

# 功率半导体分立器件产业及标准化 白皮书 (2019版)

主编单位：中国电子技术标准化研究院  
(工业和信息化部电子第四研究院)

参编单位：中国宽禁带功率半导体及应用产业联盟  
中国IGBT技术创新与产业联盟

## 版权声明

本白皮书版权属于中国电子技术标准化研究院，并受法律保护。  
转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或观点的，请注明：“来源：中国电子技术标准化研究院”。违反上述声明者，本院将追求其相关法律责任。

中国电子技术标准化研究院

## 目 录

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 1     | 前言                 | 1  |
| 2     | 功率半导体分立器件概述        | 3  |
| 2.1   | 功率半导体分立器件的概念       | 3  |
| 2.2   | 功率半导体分立器件的分类       | 4  |
| 2.3   | 功率半导体分立器件的应用       | 7  |
| 2.4   | 功率半导体分立器件关键工艺      | 8  |
| 2.4.1 | 外延工艺技术             | 8  |
| 2.4.2 | 光刻工艺技术             | 9  |
| 2.4.3 | 刻蚀工艺技术             | 9  |
| 2.4.4 | 离子注入工艺技术           | 9  |
| 2.4.5 | 扩散工艺技术             | 10 |
| 2.5   | 功率半导体分立器件          | 10 |
| 2.5.1 | 功率二极管              | 10 |
| 2.5.2 | 晶闸管                | 11 |
| 2.5.3 | 晶体管                | 11 |
| 2.5.4 | 功率半导体分立器件模块        | 14 |
| 2.5.5 | 宽禁带功率半导体器件         | 14 |
| 3     | 功率半导体分立器件发展现状及发展趋势 | 17 |
| 3.1   | 功率半导体分立器件发展现状      | 17 |
| 3.1.1 | 全球产业发展现状           | 17 |
| 3.1.2 | 国内产业发展现状           | 19 |

|       |                           |    |
|-------|---------------------------|----|
| 3.2   | 我国功率半导体分立器件发展趋势.....      | 25 |
| 3.2.1 | 下游需求旺盛为功率半导体分立器件带来新机遇.... | 25 |
| 3.2.2 | 高端产品进口替代空间广阔.....         | 27 |
| 3.2.3 | 宽禁带功率分立器件是行业持续发展的重要保障.... | 30 |
| 4     | 功率半导体分立器件标准化现状.....       | 35 |
| 4.1   | 国外标准化现状.....              | 35 |
| 4.2   | 国内标准化现状.....              | 48 |
| 4.2.1 | 国内民用标准现状.....             | 48 |
| 4.2.2 | 国内军用标准现状.....             | 48 |
| 5     | 功率半导体分立器件标准体系.....        | 50 |
| 5.1   | 标准体系的构建原则.....            | 50 |
| 5.2   | 我国功率半导体分立器件标准体系.....      | 51 |
| 5.2.1 | 基础标准.....                 | 53 |
| 5.2.2 | 产品标准.....                 | 57 |
| 6     | 功率半导体分立器件标准化发展目标及建议.....  | 66 |
| 6.1   | 发展目标.....                 | 66 |
| 6.2   | 发展建议.....                 | 67 |
| 6.2.1 | 完善标准体系，填补空白领域.....        | 67 |
| 6.2.2 | 着重发展新材料领域标准化研究.....       | 67 |
| 6.2.3 | 功率模块应用激增，带来标准研究新问题.....   | 70 |
| 6.2.4 | 针对不同领域的应用环境与要求制定相关标准..... | 71 |
| 6.2.5 | 鼓励发展高质量的团体标准.....         | 73 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 6.2.5 标准体系后续构建应注重军标与民标的协调..... | 73 |
| 附录1 功率半导体分立器件 IEC 标准转化情况.....  | 75 |
| 附录2 功率半导体分立器件现行民用标准清单.....     | 82 |

中国电子技术标准化研究院

## 1 前言

功率半导体器件是目前世界上发展最为迅速和竞争最为激烈的产业之一，功率半导体器件属于电子行业产业链中的通用基础产品，作为电子系统中的最基本单元，在汽车电子、消费电子、网络通信、电子设备、航空航天、武器装备、仪器仪表、工业自动化、医疗电子等行业都起着至关重要的作用，在实施《中国制造 2025》规划中具有重大意义。

就像中央处理器 (CPU) 是一台计算机的心脏一样，功率半导体分立器件是现代功率半导体装置的心脏，虽然价值通常不会超过整台装置总价值的 10 ~ 30%，但它对装置的总价值、尺寸、重量和技术性能起着十分重要的作用。没有领先的器件，就没有领先的设备，功率半导体分立器件对功率半导体技术领域的发展起着决定性的作用。

本白皮书以新时代标准化工作总体思路为指导，主要阐述功率半导体分立器件的基本概况、行业发展现状与趋势，国内外标准化现状，梳理功率半导体分立器件标准体系中已发布、制定中、待制定标准，重点分析我国功率半导体分立器件标准化体系，对标准化需求和实施路径进行研究，提出潜在的标准化工作方向和标准化建设建议，为更好地引导功率半导体分立器件产业健康良好、可持续发展提供参考，支撑制造强国战略实施。

本白皮书编写专家来自功率半导体器件产业链上下游各个环节相关企事业单位，并面向全行业进行了广泛的征求意见。但由于编者

水平有限，疏漏和不足之处，欢迎读者批评指正，编制组将根据技术发展和行业意见进行持续修订完善。

中国电子技术标准化研究院

## 2 功率半导体分立器件概述

### 2.1 功率半导体分立器件的概念

功率半导体器件 (Power Electronic Device) 又称为电力电子器件和功率电子器件,是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件,其作用主要分为功率转换、功率放大、功率开关、线路保护和整流等。功率半导体大致可分为功率半导体分立器件 (Power Discrete) (包括功率模块) 和功率半导体集成电路 (Power IC) 两大类,在半导体产业中的结构关系如图 1 所示。其中,功率半导体分立器件是指被规定完成某种基本功能,并且本身在功能上不能再细分的半导体器件。

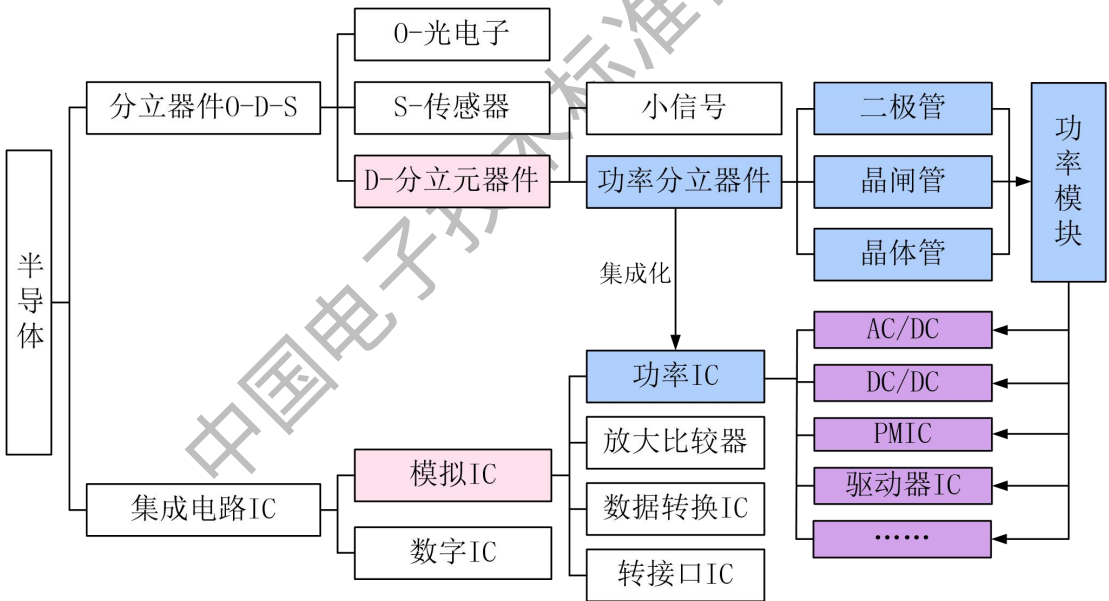


图 1 半导体产业结构关系

1957 年美国通用电气公司 (GE) 研制出世界上第一只工业用普通晶闸管 (Thyristor), 标志了功率半导体分立器件的诞生。功率半导体分立器件的发展经历了以晶闸管为核心的第一阶段、以 MOSFET 和 IGBT 为代表的第二阶段, 现在正在进入以宽禁带半导体器件为核心



的新发展阶段。

功率半导体分立器件作为介于电子整机行业以及上游原材料行业之间的中间产品，是电子与信息行业的基础及核心，功率半导体器件全产业链结构如图 2 所示。

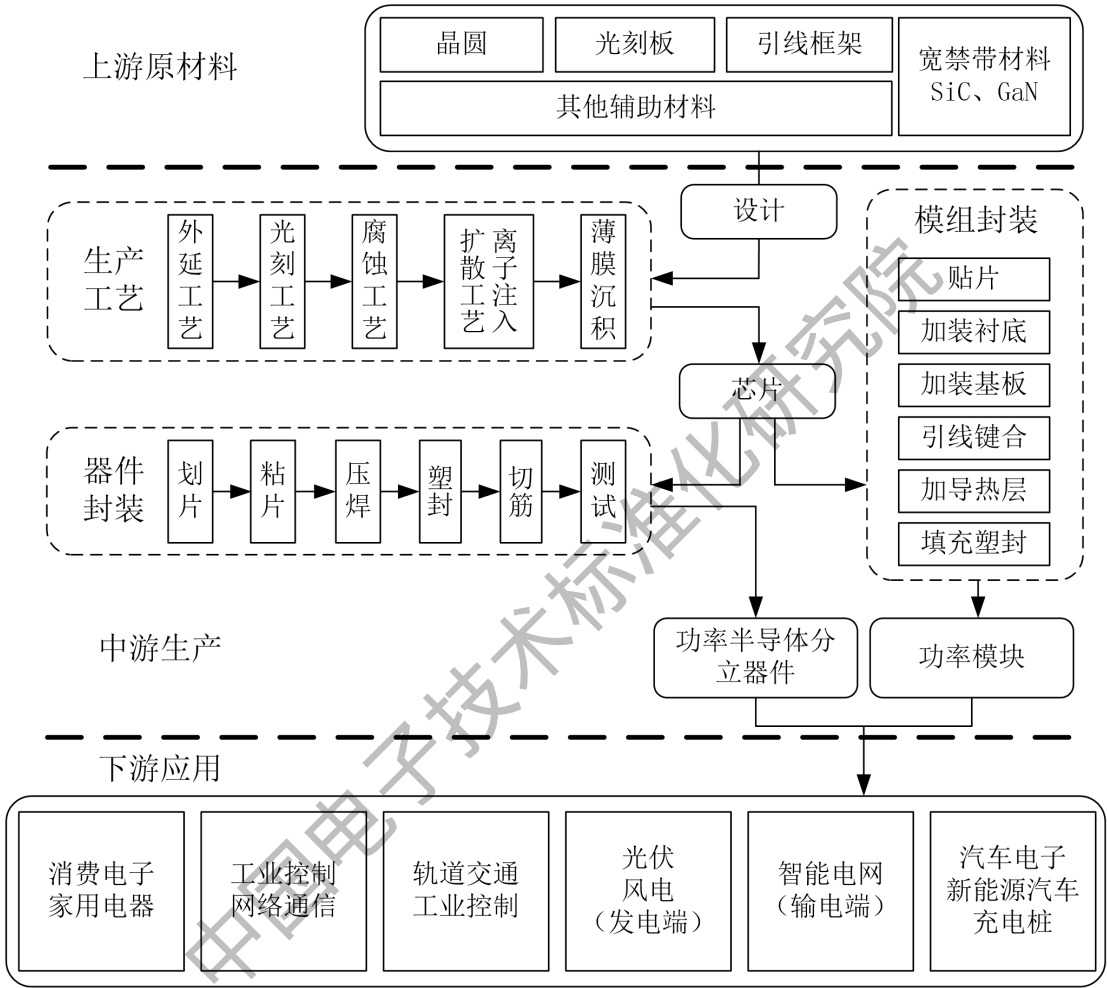


图 2 功率半导体器件全产业链结构

## 2.2 功率半导体分立器件的分类

### 2.2.1 器件结构

按照器件结构，现有的功率半导体分立器件可分二极管、功率晶体管、晶闸管等，其中功率晶体管分为双极性结型晶体管（BJT）、结型场效应晶体管（JFET）、金属氧化物场效应晶体管（MOSFET）和

绝缘栅双极晶体管（IGBT）等。

### 2.2.2 功率处理能力

按照功率处理能力，现有的功率半导体分立器件可分为低压小功率半导体分立器件、中功率半导体分立器件、大功率功率半导体分立器件和高压特大功率功率半导体分立器件。

### 2.2.3 驱动性质

按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质，现有的功率功率半导体分立器件（除功率二极管外）可分为电流驱动型与电压驱动型。

电流驱动型：通过从控制端注入或抽出电流实现其关断的功率功率半导体分立器件。

电压驱动型：通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号实现导通或关断的功率功率半导体器件。

### 2.2.4 控制程度

按照控制电路信号对器件的控制程度，现有的功率功率半导体分立器件可分为不可控型、半控型和全控型。

不可控器件：不能通过控制信号来控制其通断的功率功率半导体分立器件，代表器件为功率二极管；

半控器件：通过控制信号能够控制其导通而不能控制其关断的功率功率半导体分立器件，代表器件为晶闸管及其大部分派生器件；

全控器件：通过控制信号既能够控制其导通，又能够控制其关断的功率功率半导体分立器件，代表器件有绝缘栅双极晶体管、功率场效应晶体管、门极可关断晶闸管等；

### 2.2.5 导电情况

按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，现有的功率半导体分立器件可分为单极型器件、双极型器件和复合型器件。

单极型器件：有一种载流子（电子或空穴）参与导电的功率半导体分立器件；

双极型器件：由电子和空穴两种载流子参与导电的功率半导体分立器件；

复合型器件：由单极型器件和双极型器件集成混合而成的功率半导体分立器件；

### 2.2.6 衬底材料

按照功率半导体器件衬底材料的不同，现有的功率半导体分立器件的材料可分为三代：

第一代半导体材料主要是以锗（早期产品，现已不常见）和硅为代表。20 世纪 50 年代，锗在半导体中占主导地位，主要应用于低压、低频、中功率晶体管，但锗材料的耐高温和抗辐射能力较差，60 年代后逐渐被硅材料所取代。用硅材料制造的半导体器件，耐高温和抗辐射性能较好。由于硅材料储量丰富，提纯与结晶方便，二氧化硅薄膜的纯度高，绝缘性能好，器件的稳定性与可靠性大为提高。硅材料是目前应用最多的一种半导体材料。

第二代半导体材料主要是以砷化镓（GaAs）和磷化铟（InP）为代表的化合物半导体材料，适用于制造高频、高速、大功率半导体器件。

第三代半导体材料主要是以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）为

代表的宽禁带半导体材料。与第一代、第二代材料相比，第三代半导体材料具有更宽的禁带宽度以及更高的击穿电场、热导率和电子饱和速率及更好的抗辐照能力，适合制作高温、高频、抗辐射及大功率半导体器件。

### 2.3 功率半导体分立器件的应用

功率半导体分立器件的应用十分广泛，几乎覆盖了所有的电子制造业，传统应用领域包括消费电子、网络通信、工业电机等，近年来，新能源汽车及充电系统、轨道交通、智能电网、新能源发电、航空航天及武器装备等也逐渐成为了功率半导体分立器件的新兴应用领域。

一、消费电子：功率半导体分立器件主要应用于各种电子装置的电源及充电系统、功率半导体照明电源、家用电器变频器等方面。

二、工业电机：工业中需大量应用交直流电机，为其供电的可控整流电源或直流斩波电源、电机的变频驱动系统的核心器件均是功率半导体分立器件。

三、汽车电子及充电系统：除传统汽车在电源、照明等系统中需大量运用功率半导体器件外，新能源汽车新增了充电桩（器）、变流器、逆变器等应用需求，且新能源汽车电子化程度更高，其产品的特性要求以及汽车的可靠性要求，使得新能源汽车功率半导体分立器件的用量与价值有大幅的增加。

四、轨道交通：各种轨道交通运输工具均离不开功率半导体分立器件，直流机车中的整流装置，交流机车中的变频装置，高铁、动车、磁悬浮列车等轨道交通的直流斩波器，新能源汽车的电力变换系统、驱动控制系统与电池充电系统，以及各种车辆、飞机、船舶中的电源

系统，都以功率半导体分立器件作为核心器件。

五、智能电网：智能电网电力传输中的直流输电、柔性交流输电、无功补偿技术、谐波抑制技术以及防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等提高供电质量的技术均需要应用功率半导体期间得以实现。

六、新能源发电：功率半导体分立器件在新能源发电和分布式发电上主要应用于光伏逆变、风力发电、太阳能发电、地热能发电、生物能和燃料电池发电系统中的逆变器、变流器等装置中。

七、航空航天：第三代半导体器件具有超强的抗辐照能力，在航空航天方面有着绝对的应用优势。

八、武器装备：功率半导体分立器件主要应用于电磁打火装置，远程导弹、雷达、电磁弹射系统的电源系统中。

## 2.4 功率半导体分立器件关键工艺

功率半导体分立器件的主要工艺流程包括：在硅圆片上加工芯片（主要流程为薄膜制造、曝光和刻蚀），进行芯片封装，对加工完毕的芯片进行技术性能指标测试，其中主要生产工艺有外延工艺、光刻工艺、刻蚀工艺、离子注入工艺和扩散工艺等。

### 2.4.1 外延工艺技术

对于 Si 功率半导体器件，外延工艺是根据不同硅源（ $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 、 $\text{SiHCl}_3$ 、 $\text{SiCl}_4$ ），在 1100-1180℃ 温度下在硅片表面再长一层或多层本征（不掺杂）、N 型（掺  $\text{PH}_3$ ）或 P 型（掺  $\text{B}_2\text{H}_6$ ）的单晶硅，并且，要将硅层的厚度和电阻率、厚度和电阻率的均匀性、表面的缺陷控制在允许范围内。通过外延工艺可生长出纯度更高、质量更好、与衬底有相同晶向的单晶硅。

对于 SiC 功率半导体器件，生长出低缺陷密度的单晶十分困难，因 SiC 衬底晶体生长需在 2300℃ 的温度下进行，需在 H<sub>2</sub> 保护气氛下，用 SiH<sub>4</sub> 和 CH<sub>4</sub> 或 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 作为反应气体，其生长速率一般每小时只有几微米，且仍存在 SiC 衬底中的晶体缺陷扩展到外延层的问题，因而 SiC 晶片成本特别是高质量大面积的 SiC 晶片成本远高于 Si 晶片。

#### 2.4.2 光刻工艺技术

光刻工艺是半导体工艺技术中最关键的技术之一，也是反映半导体工艺技术水平的重要指标。光刻工艺是将掩膜（光刻板）图形转移到衬底表面的光刻胶上形成产品所需要图形的工艺技术，光刻机的精度一般是指光刻时所得到的光刻图形的最小尺寸。分辨率越高，就能得到越细的线条，集成度也越高。

#### 2.4.3 刻蚀工艺技术

刻蚀是用物理或化学的方法有选择地从硅片表面去除不需要的材料的过程，刻蚀的基本作用是准确地复制掩膜图形，以保证生产线中各种工艺正常进行。湿法刻蚀是通过合适的化学溶液与所欲蚀刻的材质进行化学反应，然后转成可溶于此溶液的化合物，而达到去除的目的；干法刻蚀是利用等离子原理有选择地从硅片表面去除不需要的材料的过程。而等离子增强反应离子刻蚀、电子回旋共振刻蚀（ECR）、感应耦合等离子体刻蚀（ICP）等其他先进蚀刻技术能够满足细线条产品的需求，特别是高端功率半导体器件的 Trench 蚀刻工艺，既能满足 Trench 线宽要求，又能使其沟槽垂直度达到 95% 以上。

