



SiC 功率器件与模块的DTCO问题

清华大学

集成电路学院

王 燕

2022年10月28日



提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



发展新能源是我们的国家战略

- 中国的能源结构——多煤少油，石油靠进口
- 汽车消耗了大部分石油能源
- 石油战略储备——90天左右安全期
- 汽车保有量还有很大上升空间——购车需摇号
- 节能减排已成为汽车业发展的重大课题
- 电动车是发展自动驾驶技术的基础
- 实现汽车行业的全球领先



发展电动汽车是我们的国家战略

时间	地区
2024	意大利·罗马
2025	挪威、墨西哥、希腊·雅典、西班牙·马德里、法国·巴黎
2029	美国·加利福尼亚州
2030	中国·海南、荷兰、英国、印度、以色列、日本·东京
2035	加拿大、日本
2040	西班牙

2022年3月比亚迪宣布停产燃油车

2025年北京汽车、长安汽车停售燃油车



SiC在电动汽车应用中的趋势

电动汽车市场呈现出三大趋势:

- 针对续航里程对**电池容量**提出了高的需求;
- 在相同的电池容量的情况下, **效率提升**可以把里程提升上去, 同时也可以实现更快的充电时间;
- 电压平台的**高压化趋势**可有效减轻整车重量。

三个市场趋势都需要SiC功率器件的作用



SiC在电动汽车应用中的趋势

SiC 战略市场: 电动汽车(EV)/混动汽车(HEV)



电动汽车趋势

- EV是未来几年SiC的主要驱动力 (约占TAM的60%)
- SiC每年可增加多达750美元的电池续航里程
- 加利福尼亚签署了行政命令, 到2030年实现500万辆电动汽车上路的目标
- 到目前为止, 2019年欧洲的电动汽车销量增长了67%

	NISSAN LEAF	CHEVROLET VOLT	TOYOTA PRIUS PLUG-IN	TESLA MODEL S	KIA SOUL EV
每次充电续航里程	76英里	38英里	11英里	208英里	120英里
充电时间	4小时	7小时	4小时	10小时	5小时

据Yole发布的《功率碳化硅 (SiC) : 材料、器件及应用-2019版》报告预计, 到2024年, 碳化硅 (SiC) 功率半导体市场规模将增长至20亿美元。其中, 汽车市场最重要的驱动因素, 其碳化硅 (SiC) 功率半导体市场份额到2024年预计将达到50%。

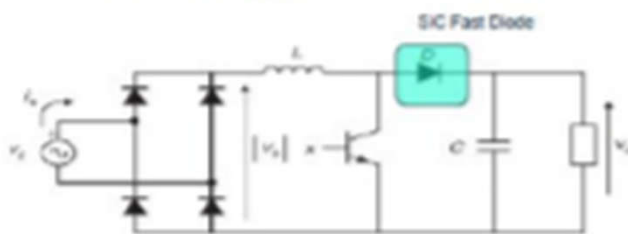


SiC在5G电源和开关电源领域的应用

SiC 战略市场：5G 电源和开关电源(SMPS)

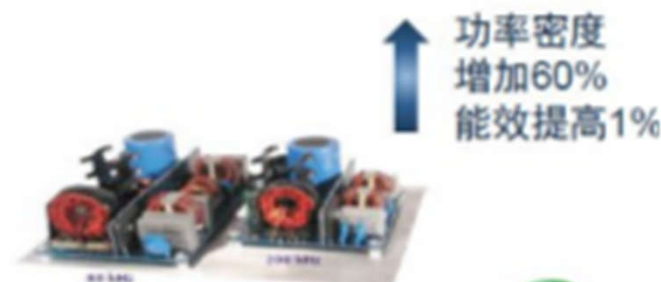


PFC 升压转换器



优势

- 更高能效(98%)
- 更高频率
- 更高功率密度
- 双向电源流
- 更少器件数

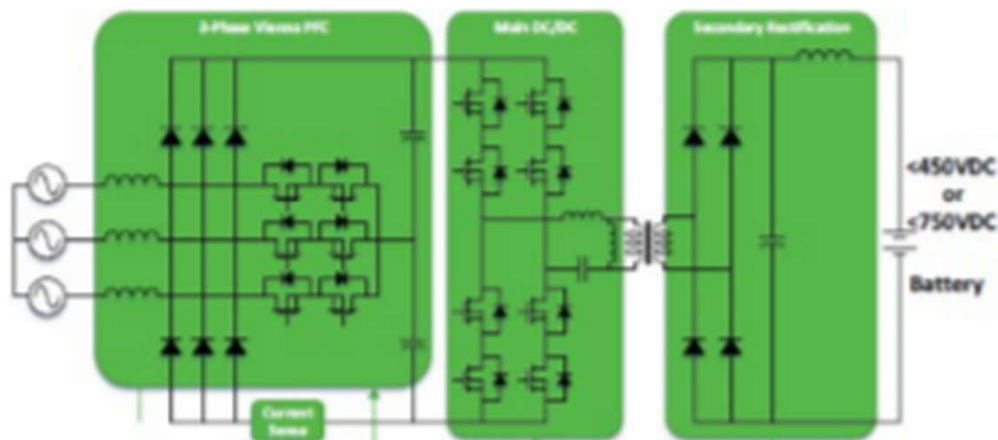


在5G电源和开关电源市场，基于碳化硅器件的PFC升压转换器，能够在使用更少器件数的前提下，实现更高的功率密度。功率密度每增加60%，能效可提升1%，进而达到最高98%的能效等。



SiC在充电桩领域的应用

SiC 战略市场：电动汽车充电器/桩



电动汽车充电桩趋势

- 现有充电桩多数为1级/2级
- 消费者要求等效于在加油站加满油（直流充电）
- 随着功率和速度的提高，对SiC的需求越来越强
- 市场受政府政策驱动

电动汽车充电桩类型

kW	充满电的时间	速度	描述	等级
250	5-7 分钟	超快	超高直流非车载充电 - 相当于加油站加油	4级
44	25-35分钟	快	直流非车载充电	3级
22	3小时	中等	3相交流充电 车载充电	2级
11	10小时	慢	单相交流充电 车载充电	1级

进入2020年之后，中国将充电桩加入到“新基建”项目内。基于碳化硅器件的电动汽车充电桩（器）功率可达250kW，能够为用户带来相当于在加油站加油的直流充电体验。



SiC在可再生能源领域的应用

SiC 战略市场：太阳能逆变器

增加的半导体含量

旧的

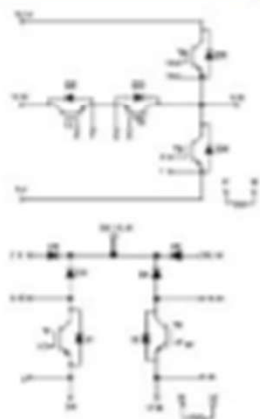


无半导体含量

新的



大的功率半导体
用于电源转换



太阳能逆变器趋势

- 如今已安装307吉瓦，到2025年将安装500+吉瓦
- 全球1%的电力来自太阳能，预计未来10-15年将达到15%
- 太阳能使个人能够将电力卖回电网
- 从硅转移到碳化硅(SiC)半导体可提高能效，减小尺寸并降低成本

受政府政策驱动

“欧盟的20-20-20目标（到2020年，能效提高20%，二氧化碳排放量降低20%，可再生能源达到20%）” - ESMIG

“[NEA]设定了清洁能源目标，到2030年满足中国20%的能源需求。” - CNN

在新能源领域，每年太阳能逆变器的安装量也在持续增长，预计未来10-15年将会有15%的能源（目前是1%）来自太阳能。可再生能源并非新市场，它一直处于快速增长中，有300多GW的安装能量。其中高压高频率器件在太阳能逆变器里都有非常大的市场空间。



提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



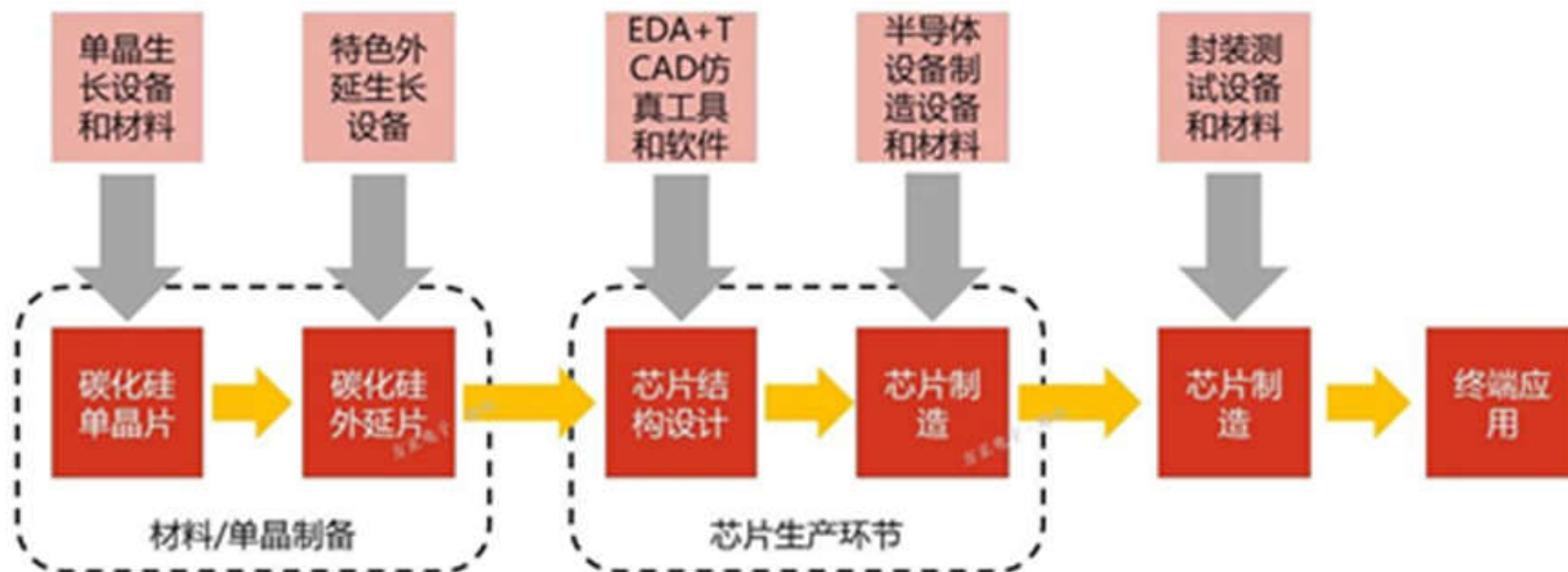
SiC发展的产业链

Cree、英飞凌和Rohm三家公司占据了近全球碳化硅晶圆市场70%份额。我国碳化硅产业链已初具规模，是国际上为数不多可在各个环节均紧随国际先进水平的国家，具备碳化硅产业化基础。

产业链		主要代表企业
衬底	国际厂商	Cree、道康宁、Rohm、新日铁住金、Norstel
	中国大陆	山东天岳、天科合达、河北同光、世纪金光
外延	国际厂商	Cree、道康宁、Rohm、新日铁住金、昭和电工、三菱电机、英飞凌、Norstel
	中国大陆	东莞天城、瀚天天成、世纪金光
器件	国际厂商	IDM Cree、GE、OnSemi、GeneSiC、Microsemi、Rohm、三菱电机、东芝、英飞凌、ST
		Fabless usCI 等
		Foundry 德国 X-Fab 等
	中国大陆	IDM 中电科 55 所、13 所，中车时代、扬杰电子、基本半导体、泰科天润、苏州能讯高能、世纪金光、嘉兴斯达
		Fabless 上海瞻芯
		Foundry 厦门三安



SiC发展的产业链



- 设计环节：电路结构简单，不需要像数字逻辑芯片投入大量资本；
- 制造环节：不需要追赶摩尔定律，核心设备三—四台，产线对先进设备依赖度不高；
- 封装环节：高温封装对可靠性要求高，需要新材料，价值量占比显著提高。



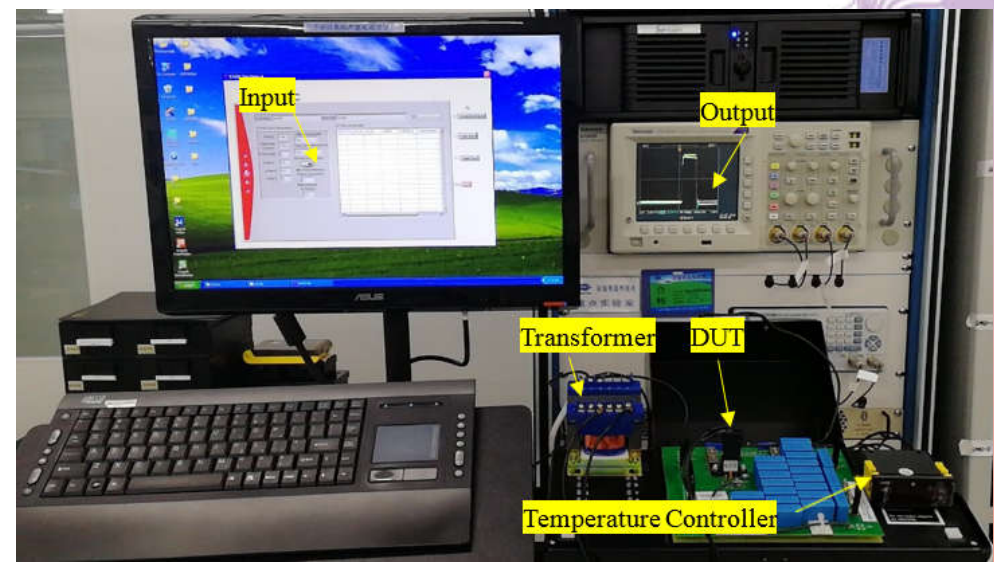
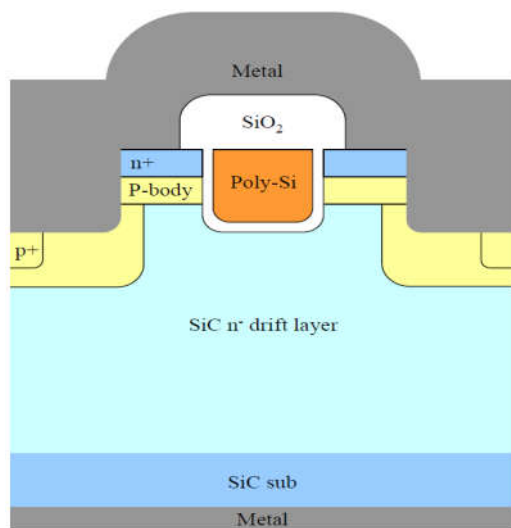
设计环节

- SiC功率产业的核心环节**被认为不在于设计**，而是在于材料选择、晶圆制造、封装和模组集成。
 - 功率半导体**电路简单**，且对运算功能要求低，因此不需要在IC设计环节中非常重要的控制芯片架构、IP、指令集、设计流程、设计软件工具等；
 - 设计环节难点和重点在对器件进行**参数设计、调整**和**性能改良**。
- SiC功率器件设计的**核心技术壁垒**在基于系统know-how能力开发定制化产品。
 - 对同一类型的功率器件，不同下游场景应用对应着不同的功率和频率需求。因此，在同一产品结构设计上，通过**差异化参数调整**，先满足客户基础指标要求，然后再实现功耗与成本的最优解。¹⁴



制造环节

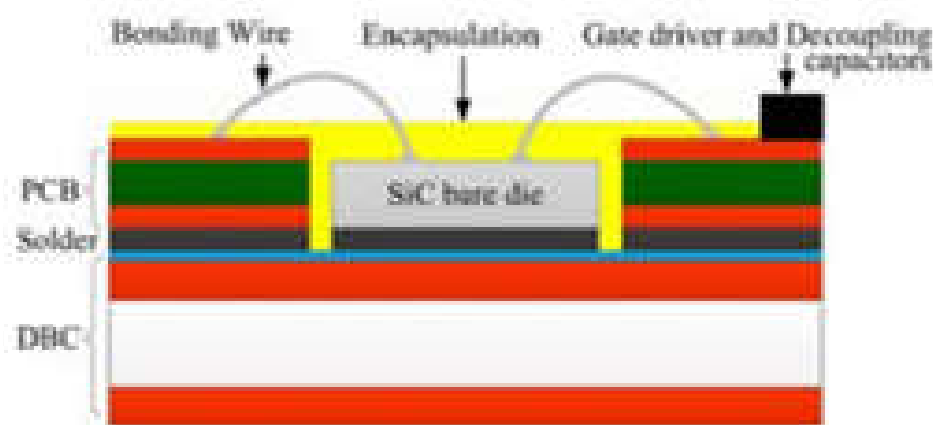
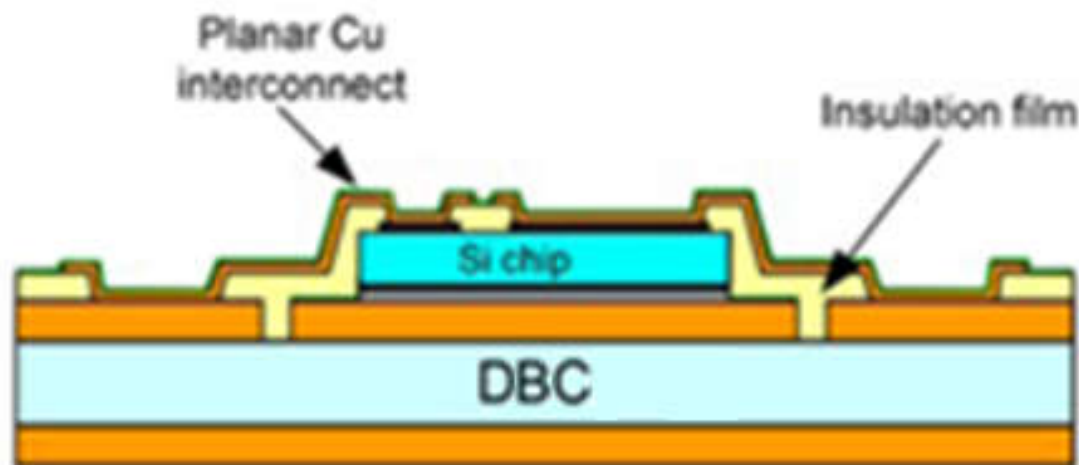
- 制造工艺是实现器件性能提升和尺寸缩小的核心
 - SiC器件制造难点在于缺陷控制、高能离子注入和退火、高温氧化，C的镀膜等，采用沟槽结构减低 R_{on} ，提升开关速度；
 - 工艺波动与成品率成为影响成本的重要因素；
- 功率半导体产业链——国内企业积极扩充产能，产线向大尺寸规划，从4寸向6寸扩展。





封装技术

- 高性能需求带动模块设计和高级封装技术发展。封装技术是功率模块的核心，重点依靠**设计和材料创新**，功率器件封装价值占比较高。
- 不同于逻辑或模拟IC，功率器件有着**工作环境极端、可靠性要求高、替换周期长**等特点，封装技术载功率半导体领域起着举足轻重的作用。





代工模式的挑战

1.客户自己准备:

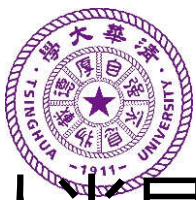
1)提供代工用的外延片;

2)提供代工流片的具体流片工艺条件;

3)提供掩膜版;

2.流片工艺是在产线设备能力能达到的情况下满足工艺条件，需要根据实际情况修改工艺条件;

