类：高低压变频调速装置、电机启动装置、整流逆变装置、电源系统、控制器、无触点投切开关、电机、控制机柜等。2、低压电器类：低压成套开关设备和控制设备、母线槽、配电箱、分线箱等。3、电力系统类：箱式变电站、高压开关柜、有源/无源电力滤波装置、高低压无功补偿装置、变压器、高低压电抗器、高低压电容器等。4、元件辅件类：断路器、接触器、隔离开关、双电源开关、软启动器、端子、插接件、母线夹、绝缘子、行线槽、桥架、铜铝排、壳体等。5、新能源类：光伏逆变器、光伏

汇流箱、风电逆变器等、中小型水力发电设备、水轮机调速器、励磁装置等。

3.19 中国铁道科学研究院高速铁路系统试验国家工程实验室

中国铁道科学研究院（简称“铁科院”）始建于1950年，是我国铁路唯一的多学科、多专业的综合性研究机构。按照国家科技体制改革的总体部署，根据铁道部《关于铁道部科学研究院转制方案的批复》（铁政法函[2000]461号）要求，2000年开始由事业单位转制为企业单位。目前已发展成为集科技创新、技术服务、成果转化、咨询监理、检测认证、人才培养等业务为一体的大型科技型企业。

铁科院下设17个单位，包括机车车辆研究所、铁道建筑研究所、通信信号研究所、运输及经济研究所、金属及化学研究所、电子计算技术研究所、节能环保劳卫研究所（铁路节能环保技术中心、铁路卫生技术中心）、标准计量研究所（铁道部产品质量监督检验中心、中铁铁路产品认证中心、国家轨道衡计量站、国家铁路罐车容积计量站）、科学技术信息研究所、基础设施检测研究所（铁道部基础设施检测中心）、铁道科学技术研究发展中心、国家铁道试验中心、铁道技术研修学院（铁路继续教育培训中心）、铁科院（北京）工程咨询有限公司、深圳研究设计院、后勤服务中心、嘉苑饭店。院属全资公司32个、控股公司7个。

铁科院行业标准化研究室按照铁道产品的分类，现为集机、车、工、电、运、材料为一体的标准化研究室，设立有铁道标准 技术审

查部和标准情报与档案中心。承担铁道国家标准、行业标准的制修订、归口、标准化审查及宣贯，是我国铁道标准化专业技术机构，可提供标准化技术审查、企业标准化技术指导、国外先进标准和国际标准咨询等技术服务。

铁道部产品质量监督检验中心受铁道部委托行使产品质量监督检验管理职能和行业产品质量归口管理职能。

铁科院高速铁路系统试验国家工程实验室是于2007年9月经国家发展和改革委员会首批批准建设的国家工程实验室之一，是固定设备和移动设备相结合、试验基地和正线试验相结合、试验仿真和实车试验相结合的国家科技创新平台，为高速铁路技术装备研制、高速铁路建设与运营管理提供技术支撑。

高速铁路系统试验国家工程实验室围绕高速铁路系统的可靠性、安全性、舒适性和节能环保等性能，依托环行铁道试验基地和运营线路，主要开展高速列车、线路工程、通信信号、牵引供电、客运服务、安全保障、节能环保等各系统的综合调试、检测试验和认证检验，为建立我国高速铁路技术标准体系提供技术手段。实验室实行理事会领导下的实验室主任负责制，实行开放式运行管理，与国内外企业、高等院校、科研机构建立广泛的技术交流与合作，最大限度地实现试验装备资源共享。

2010年10月9日，实验室获得中国合格评定国家认可委员会（CNAS）颁发的检查机构认可、实验室认可两项证书（证书编号：CNAS IB0229，CNAS L4760）；2012年8月29日，实验室获得国家技术监

督局国家计量认证（CMA）证书（证书编号：2012003335N），成为我国国家工程实验室体系中首个获得检查机构认可、实验室认可、计量认证三项资质证书的实验室。高速铁路系统试验国家工程实验室于2013年9月通过中国合格评定国家认可委员会（CNAS）组织的复评审及扩项评审，并获得新的实验室认可证书、检查机构认可证书、资质认定计量认证证书。实验室检测及计量认证能力由既有的20项增至27项，增加7项；实验室检查能力由既有的20项增至23项，增加3项，通过认证认可的检查、检测项目主要涉及动车组客货车辆、桥梁、路基结构、轨道、供变电系统、接触网系统、通信系统、信号系统、客运服务系统、防灾安全监控系统等专业领域，与电力电子相关的CNAS认可检测能力如表3-8所示。

表3-8 铁科院与变流器相关的CNAS认可检测能力

序号	检测对象	项目/参数		检测标准（方法）
		序号	名称	
1	机车车辆用电力变流器	1	轻载试验	《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第1部分：特性和试验方法》 GB/T 25122.1-2010 4.5.3.7
		2	温升试验	《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第1部分：特性和试验方法》 GB/T 25122.1-2010 4.5.3.11
		3	负载突变试验	《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第1部分：特性和试验方法》 GB/T 25122.1-2010 4.5.3.14
		4	网压跳变试验	《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第1部分：特性和试验方法》 GB/T 25122.1-2010 4.5.3.21
		5	供电短时中断试验	《轨道交通 机车车辆用电力变流器 第1部分：特性和试验方法》 GB/T 25122.1-2010 4.5.3.22
2	电子变流	1	温升试验	《电力牵引 轨道交通机车车辆和公路车辆用旋转电机 第2部分：电子变流器供电的交流电动机》 GB/T 25123.2-2010 8.1
		2	短时过载试验	《电力牵引 轨道交通机车车辆和公路车辆用旋转电机 第2部分：电子变流器供电的交流电动机》 GB/T 25123.2-2010 7.1.2.2