#### 2.4.4 离子注入工艺技术

离子注入是通过高技术设备将器件需要的掺杂元素注入到硅片

中。其基本工艺原理是:利用离子源产生的等离子体,在低压下把气态分子借电子的碰撞而离化成离子,经过引出离子电极(吸极)、质量分析器、加速管、扫描系统、工艺腔体等工艺设备将掺杂元素注入到硅片中。离子注入工艺的技术水平主要体现在束流和能量两个方面,高性能的离子注入束流可以小到100微安以下,大到几十毫安以上;能量小到40KeV以下,大到400KeV以上。

#### 2.4.5 扩散工艺技术

半导体掺杂工艺的主要目的在于控制半导体中特定区域内杂质的类型、浓度、深度和PN结。扩散技术是实现这一目的的简单而方便的途径,先进的扩散工艺技术水平可以将炉内薄膜均匀性控制在小于3%的水平。扩散、氧化、光刻工艺的结合,产生半导体的平面工艺。扩散工艺虽然在Si器件中应用广泛,但在SiC功率半导体器件中能用作掺杂物的所有元素即使在很高的温度下扩散系数仍很低,因此扩散工艺不适用于SiC功率半导体器件,通常采用离子注入技术。

### 2.5 功率半导体分立器件

#### 2.5.1 功率二极管

##### 2.5.1.1 PIN 二极管

大多数功率二极管主要是依靠PN结的单向导电原理工作的,具有极低的通态电阻,称为PIN二极管。从应用的角度,PIN二极管可以分成整流二极管与快恢复二极管。

##### 一、整流二极管

整流二极管利用PN结的单向导电性,把交流电变成脉冲直流电,主要应用于各种低频整流电路中。

## 二、快恢复二极管

快恢复二极管是一种开关频率快，反向恢复时间短的半导体二极管，主要应用于开关电源、PWM 脉宽调制器、变频器中。

### 2.5.1.2 肖特基二极管

肖特基二极管是单极器件，利用金属与半导体接触形成的金属-半导体结作为肖特基势垒，以产生整流的效果，在中、高等功率领域中应用广泛，其主要用途如下：

一、续流二极管：作为 MOSFET 或 IGBT 的续流二极管使用，其优点是结电压低，并且无储存电荷。在关断时，从导通到阻断状态，只需要考虑结电容的容性再充电。

二、宽禁带二极管：宽禁带半导体材料由于临界电场较高，会带来较高的阻断电压，在双极型器件中将导致结电压增大，由于肖特基二极管是单极型器件，将不存在结电压增大的问题。

### 2.5.2 晶闸管

晶闸管通常称为可控硅，是一种半控整流器件，体积小、无加热灯丝、寿命长、可靠性高、价格便宜，多应用在电机驱动控制、高压直流输电（HVDC）、动态无功功率补偿、超大电流电解等场合。可控硅除了单向普通可控硅外，还派生出了许多其他类可控硅元件，如快速可控硅、光控可控硅、逆导可控硅、双向可控硅、非对称可控硅、门极可关断可控硅等多个品种。

### 2.5.3 晶体管

晶体管是能够提供电功率放大并具有三个或更多电极的一种半导体器件。



晶体管按照主要用途可以分为两大类：开关管和放大管。开关管工作在截止区和饱和区，多用于数字电路，实现逻辑功能；放大管一般工作在线性区附近，应用于模拟电路，实现信号或功率放大。根据主要工艺，可以把晶体管分为双极晶体管和场效应晶体管。双极晶体管属于流控器件，响应速度快，驱动能力强；场效应管属于压控器件，输入阻抗高，功率消耗相对较低。

#### 2.5.3.1 双极晶体管

双极晶体管是至少具有两个结，其功能依赖于多数载流子和少数载流子的一种晶体管。双极晶体管是半导体基本元器件之一，具有电流放大作用，是电子电路的核心元件。双极晶体管是在一块半导体基片上制作两个相距很近的PN结，两个PN结把整块半导体分成三部分，中间部分是基区，两侧分别是发射区和集电区，排列方式有PNP和NPN两种，从三个区引出相应的电极，分别称为基极b、发射极e和集电极c。发射区和基区之间的PN结叫发射结，集电区和基区之间的PN结叫集电结。基区很薄，而发射区较厚，杂质浓度大，PNP型双极晶体管发射区"发射"的是空穴，其移动方向与电流方向一致，故发射极箭头向里；NPN型双极晶体管发射区"发射"的是自由电子，其移动方向与电流方向相反，故发射极箭头向外。发射极箭头指向也是发射结在正向电压下的导通方向。硅双极晶体管和锗双极晶体管都有PNP型和NPN型两种类型。

#### 2.5.3.2 场效应晶体管（FET）

场效应晶体管是其流过导电沟道的电流受施加在栅源引出端间的电压产生的电场所控制的一种晶体管。场效应晶体管主要可以分为

结栅场效应晶体管 (JFET), 金属-半导体场效应晶体管 (MESFET) 和金属-绝缘体-半导体场效应晶体管 (MISFET)。结栅场效应晶体管是具有一个或多个与沟道形成 PN 结的栅区的一种场效应晶体管。金属-半导体场效应晶体管是有与沟道形成肖特基势垒的一个或多个栅极的一种场效应晶体管。JFET 和 MESFET 具有完全相同的工作原理, 所不同的只是在 MESFET 中, 用金属-半导体势垒结代替了 JFET 中的 pn 结。金属-绝缘体-半导体场效应晶体管是具有一个或多个与沟道电绝缘的栅极的一种场效应晶体管。在 MISFET 中以氧化物作为绝缘层的 MOSFET 最为普遍和典型。

#### 2.5.3.3 结型栅场效应晶体管 (JFET)

结型栅场效应晶体管 (JFET) 根据导电沟道的不同可以分为两大类: N 沟道 JFET 和 P 沟道 JFET。导电沟道的载流子是电子的称为 N 沟道 JFET; 导电沟道的载流子是空穴的称为 P 沟道 JFET。在栅极和源极间施加反向电压, 通过改变 PN 结耗尽层的厚度来改变导电沟道的宽度, 实现控制源极到漏极间电流的变化。

#### 2.5.3.4 金属氧化物场效应管 (MOSFET)

金属-氧化物-半导体型场效应管, 英文缩写为 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor), 属于绝缘栅型场效应管, 其主要特点是在金属栅极与沟道之间有一层二氧化硅绝缘层, 因此具有很高的输入电阻 (最高可达  $10^{15} \Omega$ )。它也分 N 沟道管和 P 沟道管。通常是将衬底 (基板) 与源极 S 接在一起。根据导电方式的不同, MOSFET 又分增强型和耗尽型。所谓增强型是指: 当栅-源电压  $V_{GS}=0$  时管子是呈截止状态, 加上正确的  $V_{GS}$  后, 多数载

流子被吸引到栅极，从而“增强”了该区域的载流子，形成导电沟道。耗尽型则是指，当  $V_{gs}=0$  时已经存在导电沟道，加上正确的  $V_{gs}$  时，能使多数载流子流出沟道，因而“耗尽”了载流子，使管子转向截止。

#### 2.5.3.5 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是由 MOSFET 和双极型晶体管复合而成的功率半导体分立器件，它的控制极为绝缘栅场效应晶体管，输出极为双极型功率晶体管，因而兼有两者速度和驱动能力的优点，克服了两者的缺点。目前耐压达 5kV 甚至更高，电流达 1.2kA。

#### 2.5.4 功率半导体分立器件模块

半导体分立器件功率模块是由两个或两个以上半导体分立器件芯片按一定电路连接并安装在陶瓷基覆铜板 (DCB) 上，用弹性硅凝胶等保护材料密封在一个绝缘外壳内或采用塑料封装，实现半导体分立器件功能的模块。功率模块主要应用于高压大电流场合，如智能电网、高铁/动车组等。

#### 2.5.5 宽禁带功率半导体器件

宽禁带功率半导体器件具有宽带隙、高饱和漂移速度、高临界击穿电场等突出优点，是大功率、高温、高频、抗辐照应用场合下极为理想的功率半导体器件。目前，功率半导体器件领域生产技术最成熟的宽禁带半导体材料是 SiC 和 GaN。

##### 2.5.5.1 SiC 功率半导体器件

###### 一、SiC 功率二极管

SiC 功率二极管可显著降低由反向恢复作用导致的自身损耗以及反并联可控功率半导体器件的开通损耗，在开关频率较高的应用中具

有明显优势。目前主要有 3 种 SiC 功率二极管产品：SiC 肖特基二极管、SiC PiN 二极管和 SiC 结势垒控制肖特基二极管，成熟度最高的是 SiC 肖特基二极管，因其是多数载流子为主要运动方式的半导体器件，具有正向电压低，反向恢复时间短等明显优势，可应用于高速开关和大功率系统等。

## 二、SiC JFET

SiC JFET 利用 PN 结耗尽区控制沟道电流，可全面开发 SiC 的高温性能，适合高温大功率开关装置，是研发起步较早且产业化发展较成熟的 SiC 功率半导体器件。与 MOSFET、IGBT 等器件相比，单极性 JFET 具备良好的高频特性、高温稳定性及栅极可靠性，然而，栅极 PN 结工作方式使其无法兼容通用的门极驱动器，不能直接替代 Si MOSFET 及 IGBT。

## 三、SiC MOSFET

SiC MOSFET 可直接采用 Si MOSFET 的设计、制造经验及生产设备，且驱动电路与 Si MOSFET、IGBT 均兼容，因此是产业化速度最快的宽禁带功率半导体器件。SiC MOSFET 高温与常温下导通损耗与关断损耗均很小，驱动电路简单，有利于电路节能和散热设备的小型化，市场上量产的产品主要分平面 MOS 和沟槽 MOS 两类。与硅 IGBT 相比，既具有高频特性，又无拖尾电流，未来有可能替代 Si IGBT 成为主流功率电子开关器件。

## 四、SiC IGBT

在 10kV 以上的高压及超高压领域中，SiC MOSFET 器件会面临通态电阻过高等问题，SiC IGBT 优势立显。但受 P 型衬底电阻率高、

沟道迁移率低及栅氧化层可靠性问题限制，SiC IGBT 的研发工作起步较晚，目前虽正逐步解决上述问题，但产品尚未实用化。

## 五、SiC 功率模块

SiC 功率模块可分为混合 SiC 功率模块和全 SiC 功率模块，其中，混合 SiC 功率模块用 SiC SBD 替换 Si FRD，可显著提高工作频率，与同等额定电流的 Si IGBT 模块产品相比，开关损耗大幅度降低。全 SiC 模块采用了 SiC SBD 与 SiC MOSFET 一体化封装，解决了 Si IGBT 及 FRD 导致的功率转换损耗较大问题，在高频范围中推动了外围部件小型化的发展。

### 2.5.5.2 GaN 功率半导体器件

#### 一、GaN HEMT

基于 GaN 半导体材料制作的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 具有极快的开关速度和优异的反省恢复性能，适用于低损耗、高效率的应用场合，相比其他开关功率半导体器件，GaN HEMT 有更高的效率和开关速度，更小的体积和更简化的设计，并且 GaN HEMT 可工作在 Ka 波段以及 300℃ 的高温环境，能够覆盖 1-100GHz 的工作频率，在军用雷达、智能武器和通信系统等方面有着重要的应用价值。

#### 二、GaN 二极管

GaN 功率二极管方面的研究主要针对中低压领域，包括两种类型：GaN 肖特基二极管和 PN 二极管。GaN 肖特基二极管主要有横向、垂直和台面 3 种结构，每种结构对于二极管性能都各有利弊；GaN PN 二极管具有很高的电流密度、较高的雪崩击穿能量承受能力和非常小的漏电流。

### 3 功率半导体分立器件发展现状及发展趋势

#### 3.1 功率半导体分立器件发展现状

##### 3.1.1 全球产业发展现状

1999-2018 年的 20 年间，全球分立器件销售额呈现波动的趋势，综合 Yole、IHS、Gartner 等多家分析机构数据后可知，在这 20 年中，2002 年是全球分立器件行业的低点，包含功率模块及功率分立器件在内的功率半导体器件销售额为 125.28 亿美元，2018 年分立器件销售额达到 20 年来的高点，销售额为 230.91 亿美元，年复合增长率为 3.10%，其中，中国大陆功率半导体器件市场规模约为全球的 39%。

图 3 给出了近五年全球功率半导体分立器件销售额。

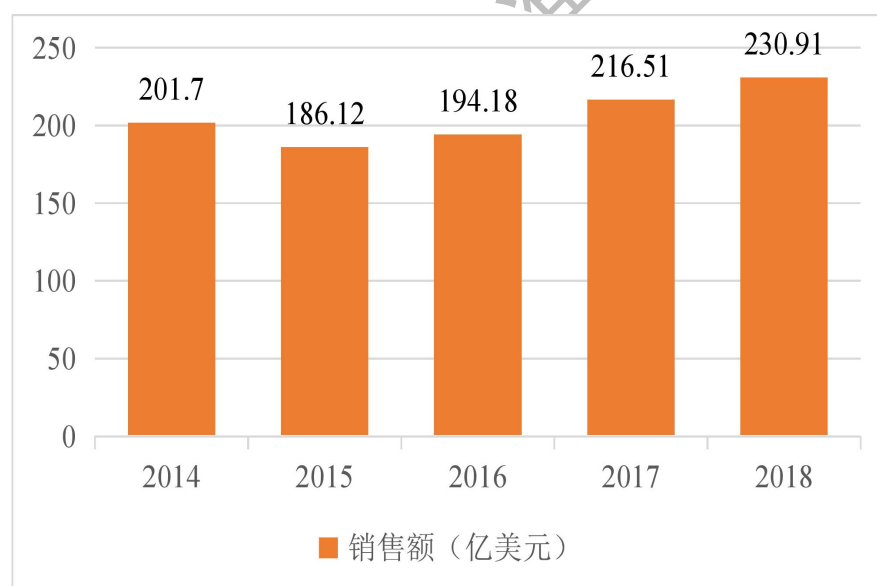


图 3 2014-2018 全球功率半导体器件销售额

从产业格局来看，全球功率半导体分立器件中高端产品生产厂商主要集中在欧美、日本和我国台湾地区。美国、日本和欧洲功率半导体器件厂商大部分属于 IDM 厂商（集成的器件制造商，即一家企业包含设计、工艺制造、封装、测试等所有环节），而我国台湾的厂商则

绝大多数属于 Fabless 厂商（即无生产线的设计公司，该企业只负责设计，工艺制造、封装、测试等环节均采用委托外协加工的方式，但最终产品产权及销售仍归属该企业），不同地区通过产业分工，形成了各自的竞争优势。美国是功率半导体分立器件的发源地，在全球功率半导体分立器件市场中占有重要的位置，主要器件企业有德州仪器（TI）、高通（QUALCOMM）和安森美（ONSEMI）等；欧洲也是全球功率半导体分立器件产业的发达地区，主要企业有英飞凌（Infineon）、意法半导体（ST）和恩智浦（NXP）等；从上世纪 90 年代开始，日本成为国际上功率半导体分立器件产业的发达地区，主要企业有东芝、富士和三菱等。全球功率半导体分立器厂商销售份额占比如图 4 所示。

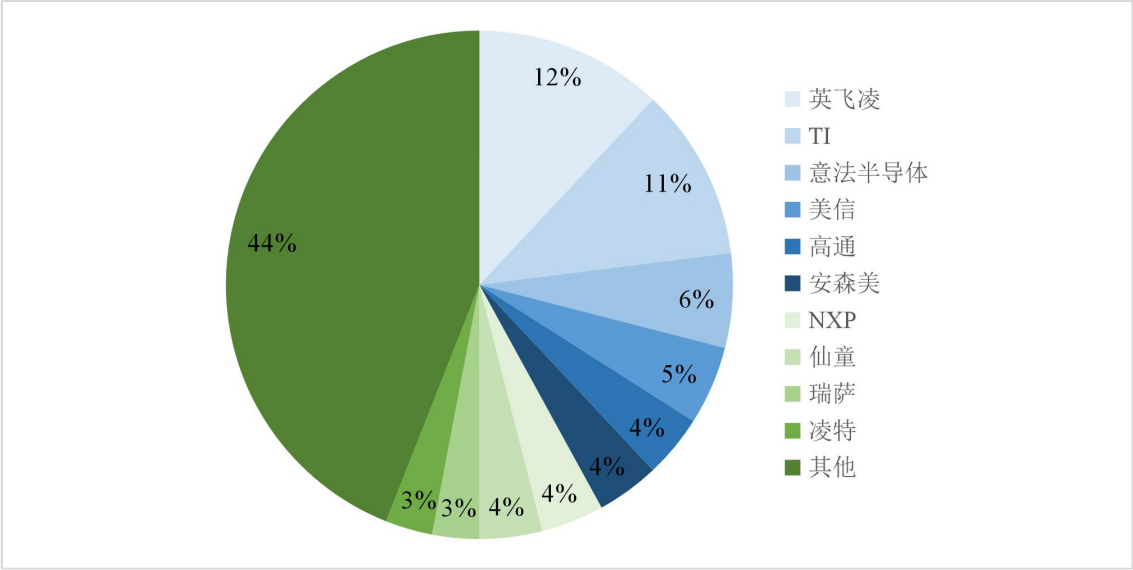


图 4 全球功率半导体分立器厂商销售份额占比

从器件种类来看，以硅基功率 MOSFET 和 IGBT 为代表的场控型器件是国际功率半导体分立器件市场的主力军，其中 IGBT 器件的年平均增长率超过 30%，远高于其它种类器件。在 SiC 和 GaN 功率半导体分立器件领域，由于国际上出现商业化产品的时间较短，并受技术成

熟度和成本的制约，该领域尚处于市场开拓的初期阶段，预计将在2020年进入市场爆发式增长阶段。

### 3.1.2 国内产业发展现状

#### 3.1.2.1 国内市场分析

我国功率半导体分立器件产业虽起步较晚，但市场规模增长迅速，从2011年的1386亿元增长到2018年的2264亿元，年均复合增速为6.33%。在市场竞争格局方面，我国由于长期受企业规模及技术水平的制约，在高端半导体分立器件领域尚未形成整体的规模效应与集群效应，目前国内功率半导体分立器件产业集中在加工制造和封测部分，产品结构以中低端为主，高端产品需进口，国际厂商仍占据我国高附加值分立器件市场的绝对优势地位，供需一直存在较大缺口。

从产品结构来看，由于电子系统的结构相对稳定，因此市场产品结构仍将保持稳定，但随着分布式能源、高铁、电动汽车的快速发展，IGBT等大功率高端产品增速较快，2018-2020我国各类功率半导体分立器件市场规模结构及预测如图5所示。