3.不参与客户的设计，流片过程部分过程监控数据可以提供，只做到裸芯片完成，不提供标准封装，不保证流片最终产品参数，不保证最终合格率。



从新审视SiC器件的设计环节

从半导体工业的发展看，半导体公司的竞争，已经从强调技术和制造，转变到产品的设计，架构，算法和软件。也就是，从技术主导向产品主导转变。在这个过程中，模拟仿真变得越来越重要。它有着众多的优势：

- (1) 评估方案的可行性
- (2) 提供问题的诊断
- (3) 提供全方位的，更深层次的理解
- (4) 对极其复杂问题，现象和产品的见解
- (5) 缩短了设计循环时间
- (6) 缩短了产品到市场的时间。EDA，用软件语言打通了芯片行业的上下游，影响了半导体行业的发展。反过来，半导体产业链的合作促进和推动了当前EDA工具的发展。



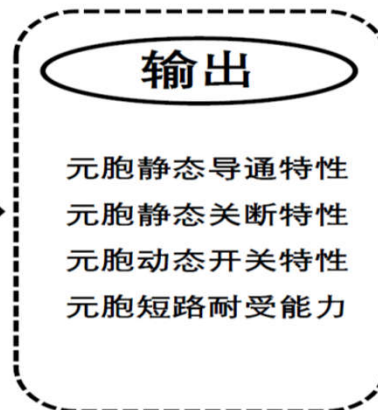
提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



三个层级的仿真设计

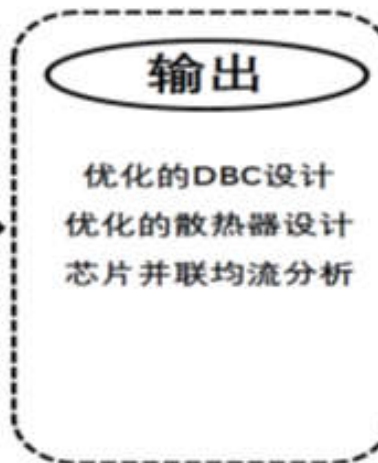
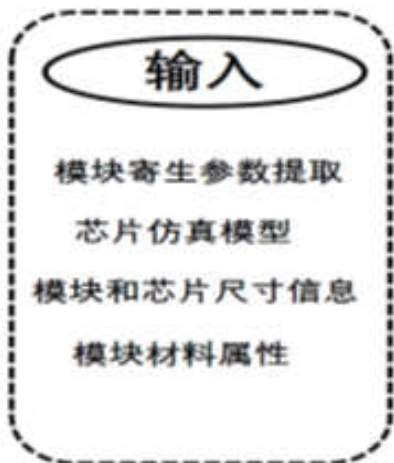
器件



芯片



模组





提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



器件仿真——TACD

- **TCAD** 就是 Technology Computer Aided Design, 指半导体工艺模拟以及器件模拟工具, 是**一类特殊的EDA工具**。这些工具被半导体器件工程师广泛的应用于各种设计流程和各类器件。帮助他们理解实际各类器件的过程。
- 不考虑实际的制造过程, TCAD甚至可以帮助他们预测在不同条件下器件的力热光电性质。
- 世界上商用的TCAD工具有Silvaco公司的Athena 和 Atlas , Synopsys 公司的Sentaurus。



器件仿真——TACD

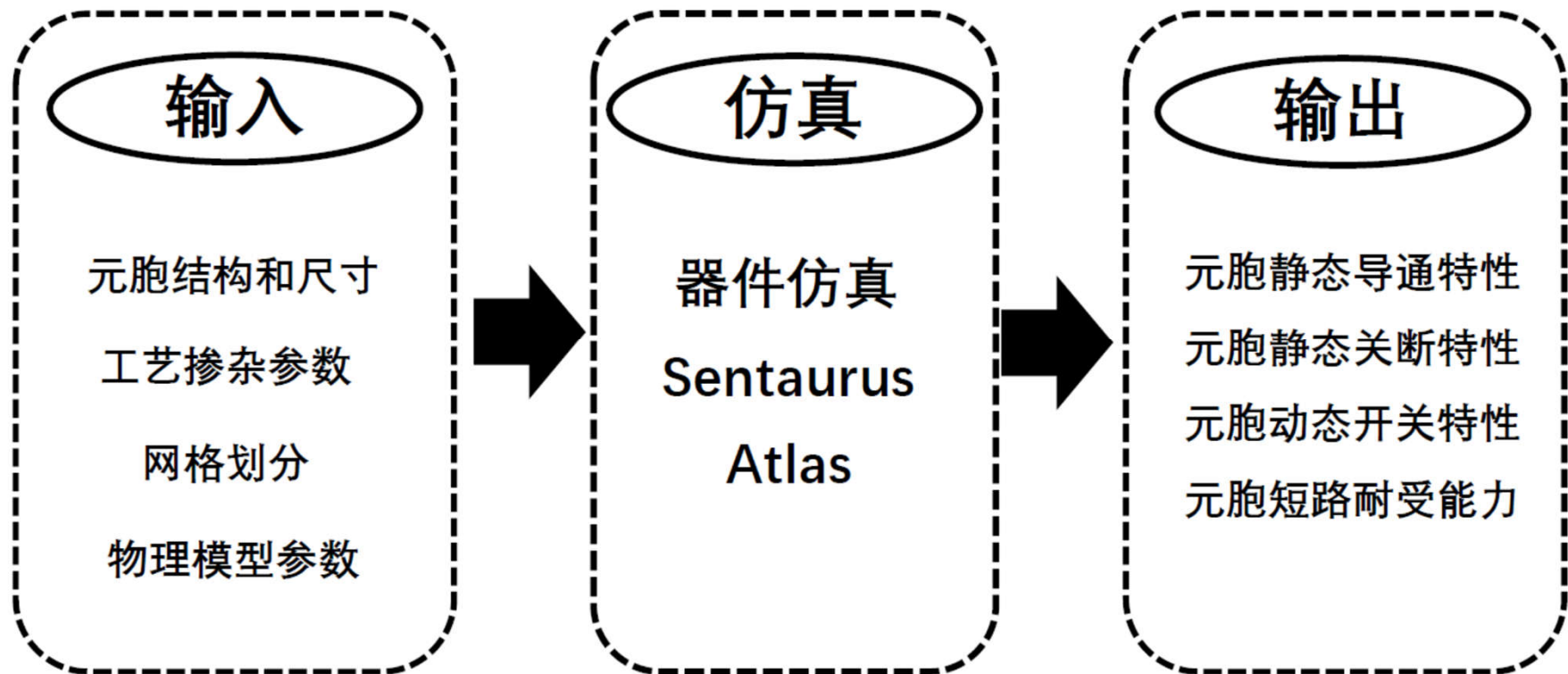
大多数TCAD软件按照功能可分为三个模块:

- 最底层是**工艺仿真模块**，用来确定标准工艺下材料水平的器件结构，标准工艺包括氧化，扩散，离子注入，干湿法刻蚀，光刻，一些比较新的TCAD也包括CMP，以及用于制造SOI衬底的smart cut工艺。仿真主要考虑因素包括杂质扩散，注入杂质和晶格作用声学模型，各种thermal budget和机械力下的应力，材料各向异性等等。
- 然后是**器件仿真**，在前面工艺仿真得到的器件结构基础上计算电学行为；
- 最顶层是**提参模块**，这个是从电学仿真结果提取符合BSIM标准的器件参数，用于spice仿真，我们平时用写网表时，引用的lib文件就是这类参数的list。



器件仿真——TACD

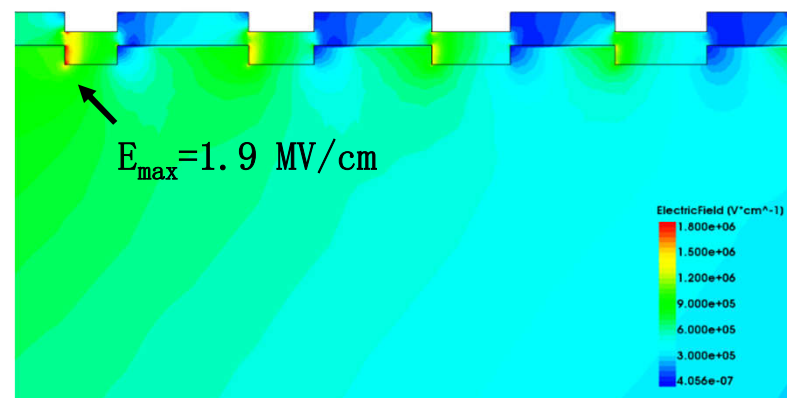
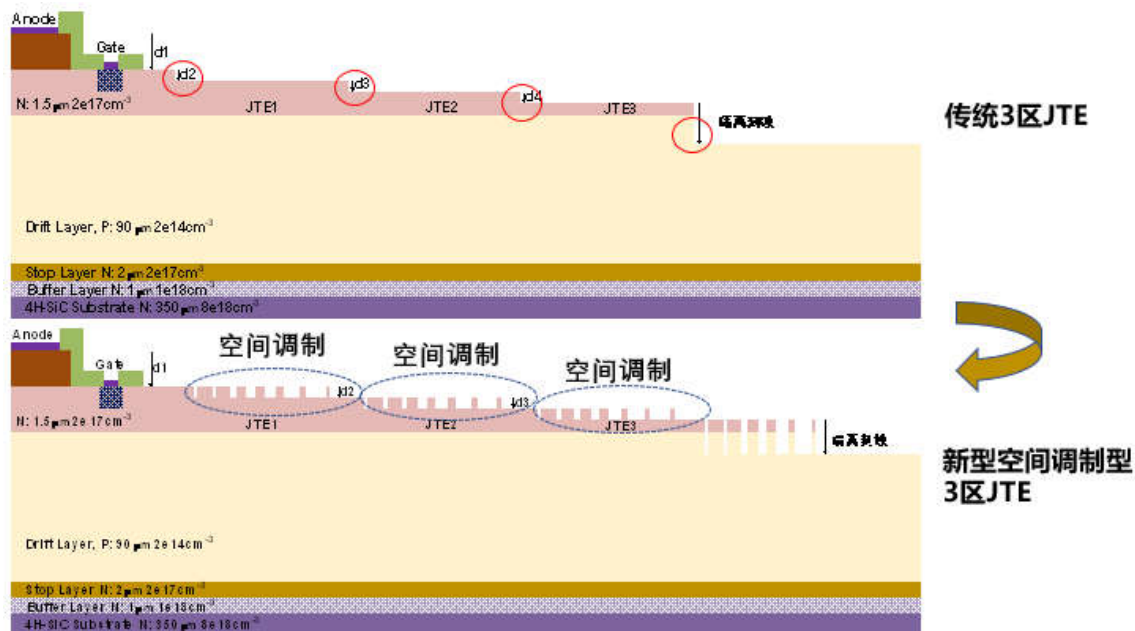
数值仿真的精度取决于其采用的离散化技术以及物理模型和经验的精度。因此，**物理模型的选取是研究工作的基础**。研究者缺乏利用TCAD开发的实际工艺基础。