	器供电的交流电动机	3	特性试验和容差	《电力牵引 轨道交通机车车辆和公路车辆用旋转电机 第2部分：电子变流器供电的交流电动机》 GB/T 25123.2-2010 8.2
		4	超速试验	《电力牵引 轨道交通机车车辆和公路车辆用旋转电机 第2部分：电子变流器供电的交流电动机》 GB/T 25123.2-2010 8.3
3	间接变流器供电的交流电动机及其控制系统	1	温升试验	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.3
		2	并联异步电动机的附加试验	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.4
		3	电动机热态时的转矩特性	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.5.1.2
		4	电动机冷态时的转矩特性	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.5.1.3
		5	满转矩的速度扫描试验	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.5.1.4
		6	组合系统的效率特性	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.5.2
		7	组合系统控制装置电源	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.6.1.1
		8	牵引传动系统供电电压	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.6.1.2
		9	牵引供电电压中断	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.6.1.3
		10	牵引供电电压突变	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.6.1.4
		11	变流器输入电流的谐波	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.6.2
		12	失效状态	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.7.1
		13	负载突变	《轨道交通 机车车辆 组合试验 第3部分：间接变流器供电的交流电动机及其控制系统的组合试验》 GB/T 25117.3-2010 7.7.2

3.20 中车株洲电机有限公司检测试验中心

中车株洲电机有限公司是中国中车旗下牵引电机、变压器专业化研制企业。主营业务为机车、动车、城轨地铁牵引电机和牵引变压器、风力发电机、高效电机、特种变压器。公司是我国轨道交通、风力发电零部件装备领军企业，产品市场占有率 50%以上，是矿山、电力、冶金、石油、防爆机械等高效电机产品专业化研制基地。

大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室下设系统集成实验室、电气传动实验室、机械综合实验室、转向架实验室、高低压电器实验室、制动实验室、综合环境实验室等七大专业技术研究实验室。其中，电气传动试验平台如图 3-X 所示，主要研究：验证电气传动系统以及主要部件参数匹配、变流器控制策略、牵引传动系统故障检测及诊断、传动系统关键部件安全性能预测及控制性能，研究电气绝缘匹配关系，验证高低压电器部件的性能。



图 3-14 中车株洲电机电气传动试验平台

中车株洲电机有限公司检测试验中心，位于湖南省株洲市国家高新区田心高科技工业园，实验室通过 CNAS 资质评审，资质编号为 CNAS L5527。实验室检测能力范围

为株洲：电机试验，变压器试验；成都：电机试验，相关 CNAS 认可检测能力如表 3-9 所示。

表 3-9 中车株洲电机有限公司检测试验中心部分 CNAS 认可检测能力

检测对象	序号	名称	检测标准（方法）
牵引变压器	1	油箱密封试验	电力变压器试验导则 JB/T 501-2006 油浸式电力变压器技术参数和要求 GB/T 6451-2008
	2	绕组电阻测量	轨道交通 机车车辆牵引变压器和电抗器 GB/T25120-2010 IEC60310-2004 电力变压器 第 1 部分 总则 GB1094.1-1996 IEC60076-1-2011
	3	电压比测量和 联结组标号检	
	4	短路阻抗和负 载损耗测量	
	5	空载电流和空 载损耗测量	
	6	总损耗测定	
	7	空载电流谐波 测量	
牵引变压器	8	风扇和油泵电 机吸收功率测 量	电力变压器试验导则 JB/T501-2006 电力变压器 第 1 部分 总则 GB1094.1-1996 IEC60076-1-2011
	9	温升试验	轨道交通 机车车辆牵引变压器和电抗器 GB/T25120-2010 IEC60310-2004 电力变压器 第 2 部分温升 GB1094.2-1996 IEC60076-2-2011 电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则 GB/T 1094.7-2008 IEC60076-7-2005
	10	外施耐压试验	轨道交通 机车车辆牵引变压器和电抗器 GB/T25120-2010
	11	感应电压试验	IEC60310-2004 电力变压器 第 3 部分绝缘水平和绝缘试验

牵引变压器	12	局部放电测量	<p>电力变压器第 1 部分 总则 GB 1094.1-1996 IEC 60076-1-2011</p> <p>电力变压器第 3 部分 绝缘水平、绝缘实验和外绝缘空气间隙 GB 1094.3-2003 IEC 60076-3:2000</p> <p>局部放电测量 GB/T 7354-2003 IEC 60270-2000</p>
	13	雷电冲击试验	<p>轨道交通 机车车辆牵引变压器和电抗器 GB/T25120-2010 IEC60310-2004</p> <p>电力变压器 第 3 部分绝缘水平和绝缘试验 GB1094.3-2003 IEC60076-3-2000</p>
	14	声级测定	<p>轨道交通 机车车辆牵引变压器和电抗器 GB/T 25120-2010 IEC60310-2004</p> <p>电力变压器 第 10 部分 声级测定 GB/T1094.10-2003 IEC60076-10-2001</p>
牵引变压器	15	绕组对地绝缘电阻和(或)绝缘系统电容的介质损耗因数 ($\tan\delta$) 的测量	<p>电力变压器 第 1 部分 总则 GB1094.1-1996 IEC60076-1-2011</p> <p>油浸电力变压器技术参数和要求 GB/T6451-2008</p> <p>电力变压器 试验导则 JB/T 501-2006</p>
	16	绕组对地和绕组间的电容测定	
	17	油流静电试验	<p>油浸电力变压器技术参数和要求 GB/T6451-2008</p>