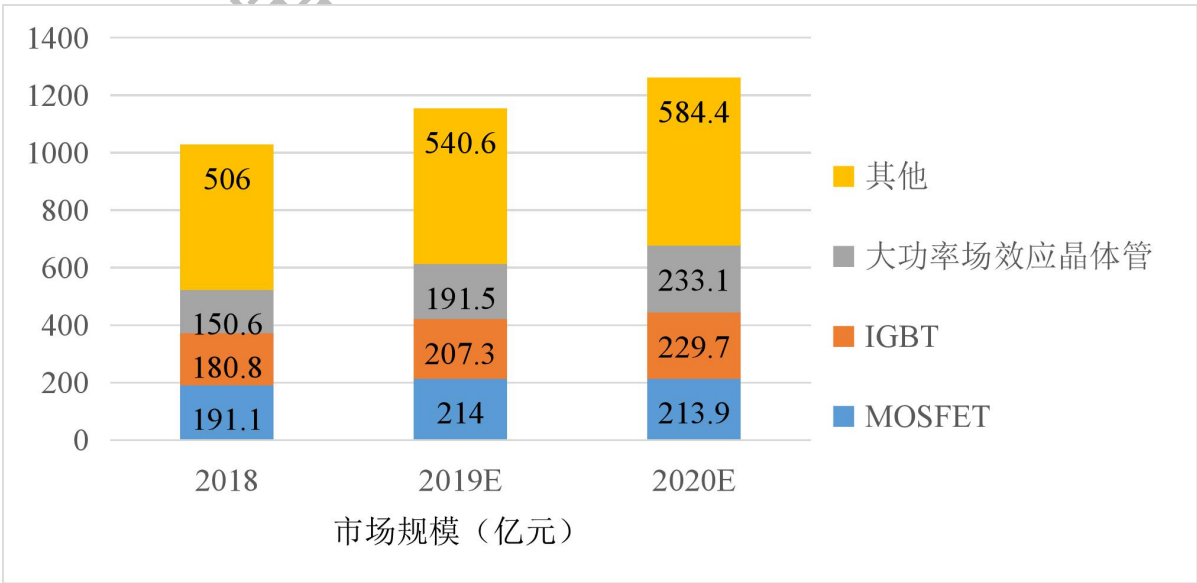


图5 2018-2020中国功率半导体分立器件市场规模结构及预测



### 3.1.2.2 政策支持

由于功率半导体器件具有巨大的国内和国际市场,且在产业结构升级、节能减排等领域发挥着不可替代的重要作用,为了鼓励国内功率半导体器件产业的发展,打破国外企业在此领域的垄断,增强科技创新能力,推进节能降耗,建设资源节约型和环境友好型社会,近年来,国家相关部门制订了一系列政策以鼓励、支持、促进国内功率半导体器件行业的发展,具体内容如表 1 所示。

表 1 我国功率器件相关政策

| 序号 | 时间          | 发布机构   | 政策名称                             | 内容概要  |
|----|-------------|--------|----------------------------------|---|
| 1  | 2006 年 8 月  | 原信息产业部 | 《信息产业科技发展“十一五”规划和 2020 年中长期规划纲要》 | 重点围绕计算机、网络和通信、数字化家电、汽车电子、环保节能设备及改造传统产业等的需求,发展相关的片式电子元器件、机电元件、印制电路板、敏感元件和传感器、频率器件、新型绿色电池、光电线缆、新型微特电机、电声器件、半导体功率器件、电力电子器件和真空电子器件。 |
| 2  | 2007 年 3 月  | 原信息产业部 | 《信息产业科技发展“十一五”规划和 2020 年中长期规划纲要》 | 推动元器件产业结构升级。继续巩固我国在传统元器件领域的优势,加强引进消化吸收再创新和产业垂直整合,加快新型元器件的研发和产业化。重点发展片式化、微型化、集成化、高性能的新型元器件,鼓励环保型电子元器件的发展。                        |
| 3  | 2008 年 10 月 | 原信息产业部 | 《信息产业“十一五”规划》                    | 推动元器件产业结构升级。继续巩固我国在传统元器件领域的优势,加强引进消化吸收再创新和产业垂直整合,加快新型元器件的研发和产业化。重点发展片式化、微型化、集成化、高性能的新型元器件,鼓励环保型电子元器件的发展。                        |

| 序号 | 时间         | 发布机构          | 政策名称                            | 内容概要   |
|----|------------|---------------|---------------------------------|--|
| 4  | 2009 年 4 月 | 国务院办公厅        | 《电子信息产业调整和振兴规划》                 | 加快完善体制机制，改善投融资环境，培育骨干企业，扶持中小创新型企业，促进产业持续健康发展；加大财税、金融政策支持力度，增强集成电路产业的自主发展能力；实现电子元器件产业平稳发展；加快电子元器件产品升级；完善集成电路产业体系；在集成电路领域，鼓励优势企业兼并重组；继续保持并适当加大部分电子信息产品出口退税力度，发挥出口信用保险支持电子信息产品出口的积极作用，强化出口信贷对中小电子信息企业的支持。 |
| 5  | 2009 年 5 月 | 国务院办公厅        | 《装备制造业调整和振兴规划》                  | 结合实施电子信息产业调整和振兴规划，以集成电路关键设备、平板显示器件生产设备、新型元器件生产设备、表面贴装及无铅工艺整机装联设备、电子专用设备仪器及工模具等为重点，推进电子信息装备自主化。   |
| 6  | 2010 年 3 月 | 国家发展和改革委员会办公厅 | 《关于组织实施 2010 年新型电力电子器件产业化专项的通知》 | 确立了工半导体分立器件产业化专项重点，支持 MOSFET、IGCT、IGBT、FRD 等量大面广的新型电力电子芯片和器件的产业化，重点解决芯片设计、制造和封装技术，包括结构设计、可靠性设计，以及光刻、刻蚀、表面钝化、背面研磨、背面金属化、测试等工艺技术，提高产品档次。   |
| 7  | 2011 年 3 月 | 国家发展和改革委员会    | 《关于组织实施 2010 年新型电力电子器件产业化专项的通知》 | 确立了工半导体分立器件产业化专项重点，支持 MOSFET、IGCT、IGBT、FRD 等量大面广的新型电力电子芯片和器件的产业化，重点解决芯片设计、制造和封装技术，包括结构设计、可靠性设计，以及光刻、刻蚀、表面钝化、背面研磨、背面金属化、测试等工艺技术，提高产品档次。   |
| 8  | 2011 年 3 月 | 国家发展和改革委员会    | 《产业结构调整指导目录 (2011 年本)》          | 将“新型电子元器件(片式元器件、频率元器件、混合集成电路、电力电子器件、光电子器件、敏感元器件及传感器、新型机电元件、高密度印刷电路板和柔性电路板等)制造”列入鼓励类。   |

| 序号 | 时间          | 发布机构               | 政策名称                           | 内容概要   |
|----|-------------|--------------------|--------------------------------|--|
| 9  | 2011 年 6 月  | 国家发展和改革委员会、科技部等五部委 | 《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南(2011 年度)》 | 将集成电路电路、信息功能材料与器件、新型元器件等列入重点领域,其中包括中大功率高压绝缘栅双极晶体管(IGBT)、快恢复二极管(FRD)芯片和模块,中小功率智能模块;高电压的金属氧化物半导体场效应管(MOSFET);大功率集成门极换流场效应管(IGCT);6 吋大功率场效应管。                 |
| 10 | 2012 年 2 月  | 工业和信息化部            | 《电子基础材料和关键元器件“十二五”专项规划》        | 紧紧围绕节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料和新能源汽车等战略性新兴产业发展需求,发展相关配套元器件及电子材料。   |
| 12 | 2016 年 3 月  | 十二届全国人大四次会议        | 《过敏经济和社会发展第十三个五年规划纲要》          | 针对功率表器件行业:<br>——加强与整机产业的联动,以市场促进器件开发、以设计带动制造、推动“虚拟 IDM”运行模式的发展;<br>——建设国家级半导体功率器件研发中心,实现从“材料-器件-晶圆-封装-应用”全产业链的研究开发;<br>——大力发展过长 IGBT 产业,促进 SiC 和 GaN 器件应用; |
| 13 | 2016 年 4 月  | 工业和信息化部            | 《工业节能管理办法》                     | 以加强工业节能管理,健全工业节能管理体系,持续提高能源利用率。  |
| 14 | 2016 年 7 月  | 中共中央办公厅、国务院办公厅     | 《国家信息化发展战略纲要》                  | 制定国家信息领域核心技术设备发展战略纲要,以体系化思维弥补单点弱势,打造国际先进、安全可控的核心技术体系,带动集成电路、基础软件、核心元器件等薄弱环节实现根本性突破。  |
| 15 | 2016 年 12 月 | 国务院                | 《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》           | 提出做强信息技术核心产业,提升核心基础硬件供给能力,推动电子器件变革性升级换代,加强低功耗高性能新原理硅基器件、硅基光电子、混合光电子、微波光电子等领域前沿技术和器件研发,包括 IGBT 在内的功率半导体分立器件产业将迎来新一轮高速发展期。                                   |
| 16 | 2017 年 2 月  | 国家发展和改革委员会         | 《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》           | 重点支持电子核心产业,包括绝缘栅双极晶体管芯片(IGBT)及模块。  |

| 序号 | 时间         | 发布机构      | 政策名称                | 内容概要  |
|----|------------|-----------|---------------------|---|
| 17 | 2017 年 5 月 | 科技部、交通运输部 | 《“十三五”交通领域科技创新专项规划》 | 提出开展整车、动力系统、底盘电子控制系统以及 IGBT、SiC、GaN 等电力电子器件技术研发等。   |
| 18 | 2018 年 2 月 | 国家能源局     | 《2018 年能源工作指导意见》    | 提出进一步完善电网结构，继续优化主网架布局 and 结构，深入开展全国同步电网格局论证，研究实施华中区域省间加强方案，加强区域内省间电网互济能力，推进配电网建设改造和智能电网建设，提高电网运行效率和安全可靠性。 |

“十一五”到“十二五”期间，我国功率半导体分立器件市场在全球市场中所占的份额越来越大，已成为全球最大的大功率功率半导体分立器件需求市场，我国功率半导体分立器件市场年增长率近 20%。

“十三五”期间随着战略性新兴产业的崛起，功率半导体分立器件及装置在风能、太阳能、热泵、水电、生物质能、绿色建筑、新能源设备等先进制造业中发挥着越来越重要的作用。在新能源的革命、投资增量需求、节能环保要求以及下游功率半导体装置行业的高速发展等因素的拉动下，我国功率半导体分立器件产业进入了黄金发展期，并保持较高的增长态势。

### 3.1.2.3 产品研发现状

我国目前已经初步建立起了包含二极管、晶闸管、IGCT、功率 MOSFET、IGBT 等全系列硅基功率电子器件产业，在我国国民经济发展中发挥了重要的作用。

在超大功率(电压 3.3kV 以上、容量 1~45MW)领域，我国以晶闸管为代表的传统半控型器件的技术已经成熟，水平居世界前列，5~6 英寸的晶闸管产品已广泛用于高压直流输电系统，并打入国际市场，

形成了国际竞争力。目前我国已经研制成功 7 英寸晶闸管产品，并实现了 IGCT 产品的商业化。

在中大功率(电压 1200 ~ 6500V)和中小功率(900V 以下)领域，在国家产业政策支持 and 国民经济发展的推动下，我国高频场控功率电子器件技术和产业取得了长足的进步，建立了从电子材料、芯片设计、研制、封装、测试和应用的全产业链。中小功率的 MOSFET 芯片已产业化，批量生产的单管已在消费类电子领域得到广泛应用，600 ~ 900V 的 MOSFET 芯片正在开发中；600V、1200V、1700V/10 ~ 200A 的 IGBT 芯片和 600V、1200V、1700V/10 ~ 300A 的 FRD 芯片已进入产业化阶段，3300V、4500V、6500V/32 ~ 63A 的 IGBT 和 3300V、4500V、6500V/50 ~ 125A FRD 芯片已研发成功，并进入量产阶段；IGBT 模块的封装技术也上了一个大台阶，采用国产芯片的 600V、1200V、1700V、3300V/200 ~ 3600A 的 IGBT 模块已经实现量产，采用国产芯片的 4500V、6500V/600 ~ 1200A 的 IGBT 模块进入小批量的量产阶段。国产品牌 IGBT 芯片和模块已经形成与国际品牌竞争的态势。

在第三代半导体领域，在 SiC 功率器件方面，国内已研发出 17kV PIN 二极管芯片、3.3kV/50A SiC 肖特基二极管芯片、1.2kV ~ 3.3kV SiC MOSFET 芯片、4.5kV/50A SiC JFET 模块等样品；已具备 600V ~ 3.3kV/2A ~ 50A SiC 二极管芯片量产能力，SiC MOSFET 芯片产业化能力正在形成。在 GaN 功率器件方面，国内的研发工作主要集中在高校和科研院所，近几年也出现风险投资公司相继涉足 Si 衬底 GaN 半导体材料与器件的开发工作，同时 Si 衬底 GaN 功率器件也得到了一些传统 Si 基功率器件企业的重视，但尚无正式产品推出。在 GaN 功率器

件方面，我国已经具备了 600V~1200V 平面型 GaN HEMT 芯片的研发能力，以及 600V 平面型 GaN HEMT 功率器件的产业化能力。

### 3.2 我国功率半导体分立器件发展趋势

半导体器件是高科技、资本密集型行业，是半导体市场的重要组成部分，受国际市场需求冲高及扩大内需政策成效显现的共同作用，电子整机制造产业出现明显回升，计算机、消费电子、通信等整机产量的增长及产品结构的持续升级，大大拉动了上游半导体器件产品的需求。此外，伴随着我国产业结构的调整，新能源、节能环保、智能电网等新兴产业快速发展，我国半导体器件的应用领域得到进一步拓展。

#### 3.2.1 下游需求旺盛为功率半导体分立器件带来新机遇

近年来，半导体产业呈现出全产业链景气的态势，从上游设备材料、中游芯片制造、到终端芯片器件成品，订单量均出现远超往年的增长速度，形成这种现象的原因便是下游旺盛的需求。

目前，功率半导体的应用范围已从传统的工业控制和 4C 产业（计算机、通信、消费类电子产品和汽车），扩展到新能源、轨道交通、智能电网等新领域。随着“供给侧改革”、“一带一路”、“智能制造”等国家政策的强化、深入和调整，功率半导体器件作为实现电气化系统自主可控的核心零部件，未来将在新能源汽车、高铁、军工、智能电网等大国重器领域有着大量且迫切的需求，发展空间巨大，发展前景广阔。我国目前已成为全球最大的半导体分立器件应用市场，并保持着持续、快速、稳定的发展。

当前下游旺盛的需求为我国功率半导体分立器件行业发展带来了六

大发展契机：

一是电力能源市场，国家大力倡导节能减排，智能电网、光伏发电等行业快速发展以，相关技术不断革新，作为智能电网建设的重要设备，功率半导体器件在未来几年将表现出巨大的发展潜力，其市场空间也将随着各国智能电网、光伏发电的需求增加而变得更加广阔。

二是新能源汽车市场，根据《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，伴随着汽车电子朝向智能化、信息化、网络化方向发展，新能源汽车和充电桩的产量将大幅激增，半导体功率器件作为内嵌于汽车电子产品中的能量转换的核心器件，存在着巨大的刚性需求空间，其用量也将翻倍增长。

三是轨道交通市场，每台高铁电力机车需要 500 个 IGBT 模块，动车组需要超过 100 个 IGBT 模块，一节地铁需要 50~80 个 IGBT 模块，轨道交通的高速发展对 IGBT 等功率器件有着极大的需求。

四是家电市场，目前国内家电升级需求旺盛，随着“一带一路”战略的实施，家电海外市场也不断拓展。功率半导体分立器件可以对驱动家用电器的电能进行控制和转换，将直接影响家用电器的性能和品质。在我国家用电器整体升级、市场扩展的大背景下，半导体分立器件将随着家电行业的发展而具有稳定的市场发展前景。

五是便携式电子终端设备市场，消费电子市场拥有庞大的客户群体且市场更新换代快，手机、平板、笔记本等便携式移动电子产品的电源充电器和电源适配器等市场需求快速增长。功率半导体分立器件在充电系统及电源适配器中主要起到整流、稳压等作用，从而依托于电脑市场的发展从而刺激半导体分立器件需求上扬。

六是新兴智能产业市场，智能产业离不开半导体分立器件等基础元器件，随着智能化步伐的不断加快，也将推动分立器件市场发展。

2010-2019 年我国半导体分立器件市场需求情况如图 6 所示，在如此旺盛的下游需求带动下，以 IGBT 为代表的功率半导体分立器件行业将迎来新的成长机遇，进入黄金发展期。

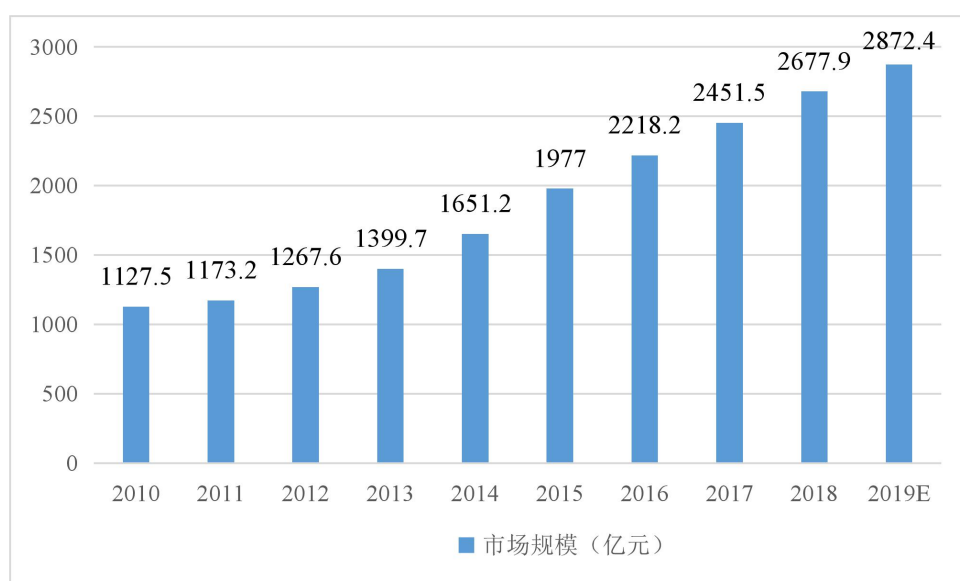


图 6 2010-2019 年我国半导体分立器件市场需求情况

### 3.2.2 高端产品进口替代空间广阔

目前，国际发展环境恶化，部分奉行单边主义的发达国家，对我国进行技术封锁和限制，而我国高端功率半导体器件有接近九成需要进口，进口替代空间广阔，确保国内功率半导体器件的自主可控，已成为刻不容缓的战略任务。