载流子迁移率, 少子寿命, 碰撞电离系数, 不完全电离, 界面电荷密度



新型超高压SiC GTO终端结构

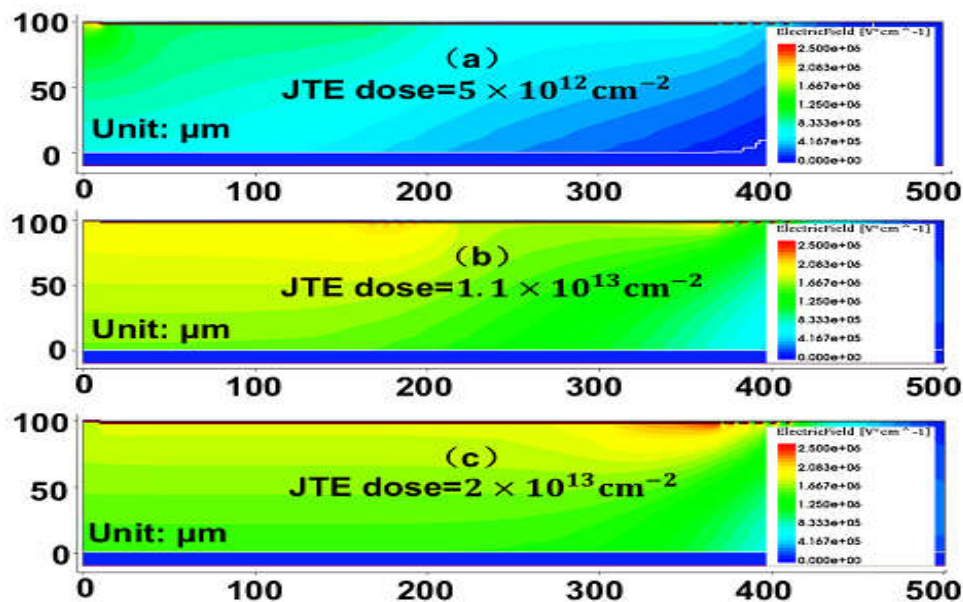


新型空间调制JTE终端结构示意图

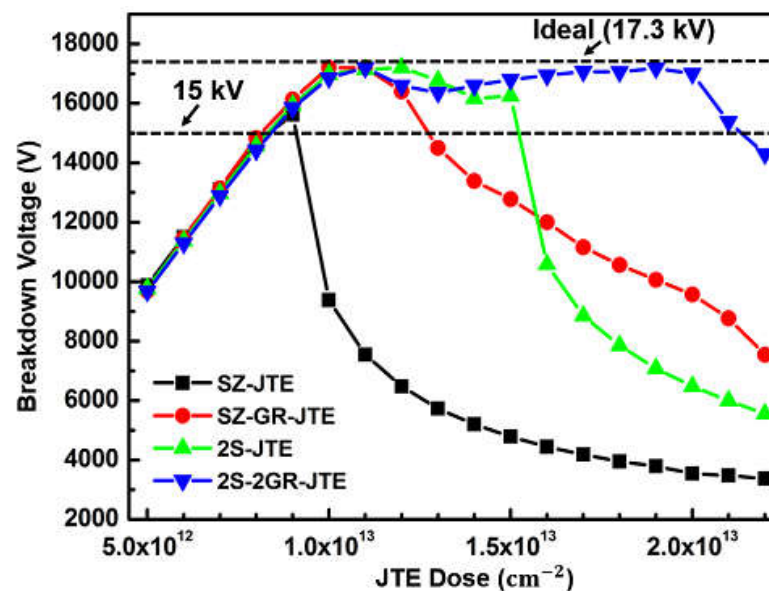
首次提出空间调制型多区JTE结构，有望降低对工艺敏感度，并有效提高阻断电压



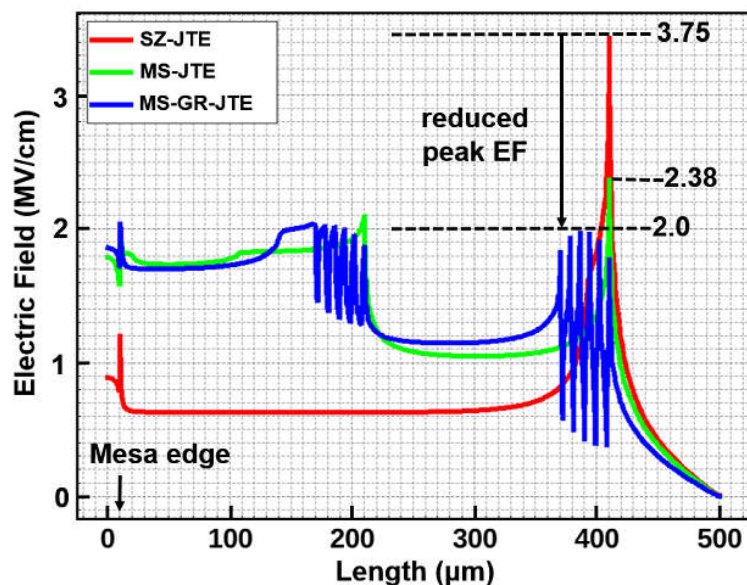
降低峰值电场，扩展工艺窗口



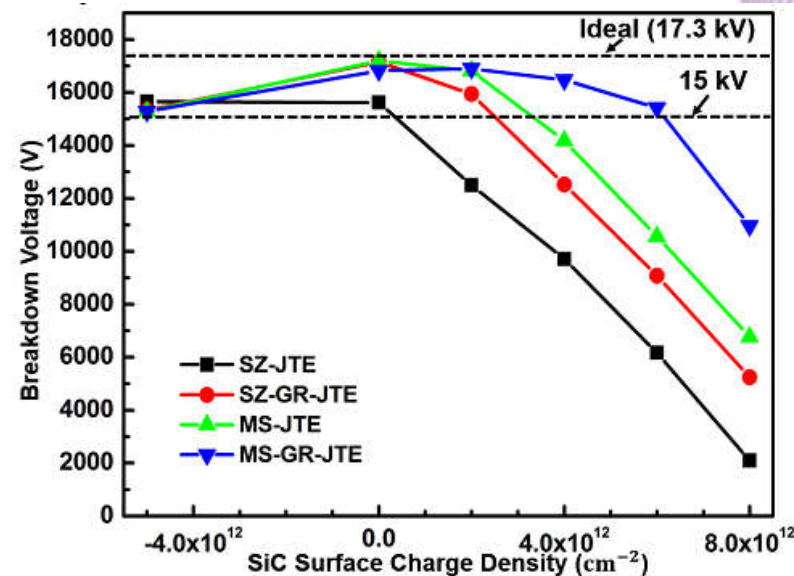
不同注入剂量下击穿点



注入剂量窗口



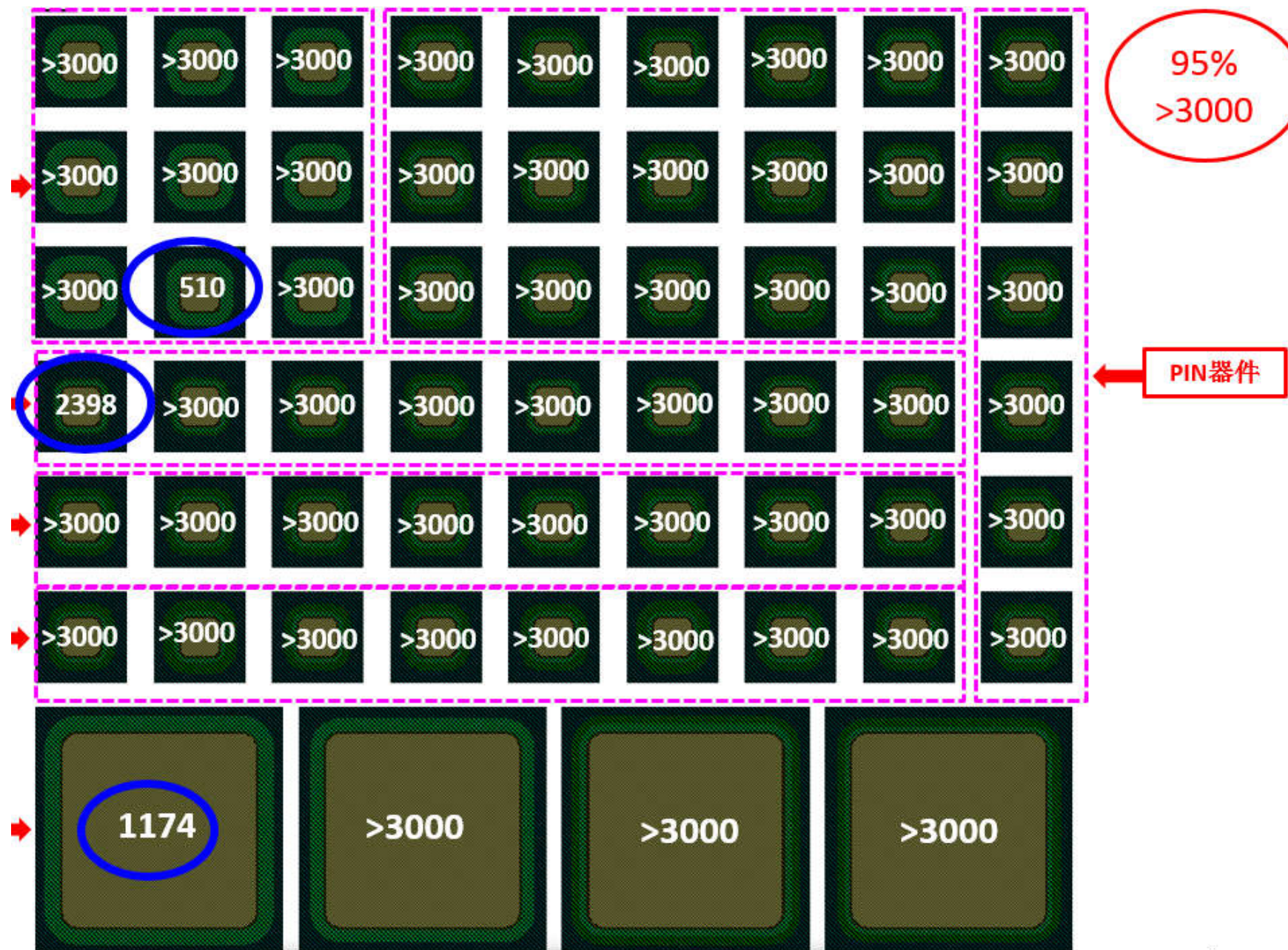
横向电场分布



表面电荷窗口

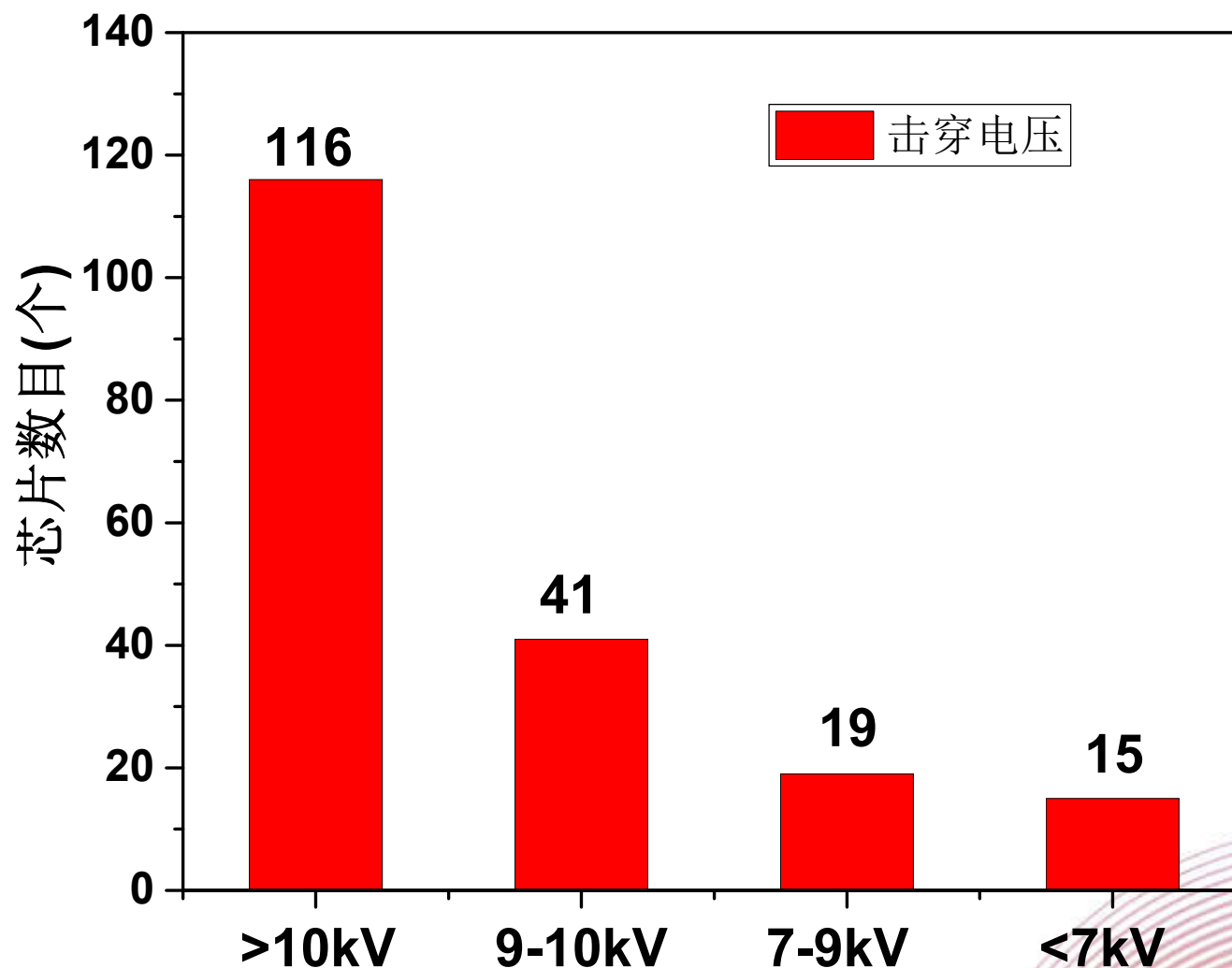


3kV PIN二极管测试结果





10kV GTO 测试结果



测试结果表明，GTO 阻断电压超过10KV以上且阳极与门极PN结正常的GTO器件（面积5mm×5mm）成品率高达62.7%



器件仿真——TACD

- 确定元胞几何结构
- 确定器件材料参数
- 确定器件物理模型
- 优化电场分布和静态特性——提高阻断电压,解决电场集中导致器件被提前击穿,逼近材料决定的理想性能;
- 优化动态特性——分析损耗, 开关特性
- 扩展工艺窗口——worst case 分析
- 确定工艺流程
- 仿真设计校准——物理参数确定

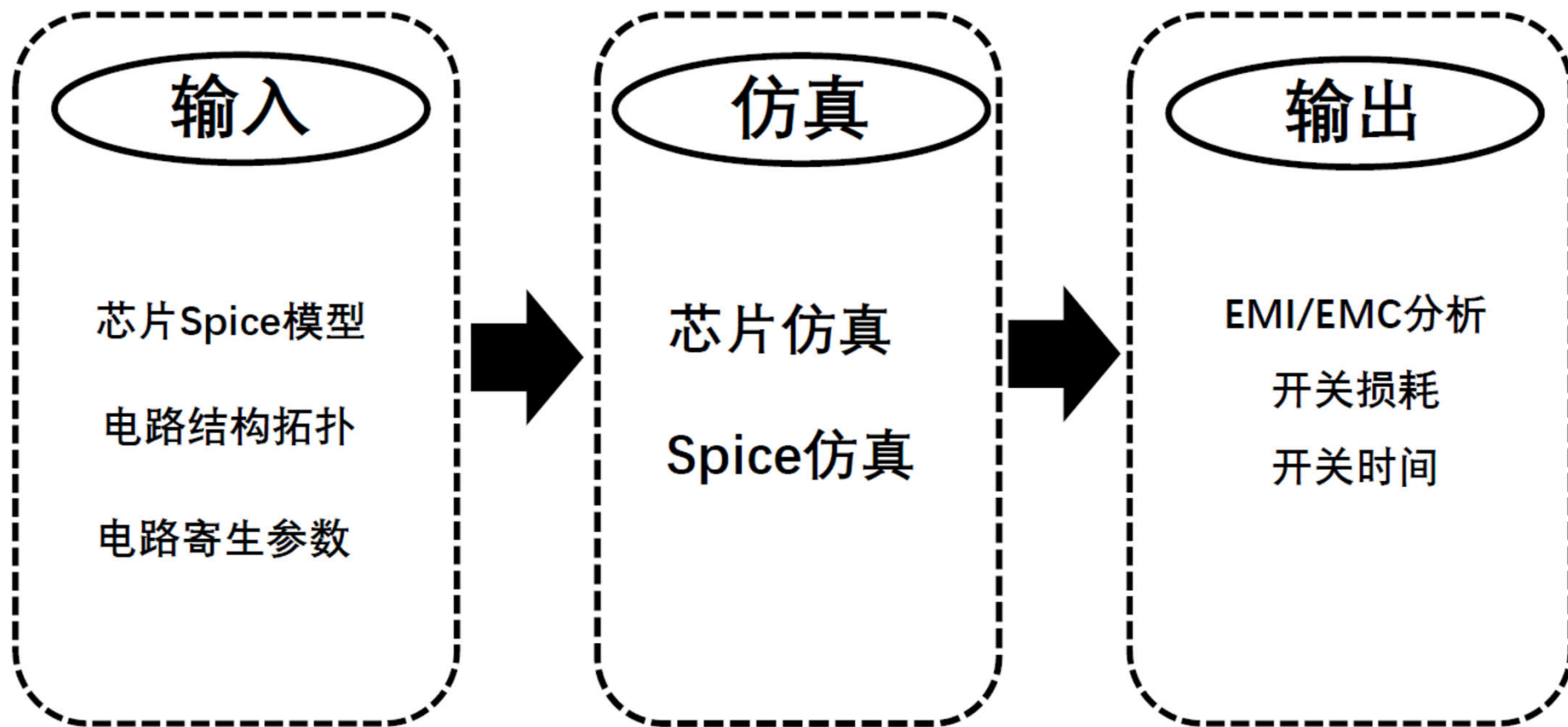


提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



芯片仿真——Spice model

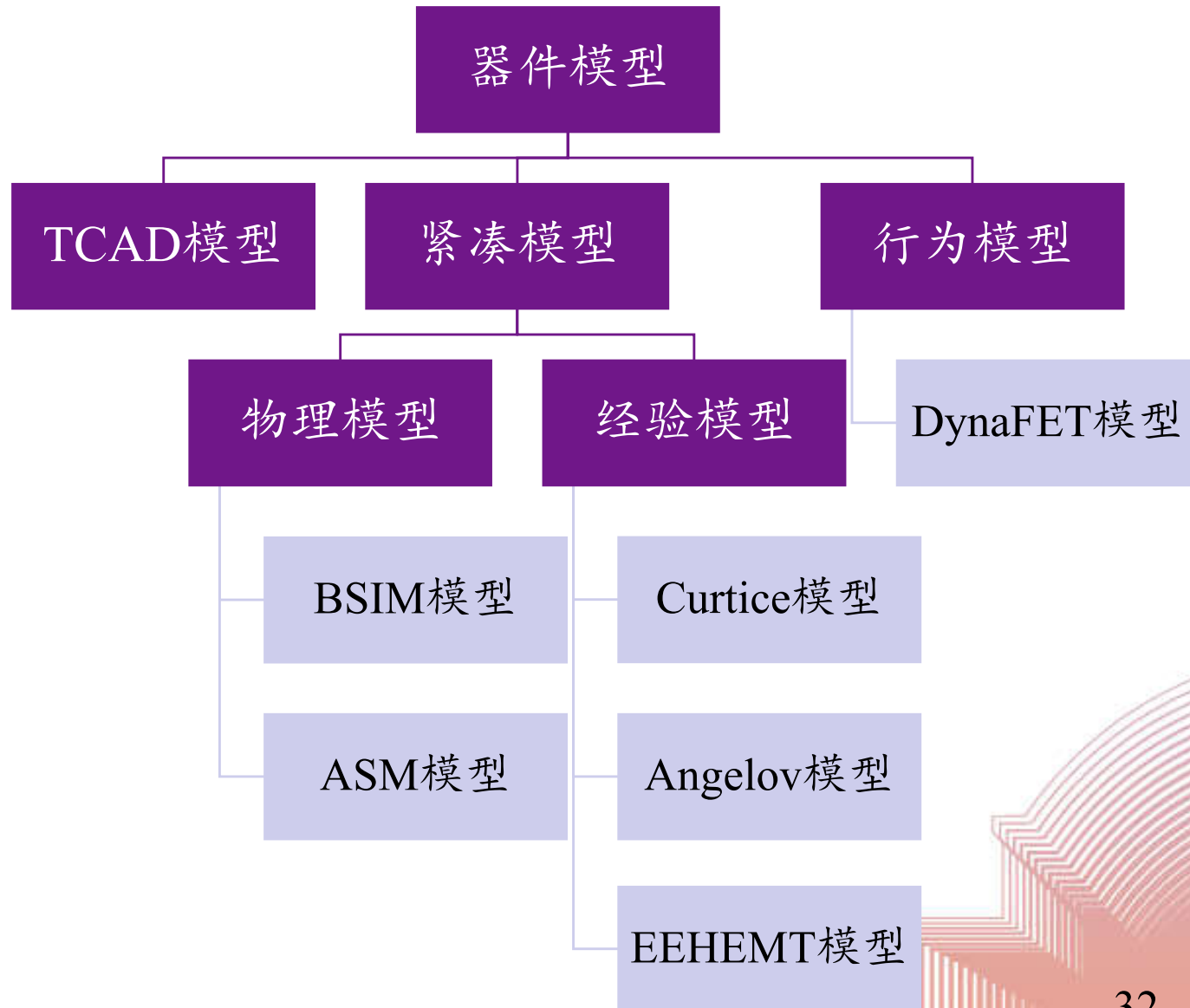


元器件模型是连接电路设计和制造的纽带，foundry目前缺乏器件建模的人力。



芯片仿真——Spice model

元器件模型主要类型





芯片仿真——Spice model

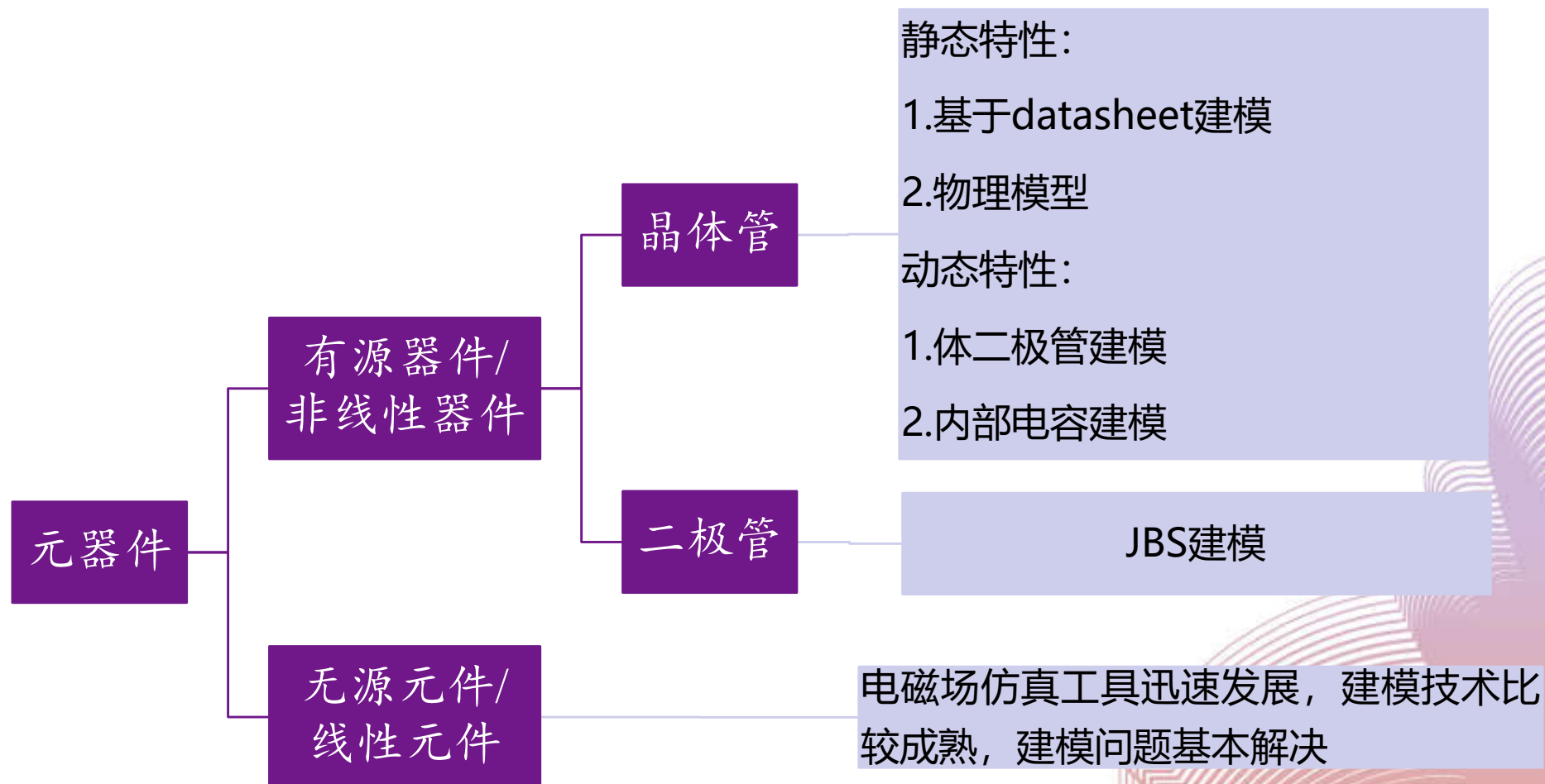
元器件模型主要类型优劣势比较

模型类型	优势	劣势
TCAD模型	有物理含义 准确性高 可缩放	难于建立 计算成本高 不可用于CAD仿真
紧凑模型：物理模型	有物理含义 计算成本低 可用于CAD仿真 可缩放	参数多且难于提取
紧凑模型：经验模型	计算成本低 可用于CAD仿真 准确性高	参数多且难于提取 不可缩放
行为模型	易于建立 计算成本低 准确性高	无物理含义 不可外推 不可缩放



芯片仿真——Spice model

SiC元器件模型现状





芯片仿真——Spice model

现有的SiC MOSFET静态特性模型具有以下不足:

- (1) SiC MOSFET静态特性模型的准确性均依赖于其模型参数的精确与否,然而参数提取策略和提取过程没有;
- (2) 多数文献没有给出其SiC MOSFET静态特性模型的具体参数;
- (3)模型的输出特性曲线只能在10V以下甚至更小的电压范围内与实际器件静态特性吻合;
- (4)模型静态特性的验证只有单一的转移特性或输出特性;
- (5)自定义沟道电流表达式过于复杂,不容易收敛,不利于系统电路仿真。