3.21 全球能源互联网有限公司

国网全球能源互联网有限公司为国家电网公司全资子公司，独立法人单位，是我国首家专业从事智能电网关键技术科研工作的高端研发机构，以领先性、突破性、革新性为导向，以“三创一化”为特征（原创、首创、独创、物化），在电力电子、微电子、新材料、储能与并网技术、智能传感、信息与通信前瞻性技术等领域，开展关键技术研究、形成创新成果并实现转化，总部位于北京“未来科技城”，分设欧洲分院和美国分院，是先进输电技术国家重点实验室（实验平台系统信息如表 3-10 所示）依托单位。

表 3-10 先进输电技术国家重点实验室实验平台系统信息

1. 直流换流阀试验平台系统	
主设备	交流耐压试验装置、直流耐压试验装置、冲击试验装置、大电流源、故障电流试验装置、冲击电压发生器
应用领域	高压设备形式试验检测
技术指标	600kV/5A、±2400kV/300mA、±3600kV、7500A、60kA、±800kV
主要功能	能够完成±1100kV/6250A 以下直流换流阀所有型式试验
2. 柔性换流阀试验平台系统	
主设备	过流关断试验装置、短路电流试验装置、故障电流试验装置
应用领域	柔性直流输电/高压设备型式试验检测
技术指标	10kV/10kA、±40kV/24kA、20kV/2kA
主要功能	可进行 MMC 型柔性换流阀的运行型式试验
3. FACTS 装置高压阀试验平台系统	
主设备	交直流耐压及局放成套试验装置、冲击电压发生器成套试验装置、温升成套试验装置、合成试验高压回路
应用领域	高压串联晶闸管阀试验
技术指标	110kV AC/100kV DC、800kV、3000A、80kA
主要功能	FACTS 装置高压阀试验
4. 灵活交流输电技术与仿真系统	
主设备	RTDS、四象限功率放大器

应用领域	灵活交流输电系统控制保护装置、换流阀拓扑的闭环仿真测试
技术指标	可仿真 144 个电网节点； 仿真步长最小可达 50 微秒； 支持 512 路数字量输入、384 路数字量输出； 支持 144 路模拟量输入、288 路模拟量输出
主要功能	具备领过交流输出阀与电网之间相互作用的电磁暂态仿真能力以及 阀内部参数差异性设置、桥臂北部故障分析能力。可对统一潮流控 制器、精致同步补偿器等新型电力电子器件装置进行低压闭环测试
5. 电力系统电力电子器件试验平台	
主设备	功率循环试验台、高加速应力试验台、8 英寸高温高压手动探针台、 IGBT 动静态特性测试系统、热阻测试系统
应用领域	功率半导体器件研发测试
技术指标	±10kV、±1500A 芯片电学性能测试； 静态 8000V/12000A、动态 6000V/8000A 动静态测试功率； 200000 次功率循环测试能力； 10kV 击穿、热阻测试等
主要功能	当前可满足 6kV 及以下大功率模块动静态参数与可靠性测试要求

第四章 第三代半导体电力电子产业测试服务分析

4.1 标准体系需要进一步完善，测试服务才能有标可依

4.1.1 SiC 器件产业化开始进入成熟期

商用 SiC 肖特基二极管于 2001、SiC MOSFET 2011 年推出，目前已经超越“概念验证”阶段，产业化进程如图 4-1 所示。

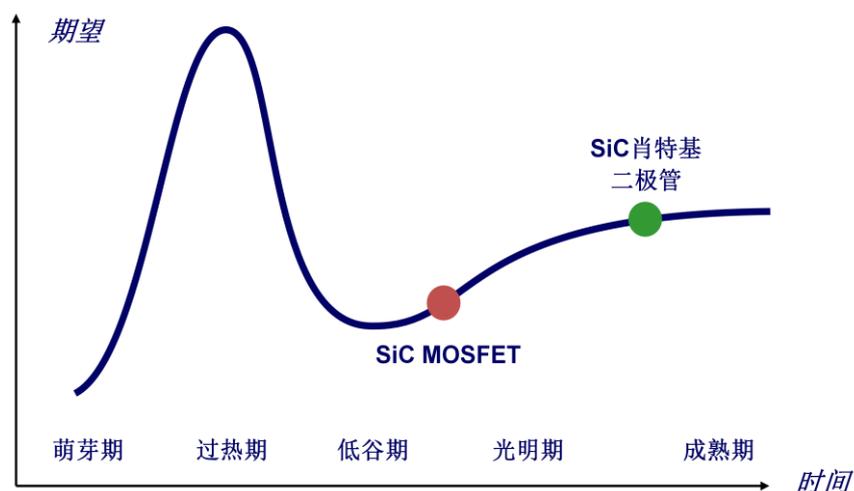


图 4-1 SiC 器件产业化进展示意图

SiC 肖特基二极管产品已经实现系列化，国内外 20 余家企业批量销售 SiC 肖特基二极管系列产品，产品技术发展到第五代，采用薄片、沟槽等先进技术，在不断提升性价比的同时，应用可靠性显著提升；SiC MOSFET 产品技术发展迅速，1700V 以下中低压产品性能可靠性满足应用要求，产品发展到第三代，采用新型栅氧、沟槽结构等技术；应用领域不断扩展，高端电源、光伏逆变器领域的应用规模进一步扩大，可靠性及成本已达到电动汽车及轨道交通等应用要求。