图 7 和 8 所示分别为英飞凌和 NXP 功率器件在全球的市场占比，从图中可以看出，目前我国才是功率半导体最大的市场。



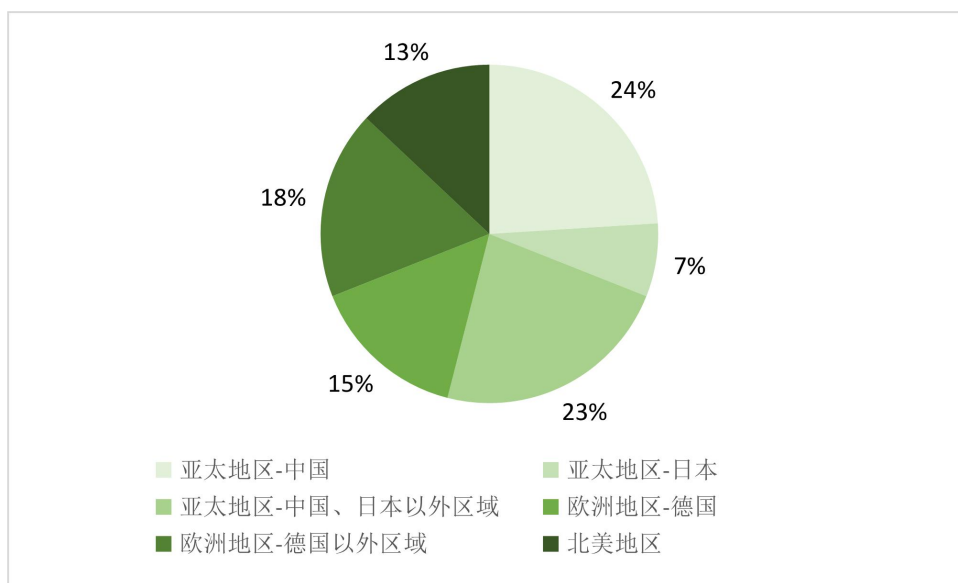


图 7 英飞凌功率器件全球市场占比

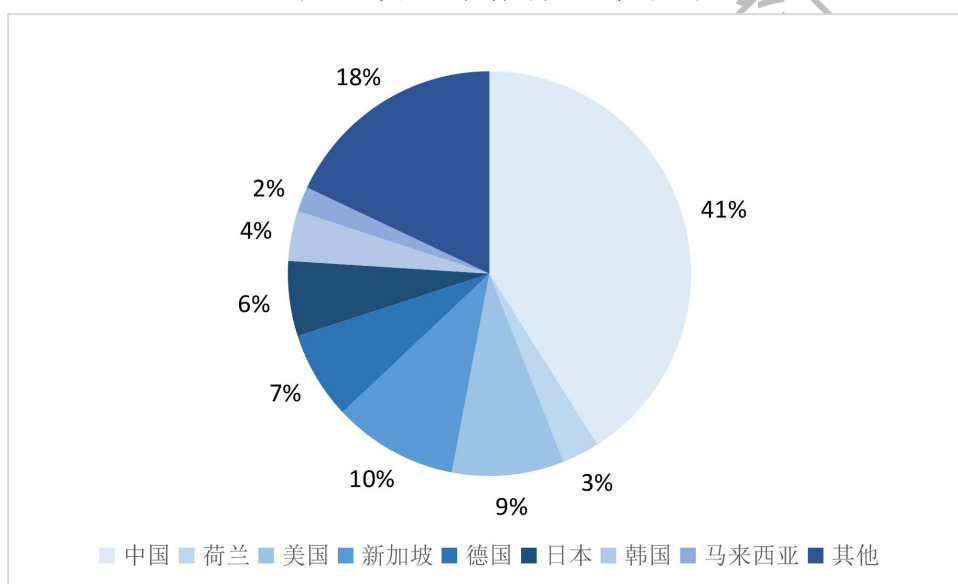


图 8 NXP 功率器件全球市场占比

其中，高端功率半导体器件更是一一直处于供不应求的状态，以轨道交通为例，IGBT 是动车、高铁等动力转换的核心器件，占动车总成本的 1.25%左右。和谐号 CRH3 列车的牵引变流器将超高电流转化为强大的动力，运营时速达 350 公里/小时，每辆列车共装有 4 台变流器，每台变流器搭载了 32 个 IGBT 模块，每个 IGBT 模块含 6 块 DCB，每块 DCB 含有 4 个 IGBT 新芯片和 2 个二极管芯片，每个模块标称电流 600A，需承受 6500V 的高压。总的来说，一辆 8 节编组动车上的

128 个 IGBT 模块为整个列车提供了 10 兆瓦的功率。据中车株洲所报道，一个 IGBT 模块就高达一万多元，一辆 CRH3C 出厂价大约 1.6 亿，IGBT 模块占动车总成本的 1.25% 左右，每年中国高铁国外采购的 IGBT 模块数量达十万个以上，金额超过 12 亿元人民币。

但目前国内功率半导体市场仍被国外厂商占据着大部分市场份额，功率二极管国际一线品牌厂商达尔科 58% 的收入来自中国，全球功率 MOSFET 市场中英飞凌、仙童半导体、日本瑞萨电子、欧洲意法半导体、日本东芝前五大厂商的市场占有率合计达到了 60.1%，IGBT 及 IPM 模块则主要是德国英飞凌及赛米控 (semikron)，日本三菱及富士电机，美国仙童半导体基本把控了全球市场，占据了 73.2% 的市场份额。目前我国国产功率器件市场占有率不足 2%，进口替代空间巨大。

相比国外厂商，国内厂商与下游客户的距离更近，客户的沟通交流更加顺畅，并且在客户需求服务响应、降低成本等方面具有竞争优势，功率器件国产品牌替代率逐渐上升应是大势所趋。

在中低端功率器件方面，我国已形成了二极管及中低压 MOSFET 等的成熟产品线，国内龙头企业拥有较明显的规模优势和成本优势，且产能扩张势头强劲，国产替代率正不断提升，全球中低端功率器件市场已呈现向中国转移的趋势。

在高端功率器件方面，IGBT、功率模块、第三代半导体功率器件的进口替代等关系到我国智能电网、高铁轨道交通、汽车动力系统等关键零部件的国产化进程，是我国智能工业时代实现自主可控的关键性因素。我国现已拥有 IDM 模式和代工模式的高端功率半导体器件产

业链，虽然技术与产品相对落后，但随着国家资本的支持，我国高端功率器件的发展进程将不断加速。

未来，国内功率半导体器件产业需注重高端产品的研发和生产能力，加大资金和技术投入，加快技术升级，早日实现技术突破，打开成长空间，加强国产化功率半导体器件的应用和市场推广力度，以满足市场内需与巨大的进口替代市场。在行业高成长以及自主可控大趋势下，国内高端功率半导体厂商将迎来历史机遇期。

3.2.3 宽禁带功率分立器件是行业持续发展的重要保障

功率电子器件是传统产业向着自动化、高频化、智能化、节能化、模块化发展的桥梁，但硅基器件已接近应用极限，而宽禁带功率器件具有耐高压、耐高温、功率密度大、抗辐照等优越性能，能够带动整个模块或系统的优化，显著地提高系统工作频率及整机效率，减小系统体积，对于各个领域的智能化、绿色化发展具有极其重要的军用和民用价值，是功率半导体器件持续向高能、大功率领域发展的重要保障，宽禁带功率器件的性能优势如表 2 所示。

表 2 宽禁带功率器件的性能优势

| 宽禁带功率器件特性 | 宽禁带功率器件性能优势                    |
|-----------|--------------------------------|
| 更宽的禁带宽度   | 可减少功率损耗，提高工作温度和可靠性             |
| 更高的击穿场强   | 可提高器件耐压能力与电流密度，减小整机体积          |
| 更高的热导率    | 可改善器件耐高温能力，简化散热系统，提高集成度，增加功率密度 |
| 更高的电子饱和速度 | 可降低器件导通电阻与导通损耗，具有良好的高频特性       |
| 更强的抗辐照能力  | 适合在外太空环境应用                     |

宽禁带半导体材料主要包括碳化硅（SiC）、立方氮化硼（C-BN）、氮化镓（GaN）、氮化铝（AlN）、砷化锌（ZnSe）以及金刚石等。目前，在用于功率器件领域，生产技术最成熟的宽禁带半导体材料是

SiC 和 GaN，基于这两种宽禁带半导体材料的功率器件已广泛应用于众多领域。

宽禁带功率器件在新能源汽车、智能电网、高速轨道交通、新能源发电、新一代移动通信、消费类电子、航空航天等领域有广阔的应用前景，具有支撑信息、能源、交通、国防等发展的重点意义，是全球半导体产业新的战略高地。SiC 功率器件全球主要应用领域及所占市场份额预测如图 9 所示，GaN 功率器件全球主要应用领域及所占市场份额预测如图 10 所示。

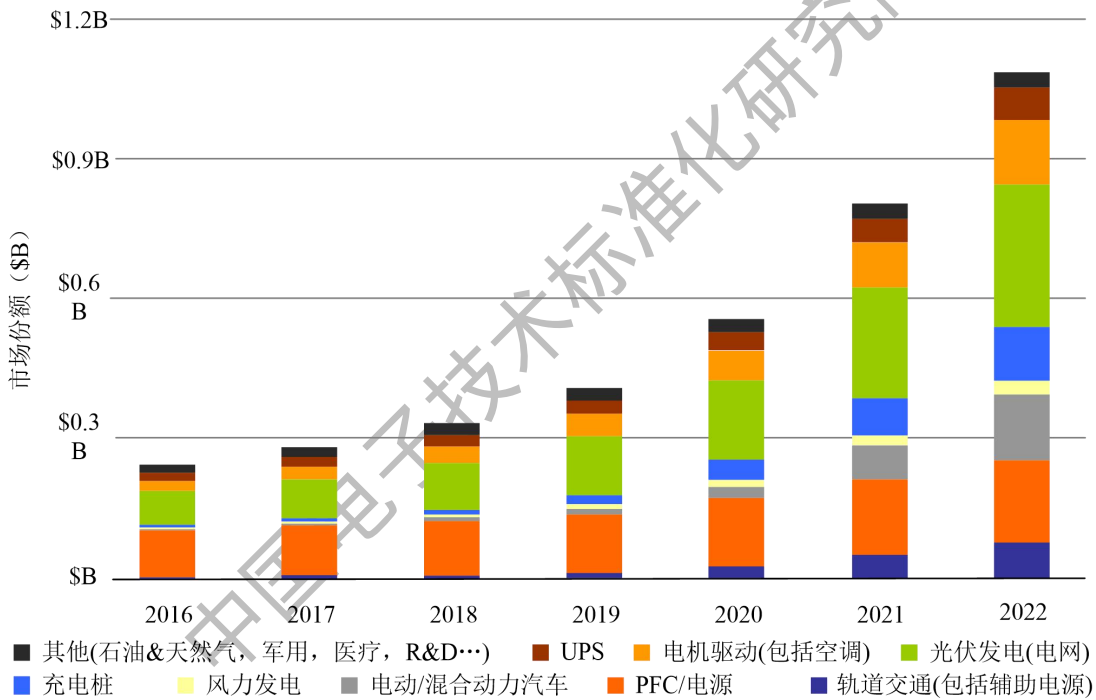


图 9 SiC 功率器件全球主要应用领域及所占市场份额预测

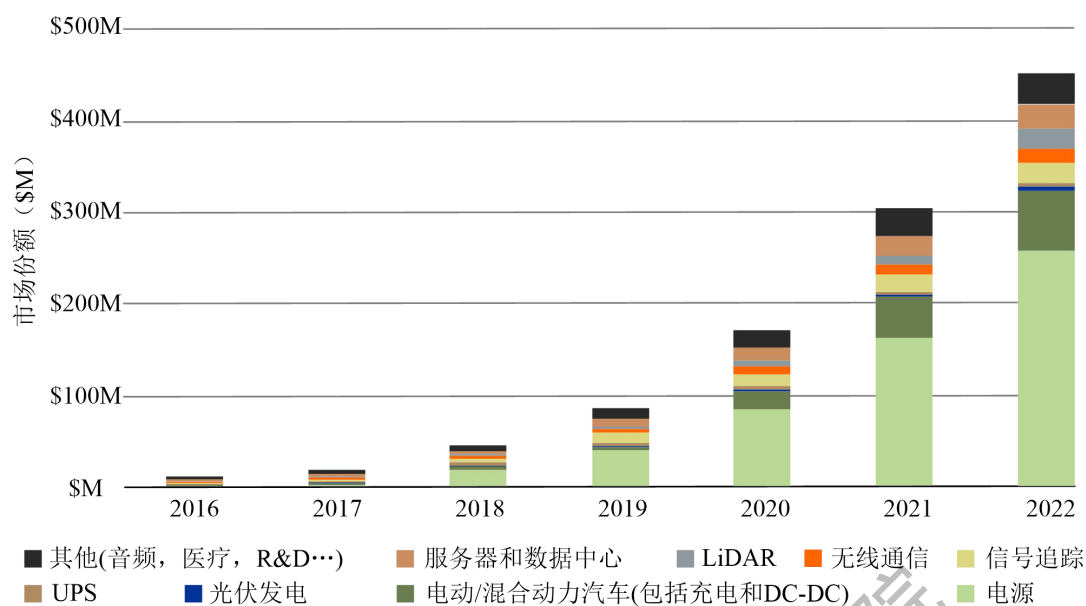


图 10 GaN 功率器件全球主要应用领域及所占市场份额预测

近年来,全球在宽禁带材料和器件的研发投入以及生产规模均迅速增长,产业化技术快速成熟,目前,全球宽禁带半导体产业整体呈现美、欧、日三足鼎立的态势。美国已在该领域处于绝对领先地位,宽禁带功率半导体器件产量占全球产量的 70~80%,并已正式装备于多种先进武器中,旨在实现宽禁带功率半导体器件在航天、航空、军事等高端领域中的全覆盖;欧洲拥有完整的衬底、外延、器件以及应用产业链,通过并购相关企业达到占领民用市场的目标,现已在全球电力电子市场拥有强大的话语权;日本则具有丰富的工程经验,在 SiC 模块与设备的开发领域处于领先地位,并大力发展 GaN 功率器件在民用通信系统中的应用。国外各领先企业对宽禁带功率半导体的市场部署如火如荼,掀起了一场节能减排和新能源领域的巨大变革,预示着新一轮的产业升级已拉开帷幕。

2018 年全球宽禁带功率半导体器件的市场规模约 70 亿元,但市场份额的 90%均由美国 Wolfspeed(包括 Cree)、德国 Infineon(包括 IR)、日本 Rohm、欧洲 STM、日本三菱、加拿大 GaN System、美

国 Transphorm、德州仪器、美国 EPC 等大公司占据。据第三方市场研究机构预测，2019~2023 年间，宽禁带功率半导体器件市场的复合年增长率将达到 39%，到 2030 年市场规模达到 1100 亿元，其中，全球 SiC 功率器件市场规模将超过 500 亿元，国内市场约占 40%~50%；全球 GaN 电力电子器件市场规模将超过 100 亿元，国内市场约占 55%~60%；全球 GaN 射频器件市场规模将超过 500 亿元，国内市场约占 50%。

宽禁带功率半导体器件在我国具有极大的应用需求与发展空间，并有望在该领域摆脱传统功率半导体器件技术大幅落后于国际先进水平、产品严重依赖进口的现状，进而实现核心技术全面自主可控。近年来，我国通过 863 计划、国家 02 重大专项等，大力促进宽禁带半导体产业的发展，并将 SiC 衬底列入十三五《战略性新兴产业重点产品目录》。随着我国政府对宽禁带半导体产业的重视和国内企业研发能力的提升，我国宽禁带功率半导体器件实现了“从无到有”的突破，逐步形成了从衬底、外延、芯片、封装、检测等器件制造的较为完整的产业链，初步摆脱了对国外衬底、外延的依赖。我国在宽禁带功率半导体器件技术研发方面已有了较好的积累，器件设计等个别技术已接近国际先进水平，未来五年，国内厂商甚至有望借助宽禁带材料实现功率半导体器件领域的“弯道超车”。

目前，宽禁带功率半导体器件正处于快速发展的黄金期，充满着机遇与挑战，但我国宽禁带功率半导体器件产业仍存在一些技术瓶颈和亟待解决的问题，如综合实力偏弱，针对宽禁带功率半导体自身特性的研发较少，创新能力尚显不足；既面临全球性技术难题，又存在基础技术薄弱、关键设备与检测能力缺乏等国内短板；产业亟需跨学

科、跨领域创新整合，共享整合制造模式的推广困难重重。

针对以上问题及我国“十三五”发展纲要对宽禁带功率半导体器件提出的要求，我国应以需求带动产业壮大，以应用推动技术进步，产业链与创新链协同发展；聚焦瓶颈技术集智攻关，加大关键材料、芯片、高温封装的核心技术和关键设备研发的资金投入，并注重人才吸收与培养并举；加强封装与检测标准化研究，增强核心技术知识产权保护力度，为产业合作共享提供良好发展环境；统筹需求，集中资源，促进各方协同发展。

中国电子技术标准化研究院

## 4 功率半导体分立器件标准化现状

国内外的标准体系中，功率半导体分立器件虽不包含电压调整二极管、电压基准二极管、开关二极管等 1W 以下的半导体分立器件以及微波分立器件，但隶属于半导体分立器件，其标准体系也服从于半导体分立器件标准体系，因此，本章将从整个半导体分立器件的标准化角度出发进行现状分析，以便更加全面、系统的了解功率半导体分立器件的标准化背景与发展历程。

### 4.1 国外标准化现状

#### 4.1.1 国际电工委员会（IEC）标准

国际电工委员会（International Electrical Commission，简称 IEC）是世界上成立最早的电气和电子国际标准化机构，是世界上最具权威性的国际性标准组织之一。

IEC/TC47 是 IEC 的第 47 技术委员会，于 1961 年成立，名称为“半导体器件技术委员会”，负责制定半导体分立器件、集成电路、传感器、电子元器件组件、接口要求和对环境无害的设计、制造、使用、再利用和试验的国际标准。

其下设分技术委员会，目前在活动的有：

- SC47A——集成电路
- SC47D——半导体器件机械标准化
- SC47E——半导体分立器件
- SC47F——MEMS

除分技术委员会外，其下还设有标准化工作组，负责半导体器件



同一大类标准（如基础标准）的制定，工作组如下：

- WG1: 术语
- WG2: 气候和机械试验
- WG3: 电子元器件长期储存
- WG5: 半导体器件晶圆级可靠性
- WG6: 新兴技术（如人体通讯等）
- WG7: 能量采集和转化用半导体

SC47E 分立器件分技术委员会于 1994 年成立，主要致力于半导体器件的半导体分立器件方面的国际标准相关工作，现有四个工作组（WG1 ~ 4）和一个维护小组（MT1）、一个联合工作组（JWG5）。其中 WG3 为半导体器件工作组，负责制定额定工作电流在 1A 以上的栅或基极控制的器件和二极管的标准，不包括光电二极管、微波器件和半导体传感器。

1982 年以前，IEC “147” 标准体系是以“特性”为主线制定标准，并没有按照管型对标准进行划分，随着半导体器件种类的日益增多及国际贸易迅猛发展的需要，这种标准分类因各种管型之间纵横交叉过多，为管理和使用带来了不便。后以 8 个大门类为主干线制定标准，形成了一个新的标准体系——“747”标准体系（后改为 60747），该体系将各门类器件的内容包括名词术语、文字符号、基本额定值及特性、测试方法的基本原理、接收和可靠性等相对集中，统一编号。在这个前提下，根据需要制定了若干空白详细规范，指导各国制定具体产品的详细规范，以进行统一的质量评定，促进国际贸易，标准清单见表 2，体系基本框架如下：

- 60747-1 总则
- 60747-2 整流二极管
- 60747-3 信号和调整二极管
- 60747-4 微波二极管和微波晶体管
- 60747-5 光电子器件
- 60747-6 闸流管
- 60747-7 双极晶体管
- 60747-8 场效应晶体管
- 60747-9 IGBT 总规范
- 60747-10 半导体器件总规范
- 60747-11 分立器件分规范
- 60747-12 光电子器件分规范
- 60747-15 绝缘型半导体分立器件

试验方法方面，TC47 发布的 IEC 60749 机械和气候试验方法系列标准，不再引用 IEC 60068 系列标准，并且将原标准拆分为一个方法一个标准，该系列标准已发布了 45 个试验方法标准（标准清单见附录 1）。

器件的长期贮存方面，TC 47 发布了 IEC 62435 半导体器件长期贮存系列标准，确定了电子元器件长期贮存需要的环境条件、失效模式，评价长期贮存电子元器件的可靠性，对电子元器件的研究、生产、包装、检验和使用具有重要意义。该系列标准结构如下：

- 62435-1 总则
- 62435-2 失效机理

- 62435-4 存储
- 62435-5 芯片和晶圆
- 62435-6 包装或成品设备

另外，TC47 还发布了芯片标准 8 个，含技术报告 4 个，基础工艺监控、寿命试验方法 10 个。

#### 4.1.2 固体技术协会（JEDEC）标准

半导体分立器件领域重要的标准还包括 JEDEC 标准。固态技术协会（JEDEC）成立于 1958 年，最初是电子工业协会（EIA）的一部分。1999 年，JEDEC 从 EIA 中独立出来，不隶属于任何一个政府或公司。作为全球半导体行业标准的领先开发组织，JEDEC 由近 300 家各个国家的公司推选的大约 3000 名行业专家组成，主要从事半导体技术方面的标准研究、制定及相关的活动，其发布的标准和出版物得到了全球的普遍认可。

JEDEC 分为若干技术委员会，与半导体分立器件有关的技术委员会有：

- JC-10: 术语、定义和文字符号
- JC-11: 机械封装外形
- JC-13: 政府联络组
- JC-15: 用于电子封装和连接面的电、热特性技术
- JC-22: 二极管和闸流管
- JC-25: 晶体管
- JC-70: 宽禁带功率转换半导体器件