芯片仿真——Spice model

目前基于Datasheet对SiC MOSFET建模的文献较少，这主要是因为Datasheet中没有提供关于器件结构和材料的数据，使得

(1) 基于物理的模型过于复杂，需要很多具体的器件结构和材料参数。而这些参数从Datasheet中给出的信息无法得到，参数提取困难且不够准确。

(2) 基于公式的行为级模型，需要很多拟合参数。当表征不同温度下器件的输出特性时，需要更多的没有物理意义的参数。这给参数的提取带来很大的困难。



现在有三种典型的表征I-V输出特性的方法：

(1) 将I-V特性分为线性区和饱和区。对两个区域，用分段函数分别表示

$$I_{ch} = I_{ch1} + I_{ch2}.$$

$$I_{chx} = \begin{cases} KF_x KP_x \frac{(V_{GS} - VT_x) V_{DIS} - LINSAT^{(kx-1)} (V_{GS} - VT_x)^{\left(\frac{2-kx}{kx}\right)}}{1 + THETA_x (V_{GS} - VT_x)} & \text{if } V_{DIS} < \frac{V_{GS} - VT_x}{LINSAT} \\ [1.5em] KP_x \frac{(V_{GS} - VT_x)^2}{2 \{1 + THETA_x (V_{GS} - VT_x)\}} & \text{if } V_{DIS} \geq \frac{V_{GS} - VT_x}{LINSAT} \end{cases}$$

$$kx = \frac{KF_x}{KF_x - LINSAT/2}.$$



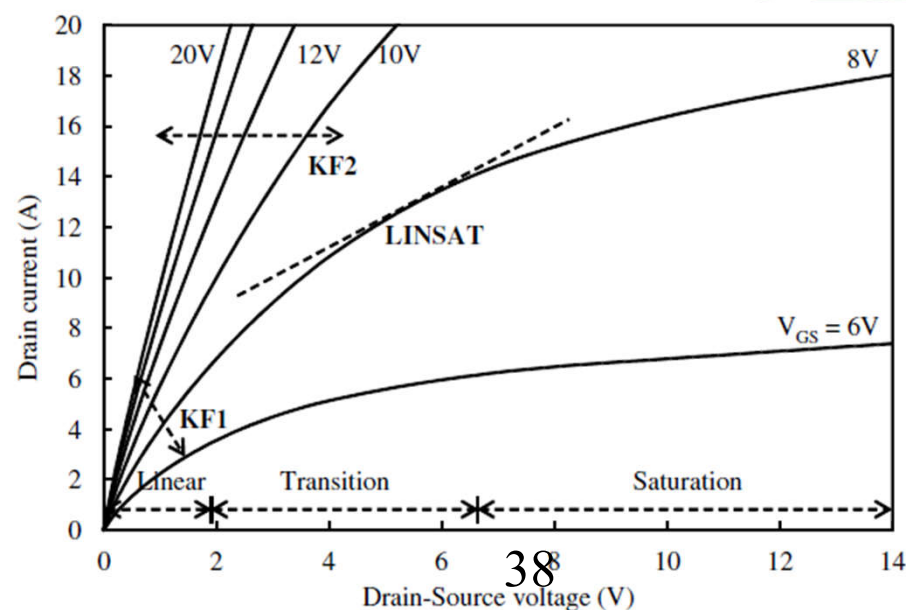
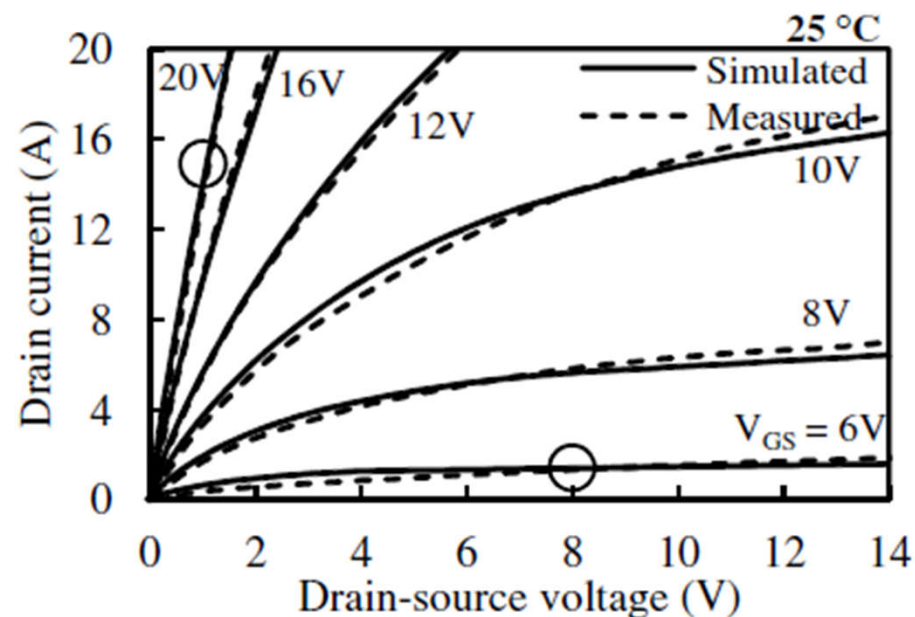
这种表示方法的优缺点

➤ 优点:

用分段函数表示, 对两个区域分别建模, 拟合更为灵活, 且拟合效果较好

➤ 缺点:

(1) 线性区和饱和区交界处, 导数不连续, 时域仿真会出现收敛问题





(2) 第二种方法是避免分段函数的表示方法，对线性区和饱和区采用统一连续的公式

$$I_{ds} = I_{ds_transfer} \cdot I_{ds_output}$$
$$= k \cdot \left\{ 1 + \tanh \left[a \cdot (V_{gs} + c) + b \cdot (V_{gs} + d)^2 \right] \right\} \cdot \frac{p \cdot V_{ds}}{1 + q \cdot V_{ds}}$$

$$\begin{cases} p(V_{gs}) = -34.9296 \cdot e^{0.01144 \cdot V_{gs}} + 43.9896 \\ q(V_{gs}) = 72.0433 \cdot e^{(-8.813 \times 10^{-5}) \cdot V_{gs}} - 71.9656. \end{cases}$$



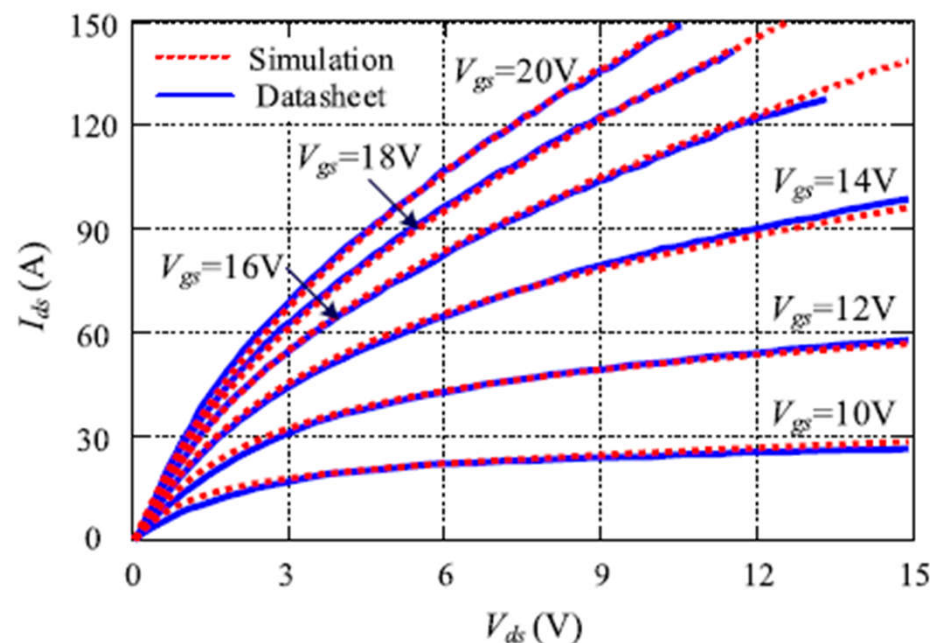
这种表示方法的优缺点

➤ 优点：线性区和饱和区交界处，导数一致连续，收敛性好

➤ 缺点：

(1) 过多的拟合参数，尤其是针对不同温度下的器件特性进行表征

(2) 公式没有物理意义，无法保证在器件所有工作区域得到的结果具有意义**或正确**



$$\begin{cases} V_{gs}(T) = [m_{gs}(T) \cdot V_{gs} + n_{gs}(T)] \\ V_{ds}(T) = [m_{ds}(T) \cdot V_{ds} + n_{ds}(T)]. \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_{gs}(T) = m_1 \cdot (T - 25)^2 + m_2 \cdot (T - 25) + 1 \\ n_{gs}(T) = n_1 \cdot (T - 25)^2 + n_2 \cdot (T - 25) \\ m_{ds}(T) = m_3 \cdot (T - 25)^2 + m_4 \cdot (T - 25) + 1 \\ n_{ds}(T) = n_3 \cdot (T - 25)^2 + n_4 \cdot (T - 25) \end{cases}$$



I-V特性表征

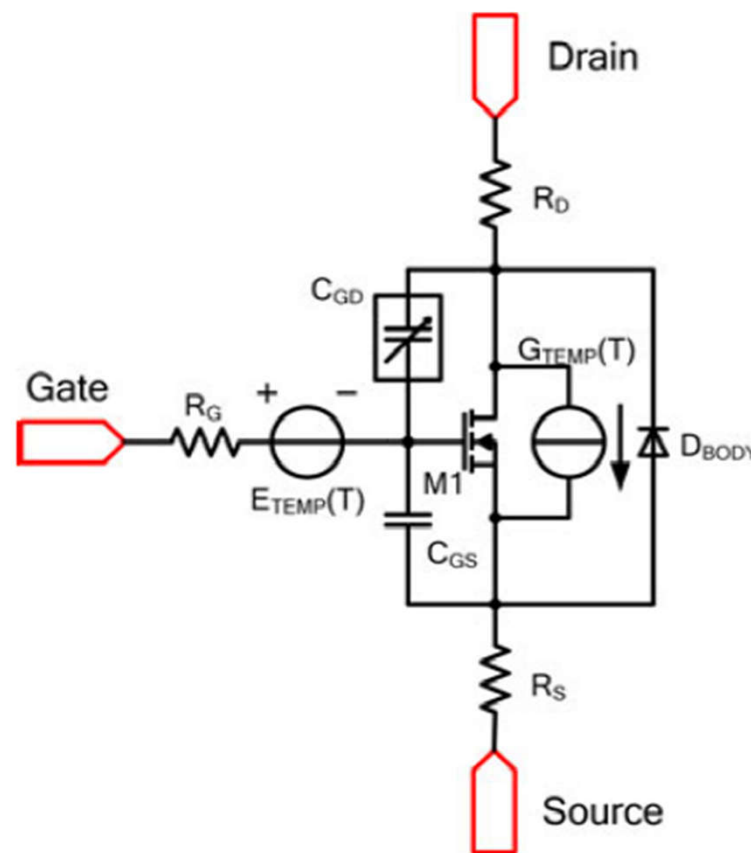
(3) 第三种方法是直接采用Si MOSFET的BSIM 模型，通过修改BSIM 模型参数，来达到表征器件输出特性的目的

优缺点：

优点：BSIM模型收敛性好，模型的收敛性较好。

缺点：

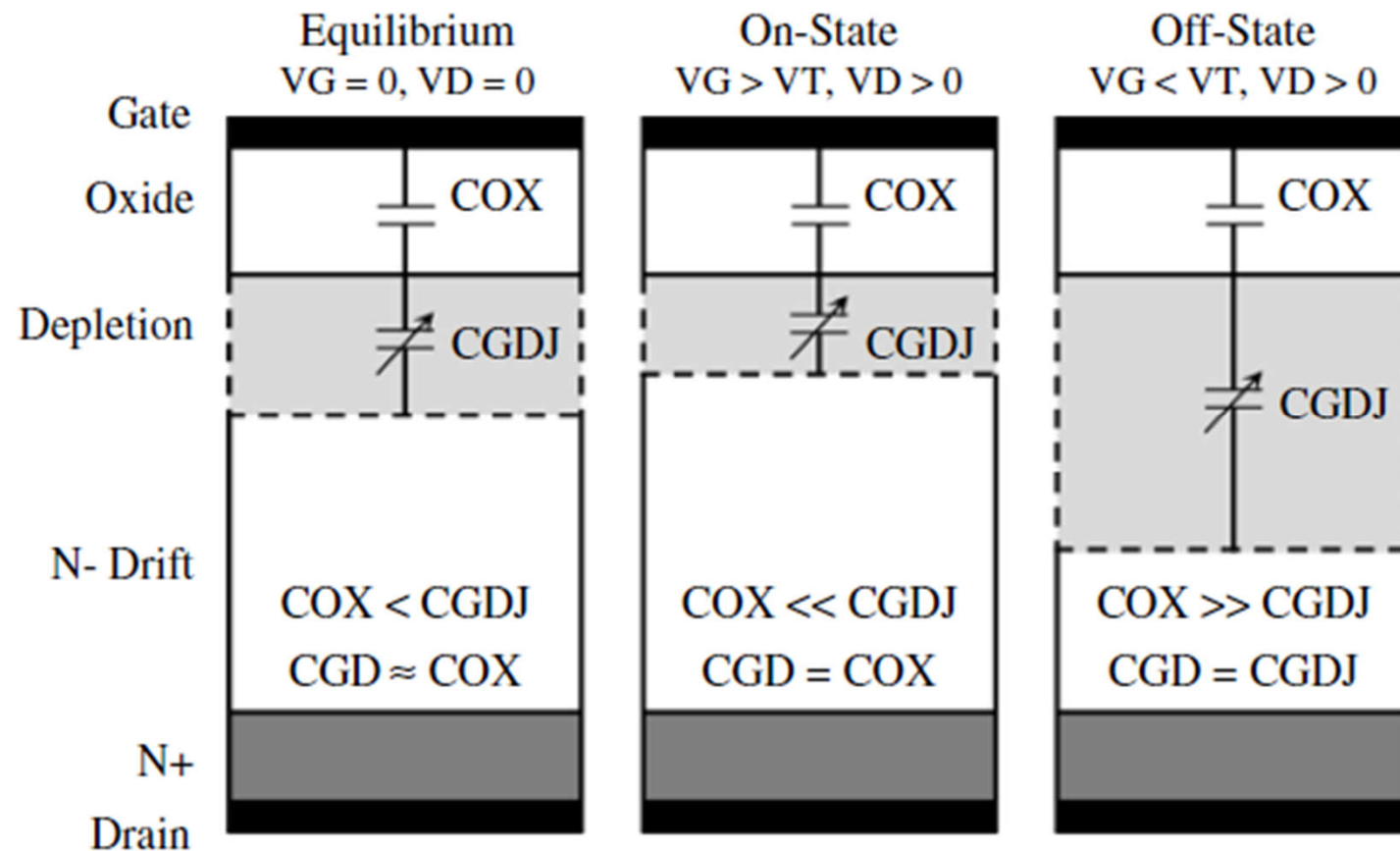
由于SiC MOSFET和Si MOSFET在结构上以及材料特性的不同，无法准确表征SiC MOSFET阈值电压等的变化，需要使用额外的受控电压源等进行补偿





C-V电容特性表征

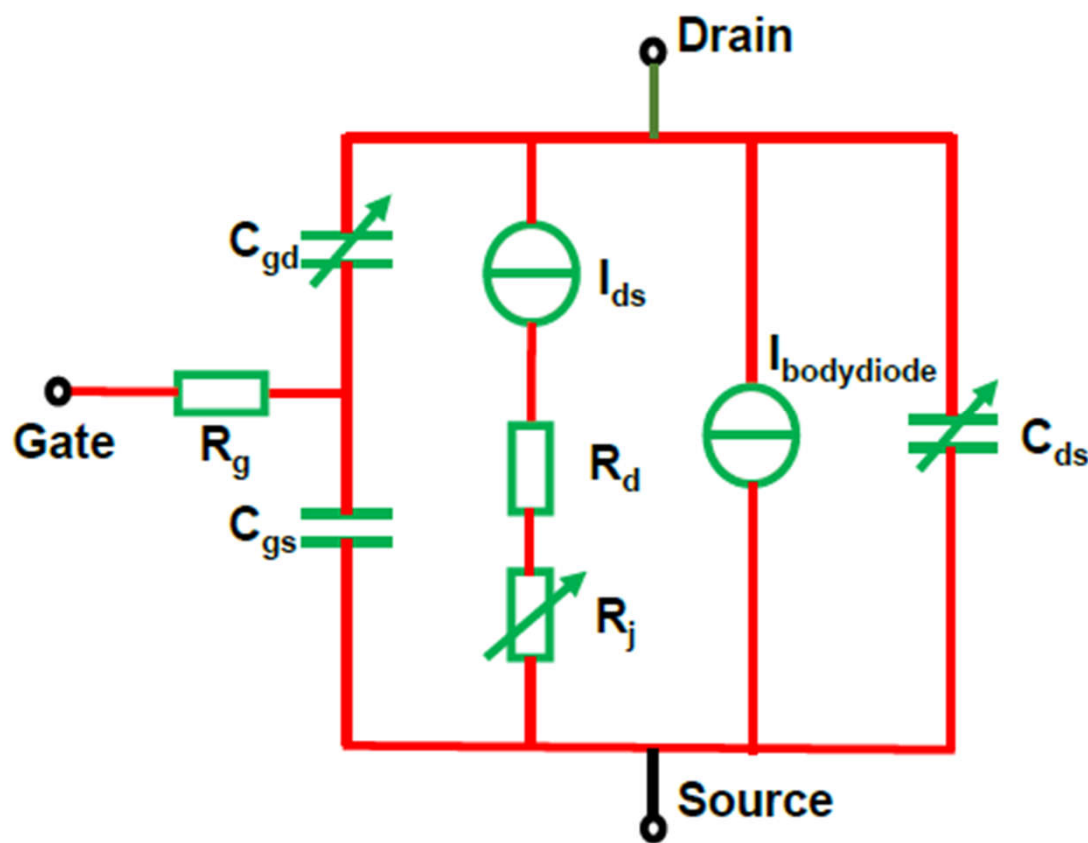
SiC MOSFET含有三个主要的寄生电容，即栅漏电容 C_{gd} ，栅源电容 C_{gs} ，漏源电容 C_{ds} 。其中最为关键的是电容 C_{gd} ，决定了器件在应用时的开关损耗大小