目前，SiC 器件广泛商业化进程依然比较缓慢，特别是 SiC MOSFET 器件，分析原因涉及到：（1）产品价格高，工程应用中提高效率、降

低系统成本等益处尚未充分体现；（2）产品成熟度待提升，实际应用工程应用中器件的可靠性问题亟待解决；（3）封装和驱动等问题未完全解决，SiC 电力电子器件优势未得到充分发挥。

国产化方面，SiC 单晶衬底及外延技术还不成熟，较高的缺陷密度制约了器件性能、可靠性以及批产能力的进一步提升，SiC 器件工艺技术水平有待提高，存在影响成品率和长期可靠性的工艺缺陷，限制了器件的大范围推广和应用。SiC 肖特基二极管应用于电源、充电装置、光伏逆变器（600-1700V）等，替代国外同类产品，系统级性能表现基本一致，已批量应用；SiC MOSFET 的产业化具备工艺条件，批量生产能力有待进一步建立。

4.1.2 新型技术发展推动下，器件测试方法有待更新和完善

在此产业成熟度的背景下，与原有 Si 电力电子器件的测试方法相比，SiC 器件测试条件和测试电路都会有一定的差异，第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）正在组织相关单位研究制定第三代半导体器件的测试方法。针对 SiC 器件的测试，中科院微电子所、电工所已经具备测试能力，可以对外开展测试服务。

在第三代半导体逐步应用于电力电子器件和产业的过程中，不断涌现新的器件、应用部件等产品，测试方法与原来的会有一定的差异标准面临部分条款的修订；面向应用的器件技术要求、可靠性要求、环境试验等标准，需要重新制定一批方法标准，支撑产品的科学客观评价和推广应用。在这种背景下，测试机构是标准制定的重要部分，是标准实施单位，测试机构的测试条件和测试能力是产品有效评价、

产业健康有序发展的关键因素。

4.1.3 器件应用功能化模块环节，标准缺失，测试无标可依

对于第三代半导体来讲，衬底相关标准基本完善，外延片和芯片部分已经制定，而器件相关标准制定刚刚开始，CASA 标准化委员会已经启动制定 SiC 肖特基势垒二极管的测试方法；在应用终端，如光伏逆变器、非车载充电机等，设备标准可以参照原有标准体系；在器件和应用终端之间，缺少模块、部件环节的标准。

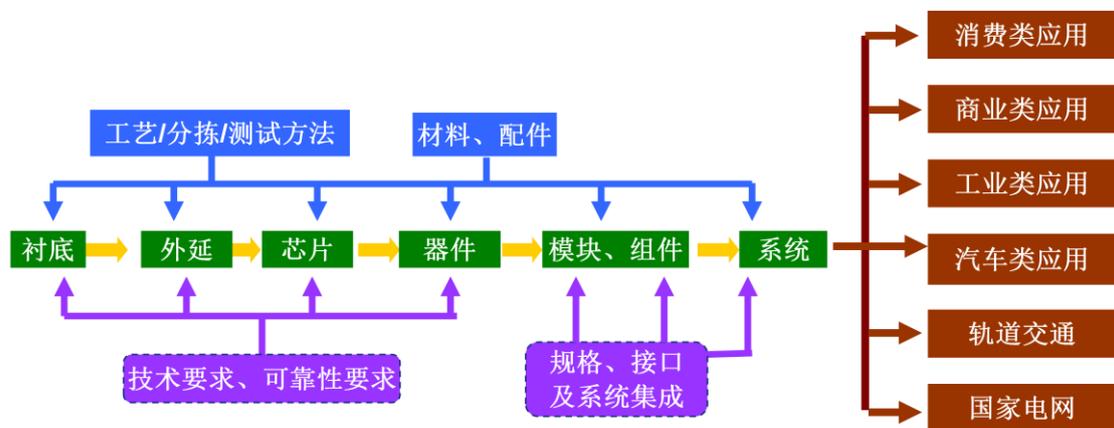


图 4-2 第三代半导体电力电子上中下游产业链示意图

对于模块、部件的生产企业，如厦门华联、杭州士兰微，多是 B2B 业务，产业链之间衔接的技术需求，特别是器件应用要求并不公开。第三代半导体器件的应用技术要求需要进一步明确，以引导器件研发方向，开启规模应用。

4.2 测试设备依赖进口，测试能力建设前期资金需求大，且设备到货期比较长

在半导体测试设备方面，国际上有许多专业的厂商，主要包括安捷伦、泰克、IST 公司等，国内大多数半导体生产厂商使用的半导体

测试设备主要依赖进口。如中科院电工所的动静态参数测试设备是瑞士生产的LEMSYS TRds4045-4070，其价格接近1000万，且到货期比较长。在第三代半导体产业化的过程中，所需设备数量会急剧增加，国外设备的供货压力将大大增加。



图 4-3 中科院电工所的动静态参数测试仪

据调研，目前国内现有的 MOS 管参数测试仪主要是针对 MOS 管的阈值电压、耐压、沟道电阻与开启电压等静态参数的测试。对于 MOSFET 与二极管的动态参数测试，国内缺少专用的直接测试仪器。在测试设备方面，原有设备并不能满足测试要求，一些测试电路需要重新设计，测试设备的国产化发展面临一定的机遇。在产品规模化生产过程中，工厂使用的测试设备的测试要求不如研究院所、大学的测量精度高，测试参数相对固定，但实际测试量随产业规模化逐渐增加，测试设备的需求量增加。据悉，国外昂贵的测试设备一般会有很长的到货期，如果在需求量急剧增加的背景下，测试设备与产业化的协调发展将面临一定的问题。