其中，JC-70 是 2017 年 9 月新成立的分技术委员会，该分会由

来自英飞凌、德州仪器等公司的专家领导，目前包括氮化镓和碳化硅两个小组。该分会目前重点关注器件可靠性、认证程序和测试方法的标准化以及电参数项目的规范化。

JEDEC 制定了 20 多项半导体分立器件领域的重要专业基础标准，主要是测试方法。从标准的类别来看，目前 JEDEC 已制定的标准主要为基础标准。具体如下：

### 一、通用基础标准

主要包括以下几类：

- 术语和定义、文字符号、型号命名；
- 外形尺寸；
- 试验方法：环境和机械试验方法、寿命试验方法、封装电特性和热特性测试方法，此外还包括晶圆级试验方法；
- 过程控制标准：如关于统计过程控制、产品出厂平均质量水平评估、工艺描述指南、分包商要求、质量问题分析和纠正措施要求等方面的标准；
- 可靠性评估标准；
- 失效分析指南。

### 二、专业基础标准

主要包括针对某一特定类别电路的特性描述、电测试方法、设计规范、接口标准、采购指南等。该类标准可为相应类别电路的设计、测试、使用提供指导。

JEDEC 标准成为业界广泛使用的标准与其标准化战略、工作策略以及标准制定程序是密切相关的。在标准投票表决阶段各公司只有一

票，保证了小公司的话语权；标准制定过程有加速程序，最快标准从起草到发布只需三个月的时间，能以最快的速度反应产业的需求。

### 4.1.3 汽车电子委员会（AEC）标准

在 AEC 成立之前，由于汽车用电子元器件占市场份额较小，没有元器件厂商提供专门用于汽车的电子元器件。各汽车制造商根据自身经验对选用的元器件进行评价，存在评价标准不统一的问题，不利于市场的扩大和降低成本。为了制定统一的汽车用电子元器件评价标准，克莱斯勒、福特和通用汽车于 1994 年组织成立了汽车电子委员会（AEC）。

AEC 先后为半导体器件和无源元件制定了评估标准，并得到了广泛认可，元器件厂商纷纷推出了汽车级电子元器件。随着汽车级电子元器件的可靠性得到业界的认可，汽车级电子元器件也逐步应用在航空、航天、医疗等高可靠领域。

在组织结构上，AEC 采用公司会员制，除克莱斯勒、福特和通用汽车等创始公司外，AEC 主要由汽车组件制造商、电子元器件制造商以及其他相关机构组成。

AEC 最初设有元器件技术委员会和质量体系委员会两个委员会。

元器件技术委员会为集成电路、半导体分立器件和无源元件制定了考核评价标准。

质量体系委员会制定了 QS-9000《质量体系要求》等质量体系认证标准，并对汽车电子元器件厂商的质量体系进行认证。ISO TS 16949

《质量管理体系-汽车行业生产件与相关服务件的组织实施 ISO9001:2000 的特殊要求》发布后，AEC 废止了 QS-9000，停止了认证活动，

并解散了该委员会。

AEC 标准由元器件的产品规范和必要的技术支撑标准两部分组成。

### 一、产品规范

AEC 先后为集成电路、半导体分立器件、半导体光电器件、多芯片组件和无源元件（包括电阻器、电容器、变压器、电感、石英晶体管振荡器等）等关键的电子元器件制定了产品规范。这些产品规范规定了汽车用电子元器件鉴定检验的试验项目、抽样方案、试验应力、鉴定扩展要求以及重新鉴定的要求。AEC 制定的半导体分立器件产品规范为 AEC-Q101《基于失效机理的汽车用分立器件应力试验鉴定要求》，该规范包含了半导体分立器件最低应力测试要求的定义和参考测试条件。当被测器件通过本规范所规定的所有测试时，则零件完成 AEC Q101 认证，认证测试方法包括高温反向偏压、交流阻断电压、高温栅偏、温度循环等 29 项测试方法，其参考文件包含了军用级、工业级和汽车级相关标准。

### 二、支撑性技术标准

为了提高供货产品的可靠性，AEC 制定了多项支撑性技术标准。半导体分立器件的支撑性技术标准有：

（一）AEC-Q001《半导体器件电参数控制指南》。该标准指导半导体器件承制方利用统计技术确定半导体器件和分立器件的电参数监控极限值。电参数偏离平均值的器件容易出现失效，通过剔除这些电参数偏离平均值的器件可以提高产品的批可靠性。

（二）AEC-Q005《无铅元器件测试要求》。该标准包含汽车用无铅电

子元器件与无铅特性有关的试验方法以及最低的鉴定要求。

#### 4.1.4 美国国防部标准

在美国国防部标准中，半导体分立器件的 FSC（联邦分类代码）分类号是 5961。在美军标体系中 MIL-HDBK-5961 列出了标准半导体分立器件，MIL-PRF-19500 半导体分立器件详细规范列出了详细性能要求，MIL-STD-750 半导体分立器件试验方法列出了具体试验方法，QML-19500 列出了合格器件和制造商目录，MIL-HDBK-6100 列出了用于半导体分立器件的标准外壳外形，具体如下：

##### 一、通用规范

在美军标体系中半导体分立器件现行有效的通用规范为 MIL-PRF-19500P 半导体分立器件通用规范，该规范适用于包含功率半导体期间在内的所有半导体分立器件。当第一个真正的半导体二极管问世后，美国海军原本只是在其所拟订的电子管规范 MIL-E-1 后面附加补充有关二极管的章节。但当其他的半导体产品陆续问世后，美国海军发现在 MIL-E-1 之后增加补充规定资料的做法已无法满足众多要求，为了更有效的明确对新半导体器件的需求，美国海军在 1959 年制定了 MIL-S-19500，以保证半导体分立器件的可靠性，后更名为 MIL-PRF-19500。

MIL-PRF-19500P 根据执行筛选的种类与数量，将军用半导体分立器件（含功率半导体器件）分为 JAN（普军级）、JANTX（特军级）、JANTXV（超特军级）和 JANS（宇航级）四个等级。半导体器件等级编号的前面三个字母“JAN”是由美国陆海军联军（Joint Army and Navy）半导体军用标准化要求而来的。“TX”表示“额外的试验”（extra

test)、 “V” 表示 “目检” (visual)、 “S” 表示 “太空” (space)。

JAN 级器件不需要经过筛选，但需要满足 A、B、C 和 E 组的检验要求。

JANTX 等级的器件除了必须经过 JAN 等级器件的处理程序和抽样试验外，还必须 100%(按照详细规范的规定) 经过特殊的程序和加电测试，以便更进一步剔除不良的产品。

JANTXV 质量保证等级的器件除必须通过所有 JANTX 器件规定的试验外，还须加上封盖前的内部目检。

JANS 是最高质量保证等级的器件，除执行所有 JANTXV 器件的试验外，同时还需要执行%100 的 PIND 试验、失效分析、编产品序列号及芯片批的可追溯性。

## 二、试验方法

半导体分立器件现行有效的试验方法标准为 MIL-STD-750F 半导体分立器件试验方法。MIL-S-19500 最初的版本是一份适用于所有的半导体，包含全部需求的规范（甚至包括测试方法，外形尺寸等），1963 年美国海军认为详细的试验方法最好是以一份独立的标准另行规定，因此在 1964 年出版了 MIL-STD-750，该标准具体规定了适用于半导体分立器件（含功率半导体器件）的试验项目，且随着半导体分立器件的发展及时更新版本，内容全面，已被国际上大多数国家所认可。

## 三、外形尺寸

外形尺寸方面，美国防部曾发布 MIL-HDBK-6100 半导体分立器件外形和尺寸列表作为编制详细规范外形尺寸的依据。随着外形尺寸的



多样化，该标准已不能满足要求。本着“有所为，有所不为”，“尽量采用民用标准”的原则，美国防部于 2003 年将该标准废止。

#### 四、详细规范

美军先后发布的军用半导体分立器件相关详细规范有 700 多项，现行有效的约 500 余项，目前最新发布的标准为 MIL-PRF-19500/774（2017 年）。这些详细规范的特点是主要规定产品的电参数及外形尺寸，以及检测项目中必须明确的项目。这样做的好处非常明显，因为通用规范的技术内容可能会根据工艺现状和对器件的需求而发展改变。详细规范中只规定特性要求可以最大程度上降低通用规范变更对详细规范带来的影响。

美军详细规范的另一个特点是只发布通用性强的通用性产品的详细规范，在一定程度上可反映当时产品研制和使用的情况，比如，2000 年以后，美国防部发布了大量的场效应晶体管的详细规范，而同时期发布的硅双极型晶体管详细规范的数量则相对极少，充分反映了当前半导体分立器件的发展趋势。

此外，美军国防部还发布了图纸（SMD）文件，这些图纸都转化自被废止的详细规范。部分详细规范被废止后，国防部发现这些详细规范涉及的产品尚有少量应用，因此将其转化为标准图纸文件（这种图纸文件和产品详细规范几乎无差异）。

#### 五、认证方式

MIL-PRF-19500L 之前的各版中规定质量认证的方式为合格产品目录（QPL）认证方式，美国国防部 1998 发布的 MIL-PRF-19500L 版加入了 QML 认证方式，但是，目前尚未看到有分立器件制造厂采用

QML 认证方式。经过研究，我们认为 MIL-PRF-19500 中规定了采用结构相似性进行鉴定扩展，也可以达到合理的节约试验经费的目的，其效果与 QML 认证方式相同，因此制造商没有选择进行 QML 认证方式进行认证。

## 六、QML 表

美国防部哥伦比亚后勤供应中心 (DSCC) 发布经认证符合美军标要求的半导体分立器件产品清单。该清单名称几经变换，经历过 QPL-19500 到 QML-19500，再到 QPDSIS-19500 的几次变换。

目前，列入 QPDSIS-19500 上产品的数量约为 12000 多项，涉及 14 个制造商的 4000 多个型号的分立器件。其中，Microsemi 公司的产品占上表总数的 80%。

### 4.1.5 美国航空航天局 (NASA) 标准

美国航空航天局 (NASA) 电子元器件方面的标准由其下属的戈达德空间中心负责，该中心所发布的标准中，涉及半导体分立器件的有 GFSC S-311 系列电子元器件标准中 5961 类别下的 5 份标准，具体目录如下：

- S-311-24 用于 PNP 型中功率晶体管 (2N4236) 的筛选程序
- S-311-407 用于 PN S874-18k 型光电探测二极管的筛选程序
- S-311-787 温度传感二极管 (XDT-570)
- S-311-790 LPE GaAlAs 红外发光二极管 (OD-880WJ)
- S-311-791 GaAlAs 红外发光二极管

此外，NASA 发布的标准 EEE-INST-002: 电气、电子和机电元器件选择、筛选、鉴定和降额指南中对半导体分立器件的选择、筛选、鉴

定和降额有比较细致的规定。

从总体上讲，NASA 在半导体分立器件方面主要依托美军标准，自己的制定标准并不多。

#### 4.1.6 欧洲航天局（ESA）标准

欧洲航天局电子元器件方面的标准由欧洲航天元器件协调委员会（ESCC）负责。ESCC 成立于 2002 年 10 月，总部设在法国巴黎。

ESCC 目前发布的分立器件标准共 55 项，其中 2 项通用规范，10 项试验方法，43 项详细规范。

总体上，在半导体分立器件领域，ESCC 根据自己的实际需求制定并发布了自己的一系列标准，但在试验方法方面则尽可能引用美军标准（MIL-STD-750），除非必须，否则不制定试验方法标准。

在通用规范方面，ESCC 有两项通用规范：

- ESA 5000（目前为 2010 版）：半导体分立器件通用规范
- ESA 5010（目前为 2002 版）：微波半导体器件通用规范。

ESA 将对微波半导体分立器件的要求从对普通半导体分立器件的要求中分离出来。

ESA 5000 对半导体分立器件的评价和质量保证思路与 MIL-PRF-19500 略有不同，如鉴定检验中，ESA5000 将试验分为：

- 机械和环境试验分组；
- 耐久性试验分组；
- 封装和性能试验分组。

分组理念与 MIL-PRF-19500 不同，试验样品数少于 MIL-PRF-19500 的规定，但试验样品复用程度较高，强度高于

MIL-PRF-19500。

此外，作为对通用规范的有效补充，ESCC 还发布了 226500 《非微波型器件评估程序》，要求对选用的器件进行极限能力评估，通过评估后方可选用。

#### 4.1.7 日本航天局（JAXA）标准

在半导体分立器件领域，日本航天局也制定了相关标准，其标准化发展思路是先模仿美军标准，在积累大量经验后，再根据自己的情况制定自己的标准。JAXA 在半导体分立器件领域的标准有：

- NASDA-QTS-19500A（1982 年发布，已废止）
- JAX-QTS-2030（最新版为 E 版，2015 年发布）《宇航用高可靠分立器件通用规范》

NASDA-QTS-19500A 与美军 MIL-S-19500 完全相同，JAX-QTS-2030 也是参照 MIL-PRF-19500 制定，但有一定的修改。比如，MIL-PRF-19500 的 D 组为耐辐照试验，E 组为仅鉴定检验时进行的检验；MIL-PRF-19500 的 D3 分组为功率晶体管剂量率试验，但美国国防部却从未发布过一份进行该项试验的详细规范，而美国国防部近年来发布了大量进行单粒子试验的详细规范。这一情况可在 JAX-QTS-2030E 中得到反映。JAX-QTS-2030E 将耐辐照试验规定为 E 组检验，将 D3 分组规定为单粒子试验。

- JAX-QTS-2030E 主要特点：
- 坚持部分采用 LTPD 抽样；
- 在附录中规定了部分类型的器件的关键参数。

在试验方法方面，JAXA 与 ESA 类似，都是尽量采用美军标准

MIL-STD-750。

## 4.2 国内标准化现状

### 4.2.1 国内民用标准

全国半导体器件标准化技术委员会 (SAC/TC78) 负责全国半导体器件标准化和 IEC/TC47 的国内技术归口工作, 并设有 SC1 半导体分立器件分技术委员会, 负责全国半导体分立器件等专业领域标准化工作; SC2 半导体集成电路分技术委员会, 负责全国半导体集成电路、混合集成电路等专业领域标准化工作。

半导体分立器件的标准化对该行业的发展有着重要的指导和规范作用, 我国民用功率分立器件国家标准体系在借鉴国外 IEC 标准体系的基础上, 结合我国国情进行了合理调整, 将原半导体器件体系表中的光电子器件移出, 其内容并入光电子器件体系中。我国民用功率分立器件国家标准体系相对比较完善, 但随着技术的发展, 老产品不断改进, 新产品不断出现, 目前现有的国内标准内容并没有及时跟踪国际先进水平, 且缺少有关新型产品的标准和测试方法。

我国功率半导体分立器件 (不包含电压调整二极管、电压基准二极管、开关二极管等 1W 以下的半导体分立器件以及微波分立器件) IEC 标准转化情况如附录 1 所示, 半导体分立器件 (不包含电压调整二极管、电压基准二极管、开关二极管等 1W 以下的半导体分立器件以及微波分立器件) 国内现行民用标准统计见附录 2, 国内民用标准体系及标准情况分析详见第五章。

### 4.2.2 国内军用标准

我国军用半导体分立器件标准化工作开展于 20 世纪的八十年

代，依照国防科工委制定的“认真研究、区别对待、积极采用”的方针，在制定我国的半导体分立器件国家军用标准时，参照了当时的美军标等标准。目前，军用电子元器件按照 GJB 8118 军用电子元器件分类与代码进行专业划分，其中，半导体功率器件（不包含电压调整二极管、电压基准二极管、开关二极管等 1W 以下的半导体分立器件以及微波分立器件）标准隶属于半导体分立器件标准。

通过一系列相关标准的发布实施，我国现已建立了基本完备的半导体分立器件军用标准体系。半导体分立器件军用标准体系的特点是，对于不同种类半导体器件的要求均采用一个通用规范，在试验方法的相关标准中也很少出现关于试验仪器、试验方法的具体说明，所用到的试验方法一般都是直接引用通用的方法标准 GJB 128，只有极个别的性能，如没有合适的试验方法标准，才会在文本中对试验仪器和试验方法予以说明。通过这种方式控制标准的数量，以提高标准的质量和反应速度。

## 5 功率半导体分立器件标准体系

### 5.1 标准体系的构建原则

功率半导体分立器件标准体系以规范半导体器件的研制、生产和使用,统一半导体器件检验试验方法,提高半导体器件可靠性为原则,构建功率半导体分立器件通用标准体系,具体如下:

#### 1、目标性

按照科学的分类体系指导功率半导体分立器件标准化工作有序地开展。

#### 2、整体性

由于标准的特点决定了一个标准必须与其相关的标准共同使用,因此标准体系的整体性尤为重要。

#### 3、有序性

标准体系中包含了为数众多的标准,整个标准体系的结构必须是有序的,其有序性是由体系中各种类标准之间的一丛关系决定的,同城上一级种类标准是对下一集种类标准的抽象归纳,而下一集种类标准时尚以及种类标准的具体化。

#### 4、开放性与动态性

标准是科学技术和生产水平的综合反映,随着科学技术的不断发展,生产水平的不断提高,标准会不断地更新和提高水平,因此标准体系也必然会随着科学技术和生产力的发展而不断发展、补充,标准必须及时修订,使之适应技术发展的需求,这就使标准体系必须具有开放性和动态性。

#### 5、相对稳定性

标准体系的开放性，增强了标准体系的活力和适应性，但标准体系的发展是有阶段性的，这就使标准体系应具有相对的稳定性。

## 5.2 我国功率半导体分立器件标准体系

标准化工作对功率半导体器件及其产业发展具有基础性、支撑性、引领性的作用，既是推动产业创新发展的关键抓手，也是产业竞争的制高点。当前，在我国功率半导体器件相关产品不断丰富的时候，出现了标准化程度不足的问题。虽然功率半导体器件领域通过借鉴国外标准已具备一定的标准化基础，但功率半导体器件的应用涉及众多领域，目前的基础标准化工作并不足以完全支撑与指导功率表半导体器件在各领域中的应用。另一方面，新兴领域宽禁带功率半导体器件的发展方兴未艾，从世界范围来看，标准化工作仍在起步过程中，尚未形成完善的标准体系，我国基本与国外处于同一起跑线上，存在快速突破的机会，只要瞄准窗口快速布局，完全有可能抢占标准创新的制高点，反之，则有可能丧失良机。因此，迫切需要把握机遇，加快对功率半导体器件技术及产业发展的研究，系统梳理、加快研制功率半导体器件的标准体系，明确标准之间的依存性与制约关系，建立统一完善的标准体系，以标准的手段促进我国功率半导体器件技术与产业蓬勃发展。

结合国内外功率半导体分立器件标准化情况、国内功率半导体分立器件技术发展现状、功率半导体分立器件参考架构及标准化需求，根据功率半导体器件自身标准化特点，当前各领域推动功率半导体分立器件应用的实践经验，以及未来功率半导体分立器件发展的趋势，白皮书提出了功率半导体分立器件标准体系，可为后续标准立项提供



依据，该体系中不包含电压调整二极管、电压基准二极管、开关二极管等 1W 以下的半导体分立器件，也不包含微波分立器件，功率半导体分立器件标准体系框图如图 11 所示。