芯片仿真——Spice model

为了从Datasheet中可以提取准确的紧凑型模型，我们提出了一种完全基于公式的SiC MOSFET模型



模型的优势：

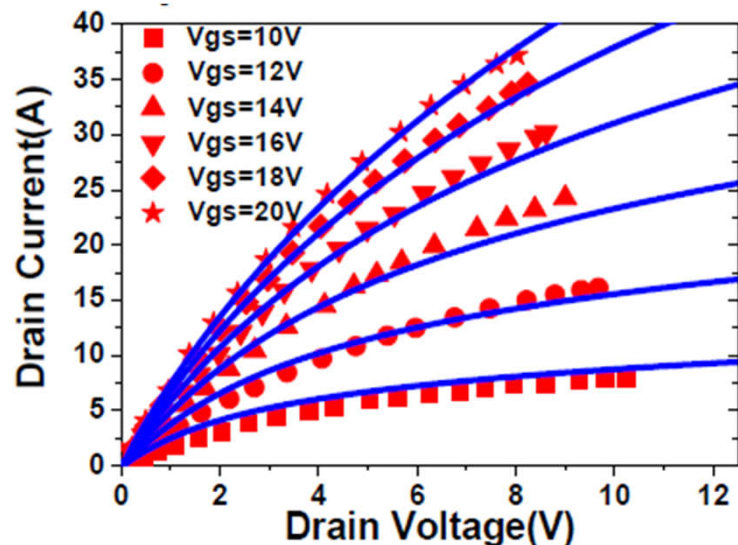
(1) 对线性区和饱和区的公式进行了统一，方便模型的提取，并提高模型的收敛性

(2) 器件的主要特性，如输出特性、C-V特性和体二极管特性，全部采用公式表征，极大的简化了模型

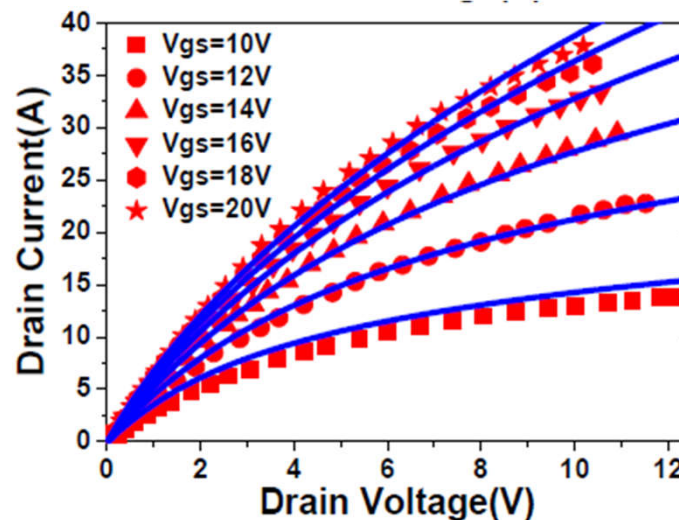
(3) 对于电阻的精确描述（含温度修正）



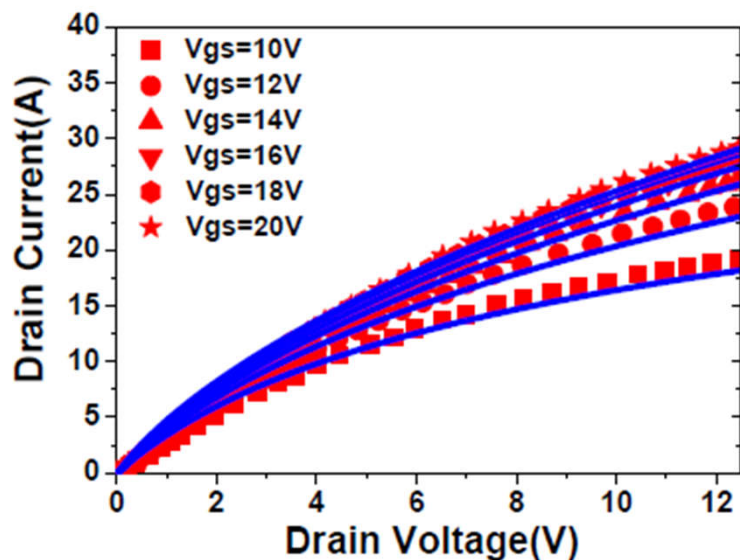
芯片仿真——Spice model



-55°C



25°C

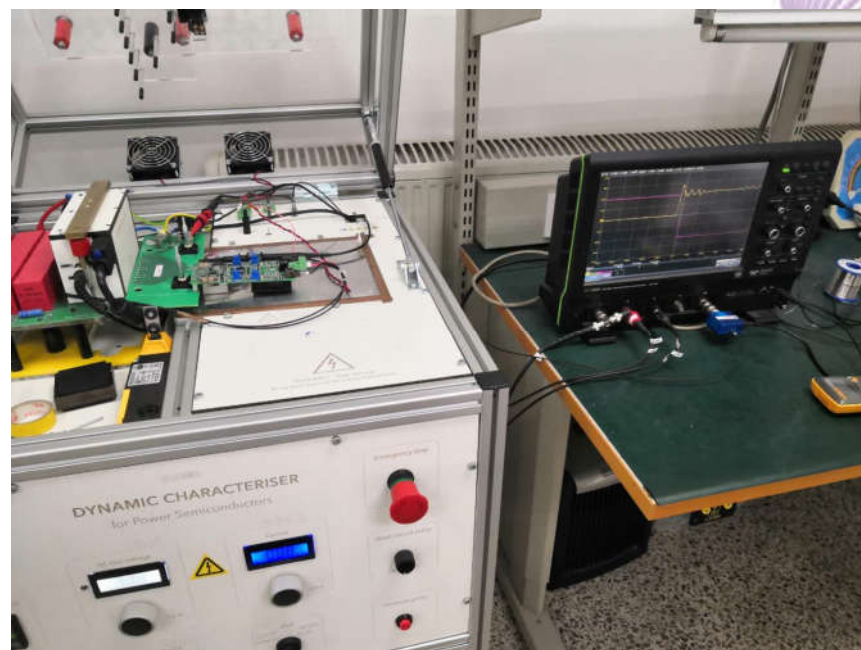
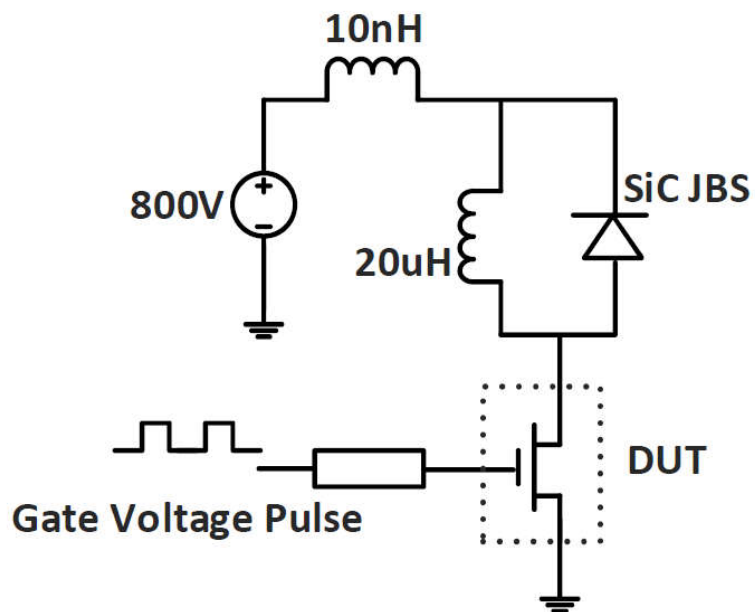
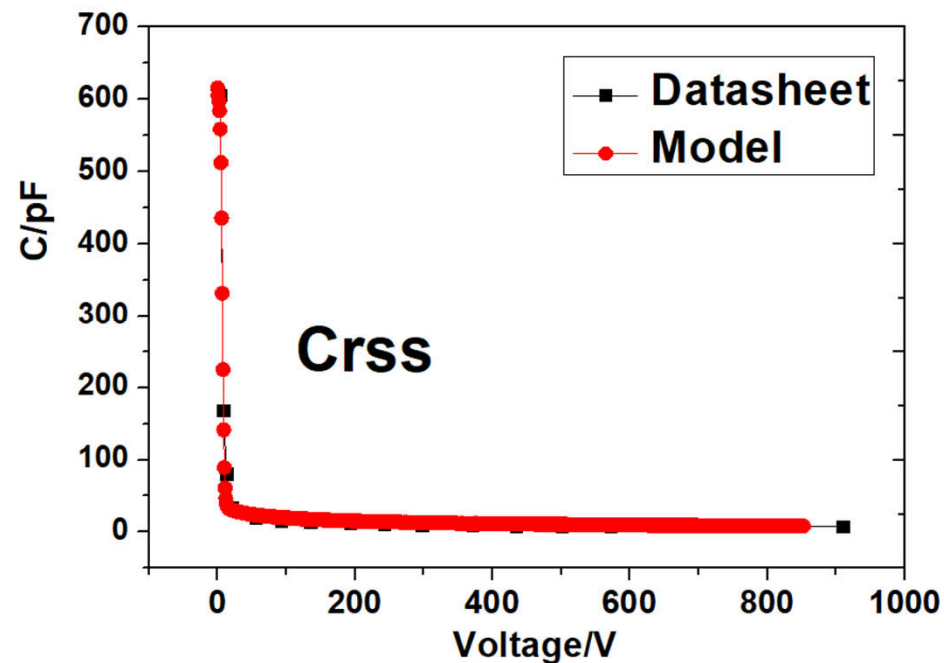
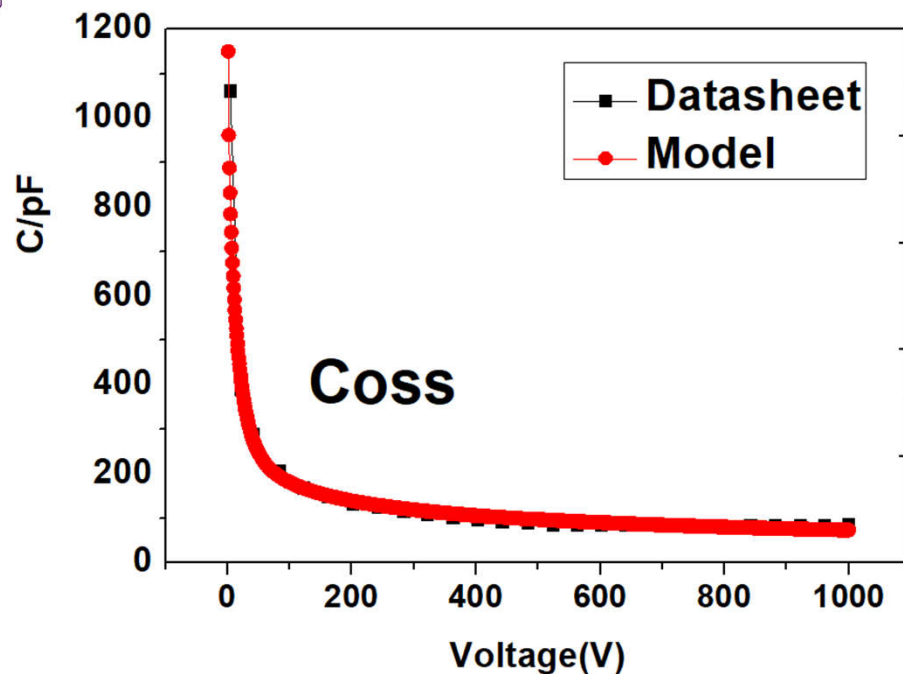


125°C

在三种工作温度下，模型都能够精确的表征器件的输出特性

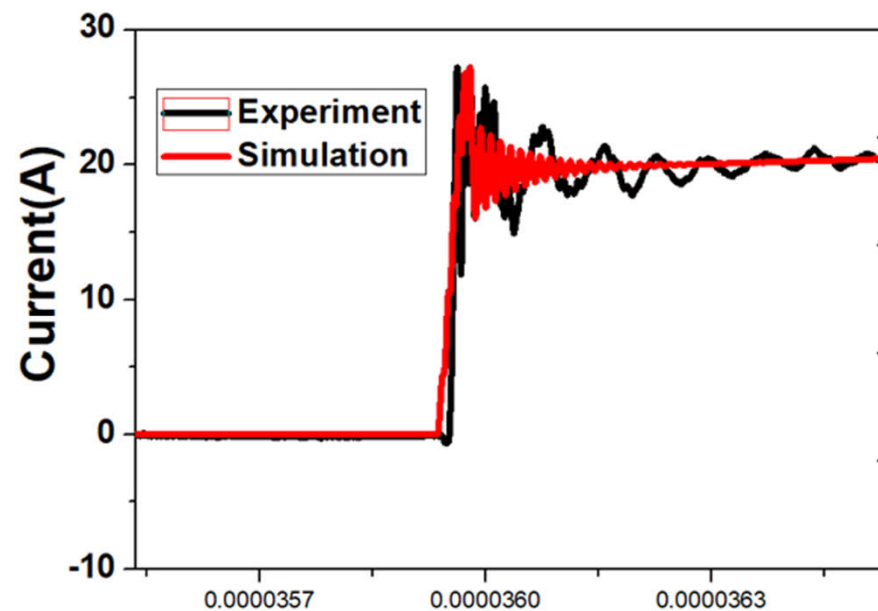
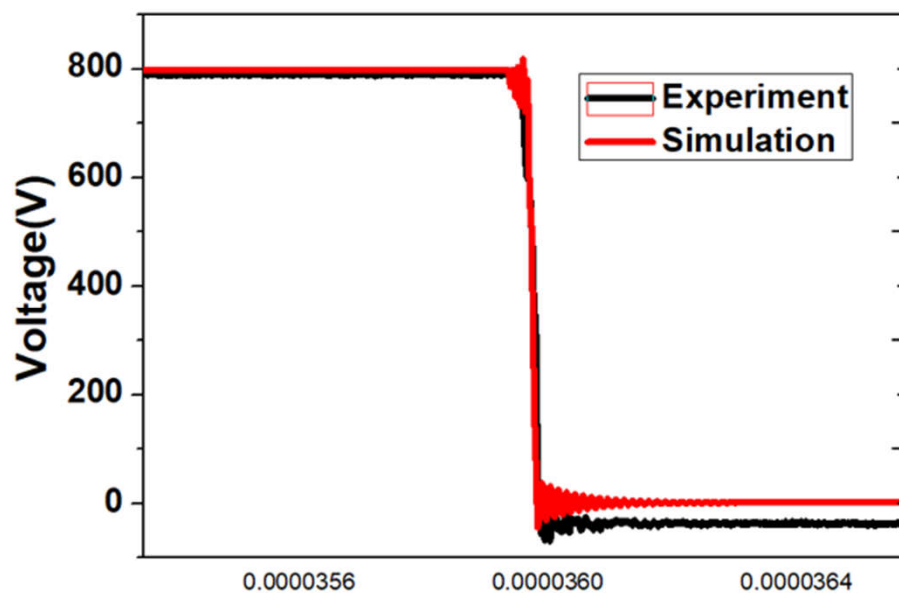
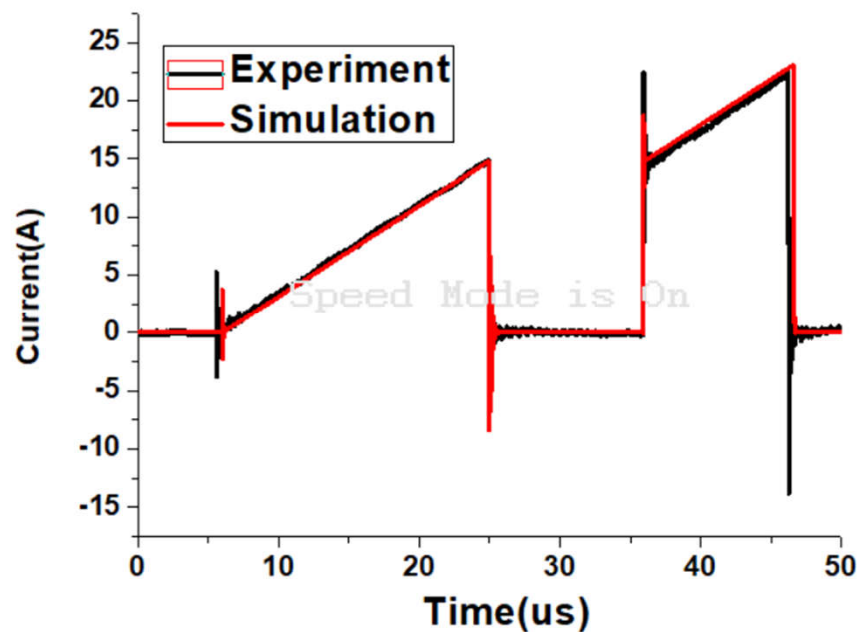


芯片仿真——Spice model





芯片仿真——Spice model





芯片仿真——Spice model

- 在SiC MOSFET没有工业标准时，所有使用者能拿到的数据就是datasheet，因此开发基于datasheet的spice模型尤其重要；
- 建立的元器件的Spice Model，包含I-V和C-V，非线性特性以及温度特性；
- 根据应用场景确定电路的拓扑结构，DC-AC逆变器，DC-DC变换器，开关电源等；
- 提取寄生参数，优化动静态特性，EMI/EMC分析；