4.3 应用规模开启还需时日，测试服务市场前景不明

电力电子应用广泛，基于第三代半导体的技术优势，应用领域包括消费类电子中的电源适配器、冰箱洗衣机中的变频器，新能源并网的光伏逆变器、风力发电机变流器、储能变流器，电动汽车中的充电桩模块、车载充电器、电机控制器，工业电机中的变频器，轨道交通中的变流器、智能电网中的电力电子变压器、电压源换流器等。各应用部件使用国产器件的样机研制时间预测如图 4-4 所示。

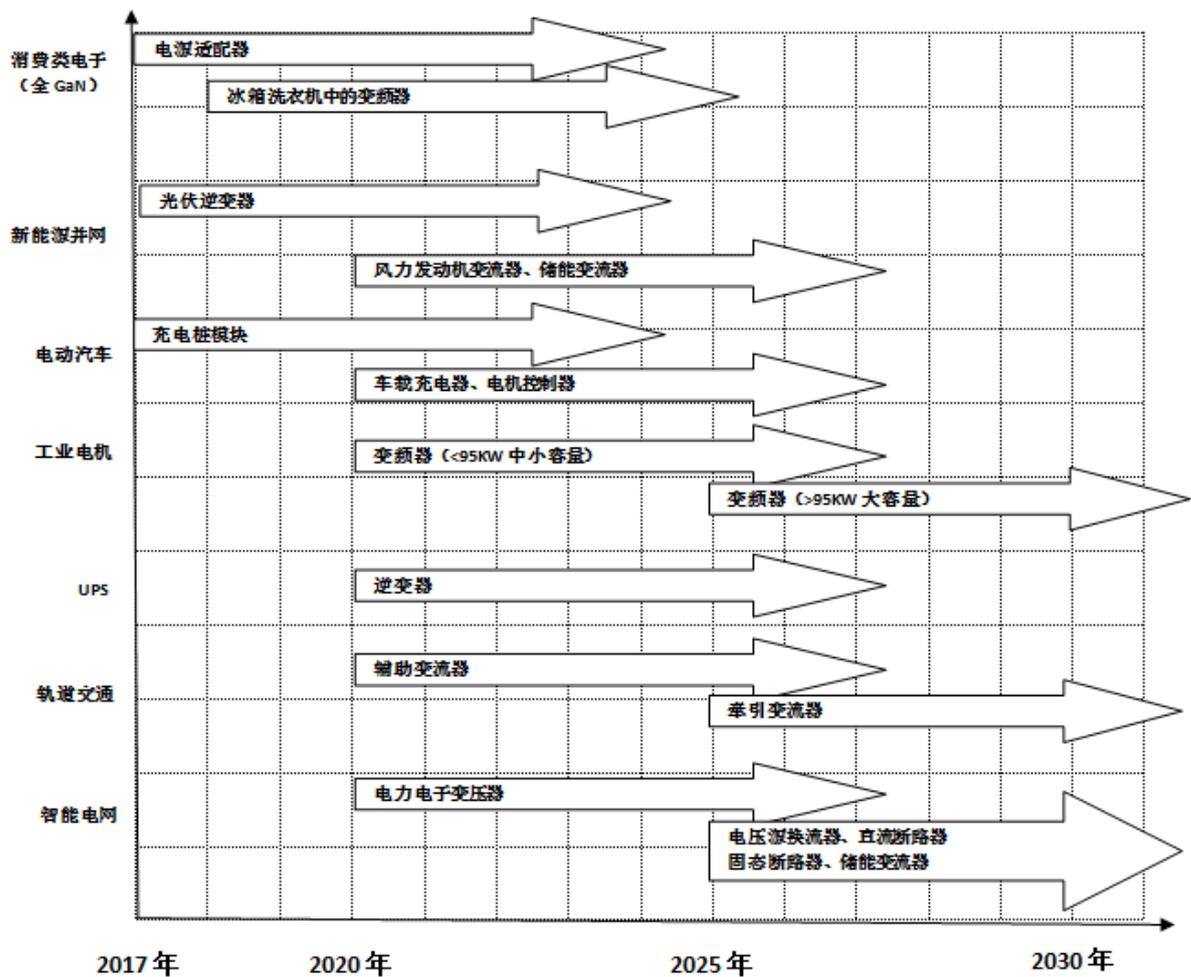


图 4-4 电力电子应用第三代半导体国产器件的样机时间预测

第三方检测是国家、社会乃至经济贸易发展到一定阶段后的产

物，其含义是指两个存有关联的主体之外的第三方客体，以非当事人的身份，依据相关政策、规定、标准或者合同对制定物品进行的检验活动。第三方检测市场的大小与对应的产业的产业化进展、产业规模息息相关，在第三代电力电子器件与应用市场短时间内规模开启时间不明确的背景下，检测市场前景也不明朗。

4.4 标准、测试、认证服务于应用市场开启的综合能力有待建立

4.4.1 认证概述

认证（Certification）是一个外来词，根据 GB/T 27000-2006(等同采用 ISO/IEC 17000-2004)《合格评定词汇和通用原则》中把认证定义为“与产品、过程、体系或人员有关的第三方证明”；《中华人民共和国认证认可条例》第二条规定：认证“是指由认证机构证明产品、服务、管理体系符合相关技术规范、相关技术规范的强制性要求或者标准的合格评定活动”。

中国目前有认证资质的机构达 200 多家，影响力比较大、与第三代半导体电力电子产业相关的国内认证包括：中国质量认证中心、泰尔认证、中铁检验认证中心、鉴衡认证等。

4.4.2 中国质量认证中心

中国质量认证中心是由中国政府批准设立，被多国政府和多个国际权威组织认可的第三方专业认证机构，隶属中国检验认证集团。经过近三十年的发展，已经成为业务门类全、服务网络广、技术力量强