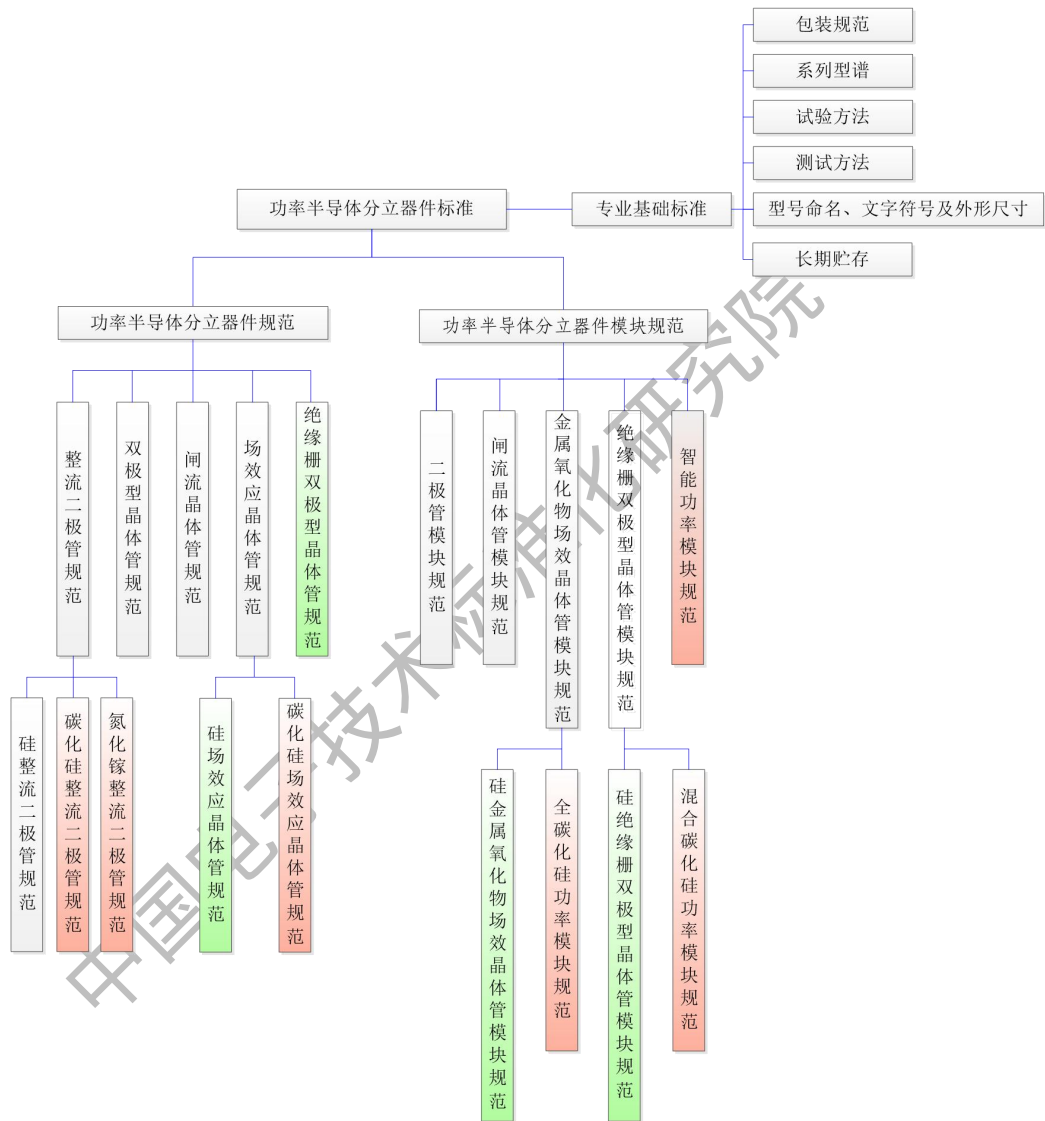


图 11 功率半导体分立器件标准体系

我国功率半导体分立器件标准按照标准的适用范围与内容分为两种，即基础标准和产品标准，其中基础标准为系列标准提供包括术语、文字符号、命名方法、外形尺寸、机械和气候试验方法等基础性

标准；产品标准分为通用规范和详细规范，覆盖各门类半导体器件的设计、制造、检验、使用等领域。目前，体系中需重点发展的领域有：硅场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管、硅金属氧化物场效应晶体管模块、硅绝缘栅双极型晶体管模块和氮化镓微波场效应晶体管等产品的规范；亟待补充的领域有：碳化硅整流二极管、碳化硅场效应晶体管、全碳化硅功率模块和混合碳化硅功率模块等产品的测试方法和规范。

### 5.2.1 基础标准

我国功率半导体分立器件的基础标准包含：

#### 一、型号命名标准

GB/T 249-2017 半导体分立器件型号命名方法规定了半导体分立器件型号命名方法的组成原则、组成部分的符号及其意义，历次版本发布时间为 1964、1974、1989 和 2017；

#### 二、文字符号标准

GB/T 11499-2001 半导体分立器件文字符号参照 IEC 国际标准 60747 系列的有关文字符号的内容对 GB/T 11499-1989 进行了修订，规定了半导体分立器件主要的文字符号；

#### 三、外形尺寸标准

GB 7581-1987 半导体分立器件外形尺寸适用于半导体分立器件的外形尺寸；

#### 四、机械和气候试验方法标准

民用试验方法标准中的气候和机械试验详见于标准 GB/T 4937 系列，该系列主要是由 IEC60749 系列标准转化的国家标准，目前 IEC

60749 系列标准已经正式发布的有 45 项，我国对该系列标准的转化情况如下：

- 已经转化为国家标准并正式发布：17 项；
- 已完成报批稿，并在报批审查过程中：5 项；
- 已有计划，在制定过程中：6 项；
- 已提交项目建议书和草案，计划立项：6 项。

除此之外，还 IEC 还制定了其他分立器件相关试验方法，如 MOSFET 的温度偏置稳态试验、栅绝缘薄膜的依靠介质击穿时间试验、内部金属层的 TDDDB 试验、恒流电迁移试验、关于 MOS 晶体管的热载流子试验、MOSFET 自由离子试验、金属化空洞应力试验、静电放电敏感度试验 - 传输线脉冲 - 元件水平，以及 IEC 62435 半导体器件长期贮存系列标准。

具体标准转化情况详见附录 1。

军用功率半导体分立器件现行有效的试验方法标准为 GJB 128A-1997《半导体分立器件试验方法》，后参照美军于 2006 年底发布的 MIL-STD-750E，对 GJB 该版本标准中的测试方法进行了大幅修订，形成了 GJB 128B-20XX《半导体分立器件试验方法》，目前正在报批过程中，本标准中规定了半导体分立器件的通用试验方法，包括为确定器件耐受自然环境和军用工作环境的有害影响而进行的基本环境试验，力学(物理)试验和电学试验，主要试验方法包括：

- 方法 1000 系列 环境试验；
- 方法 2000 系列 机械性能试验；
- 方法 5000 系列 高可靠宇航应用试验。

## 五、测试方法标准

民用半导体分立器件参数测试详见于各门类测试方法标准中，具体结构如下：

➤ GB/T 17573-1998 半导体器件分立器件和集成电路 第 1 部分：总则；

➤ GB/T 4023-2015 半导体器件分立器件和集成电路第 2 部分：整流二极管；

➤ 第 3 部分：GB/T 6571-1995 半导体器件分立器件第 3 部分：信号（包括开关）二极管和调整二极管；

➤ GB/T 20516-2006 半导体器件分立器件第 4 部分：微波器件；

➤ GB/T 15291-2015 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管；

➤ GB/T 4587-1994 半导体分立器件和集成电路第 7 部分：双极型晶体管（新版本修订中）；

➤ GB/T 4586-1994 半导体器件分立器件第 8 部分：场效应晶体管（新版本修订中）；

➤ GB/T 29332-2012 半导体器件分立器件第 9 部分：绝缘栅双极晶体管；

➤ GB/T 4589.1-2005 半导体器件 第 10 部分：分立器件和集成电路总规范；

➤ GB/T 12560-1999 半导体器件第 11 部分：分立器件分规范；

➤ 第 15 部分：绝缘功率半导体分立器件(未转化)；

➤ 第 17 部分：基本绝缘和加强绝缘的磁性和电容性耦合(未转

化)。

测试方法分门类提供了下列有关半导体器件的基本信息：

- 术语
- 文字符号
- 基本额定值和特性
- 测试方法
- 接收和可靠性

军用半导体分立器件测试方法详见于GJB 128A-1997《半导体分立器件试验方法》，主要包括：

- 方法3000系列 双极晶体管电特性测试；
  - ✓ 方法3100系列 热特性测试；
  - ✓ 方法3200系列 低频测试；
  - ✓ 方法3300系列 高频测试；
  - ✓ 方法3400系列 MOS场效应晶体管电特性测试；
  - ✓ 方法3500系列 砷化锌场效应晶体管的电特性测试；
- 方法4000系列 二极管电特性测试；

## 六、长期贮存

我国民用标准中尚未有半导体器件长期贮存的相关标准发布，但已有标准正在转化制定过程中，改系列标准发布后将会填补标准体系中的空白。目前 IEC 62435 系列标准已经正式发布的有 5 项，我国对该系列标准的转化情况如下（具体标准转化清单详见附录 1）：

- 已有计划，在制定过程中：3 项；
- 已提交项目建议书和草案，计划立项：2 项。

## 七、包装规范

GJB 3169-1998 半导体分立器件包装规范规定了各类半导体分立器件的防护包装、装箱、标识的要求和质量保证规定，适用于各类半导体分立器件的包装设计、生产和检验。防护包装和装箱均分为A级、B级和C级，检验包括材料检验、首件检验与质量一致性检验。

### 5.2.2 产品规范

我国民用功率半导体分立器件产品规范均按照器件结构进行门类的划分，不同门类的功率半导体分立器件由总规范、分规范、空白详细规范与详细规范组成；我国军用功率半导体分立器件则是多个门类产品均使用同一通用规范，以减少通用规范数量，便于管理与使用，除此之外，军用产品规范也包括空白详细规范与详细规范，但在此不做太多介绍。

#### 一、总规范

##### （一）半导体器件分立器件和集成电路总则

GB/T 17573-1998 半导体器件分立器件和集成电路第1部分：总则等同采用了 IEC 747-1: 1983，提供了有关 IEC 747 和 IEC 748 标准的范围和说明的通用内容，以及有关适用于 IEC 747-2、IEC 747-3 等各类或各分类分立器件标准的一般原则或要求，主要包含以下内容：

- 第 I 篇：IEC 747 和 IEC 748 标准的范围和说明
- 第 II 篇：IEC 747-1 标准的目的和说明
- 第 III 篇：关于 IEC 747-2、IEC 747-3 等标准的目的、说明和要求

- 第IV篇：术语（通用部分）
- 第V篇：文字符号（通用部分）
- 第VI篇：基本额定值和特性（通用部分）
- 第VII篇：一般测试方法和基准测试方法（通用部分）
- 第VIII篇：分立器件的接收和可靠性（通用部分）
- 第IX篇：经典敏感器件

## （二）半导体器件分立器件和集成电路总规范

GB/T 4589.1-2006 半导体器件第 10 部分：分立器件和集成电路总规范等同采用 IEC 60747-10: 1991，该规范是国际电工委员会电子元器件质量评定体系（IECQ）的一部分，是半导体器件（分立器件和集成电路，包括单片集成电路，但不包括混合电路）的总规范，规定了在 IECQ 体系内采用的质量评定规定总程序，并给出了下述方面的总原则：

- 电特性测试方法
- 气候和机械试验
- 耐久性试验

## （三）半导体分立器件芯片总规范

半导体芯片领域中，SJ/T 10416-1993 半导体分立器件芯片总规范规定了半导体分立器件芯片的技术要求、检验方法及验收规则。2016 年，我国在半导体芯片的采购和使用、操作包装和贮存、仿真、数据交换格式等方面开展了 8 项标准的制定，目前该 8 项标准已于 2018 年进行报批审查。

我国军用标准中，电子元器件长期贮存与晶圆级可靠性领域，目

前还未制定相关标准，亟需制定相关标准，填补空白。

## 二、分规范

GB/T 12560-1999 半导体器件分立器件分规范，该标准等同采用 IEC 747-11:1985，适用于除光电子器件之外的半导体分立器件，

给出了评定半导体器件所需的质量评定程序、检验要求、筛选序列、抽样要求、试验和测试方法的细节。分规范应与有关的总规范一同使用。

## 三、通用规范

### （一）半导体分立器件通用规范

参照美军标 MIL-S-19500，我国制定了 GJB 33-1985《半导体分立器件总规范》，1997 年发布了 GJB 33A-1997《半导体分立器件总规范》，目前，GJB 33B-201X《半导体分立器件通用规范》已完成修订，正在报批过程中，GJB 33B-201X 将质量保证大纲、质量保证体系、产品验证程序、关键界面和材料等内容单独编成五个附录，在结构上比 GJB33A 更清晰。本规范规定了军用半导体分立器件的一般要求，具体要求和特性见相应军用详细规范。本规范适用于金属、陶瓷气密封装的军用半导体分立器件的研制、生产和采购，覆盖信号、开关和调整二极管、整流二极管和晶闸管、微波二极管、晶闸管、双极型晶体管、场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管等产品门类。

### 1、质量等级

GJB33A-1997 从低到高规定了 4 个质量保证等级，即普军级（JP）、特军级（JT）、超特军级（JCT）和宇航级（JY）。

### 2、检验



GJB33A-1997 中规定的检验分为筛选、质量一致性检验和鉴定检验三类。

### (1) 筛选

只有 JT、JCT 和 JY 级的器件才在规范中规定筛选。应按 GJB33A-1997 中筛选要求表中规定的顺序、器件类型及允许的不合格品率 (PDA) 100%地经受全部筛选试验。

### (2) 质量一致性检验

质量一致性检验由 A 组 (逐批)、B 组 (逐批)、C 组周期 (6 个月) 和 D 组 (要求幅射强度保证时) 组成。

A 组检验由外观和机械检验及电性能测试组成。应对每个检验批以任一顺序进行 (见 GJB33A-1997 中 A 组检验表); JY 级按 GJB33A-1997 中 JY 级器件的 B 组检验表的规定进行, JP、JT 和 JCT 按 GJB33A-1997 中 JP、JT 和 JCT 级器件的 B 组检验表的规定进行。B 组试验应从通过了 A 组试验的检验批中抽取, 可以任一子批为代表。试验以任一顺序进行, 但同一个分组内的试验项目应按规定顺序进行; C 组周期检验应从通过了 A 组检验的批抽取样品按 GJB33A-1997 中 C 组周期检验 (全部质量等级) 表的规定进行, 适用于所有质量等级; D 组检验是幅射强度保证 (RHA) 试验, JP、JT 级及不要求幅射强度保证的 JCT 和 JY 级均不必进行。

### (3) 鉴定

不同质量保证等级的鉴定试验是采用不同质量等级的质量一致性检验加上 E 组检验构成。器件应进行相应质量保证等级的筛选试验, B 组、C 组和 E 组试验的样品应从通过了 A 组检验的批中抽取。E

组仅供鉴定用，质量一致性检验不必进行。

静电放电敏感度（ESD）等级鉴定应包括相应的质量和可靠性等级鉴定。ESD 鉴定后，若设计或工艺不再改变时，可不再进行。

## （二）芯片通用规范

功率半导体分立器件芯片适用的通用规范为 GJB XXXX-201X《半导体分立器件芯片通用规范》处于报批过程中，该规范规定了半导体分立器件芯片的一般要求，规范中的半导体分立器件芯片是指未封装的半导体分立器件。

### 1、质量保证等级

规范将芯片的质量保证等级分为 JKC 和 JHC 两个等级。JKC 级芯片的生产线认证要求、筛选要求、B 组检验项目和抽样方案都严于 JHC 级芯片。JKC 级芯片的寿命试验在 B 组进行（逐批），JHC 级芯片的寿命试验在 C 组进行（周期），JHC 级芯片在 B 组进行老练。

### 2、检验

检验分为筛选、鉴定检验和质量一致性检验。

#### （1）筛选

芯片应按照筛选表进行筛选并剔除不合格品。不合格品率大于 10%的批不得接收，其中晶圆检验仅对 JKC 级芯片。

#### （2）鉴定

JKC 级芯片的鉴定检验应在鉴定机构批准的实验室中按 A 组检验表、JKC 级芯片已封装样品的 B 组检验表、D 组检验表（适用时）的规定进行。

JHC 级芯片的鉴定检验应在鉴定机构批准的实验室中按 A 组检验

表、JHC 级芯片已封装样品的 B 组检验表、C 组检验（仅对 JHC 级芯片已封装样品）表、D 组检验表（适用时）的规定进行。

### （3）质量一致性

质量一致性检验由 A 组（逐批）、B 组（逐批）、C 组周期（6 个月）（仅对 JHC 级芯片）和 D 组周期（12 个月）组成。

JKC 级芯片的质量一致性检验应按 A 组检验表、JKC 级芯片已封装样品的 B 组检验表、D 组检验表（适用时）的规定进行；JHC 级芯片的质量一致性检验应按 A 组检验表、JHC 级芯片已封装样品的 B 组检验表、C 组检验表、D 组检验表（适用时）的规定进行。

### （三）模块通用规范

功率半导体分立器件功率模块适用的通用规范为 GJB XXXX-201X《半导体分立器件功率模块通用规范》处于报批过程中，该规范规定了半导体分立器件模块的一般要求和质量保证规定，规范中的半导体分立器件模块是指由两个或两个以上半导体分立器件芯片按一定电路连接并安装在基板（陶瓷基覆铜板）上，用弹性硅凝胶等保护材料密封在一个绝缘外壳内或采用塑料封装，实现半导体分立器件功能的模块。

#### 1、质量保证等级

规范供货的模块的质量保证等级从低到高分：JM1、JM2 和 JM3 三个等级。

#### 2、检验

检验分为筛选、鉴定检验和质量一致性检验。

##### （1）筛选

模块应 100%按规范中的筛选表规定的试验顺序和所允许的不合格品率（PDA）承受并通过所有适用的筛选试验。

## （2）鉴定

鉴定检验应按本规范 A 组、B 组、C 组和 D 组的规定进行。进行 B 组、C 组和 D 组检验的样品必须从已通过 A 组检验的样品中选取。D 组仅供鉴定用，质量一致性检验不必进行。

承制方应按 GJB 128B-201X 方法 1020 的规定对模块进行 ESDS 等级的试验。

## （3）质量一致性

质量一致性检验由 A 组（逐批）、B 组（逐批）和 C 组周期（12 个月）组成。

A 组检验包括外观及机械检查和电性能测试，可以按任意顺序进行 A 组检验（见规范中 A 组检验表）；B 组检验仅适用于已经受并通过 A 组各分组检验的各批中有完整标志的成品模块（寿命试验除外），按本规范的 B 组检验表进行检验分组内所有的试验都应按本规范规定的顺序进行；C 组检验的周期为 12 个月，应从已提交并满足 A 组和 B 组要求的批中抽取有完整标志的成品模块按本规范的 C 组检验表进行检验，分组内的所有试验都应按本规范规定的顺序进行。

## 四、空白详细规范

功率半导体分立器件产品标准中除半导体器件总则、总规范与分规范外，按照功率半导体分立器件门类及各门类的空白详细规范形成了系列标准，结构如下：

### ➤ 第 2 部分整流二极管

- ✓ 整流二极管第 1 节：100A 以下环境和管壳额定整流二极管（包括雪崩整流二极管）空白详细规范
- ✓ 整流二极管第 2 节：100A 以上环境和管壳额定整流二极管（包括雪崩整流二极管）空白详细规范
- 第 3 部分：信号（包括开关）二极管和调整二极管
  - ✓ 信号（包括开关）二极管和调整二极管第 1 节：信号二极管、开关二极管和可控雪崩二极管空白详细规范
  - ✓ 信号（包括开关）二极管和调整二极管第 2 节：电压调整二极管，电压基准二极管（不包括温度补偿精确基准二极管）空白详细规范
- 第 4 部分：微波器件
  - ✓ 第 4-1 部分：微波二极管和晶体管，微波场效应晶体管空白详细规范
- 第 6 部分：晶闸管
  - ✓ 晶闸管第 1 节：100A 以下环境和管壳额定反向阻断三极闸流管空白详细规范
  - ✓ 晶闸管第 2 节：100A 以下环境和管壳额定双向三极闸流管空白详细规范
  - ✓ 晶闸管第 3 节：电流大于 100A、环境和管壳额定的反向阻断三极晶闸管空白详细规范
- 第 7 部分：双极晶体管
  - ✓ 双极晶体管第 1 节：环境额定高、低频放大用双极型晶体管空白详细规范