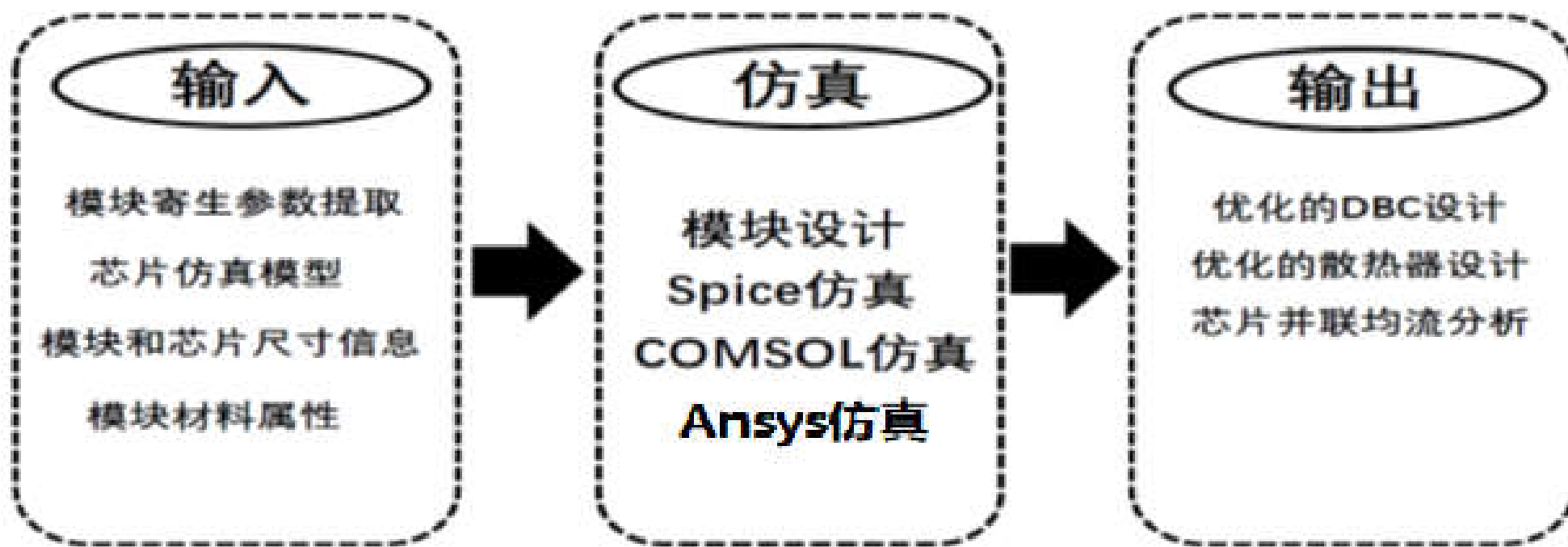


提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



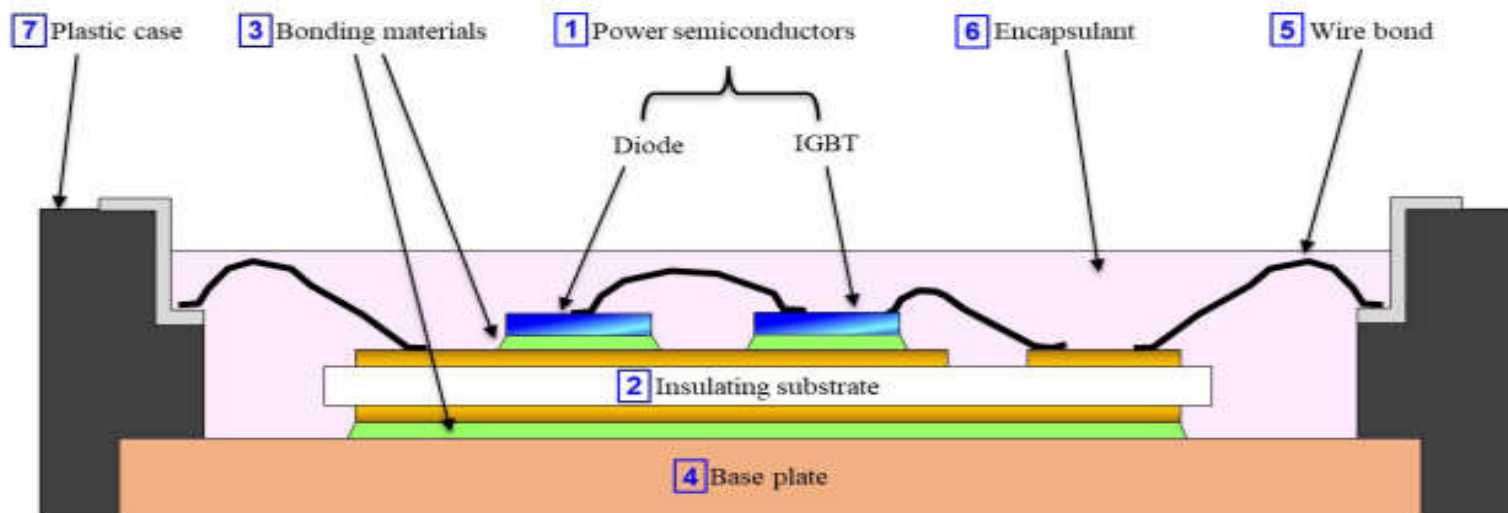
模組设计——多物理场仿真



功率模块封装结构的布局设计对功率器件与模组提升性能和保证其安全工作至关重要。封装结构和布局对模块内部寄生电感和芯片散热的影响巨大，需要建立相应的评估方法



模組设计——多物理场仿真

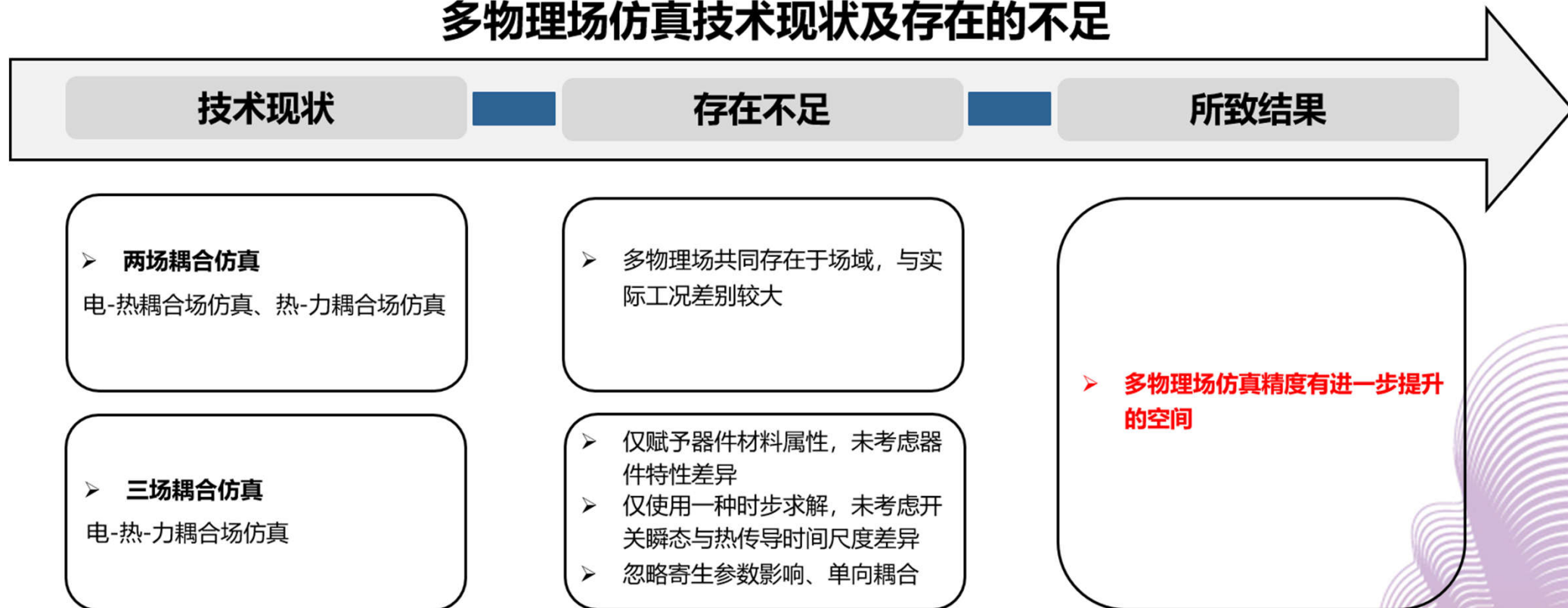


- 使用SiC器件最重要的益处之一就是能够在**高开关频率**下工作,但是电源模块封装应考虑封装中的寄生效应和高频瞬态引起的挑战;
- 功率器件的开关损耗和传导损耗会在器件周围以及从芯片到散热器产生高度集中的热通量密度,引起**热可靠性**问题;
- 当设备或环境温度过高时,必须采用主动**热管理**方法,这将给整个系统增加额外的尺寸,重量,成本和复杂性;
- 封装材料还需要承受**高电场**,同时还要考虑其粘度方面的可加工性,这对材料开发提出了严峻的要求。



模组设计——多物理场仿真

多物理场仿真技术现状及存在的不足



[1] Stepwise Design Methodology and Heterogeneous Integration Routine of Air-Cooled SiC Inverter for Electric Vehicle. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3973-3988.

[2] Questionnaire-Based Discussion of Finite Element Multiphysics Simulation Software in Power Electronics. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7010-7020.

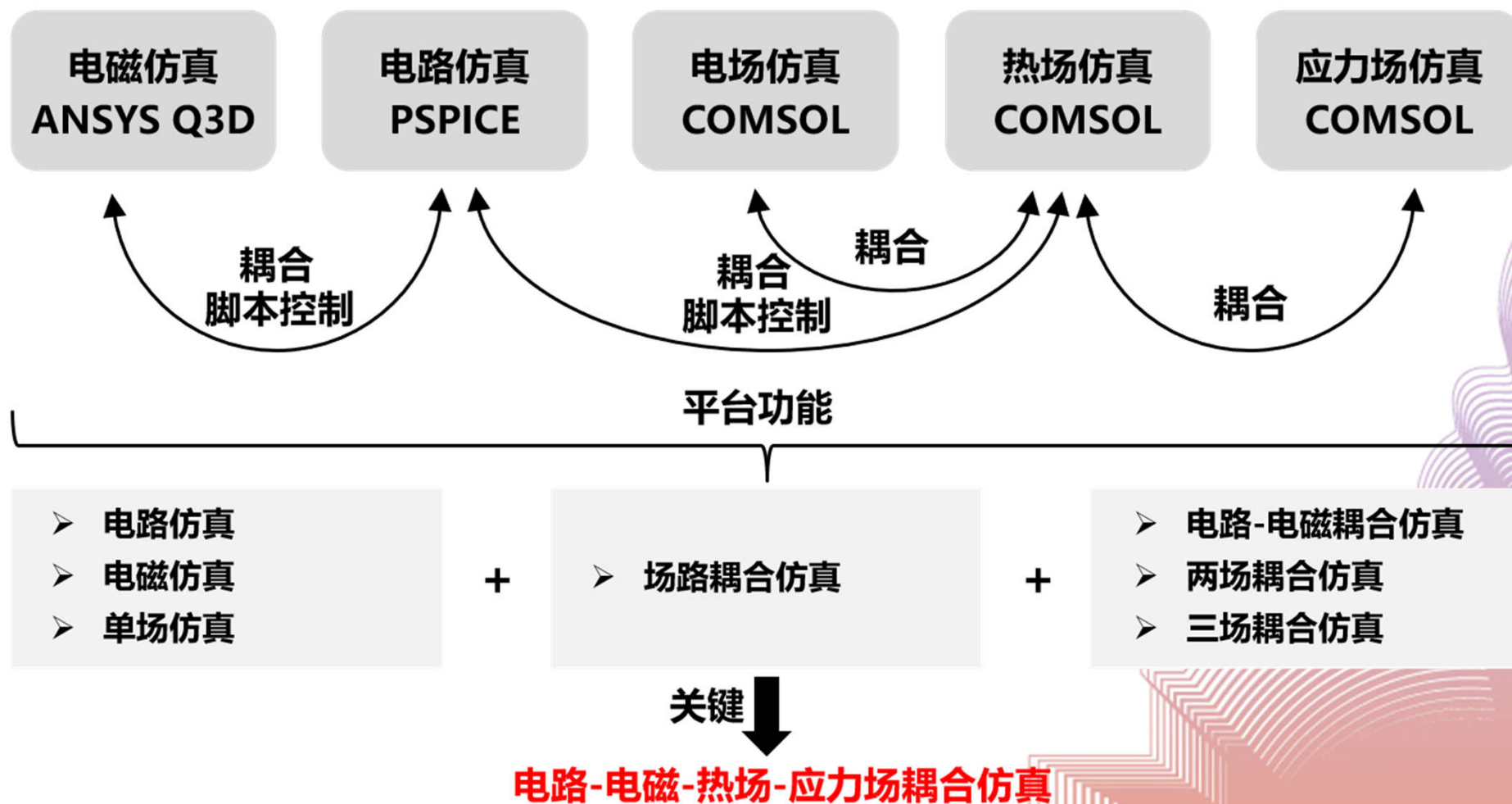
[3] Failure and Reliability Analysis of a SiC Power Module Based on Stress Comparison to a Si Device. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2017, 17(4): 727-737.

[4] Electro-thermo-mechanical analyses on silver sintered IGBT-module reliability in power cycling. 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems.



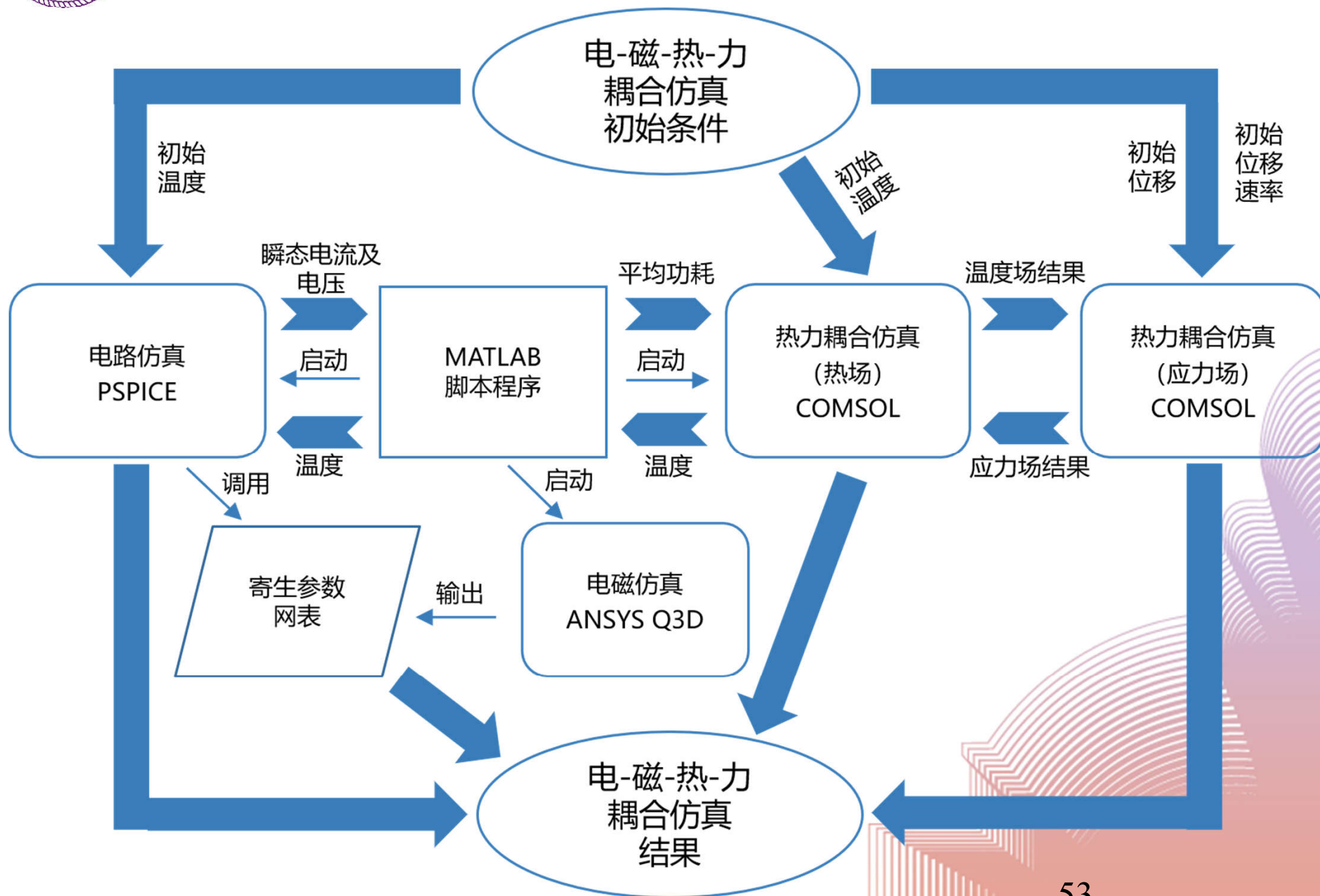
模組设计——多物理场仿真

开发电-磁-热-力仿真平台





电-磁-热-力耦合仿真基本原理





电-磁-热-力耦合仿真基本原理

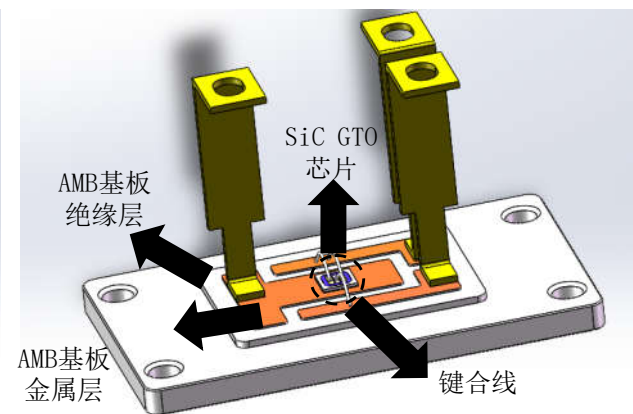
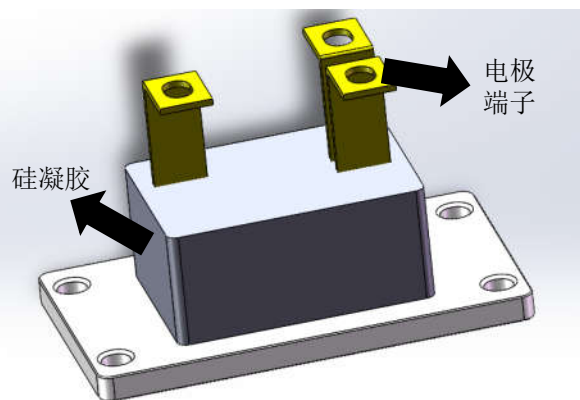
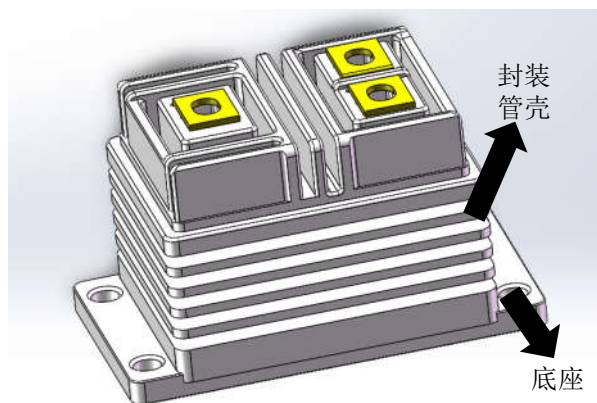
电-磁-热-力耦合仿真流程





电-磁-热-力耦合仿真实例

➤ 10kV SiC GTO模块主要结构、组件、尺寸



□ 封装管壳: Peek, 长度51mm、宽度39mm

□ AMB基板绝缘层 (AlN) 厚度为1mm、AMB基板Cu层厚度为0.3mm

□ GTO芯片: SiC, 5mm × 5mm × 4.5mm

□ 键合线 (Al) 直径为0.5mm, 焊料层 (Sn-3.5Ag) 厚度为100 μm

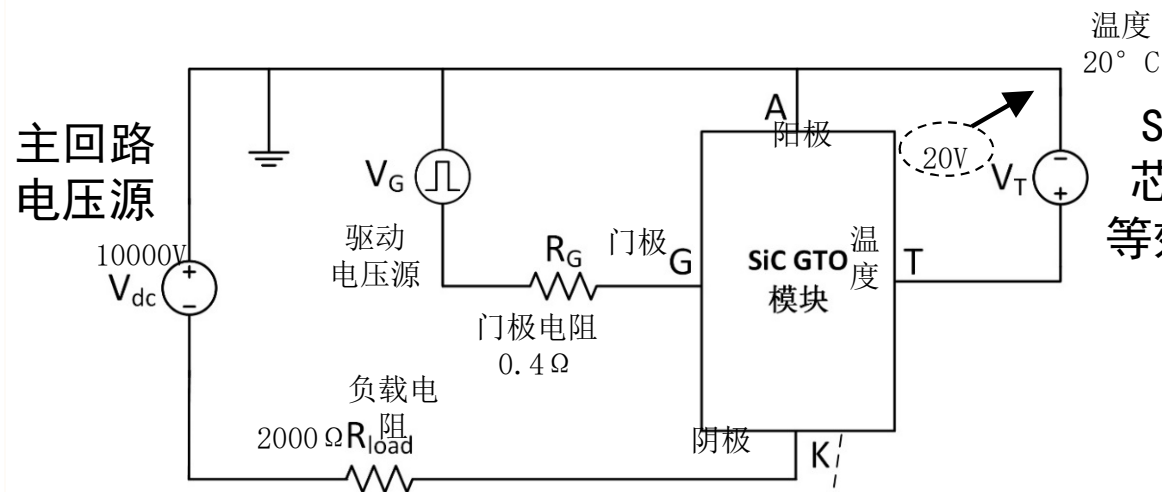
□ AMB基板: 36mm × 24.2mm × 1.6mm

□ 底座: AlSiC, 66mm × 38mm × 4mm

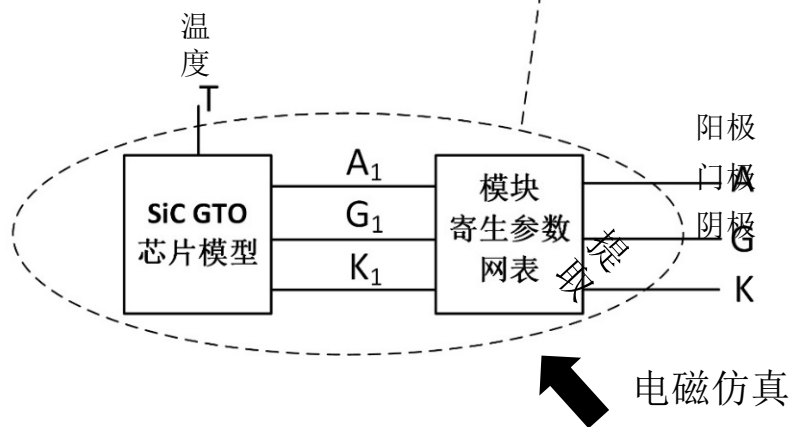
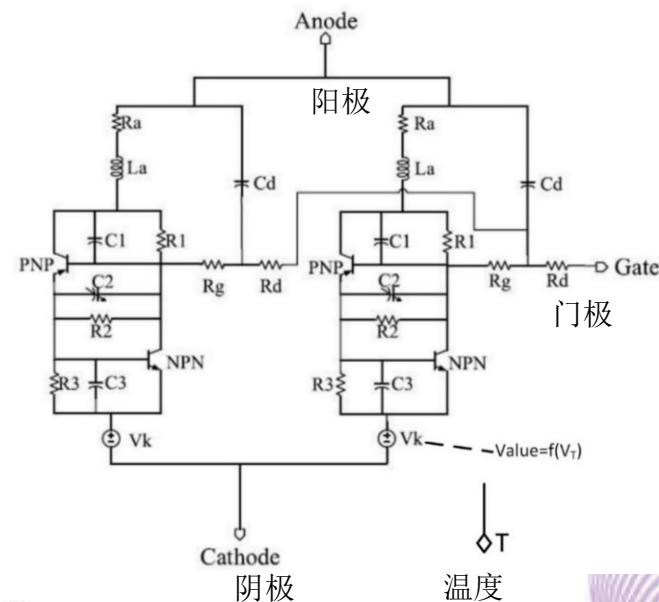