的一流质量服务机构，以较高的信誉度和美誉度跻身世界知名认证品牌行列。

中国质量认证中心认证结果，是进入中国《节能产品政府采购清单》的必要条件；是国家“节能产品惠民工程”、“金太阳示范工程”及高效照明财政补贴等政策支持的重要条件；是政府及企事业单位招投标工作的重要依据；是消费者选购商品的重要参考。

当器件应用于某一产品或部件时，如低压电器、工业电机、手机、照明电器、光伏组件、风力发电机组等，电磁兼容、安全方面属于国家强制性 3C 认证、性能方面 CQC 节能认证是政府采购的必要条件，典型产品需要符合的标准如表 4-1 所示。

表 4-1 部分产品的 3C 或 CQC 认证相关信息

序号	类别	产品名称	认证需符合的标准
1	3C	0802 功率放大器	GB 8898-2011
2		0807 电源适配器（线型）	GB 13837-2003
3		0807 电源适配器（开关型）	GB 17625.1-2003
4		0902 便携式个人计算机 （开关电源已认证）	GB4943.1-2011、GB9254-2008 GB17625.1-2003
5		0907 适配器、充电器（线型）	
6	CQC	001017 不间断电源（UPS）	GB4943
7		001028 激光系统（激光组件）	GB7247.1
8		002022 家用和类似用途电器用外置电源适配器、充电器和内置开关电源	GB 17625.1、GB 17625.2、 GB 4343.1、GB 4343.2
9		024001 晶体硅光伏组件	GB/T 9535、 IEC61730-2:2004

10	024002	离网控制器、逆变器、控制 逆变一体机	GB/T19064
11	024003	独立光伏系统	IEC62124

4.4.3 泰尔认证电源类产品

泰尔认证中心(简称 TLC),隶属于工业和信息化部电信研究院,是目前国内唯一的一家专业从事邮电通信行业企业质量管理体系认证、环境管理体系认证、职业健康安全管理体系认证和产品认证的机构。目前泰尔认证中心颁发的产品认证证书已被各大电信运营商全面采信,普遍作为招投标时的基本资质要求之一。同时在部分政府机关、其它行业的采购招标活动中,中心颁发的产品认证证书也被作为招投标时的基本资质要求之一。

在电源方面,按照《TLC-GZ-P004 通信电源设备认证实施规则》,电源类产品包括: 1. 高频开关电源系统及模块; 2. 户外电源系统(壁挂、落地); 3. 直流—直流模块电源; 4. 直流—直流变换设备; 5. 逆变电源设备; 6. 交、直流配电设备; 7. 高压直流系统; 8. 交流稳压器; 9. 交流不间断电源(UPS); 10. 风、光发电设备与系统等新能源产品; 11. 铅酸蓄电池、铁锂电池; 12. 移动通信手持机电池及充电器; 13. 柴、汽油发电机组; 14. 传输设备用直流电源分配列柜; 15. 通信电源监控系统; 16. 通信局站环境与节能系统; 17. 空调。

4.4.4 中铁检验认证中心

中铁检验认证中心(原中铁铁路产品认证中心)(简称“CRCC”)是2002年10月29日经国家认证认可监督管理委员会批准成立(批准

号为 CNCA-R-2002 -102)，2002 年 11 月国家工商注册、2003 年 4 月正式挂牌成立的国有独资企业，注册资金 5100 万元，是实施铁路产品、城轨装备认证的第三方检验、认证机构。

2013 年 4 月 11 日工商变更注册法人为 CRCC，经营范围增加了检测检验及其他技术服务。

2014 年 1 月 21 日，国家认监委发文正式批准 CRCC 的“国家铁路产品质量监督检验中心”授权。CRCC 的检测检验范围覆盖了铁路及城轨机车车辆、牵引供电、通信信号、工务工程、运输包装、金属化学等产品。

4.4.5 鉴衡认证

北京鉴衡认证中心（China General Certification Center，简称“鉴衡”或“CGC”）成立于 2003 年，是经国家认证监督管理委员会批准，致力于为太阳能、风能、碳排放等清洁技术领域，提供技术开发、标准制定、认证、检测、产业和政策研究等服务的第三方机构，是国内少数同时具备中国合格评定国家认可委员会（CNAS）认可和中國计量认证（CMA）资质的检测认证机构。

从太阳能、风能、生物质、节能、低碳到电子电器产品，从认证、测试、审核、检验到监造以及技术研究和培训咨询，十余年来，鉴衡以严谨的态度、精湛的技术、专业的服务，为众多企业搭建了从技术到产品、从产品到市场的桥梁，支持客户在全球市场取得成功。

4.4.6 标准、测试和认证协调发展面临一定的挑战

科研机构的测试部门主要定位于服务科研，管理机制，不能有效调动人员积极性，难以支撑产业化需要，同时，测试设备功能定位在高精度、全覆盖，产业化服务的批量能力有待建立。同时，科研机构相对集中的区域，与未来产业生产基地有一定差异，跨越区服的服务成本相对较高，产业聚集区的测试配套服务有待配套建立。

被国务院定位于高技术服务业、科技服务业、生产性服务业的检验检测服务业，实际上高技术含量非常低。2015年，平均每个检验检测机构参与的科研项目不足1项，平均科研经费50.6万元，平均标准制修订经费仅3.2万元。说明国内的检测行业技术含量水平仍有大幅提升空间。