✓ 双极晶体管第 2 节：管壳额定低频放大用双极型晶体管空白详细规范

✓ 双极晶体管第 3 节：开关用双极型晶体管空白详细规范

✓ 双极晶体管第 4 节：管壳额定高频放大用双极型晶体管空白详细规范

➤ 第 8 部分：场效应晶体管

✓ 场效应晶体管第 1 节：1GHz、5W 以下单栅场效应晶体管空白详细规范

✓ 场效应晶体管第 3 节：管壳额定开关用场效应晶体管空白详细规范

空白详细规范规定了制定各门类半导体器件详细规范的基本原则，制定该范围内的所有详细规范应与空白详细规范一致。当要求出现矛盾时，空白详细规范的权限优先于总规范/分规范。

## 五、详细规范

我国民用标准中现行有效的详细规范约有 30 项，规定了某种型号功率半导体分立器件的详细要求，包括要求、质量保证规定、交货准备、说明事项等。

## 6 功率半导体分立器件标准化发展目标及建议

### 6.1 发展目标

我国功率半导体分立器件标准化工作的目标是根据功率半导体分立器件的特点和发展趋势,掌握国际功率半导体分立器件标准的发展动态,制定适合我国国情的,有利于推动我国功率半导体分立器件技术和应用的发展,有利于促进我国对外经济交往的功率半导体分立器件标准发展规划。重点是在深入分析国际功率半导体分立器件标准体系的基础上,提出制定我国功率半导体分立器件标准体系的研究思路;在分析功率半导体分立器件系统各基本要素相互关系的基础上,建立功率半导体分立器件系统架构和功率半导体分立器件标准体系;从维护国家利益,推动我国功率半导体分立器件和应用的发展的角度出发,从系统的和形成有机整体角度考虑,建立我国功率半导体分立器件基础标准体系结构图,并分析标准体系中各个层次标准和各个标准的作用和相互关系;结合我国国情和功率半导体分立器件基础标准体系的特点,给出功率半导体分立器件标准体系优先级列表,进而为国家的宏观决策和指导提供技术依据,为与功率半导体分立器件相关的国家标准和行业标准的立项和制定提供指南。

从目前行业应用情况来看,基于功率半导体分立器件的应用系统涉及许多领域,需要一系列的技术标准。制定我国功率半导体分立器件标准体系,需要把国际功率半导体分立器件应用发展动态和我国功率半导体分立器件发展战略相结合,在深入分析国际相关标准体系的基础上,以实现我国功率半导体分立器件发展战略为前提,联合相关部门开展我国功率半导体分立器件标准体系研究;以保证实际需要为

目标，实现必要的与国际标准的互联互通和与国家标准的兼容；结合国情和产业的实际，为促进我国功率半导体分立器件发展，提出需要优先制定的标准，形成功率半导体分立器件发展的标准战略和规划。

## **6.2 发展建议**

### **6.2.1 完善标准体系，填补空白领域**

随着技术的不断发展，以及对半导体器件长期可靠性要求的不断提高，我国功率半导体分立器件标准化工作方面应进一步补充完善标准体系，在半导体器件试验方法、长期贮存、晶圆级可靠性领域，开展国家标准制定研究，逐步制定相应国家标准，填补该领域的标准空白，促进功率半导体器件行业的发展。同时，对现有标准进行复审和修订，确保标准有效性和先进性，并尽快将IEC标准转化为国家标准，提高我国标准的采标率。具体要求如下：

- IEC TC47 正在制定关于半导体器件长期贮存可靠性、半导体晶圆可靠性方面的标准，这两个领域的标准，目前我国还是空白，因此我国应跟踪该两个领域国际标准的制定情况，并及时将国际标准转化为我国国家标准；

- 试验方法标准，关于半导体器件机械和试验方法标准，应加快该领域国际标准的转化进度，建立并逐步完善半导体器件的检测和试验平台，以指导功率半导体器件的使用，提高功率半导体器件可靠性。

### **6.2.2 着重发展新材料领域标准化研究**

跟踪行业中新型功率半导体器件用的关键半导体材料、关键材料以及功率半导体器件的发展动态，以制定实时有效的相关技术标准，保证标准与创新成果的同步性。功率半导体分立器件今后的工作重点



是与宽禁带半导体等新材料有关的标准化问题。氮化镓和碳化硅器件性能优于传统的硅材料器件，氮化镓和碳化硅等第三代半导体器件已实现商用化。随着商用化的逐步推进，今后氮化镓和碳化硅器件的成本会越来越低，其市场占有率将会稳步提高，而碳化硅和氮化镓功率半导体器件有诸多迫切需要研究并解决的标准化问题。

### ● 性能表征

宽禁带材料与传统半导体材料在特性上有明显的差别，因此，宽禁带功率半导体器件的电参数表征形式需要重新规范，研究相关性能表征要求及相应的评价方法。以 SiC 二极管为例，目前硅器件的最高允许结温一般为 175℃或 200℃，器件进行稳态工作寿命试验时以最高结温为基础，确定试验时的结温要求。SiC 二极管理论上最高允许结温超过 200℃，需要联合研制单位、用户，确定该类器件的最高允许结温，并确定相应的稳态工作寿命试验时的结温要求。

### ● 参数测试方法

由于宽禁带功率半导体器件属于高压、大功率半导体器件，其特性参数具有测试项目多、量程变化大、参数之间互相关联和部分瞬态参数快速突变等特点，使得对参数的测试，尤其是动态参数的测试变得十分困难，且现行标准中的部分参数测试方法并不适用于 SiC 功率半导体器件。虽然国内已有 SiC 功率半导体器件的产品规范，但现有的标准对产品性能表征的各类参数的要求并不完整，部分参数的测试未进行规定，且各个研制单位对于同一个参数的测试方法要求也不完全相同，因此对此类参数的测试方法和要求需要进一步研究、确定，并加以验证。

## ● 质量评价与可靠性检测

无论是 GJB 33 还是 GJB 128 都是在 Si 材料制作的器件上形成的, 对于 SiC 等第三代半导体材料制作的器件, 在引用现有标准对其进行检测和试验时会出现考核未满足 SiC 功率半导体器件自身特性、试验应力与考核要求偏低等问题。宽禁带功率半导体器件虽然应用前景广阔, 但相关器件的可靠性, 尤其是长期工作及严酷环境下的可靠性一直是最受关注的热点。以 SiC MOSFET 为例, 虽然 SiC 材料出众的电学和物理学特性能够使其耐受极高的电压, 但 SiC MOSFET 存在与轨迹器件不同的离子注入、栅极 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面态、导通电阻、栅极驱动电压等技术难点, 其阈值电压漂移、栅氧层可靠性、体二极管衰退等问题均会影响器件的长期可靠性, 应针对上述问题进行 SiC MOSFET 的质量评价要求研究。为了获得市场的广泛接受, 宽禁带功率半导体器件需要在长期可靠性方面继续努力, 宽禁带功率半导体器件质量与可靠性的评价、失效分析、寿命试验等均迫切需要规范与统一。

## ● 封装的新材料与新技术

由于 SiC 功率半导体器件通常应用于较为恶劣的高温或高辐照条件下, 其器件封装要求也较传统的 Si 半导体器件或集成电路的要求更高。目前 300~600℃ 工作条件下还缺乏成熟的封装技术, 这也成为限制 SiC 功率半导体器件应用的主要障碍之一, 其面临的困难和挑战表现在同时要求封装材料的化学特性、物理特性以及电学特性在高温环境下能保持稳定, 且不同封装材料间界面也需要很高的稳定性和热膨胀系数的匹配。气密性封装中, 对于基板材料、贴片材料、键合材料都需要针对 SiC 材料进行选择, 其他封装材料很据实际需求进

行选择。围绕封装的新方法、新材料等均亟需制定相关的标准。

我国需要密切联合相关的产业（材料、器件制造、检测等），研究并制定氮化镓和碳化硅器件标准化路线图并积极推进相关标准的研究和制定。我院现已联合部分研制单位开展宽禁带功率半导体分立器件的相关标准研究。

### 6.2.3 功率模块应用激增，带来标准研究新问题

随着半导体制造技术的发展，大功率半导体器件的功率逐步提高，但受封装的限制，单管芯器件功率的提高速度已逐渐放缓，但整机对大功率半导体器件的需求日益迫切，此时功率模块便应运而生。半导体分立器件模块是将两个或两个以上功率半导体分立器件或芯片按一定的电路结构相连接，用弹性硅凝胶或环氧树脂等材料灌封封在一个绝缘的外壳内，实现分立器件功能的模块，常用功率模块有 IGBT 模块、IPM 模块和 SiC 模块等。目前，功率模块已在汽车（特别是电动汽车）、空调等家用电器、电网、轨道交通、新能源发电（风能或太阳能）等领域获得了广泛的应用。

半导体分立器件模块是从功率型半导体分立器件的基础上发展起来的，其参数表征与功率型半导体分立器件基本一致。由于功率模块的体积、功率差异较大，因此标准化难度较大，但随着功率模块应用范围的逐步扩大，行业急需对功率模块进行标准化。

目前，该类产品国外尚无适用的通用规范，但相关研制单位已发布了若干与模块的质量控制要求相关的资料，重要的资料有：

- 美国 Microsemi 公司发布的《汽车用功率模块可靠性试验》，该文件参照汽车电子行业协会制定的 AEC Q101 制定，并根据模块的

特点补充了若干考核要求。

- 日本三菱公司发布的《功率模块可靠性》，该文件对模块的评价项目进行了详细的介绍。

- IEC 60747-15《半导体器件分立器件第 15 部分：隔离型功率半导体器件》规定了半导体分立器件模块的通用考核要求，可视为民用模块的通用规范。

为解决半导体分立器件模块产品缺乏通用规范的问题，我院于 2011 年负责制定了《半导体分立器件模块通用规范》，现该标准已报批。但在现阶段功率模块的应用过程中，存在以下问题：

- 参数指标不统一，部分参数缺少测试方法，影响功率模块性能评价和考核

- 缺少工艺过程控制要求

- 缺少统一的质量评价要求

因此，针对功率模块，后续需要进行的标准化工作有：

- 参数指标体系研究。

- 相关测试方法研究。

- 质量评价要求研究。

#### 6.2.4 针对不同领域的应用环境与要求制定相关标准

功率半导体分立器件作为中间器件，应用领域广泛，几乎包含了所有电气工业，但不同领域中器件的应用环境与应用要求均不相同，应制定具有针对性的功率半导体分立器件标准。以汽车级功率半导体器件为例，汽车的复杂工作环境对功率半导体器件可靠性和耐环境应力的要求极高，因此，汽车电子行业协会 AEC 制定的汽车用功率半导

体器件产品标准与消费级功率半导体器件产品标准有很大区别，具体要求如下：

- 试验项目应全面和应力应更高

汽车属于预期寿命较长的产品，汽车在工作过程中会经受高温、高湿、低温、温度迅速变化以及剧烈的振动等恶劣的自然环境，而汽车对关键组件（如安全气囊控制系统、刹车系统等）的可靠性要求极高，以上因素导致汽车厂商对汽车级元器件提出了极高的可靠性要求，其试验项目和应力水平远远高于普通的工业级功率半导体器件的要求，有的甚至高于军用功率半导体器件的要求。

- 抽样方案应较严

鉴定检验时，抽取的样品数量越多，越能代表被抽样批次产品的水平，试验结果的可信度越高，对被测器件的要求也越严格。汽车级功率半导体器件产品规范规定的抽样方案应更加严格，以温度循环试验为例，AEC Q101 规定的抽样方案为：抽取 77 只器件，不允许任何一只器件失效。GB/T12560-2006 规定的零失效时的抽样数为 11 只器件。

- 失效判据应较严格

功率半导体器件在进行各项试验（特别是寿命试验）后，电参数一般会出现变化。电参数变化率的多少反映了产品一致性的好坏，可以从一定程度上反映产品长期可靠性。汽车的最低设计寿命为 15 年，因此，对电子元器件可靠性有较高的要求，不允许产品试验后电参数出现较大变化。AEC Q101 规定试验后电测试（除漏电流等变化较大的参数外）的数值与初始值的变化不得超过 20%，超过 20%可判定为

未通过试验。

建议针对不同应用场合制定相关技术标准，如轨道交通用 IGBT、电力系统用 IGBT、新能源汽车用 IGBT、平板全压接 IGBT、电动车辆用功率 MOSFET、快恢复二极管 FRD 等。

#### 6.2.5 鼓励发展高质量的团体标准

功率半导体行业目前正处于高速发展期，创新技术与新一代器件层出不穷，这些创新成果欲转化为标准，形成知识产权的保护则需要快速的标准响应机制。团体标准则刚好满足这类需求，因其具有制修订速度较快，能及时响应市场需求；能迅速跟进新技术、新产品，及时填补标准空白，有效促进创新成果的转化应用；技术指标一般处于国际领先水平，有利于推动相关产品和服务质量提升，增强产品、服务和产业的市场竞争力等特点。应加快培育发展团体标准，以便充分利用市场资源，满足科技创新和产业发展需求。

以宽禁带功率半导体器件为例，开展宽禁带半导体行业标准化工作以来，已立团体标准项目十余项，涉及衬底、外延及器件模块等领域，目前已发布《碳化硅单晶》、《碳化硅外延片表面缺陷测试方法》、《碳化硅外延层载流子浓度测定-汞探针电容-电压法》和《电动汽车用功率半导体器件可靠性试验通用要求及试验方法》共 4 项标准，还有多项标准正处于初稿或征求意见稿阶段。通过一系列宽禁带团体标准的制定与发布，为我国宽禁带半导体产业规范有序、快速健康发展奠定了良好基础。

#### 6.2.6 标准体系后续构建应注重军标与民标的协调

目前，我国功率半导体分立器件的军标体系与民标体系现状对比

如下：

- 相对独立，自成体系；（军标参照 MIL、民标参照 IEC）
- 基础标准差别较小；
- 引用范围存在交叉；
- 产品规范结构不同；
- 军用标准中质量与可靠性水平大部分高于民用；
- 认证体系不同。

在后续功率半导体分立器件的标准化体系构建工作中，应将军标与民标的协调发展纳入统筹规划各环节中，实现从功率半导体器件基础研究到产业发展创新链路合理有序的全过程管理。在产业发展路径上应做好顶层设计，强化功率半导体器件产业中双方协作意识与凝聚共识，创建基础标准统一、产品规范互补的标准体系，打破军标与民标自成体系、自我封闭的格局，建立线上线下协同的宽禁带产业信息协作平台，提高功率半导体器件科技创新效率，解决军用与民用功率半导体器件信息不流通问题，消除民品先进宽禁带功率半导体器件与装备使用可靠性要求存在的技术壁垒。

附录1 功率半导体分立器件 IEC 标准转化情况

| 序号  | 国际标准标号和名称  | 我国标准编号和名称/计划号   | 转化程度 |
|-----|--|---|------|
| 1.  | IEC 60747-1 (2010) 半导体器件第1部分: 总则                         | GB/T 17573-1998 半导体器件分立器件和集成电路第1部分: 总则                | IDT  |
| 2.  | IEC 60747-10 (1991) 半导体器件第10部分: 分立器件和集成电路总规范             | GB/T 4589.1-2006 半导体器件第10部分: 分立器件和集成电路总规范             | IDT  |
| 3.  | IEC 60749-1 (2002) 半导体器件机械和气候试验方法第1部分: 总则                | GB/T 4937.1-2006 半导体器件机械和气候试验方法第1部分: 总则               | IDT  |
| 4.  | IEC 60749-2 (2002) 半导体器件机械和气候试验方法第2部分: 低气压               | GB/T 4937.2-2006 半导体器件机械和气候试验方法第2部分: 低气压              | IDT  |
| 5.  | IEC 60749-3 (2017) 半导体器件机械和气候试验方法第3部分: 外部目检              | GB/T 4937.3-2012 半导体器件机械和气候试验方法第3部分: 外部目检             | IDT  |
| 6.  | IEC 60749-4 (2017) 半导体器件机械和气候试验方法第4部分: 强加速稳态湿热试验 (HAST)  | GB/T 4937.4-2012 半导体器件机械和气候试验方法第4部分: 强加速稳态湿热试验 (HAST) | IDT  |
| 7.  | IEC 60749-5 (2017) 半导体器件机械和气候试验方法第5部分: 稳态温湿度偏置寿命试验       | 20130106-T-339 (批准阶段)                                 | -    |
| 8.  | IEC 60749-6 (2017) 半导体器件机械和气候试验方法第6部分: 高温贮存              | 20130107-T-339 (批准阶段)                                 | -    |
| 9.  | IEC 60749-7 (2011) 半导体器件机械和气候试验方法第7部分: 内部水汽含量测试和其他残余气体分析 | 2018100261 (计划网上公示)                                   | -    |
| 10. | IEC 60749-8 (2002) 半导体器件机械和气候试验方法第8部分: 密封                | 2018100260 (计划网上公示)                                   | -    |
| 11. | IEC 60749-9 (2017) 半导体器件机械和气候试验方法第9部分: 标志耐久性             | -   | -    |
| 12. | IEC 60749-10 (2002) 半导体器件机械和气候试验方法第10部分: 机械冲击            | 2018100263 (计划网上公示)                                   | -    |



| 序号  | 国际标准标号和名称  | 我国标准编号和名称/计划号   | 转化程度 |
|-----|--|---|------|
| 13. | IEC 60749-11(2002) 半导体器件机械和气候试验方法第 11 部分: 快速温度变化 - 双液槽法                      | GB/T 4937.11-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 11 部分: 快速温度变化 - 双液槽法                    | IDT  |
| 14. | IEC 60749-12(2017) 半导体器件机械和气候试验方法第 12 部分: 变频振动                               | GB/T 4937.12-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 12 部分: 变频振动                             | IDT  |
| 15. | IEC 60749-13(2018) 半导体器件机械和气候试验方法第 13 部分: 盐雾                                 | GB/T 4937.13-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 13 部分: 盐雾                               | IDT  |
| 16. | IEC 60749-14(2003) 半导体器件机械和气候试验方法第 14 部分: 引线牢固度                              | GB/T 4937.14-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 14 部分: 引线牢固度                            | IDT  |
| 17. | IEC 60749-15(2010) 半导体器件机械和气候试验方法第 15 部分: 通孔安装器件的耐焊接热                        | GB/T 4937.15-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 15 部分: 通孔安装器件的耐焊接热                      | IDT  |
| 18. | IEC 60749-16(2003) 半导体器件机械和气候试验方法第 16 部分: 粒子碰撞噪声检测 (PIND)                    | 2018100099 (计划网上公示)   | -    |
| 19. | IEC 60749-17 (2019) 半导体器件机械和气候试验方法第 17 部分: 中子辐射                              | GB/T 4937.17-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 17 部分: 中子辐射                             | IDT  |
| 20. | IEC 60749-18(2019) 半导体器件机械和气候试验方法第 18 部分: 离子辐射 (总剂量)                         | GB/T 4937.18-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 18 部分: 离子辐射 (总剂量)                       | IDT  |
| 21. | IEC 60749-19 (2010) 半导体器件机械和气候试验方法第 19 部分: 芯片剪切强度                            | GB/T 4937.19-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 19 部分: 芯片剪切强度                           | IDT  |
| 22. | IEC60749-20(2008) 半导体器件机械和气候试验方法第 20 部分: 塑封表面安装器件的耐湿和耐焊接热                    | GB/T 4937.20-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 20 部分: 塑封表面安装器件的耐湿和耐焊接热                 | IDT  |
| 23. | IEC 60749-20-1 (2019) 半导体器件机械和气候试验方法第 20-1 部分: 对耐焊接热和潮湿敏感的表面安装器件的操作、包装、标志和运输 | GB/T 4937.201-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 20-1 部分: 对耐焊接热和潮湿敏感的表面安装器件的操作、包装、标志和运输 | IDT  |
| 24. | IEC 60749-21(2011) 半导体器件机械和气候试验方法第 21 部分: 可焊性                                | GB/T 4937.21-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 21 部分: 可焊性                              | IDT  |