电-磁-热-力耦合仿真实例

➤ GTO芯片开关特性分析（电路仿真、电磁仿真）

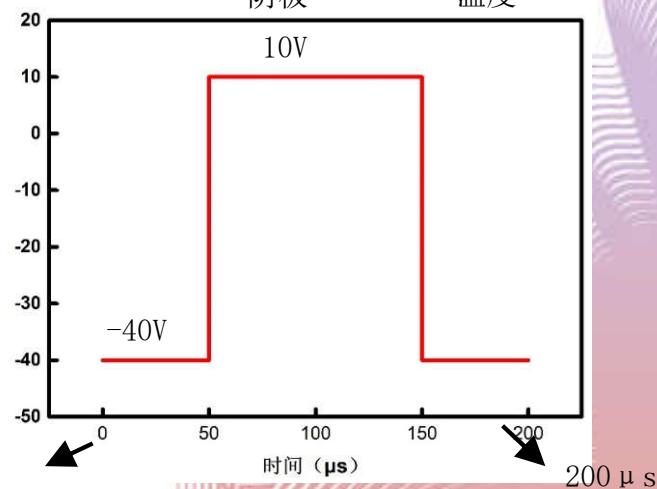


SiC GTO 芯片模型 等效电路图



电路仿真原理图

驱动电压脉冲波形

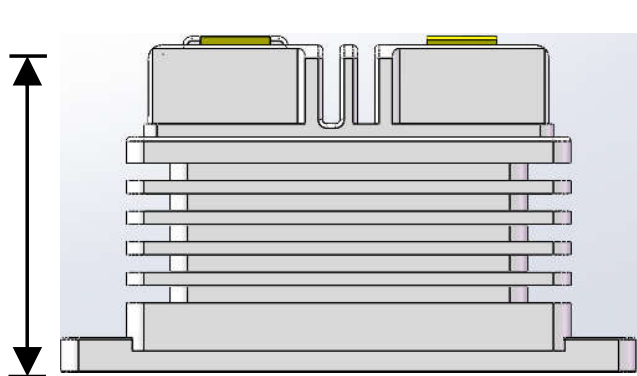




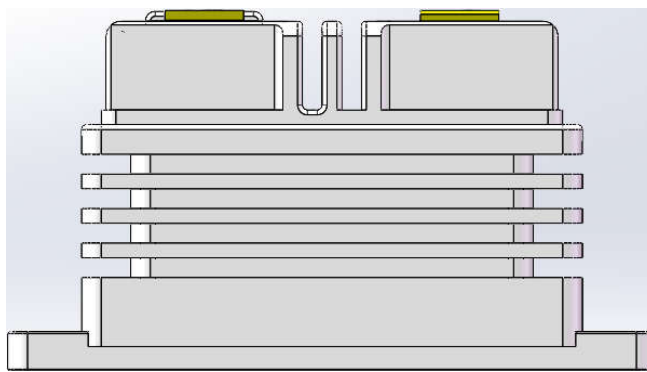
电-磁-热-力耦合仿真实例

➤GTO模块不同高度

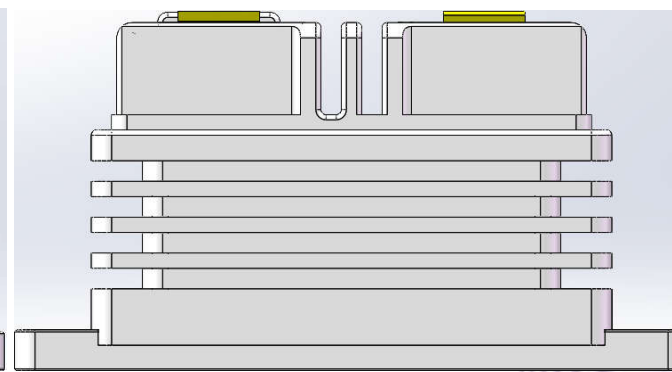
模块高度



高度38.5mm模块

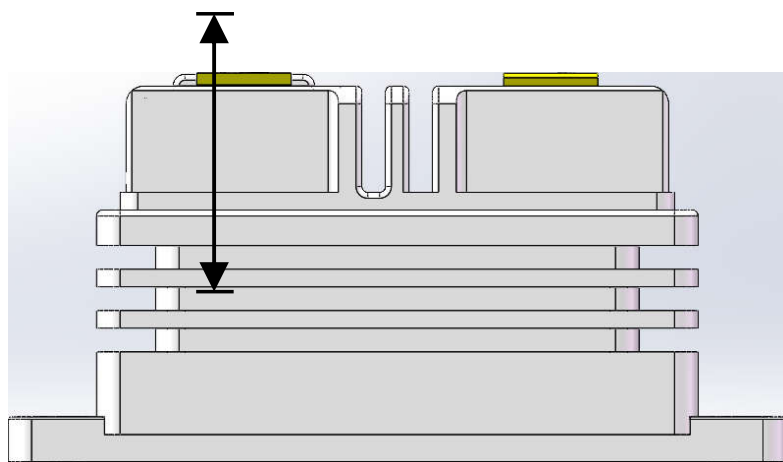


高度36.6mm模块

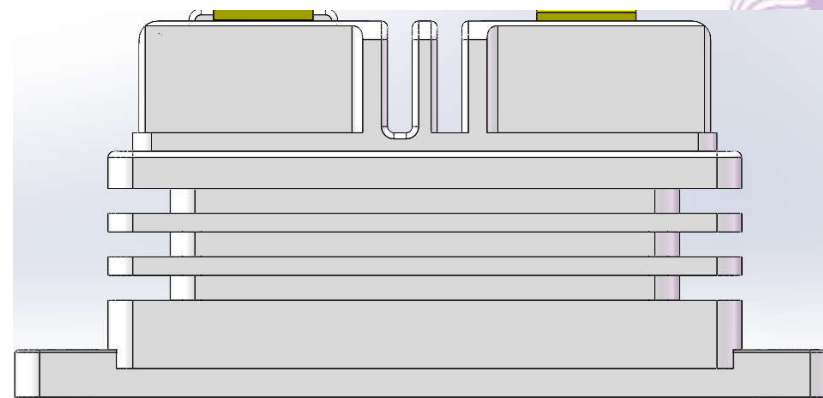


高度35.1mm模块

模块高度



高度33.1mm模块

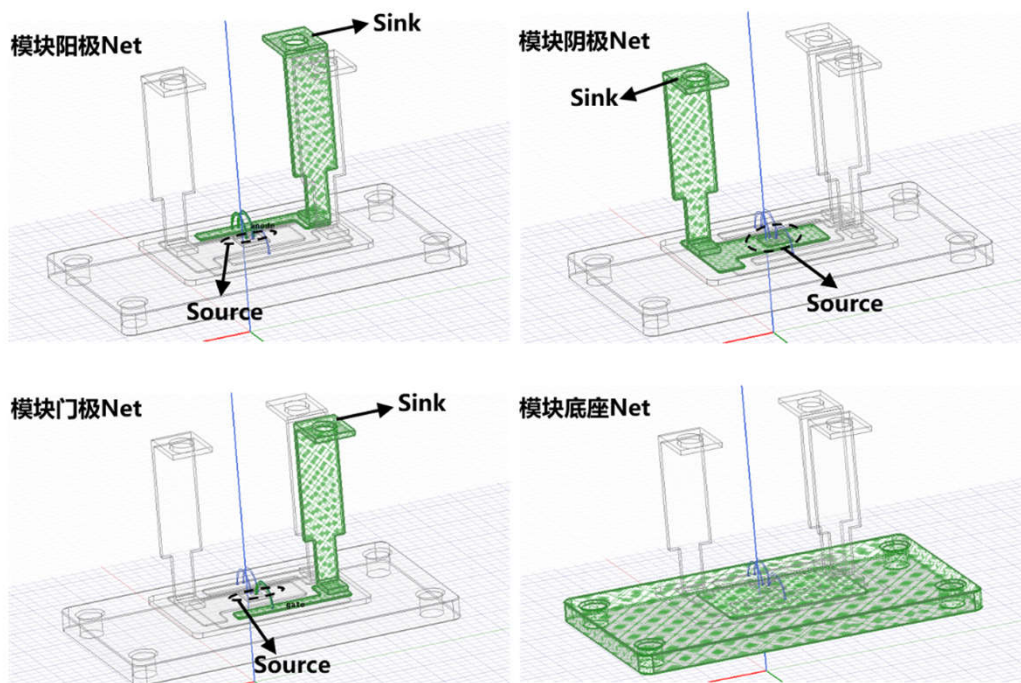


高度31.6mm模块



电-磁-热-力耦合仿真实例

➤不同高度模块寄生参数

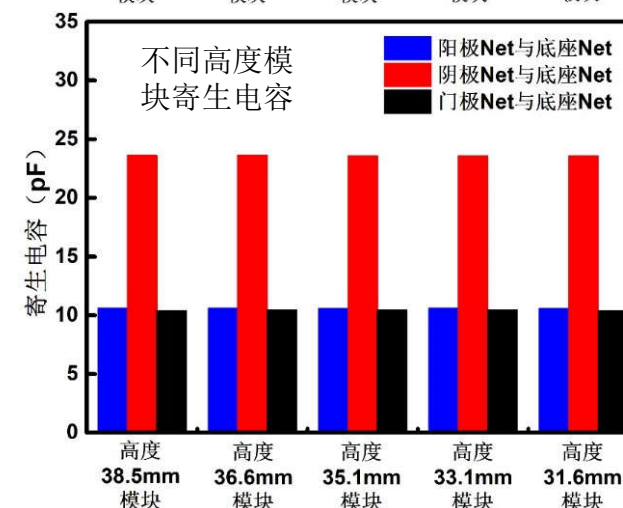
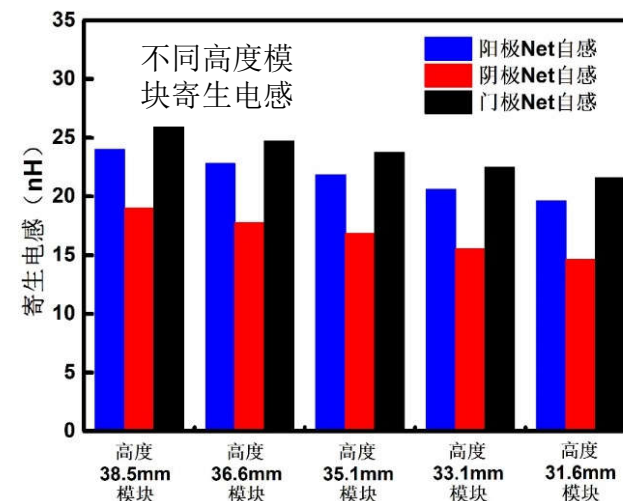


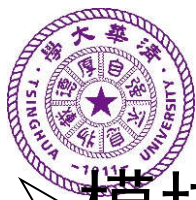
□ 阳极Net：阳极键合线+AMB基板Cu层+阳极端子

□ 阴极Net：焊料层+AMB基板Cu层+阴极端子

□ 门极Net：门极键合线+AMB基板Cu层+门极端子

□ 底座Net：AlSiC底座



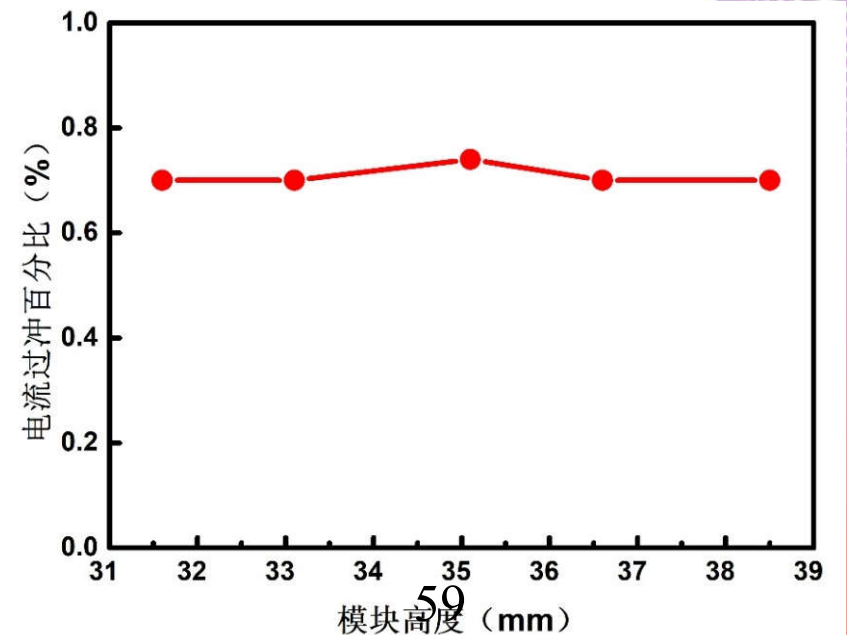
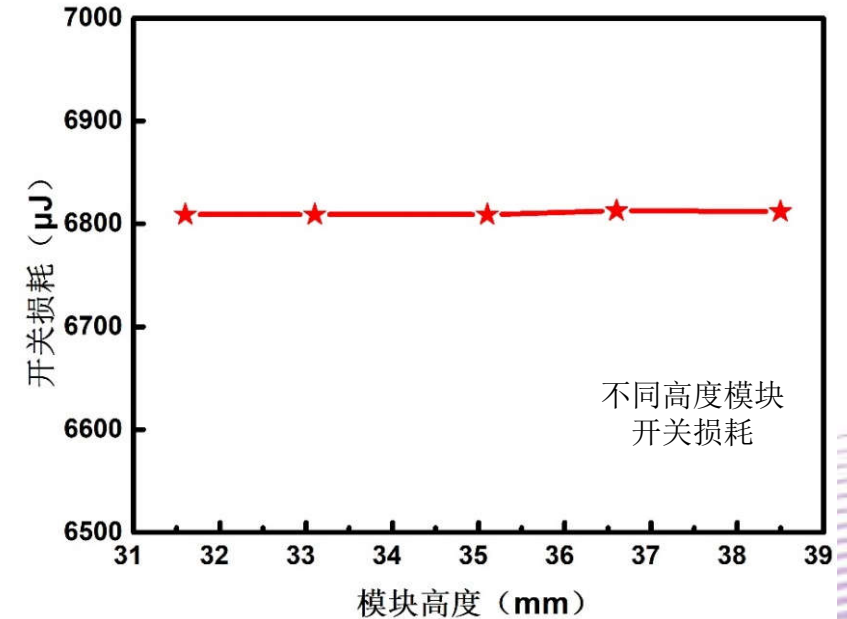


电-磁-热-力耦合仿真实例

➤ 模块高度对GTO芯片开关特性的影响

模块高度 (mm)	开启时间 (μ s)	关断时间 (μ s)	开启损耗 (μ J)	关断损耗 (μ J)	电流过冲 百分比 (%)
38.5	0.165	0.81	856	5956	0.7
	td=0.082 tr=0.083	ts=0.172 tf=0.638			
36.6	0.165	0.809	857	5956	0.74
	td=0.08 tr=0.085	ts=0.17 tf=0.639			
35.1	0.164	0.807	853	5956	0.74
	td=0.081 tr=0.083	ts=0.168 tf=0.639			
33.1	0.164	0.807	853	5956	0.7
	td=0.079 tr=0.085	ts=0.169 tf=0.638			
31.6	0.164	0.807	853	5956	0.7
	td=0.081 tr=0.083	ts=0.169 tf=0.638			