对于目前整理的标准化组织、测试机构、认证机构，能力多建立在Si基器件和以此为基础的电力电子应用，对第三代半导体的认识比较薄弱，对如何以认证的手段服务于第三代半导体器件应用推广，尚未有全面的认识与工作规划。

在原有Si基电力电子产业链中，已经形成了相对各有分工、有序合作的关系；但是，这种关系错综复杂，标准化组织相关的行业管理部门、测试机构相关的利益分配、认证机构相关的市场管理等各有诉求。针对原有的电力电子产业链利益关系，第三代半导体产业应用的系统转换成本比较高，只有当新型产品性能更优、解决方案价格更低时，才有可能打开规模市场，在这个过程中，标准、测试和认证如

何能有效、客观评价新型产品的性能,不代表原有产业阻碍技术进步,是新兴产业必须面临的问题。

第五章 产业测试能力建设工作建议

5.1 依托联盟制定标准，以保证测试有标可依

联盟标准作为国家标准的有益补充，有制定周期短、与创新技术结合紧密、快速反应新兴市场发展等明显优势。在产品技术路线的更新换代的过程中，联盟作为产业的交流平台，更能汇集产业链上各方的优势资源，开展现有技术路线市场调研、新型技术解决方案的共同研发、标准的联合制定，以及实施应用推广等工作。

第三代半导体产业技术创新战略联盟成员单位覆盖科研院所、大学、企业，聚集产业各方面人才，通过现有的“公开、透明、协商一致”的标准化委员会工作机制，推动产业急需的标准制定，以保证测试服务有标可依。

5.2 调研测试设备国产化可行性，推动国产测试设备的研发

调研现有第三代半导体电力电子产业测试设备国产化发展的瓶颈问题，鼓励研制国产化测试设备，积极推动国产化测试设备的企业参与新兴产业各项标准的制定。

半导体照明作为第三代半导体材料的第一个成功应用，在其产业快速发展（2008年-2017年）的近10年时间里，测试设备公司——远方信息（股票代码：300306）也快速成长，远方信息营收与半导体照明产业规模随时间发展，如图5-1所示。

杭州远方光电信息股份有限公司（股票代码：300306，简称“远

方光电”)是光电(光学、电学、光电子学)检测设备和校准服务专业供应商,远方光电在LED和照明检测设备领域内综合实力全球领先。远方公司多次承担国家高技术研究发展计划(863计划)课题和省市级重大科技攻关项目。远方积极参与国际标准化活动,主导或参与了30多项国际、国内标准或技术规范的制修订。

远方在半导体照明产业初期,就开始积极承担标准的编写工作。联盟标准CSA001-2008《整体式LED路灯测量方法》作为全球首个专门针对于半导体照明特定应用产品的测量方法文本于2008年7月1日由国家半导体照明工程研发及产业联盟(下简称“联盟”)发布,该标准的第一起草单位为杭州远方光电信息技术有限公司。

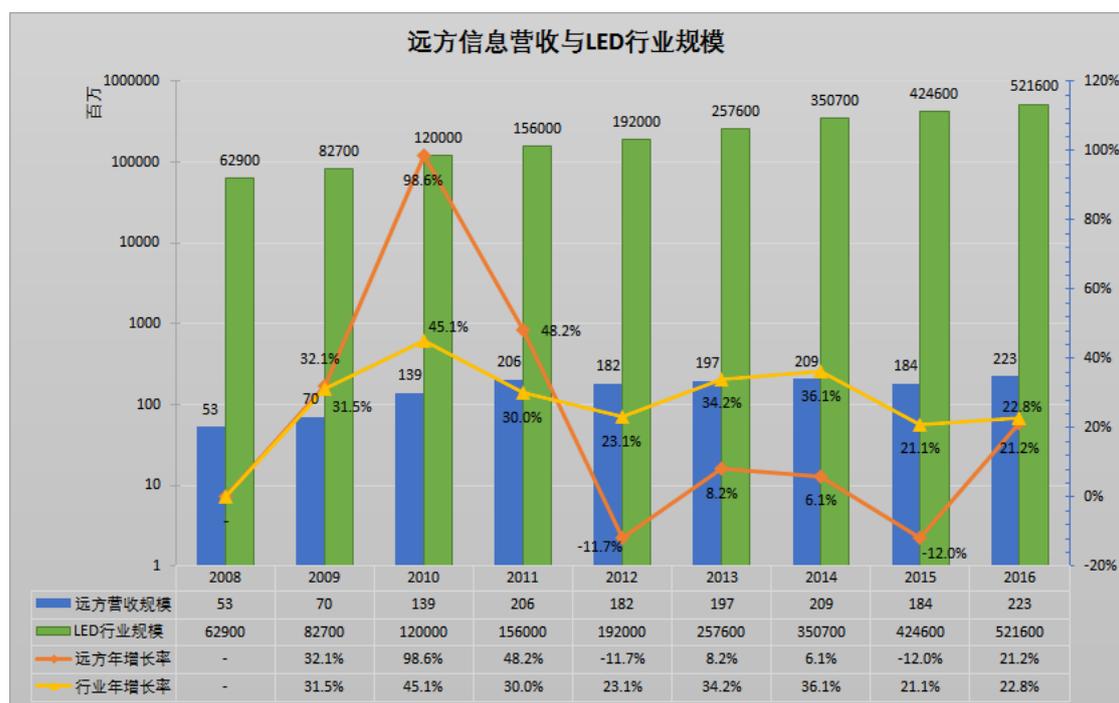


图 5-1 远方营收与半导体照明产业规模对比图

5.3 整合资源，确保产业化进程和测试服务能力并行发展

目前第三代半导体的创新技术主要掌握在科研机构、大学等研究实力比较强的单位中，在产业化过程中，创新技术会逐步转移到企业，规模化生产，产业配套服务需要同步建立、与产业化发展协调并进。