| 序号  | 国际标准标号和名称  | 我国标准编号和名称/计划号   | 转化程度 |
|-----|--|---|------|
| 25. | IEC 60749-22(2002) 半导体器件机械和气候试验方法第 22 部分: 键合强度                         | GB/T 4937.22-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 22 部分: 键合强度               | IDT  |
| 26. | IEC 60749-23 (2011) 半导体器件机械和气候试验方法第 23 部分: 高温工作寿命                      | 20184235-T-339 (起草阶段)                                       | -    |
| 27. | IEC 60749-24(2004) 半导体器件机械和气候试验方法第 24 部分: 加速潮湿阻抗 - 无偏置强加速压力试验          | 20141817-T-339 (批准阶段)                                       | -    |
| 28. | IEC 60749-25(2003) 半导体器件机械和气候试验方法第 25 部分: 温度循环                         | 20141818-T-339 (批准阶段)                                       | -    |
| 29. | IEC 60749-26(2018) 半导体器件机械和气候试验方法第 26 部分: 静电放电灵敏度试验 - 人体模式             | 20184231-T-339 (起草阶段)                                       | -    |
| 30. | IEC 60749-27(2012) 半导体器件机械和气候试验方法第 27 部分: 静电放电灵敏度试验 - 机械模式             | 20184234-T-339 (起草阶段)                                       | -    |
| 31. | IEC 60749-28(2017) 半导体器件机械和气候试验方法第 28 部分: 静电放电灵敏度试验 - 直接接触带电器件模式 (CDM) | -   | -    |
| 32. | IEC 60749-29(2011) 半导体器件机械和气候试验方法第 29 部分: 门锁试验                         | 2018102478 (计划网上公示)   | -    |
| 33. | IEC 60749-30(2011) 半导体器件机械和气候试验方法第 30 部分: 非密封表面安装器件可焊性之前的预处理           | GB/T 4937.30-2018 半导体器件机械和气候试验方法第 30 部分: 非密封表面安装器件可焊性之前的预处理 | IDT  |
| 34. | IEC 60749-31(2002) 半导体器件机械和气候试验方法第 31 部分: 塑封器件的易燃性 (内部引起的)             | 20184233-T-339 (起草阶段)                                       | -    |
| 35. | IEC 60749-32 (2010) 半导体器件机械和气候试验方法第 32 部分: 塑封器件的易燃性 (外部引起的)            | 20184232-T-339 (起草阶段)                                       | -    |
| 36. | IEC 60749-33(2004) 半导体器件机械和气候试验方法第 33 部分: 加速潮湿阻抗 - 无偏置高压               | 20141819-T-339 (批准阶段)                                       | -    |

| 序号  | 国际标准标号和名称   | 我国标准编号和名称/计划号         | 转化程度 |
|-----|---|-----------------------|------|
| 37. | IEC 60749-34 (2010) 半导体器件机械和气候试验方法第 34 部分: 功率循环                     | 20162479-T-339 (起草阶段) | -    |
| 38. | IEC 60749-35 (2006) 半导体器件机械和气候试验方法第 35 部分: 塑封电子元件的声学显微方法            | 20162477-T-339 (起草阶段) | -    |
| 39. | IEC 60749-36 (2003) 半导体器件机械和气候试验方法第 36 部分: 恒定加速度                    | 2018100135 (计划网上公示)   | -    |
| 40. | IEC 60749-37 (2008) 半导体器件机械和气候试验方法第 37 部分: 手持电子产品用元器件桌水平面跌落试验方法     | -                     | -    |
| 41. | IEC 60749-38 (2008) 半导体器件机械和气候试验方法第 38 部分: 半导体器件的软错误试验方法            | -                     | -    |
| 42. | IEC 60749-39 (2006) 半导体器件机械和气候试验方法第 39 部分: 半导体元器件使用原材料的潮气扩散率和水溶解性测量 | -                     | -    |
| 43. | IEC 60749-40 (2011) 半导体器件机械和气候试验方法第 40 部分: 使用张力仪的桌水平面跌落试验           | -                     | -    |
| 44. | IEC 60749-41 半导体器件机械和气候试验方法第 41 部分: 非易失性存储器可靠性试验方法 (制定中)            |                       |      |
| 45. | IEC 60749-42 (2014) 半导体器件机械和气候试验方法第 42 部分: 温湿贮存                     | -                     | -    |
| 46. | IEC 60749-43 (2011) 半导体器件机械和气候试验方法第 43 部分: 集成电路 (IC) 可靠性鉴定方案指南      | -                     | -    |
| 47. | IEC 60749-44 (2016) 半导体器件机械和气候试验方法第 44 部分: 半导体器件的中子辐照软错误试验方法        | -                     | -    |
| 48. | IEC 62373 (2006) MOSFET 的温度偏置稳态试验                                   | -                     | -    |

| 序号  | 国际标准标号和名称  | 我国标准编号和名称/计划号   | 转化程度 |
|-----|--|---|------|
| 49. | IEC 62374 (2007) 半导体器件 - 栅绝缘薄膜的依靠介质击穿时间试验  | -   | -    |
| 50. | IEC 62374-1 (2010) 内部金属层的 TDDDB 试验   | -   | -    |
| 51. | IEC 62415 (2010) 恒流电迁移试验   | -   | -    |
| 52. | IEC 62416 (2010) 关于 MOS 晶体管的热载流子试验   | -   | -    |
| 53. | IEC 62417 (2010) 半导体器件 - MOSFET 自由离子试验   | -   | -    |
| 54. | IEC 62418 (2010) 半导体器件 - 金属化空洞应力试验   | -   | -    |
| 55. | IEC 62615 (2010) 半导体器件 - 静电放电敏感度试验 - 传输线脉冲 - 元件水平  | -   | -    |
| 56. | IEC 62435-1: 2017 半导体器件长期贮存 第 1 部分: 总则   | 20182268-T-339  | -    |
| 57. | IEC 62435-2: 2017 半导体器件长期贮存 第 2 部分: 失效机理   | 20182267-T-339  | -    |
| 58. | IEC 62435-4: 2018 半导体器件长期贮存 第 4 部分: 存储   | -   | -    |
| 59. | IEC 62435-5: 2017 半导体器件长期贮存 第 5 部分: 芯片和晶圆  | 20182266-T-339  | -    |
| 60. | IEC 62435-6: 2018 半导体器件长期贮存 第 6 部分: 包装或成品设备  | -   | -    |
| 61. | IEC 62483 (2013) 锡和锡合金表面镀层锡须生长测量方法和环境接受性试验   | -   | -    |
| 62. | IEC 60747-2 (2000) 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 半导体器件分立器件和集成电路第 2 部分: 整流二极管  | EQV  |
| 63. | IEC 60747-2-1 (1989) 半导体器件分立器件第 2 部分: 整流二极管第 1 节: 100A 以下环境和管壳额定整流二极管 (包括雪崩整流二极管) 空白详细规范 | GB/T 6351-1998 半导体器件分立器件第 2 部分: 整流二极管第 1 节: 100A 以下环境和管壳额定整流二极管 (包括雪崩整流二极管) 空白详细规范  | IDT  |
| 64. | IEC 60747-2-2 (1993) 半导体器件分立器件第 2 部分: 整流二极管第 2 节: 100A 以上环境和管壳额定整流二极管 (包括雪崩整流二极管) 空白详细规范 | GB/T 16894-1997 半导体器件分立器件第 2 部分: 整流二极管第 2 节: 100A 以上环境和管壳额定整流二极管 (包括雪崩整流二极管) 空白详细规范 | IDT  |

| 序号  | 国际标准标号和名称   | 我国标准编号和名称/计划号   | 转化程度 |
|-----|---|---|------|
| 65. | IEC 60747-6 (2000) 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管                                      | GB/T 15291-2015 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管                                       | IDT  |
| 66. | IEC 60747-6-1 (1989) 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 1 节：100A 以下环境和管壳额定反向阻断三极闸流管空白详细规范 | GB/T 6352-1998 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 1 节：100A 以下环境和管壳额定反向阻断三极闸流管空白详细规范     | IDT  |
| 67. | IEC 60747-6-2 (1991) 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 2 节：100A 以下环境和管壳额定双向三极闸流管空白详细规范   | GB/T 6590-1998 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 2 节：100A 以下环境和管壳额定双向三极闸流管空白详细规范       | IDT  |
| 68. |   | GB/T 13150-2005 半导体器件分立器件电流大于 100A、环境和管壳额定的双向三极晶闸管空白详细规范                  | EQV  |
| 69. | IEC 60747-6-3 (1993) 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 3 节：100A 以上环境和管壳额定反向阻断三极闸流管空白详细规范 | GB/T 13151-2005 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 3 篇电流大于 100A、环境和管壳额定的反向阻断三极晶闸管空白详细规范 | IDT  |
| 70. | IEC 60747-7 (2010) 半导体器件分立器件第 7 部分：双极型晶体管                                   | GB/T 4587-1994 半导体分立器件和集成电路第 7 部分：双极型晶体管（修订中）                             | IDT  |
| 71. | IEC 60747-7-1 (1989) 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 1 节：环境额定高、低频放大用双极型晶体管空白详细规范     | GB/T 6217-1998 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 1 节：环境额定高、低频放大用双极型晶体管空白详细规范         | IDT  |
| 72. | IEC 60747-7-2 (1989) 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 2 节：管壳额定低频放大用双极型晶体管空白详细规范       | GB/T 7577-1996 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 2 节：管壳额定低频放大用双极型晶体管空白详细规范           | IDT  |
| 73. | IEC 60747-7-3 (1991) 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 3 节：开关用双极型晶体管空白详细规范             | GB/T 6218-1996 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 3 节：开关用双极型晶体管空白详细规范                 | IDT  |
| 74. | IEC 60747-7-4 (1991) 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 4 节：管壳额定高频放大用双极型晶体管空白详细规范       | GB/T 7576-1998 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 4 节：管壳额定高频放大用双极型晶体管空白详细规范           | IDT  |

| 序号  | 国际标准标号和名称   | 我国标准编号和名称/计划号   | 转化程度 |
|-----|---|---|------|
| 75. | IEC 60747-7-5 (2005) 半导体器件 - 分立器件 - 第 7-5 部分: 功率开关用双极晶体管                    | --  | -    |
| 76. | IEC 60747-8 (2010) 半导体器件分立器件第 8 部分: 场效应晶体管                                  | GB/T 4586-1994 半导体器件分立器件第 8 部分: 场效应晶体管 (修订中)                          | IDT  |
| 77. | IEC 60747-8-1 (1987) 半导体器件分立器件第 8 部分: 场效应晶体管第 1 节: 1GHz、5W 以下单栅场效应晶体管空白详细规范 | GB/T 6219-1998 半导体器件分立器件第 8 部分: 场效应晶体管第 1 节: 1GHz、5W 以下单栅场效应晶体管空白详细规范 | IDT  |
| 78. | IEC 60747-8-3 (1995) 半导体器件分立器件第 8 部分: 场效应晶体管第 3 节: 管壳额定开关用场效应晶体管空白详细规范      | GB/T 15449-1995 半导体器件分立器件第 8 部分: 场效应晶体管第 3 节: 管壳额定开关用场效应晶体管空白详细规范     | IDT  |
| 79. | IEC 60747-8-4 (2004) 半导体分立器件第 8-4 部分: 功率开关用 MOS 场效应晶体管                      | --  | -    |
| 80. | IEC 60747-9 (2007) 半导体器件分立器件第 9 部分: 绝缘栅双极晶体管                                | GB/T 29332-2012 半导体器件分立器件第 9 部分: 绝缘栅双极晶体管                             | IDT  |
| 81. | IEC 60747-11 (1985) 半导体器件第 11 部分: 分立器件分规范                                   | GB/T 12560-1999 半导体器件第 11 部分: 分立器件分规范                                 | IDT  |
| 82. | IEC60747-15 (2010) 半导体器件 - 分立器件 - 第 15 部分: 功率隔离半导体器件                        | -   | -    |
| 83. | IEC60747-17 (201X) 半导体器件 - 分立器件 - 第 17 部分: 基本和加强隔离用电磁电容耦合器                  | -   | -    |

附录2 功率半导体分立器件现行民用标准清单

| 序号  | 标准类别 | 标准层次 | 标准编号               | 标准名称  |
|-----|------|------|--------------------|---|
| 1.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.1-2006   | 半导体器件机械和气候试验方法第1部分：总则                               |
| 2.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.2-2006   | 半导体器件机械和气候试验方法第2部分：低气压                              |
| 3.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.3-2012   | 半导体器件机械和气候试验方法第3部分：外部目检                             |
| 4.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.4-2012   | 半导体器件机械和气候试验方法第4部分：强加速稳态湿热试验（HAST）                  |
| 5.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.11-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第11部分：快速温度变化—双液槽法                     |
| 6.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.12-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第12部分：变频振动                            |
| 7.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.13-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第13部分：盐雾                              |
| 8.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.14-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第14部分：引线牢固度                           |
| 9.  | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.15-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第15部分：通孔安装器件的耐焊接热                     |
| 10. | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.17-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第17部分：中子辐射                            |
| 11. | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.18-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第18部分：离子辐射（总剂量）                       |
| 12. | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.19-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第19部分：芯片剪切强度                          |
| 13. | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.20-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第20部分：塑封表面安装器件的耐湿和耐焊接热                |
| 14. | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.201-2018 | 半导体器件机械和气候试验方法第20-1部分：对耐焊接热和潮湿敏感的表面安装器件的操作、包装、标志和运输 |
| 15. | 试验方法 | 国标   | GB/T 4937.21-2018  | 半导体器件机械和气候试验方法第21部分：可焊性                             |

|     |        |    |                   |  |
|-----|--------|----|-------------------|--|
| 16. | 试验方法   | 国标 | GB/T 4937.22-2018 | 半导体器件机械和气候试验方法第22部分：键合强度                                   |
| 17. | 试验方法   | 国标 | GB/T 4937.30-2018 | 半导体器件机械和气候试验方法第30部分：非密封表面安装器件可焊性之前的预处理                     |
| 18. | 基础标准   | 国标 | GB/T 11499-2001   | 半导体分立器件文字符号  |
| 19. | 基础标准   | 国标 | GB/T 249-2017     | 半导体分立器件型号命名方法  |
| 20. | 基础标准   | 国标 | GB 7581-1987      | 半导体分立器件外形尺寸  |
| 21. | 测试方法   | 国标 | GB/T 15292-1994   | 晶闸管测试方法逆导三极晶闸管   |
| 22. | 测试方法   | 国标 | GB/T 15293-1994   | 晶闸管测试方法可关断晶闸管  |
| 23. | 基础标准   | 国标 | GB/T 7423.1-1987  | 半导体器件散热器通用技术条件   |
| 24. | 基础标准   | 国标 | GB/T 7423.2-1987  | 半导体器件散热器型材散热器  |
| 25. | 基础标准   | 国标 | GB/T 7423.3-1987  | 半导体器件散热器叉指形散热器   |
| 26. | 产品规范   | 国标 | GB/T 17573-1998   | 半导体器件分立器件和集成电路第1部分：总则                                      |
| 27. | 产品规范   | 国标 | GB/T 4589.1-2006  | 半导体器件第10部分：分立器件和集成电路总规范                                    |
| 28. | 测试方法   | 国标 | GB/T 4023-2015    | 半导体器件分立器件和集成电路第2部分：整流二极管                                   |
| 29. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 6351-1998    | 半导体器件分立器件第2部分：整流二极管第1节：100A以下环境和管壳额定整流二极管（包括雪崩整流二极管）空白详细规范 |
| 30. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 16894-1997   | 半导体器件分立器件第2部分：整流二极管第2节：100A以上环境和管壳额定整流二极管（包括雪崩整流二极管）空白详细规范 |
| 31. | 测试方法   | 国标 | GB/T 15291-2015   | 半导体器件分立器件第6部分：晶闸管  |
| 32. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 6352-1998    | 半导体器件分立器件第6部分：晶闸管第1节：100A以下环境和管壳额定反向阻断三极闸流管空白详细规范          |



|     |        |    |                 |   |
|-----|--------|----|-----------------|---|
| 33. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 6590-1998  | 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 2 节：100A 以下环境和管壳额定双向三极闸流管空白详细规范      |
| 34. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 13150-2005 | 半导体器件分立器件电流大于 100A、环境和管壳额定的双向三极晶闸管空白详细规范                  |
| 35. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 13151-2005 | 半导体器件分立器件第 6 部分：晶闸管第 3 篇电流大于 100A、环境和管壳额定的反向阻断三极晶闸管空白详细规范 |
| 36. | 测试方法   | 国标 | GB/T 4587-1994  | 半导体分立器件和集成电路第 7 部分：双极型晶体管（修订中）                            |
| 37. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 6217-1998  | 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 1 节：环境额定高、低频放大用双极型晶体管空白详细规范        |
| 38. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 7577-1996  | 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 2 节：管壳额定低频放大用双极型晶体管空白详细规范          |
| 39. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 6218-1996  | 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 3 节：开关用双极型晶体管空白详细规范                |
| 40. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 7576-1998  | 半导体器件分立器件第 7 部分：双极晶体管第 4 节：管壳额定高频放大用双极型晶体管空白详细规范          |
| 41. | 测试方法   | 国标 | GB/T 4586-1994  | 半导体器件分立器件第 8 部分：场效应晶体管（修订中）                               |
| 42. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 6219-1998  | 半导体器件分立器件第 8 部分：场效应晶体管第 1 节：1GHz、5W 以下单栅场效应晶体管空白详细规范      |
| 43. | 空白详细规范 | 国标 | GB/T 15449-1995 | 半导体器件分立器件第 8 部分：场效应晶体管第 3 节：管壳额定开关用场效应晶体管空白详细规范           |
| 44. | 测试方法   | 国标 | GB/T 29332-2012 | 半导体器件分立器件第 9 部分：绝缘栅双极晶体管                                  |

|     |      |    |                 |                              |
|-----|------|----|-----------------|------------------------------|
| 45. | 产品规范 | 国标 | GB/T 12560-1999 | 半导体器件第 11 部分：分立器件分规范         |
| 46. | 基础标准 | 行标 | SJ 21062-2015   | 半导体芯片产品处理、包装和贮存的操作要求         |
| 47. | 基础标准 | 行标 | SJ/T 9533-1993  | 半导体分立器件质量分等标准                |
| 48. | 基础标准 | 行标 | SJ/T 10149-1991 | 电子元器件图形库半导体分立器件图形            |
| 49. | 试验方法 | 行标 | SJ/T 11586-2016 | 半导体器件 10keV 低能 X 射线总剂量辐射试验方法 |
| 50. | 产品规范 | 行标 | SJ/T 10416-1993 | 半导体分立器件芯片总规范                 |
| 51. | 详细规范 | 行标 | SJ 5033.43-1994 | 半导体分立器件 2CZ104 型硅开关整流二极管详细规范 |
| 52. | 详细规范 | 行标 | SJ 5033.44-1994 | 半导体分立器件 2CZ105 型硅开关整流二极管详细规范 |
| 53. | 详细规范 | 行标 | SJ 5033.45-1994 | 半导体分立器件 2CZ58 型硅整流二极管详细规范    |
| 54. | 详细规范 | 行标 | SJ 5033.46-1994 | 半导体分立器件 2CZ59 型硅整流二极管详细规范    |
| 55. | 详细规范 | 行标 | SJ 5033.47-1994 | 半导体分立器件 2CZ117 型硅整流二极管详细规范   |
| 56. | 详细规范 | 行标 | SJ 5033.50-1994 | 半导体分立器件 QL73 型硅三相桥式整流器详细规范   |



地址：北京市东城区安定门东大街1号  
邮政编码：100007  
联系电话：010-64102999  
官方网址：[www.cesi.cn](http://www.cesi.cn)