行业的测试能力除了第三章中描述的在行业内影响力比较大的检测机构以外，还有一些区域性检测机构，如在上海、广东等地。针对目前正在建设或规划建设的第三代半导体产业聚集区，整合原有测试机构的资源，升级形成第三代半导体产业测试服务体系，有效利用原有人才，可大大降低新兴产业测试服务能力建立的难度。

5.4 建立服务于创新技术产业化的标准、测试、认证服务体系

5.4.1 自愿性产品认证处于起步阶段

根据国家统计局历年《国民经济和社会发展统计公报》中公布的数据，2010-2013年，我国累计接受产品认证企业数量从79 850家上升至110 949家。

根据认可委秘书处发布的《CNAS 认证机构、实验室、检查机构认可年报》，截至2013年12月31日，获得认可的认证机构颁发的现行有效认证证书共758,311份，其中强制性产品认证证书359,076份，占比47.352%；质量管理体系认证证书239,747份，占比31.616%；环境管理体系认证证书67,976份，占比8.964%；职业健康安全管理体系认证证书46,170份，占比6.089%；上述四类证书占全部有效证

书数量 94.021%，因而是目前最主要的认证市场结构，如图 5-2 所示。

与此同时，我国目前自愿性产品认证尚处于起步阶段，所颁发的现行有效的证书仅 26,340 份，占整个认证市场的份额为 3.474%，尚有很大的发展潜力。

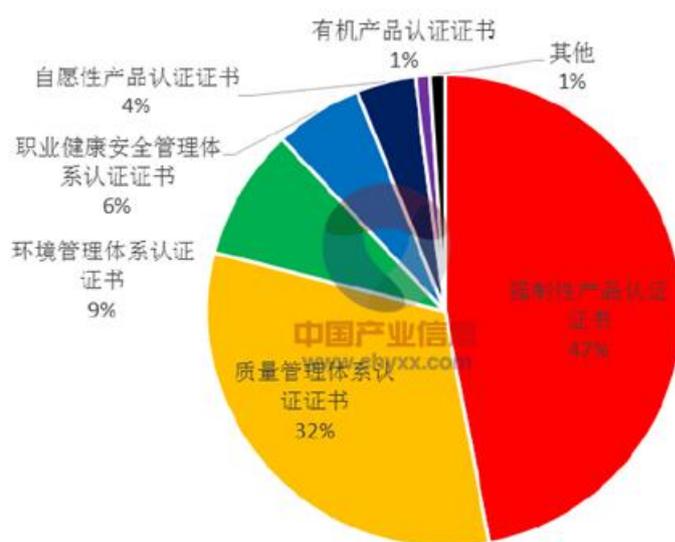


图 5-2 获得 CNAS 认可的机构颁发的先行有效证书占比

资料来源：CNAS

5.4.2 国家鼓励以联盟标准作为认证依据

2016 年 4 月，为实现我国自愿性产品认证工作多领域、多层次、多元化健康有序发展，国家认监委出台《国家认监委关于加快发展自愿性产品认证工作的指导意见》（国认证[2015]76 号），部分条款如下：

“（三）适应产品发展要求……；针对产品策划、研发、生产、流通、使用、回收、处置等不同阶段或全寿命周期开发认证需求；针对绿色低碳、节能环保、循环经济、区域战略等产品绿色发展导向发

掘认证需求；针对产品整机、部件、功能、系统关键特性，应用测试、标定、分级、特性标识等多种形式满足认证需求。”

“（十一）激发机构活力。……；鼓励具备产品研发优势、检测优势、应用研究优势、标准制修订优势的科研院所、检测机构设立认证机构或与认证机构合作，开展相关领域自愿性产品认证业务。”

“（十二）鼓励全面创新。……。鼓励行业协会、产业联盟和社会团组织运用认证手段实现管理目标和发展需求，积极引导和规范发展联盟认证、区域认证。鼓励社会资本依据国家相关政策，有序进入自愿性产品认证检测市场，……。”

“（十九）完善认证相关标准。加大自愿性产品认证所依据的标准建设，鼓励认证机构开发认证技术标准，完善认证认可行业标准、认证认可社团标准、**联盟标准**；鼓励将有市场认证需求的国际标准、社团标准、**联盟标准**作为认证依据，为标准的制订、发布、实施、使用提供方便。”

5.4.3 调研联盟标准实施方案，推动建立服务于产业市场开拓的检测认证体系

认证认可是产业进步的技术支撑手段，有效实施技术评价和市场引导，促进产业结构升级。在国家认证制度市场化改革的背景下，联盟标准如何与认证单位合作，发挥技术优势和行业资源，结合认证推广模式，服务质量提升，打造品牌企业，服务产品招标采购，探索认证与保险的关系，推动联盟标准的实施，是产业急需解决的问题。

跟踪科技创新产业化进程，畅通科技成果转化为技术标准渠道，推进科技、标准与产业协同发展，调研联盟标准实施推广机制，分析推动产业市场开拓的检测认证服务体系建立的可行性，进一步实践探索联盟标准的实施推广。



共创、共建、共享、共赢

第三代半导体产业技术创新战略联盟

地址：北京市海淀区清华东路甲 35 号（中科院半导体所院内 5 号楼 5 层）

邮编：100083

电话：010-82388680

传真：010-82388580

邮箱：casas@casa-china.cn

www.casa-china.cn