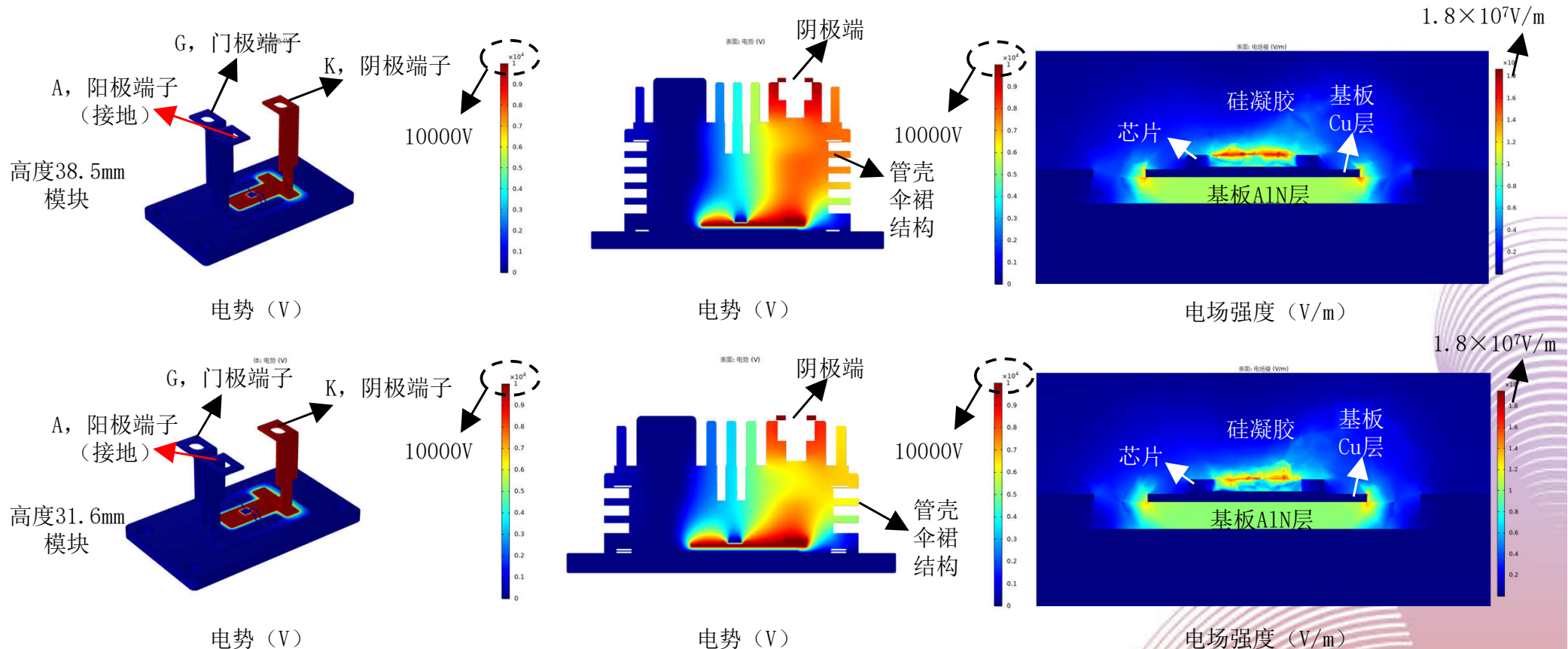
✓ 开启损耗、关断损耗均含驱动回路部分





电-磁-热-力耦合仿真实例

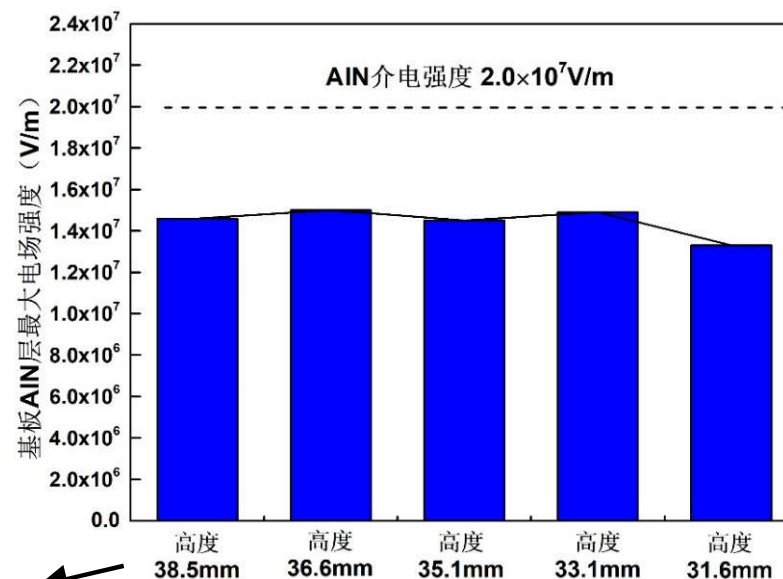
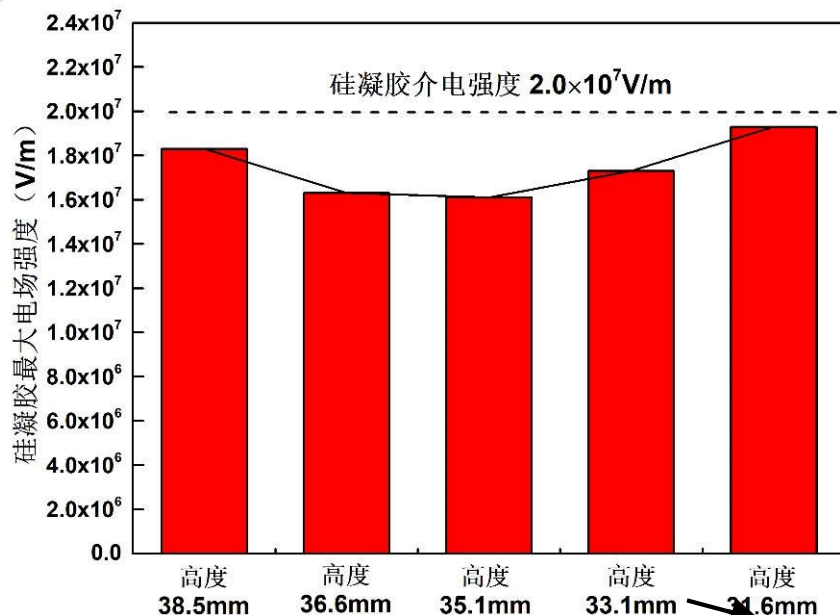
➤ 模块高度对电场分布的影响 (电场仿真, $V_{AG} = -40V$, $V_{AK} = 10000V$)





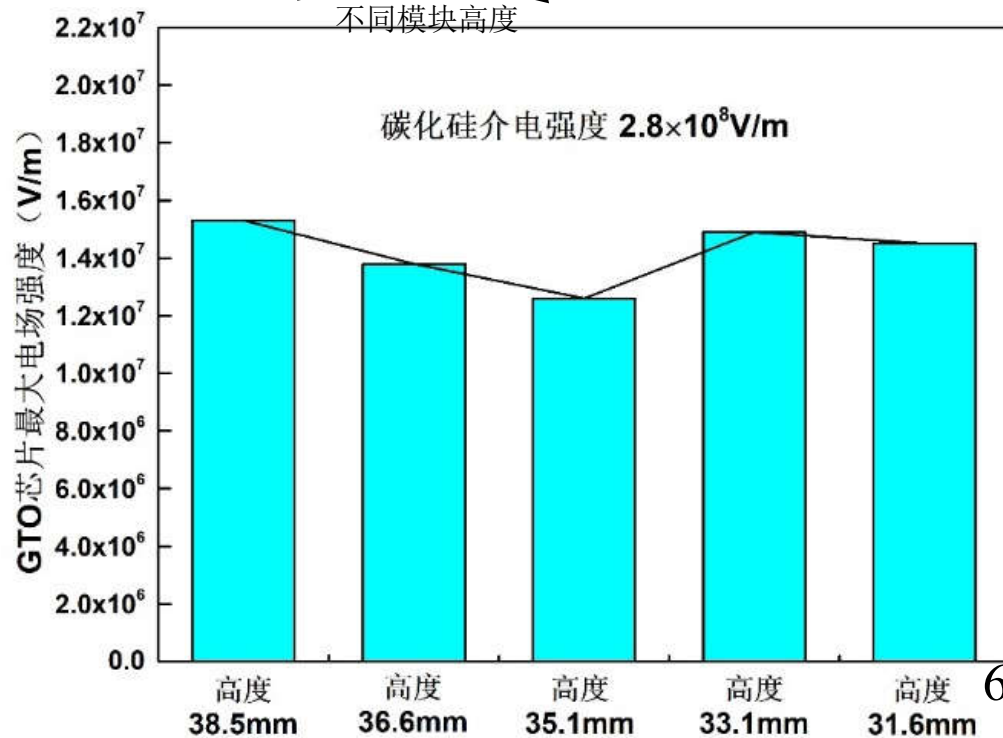
电-磁-热-力耦合仿真实例

硅凝胶最大
电场强度



AlN层最大电
场强度

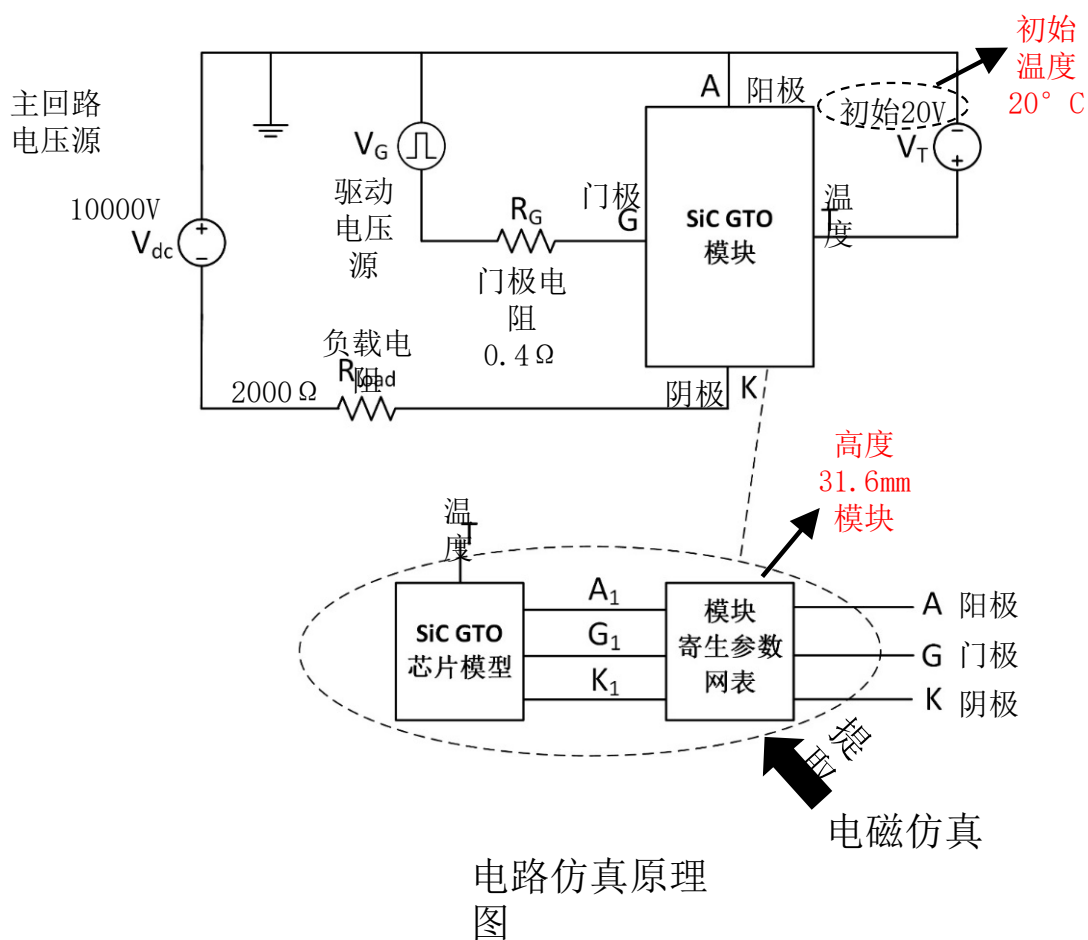
GTO芯片最
大电场强度



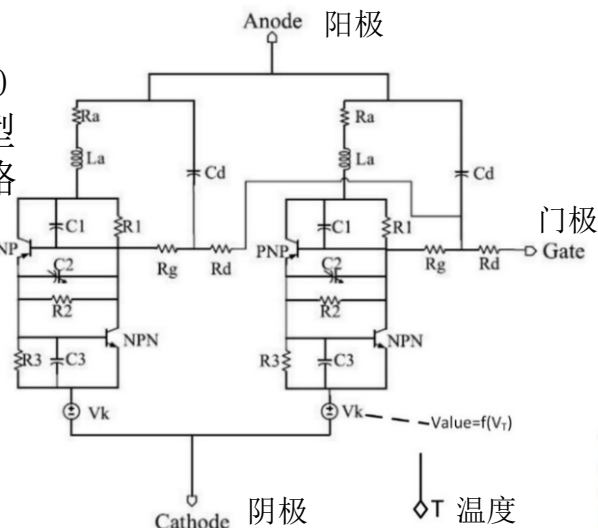


电-磁-热-力耦合仿真实例

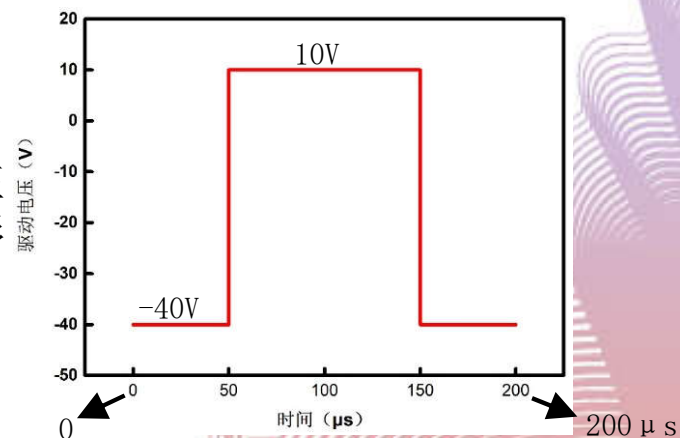
➤ GTO模块电-磁-热-力耦合仿真 (高度31.6mm模块)



SiC GTO 芯片模型等效电路图



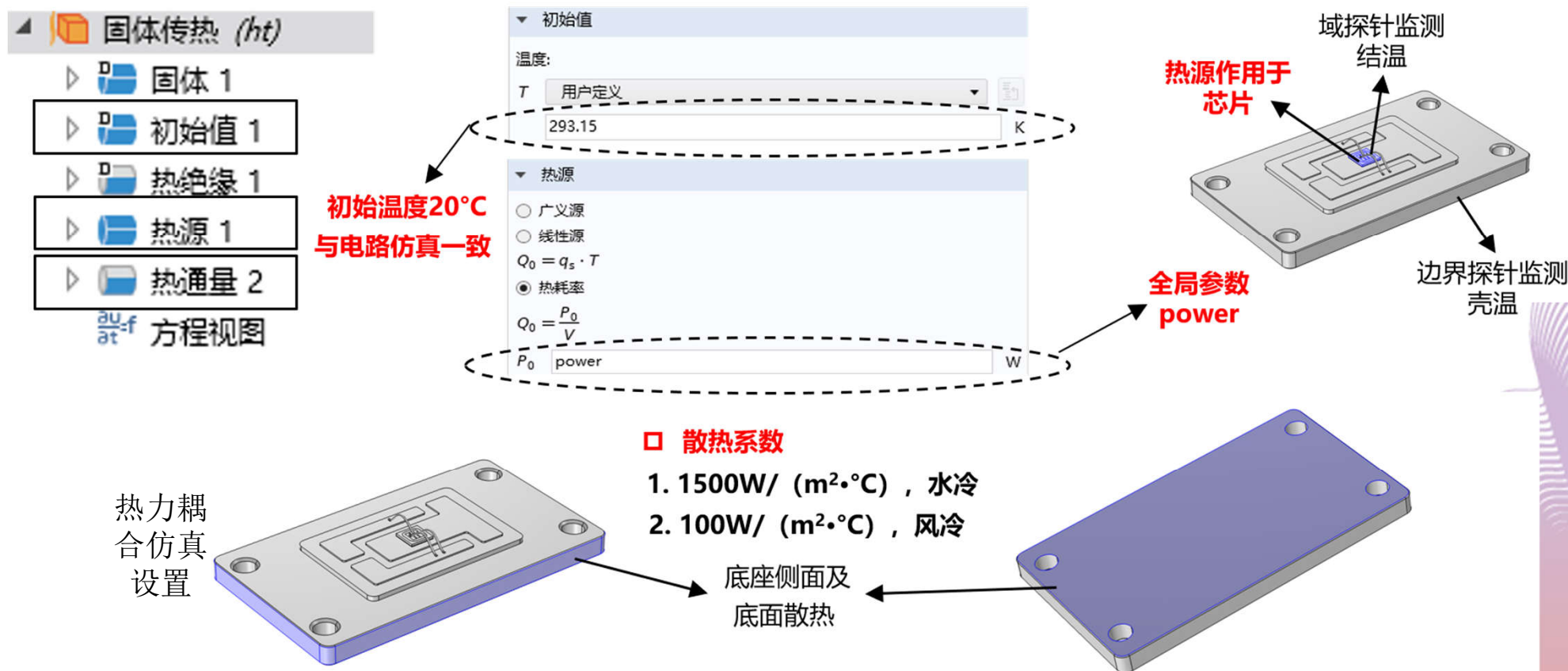
驱动电压脉冲波形





电-磁-热-力耦合仿真实例

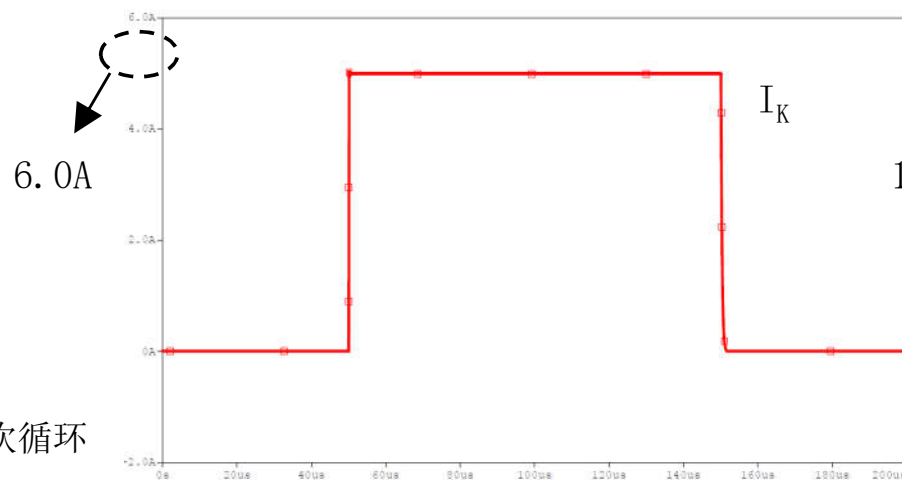
➤ GTO模块电-磁-热-力耦合仿真 (高度31.6mm模块)



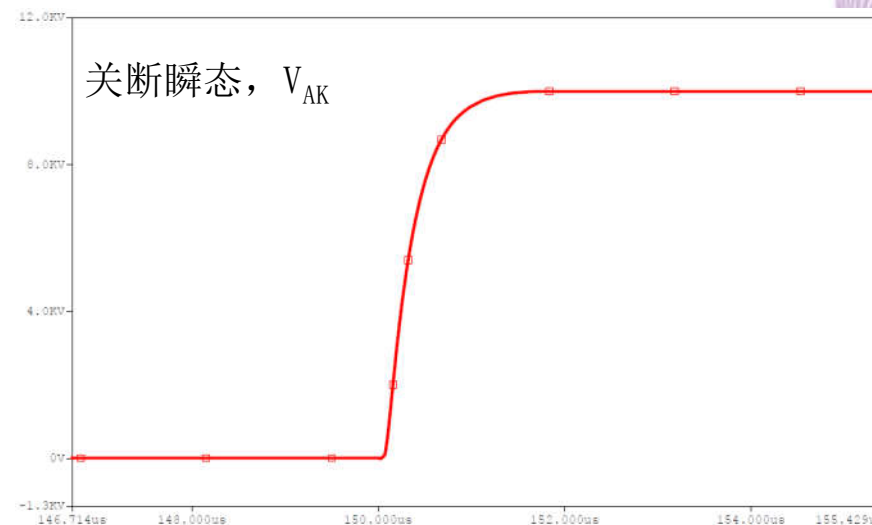
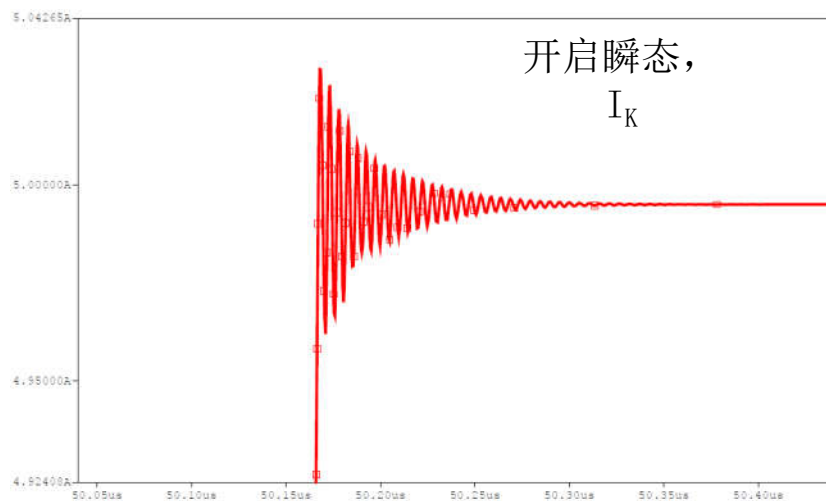
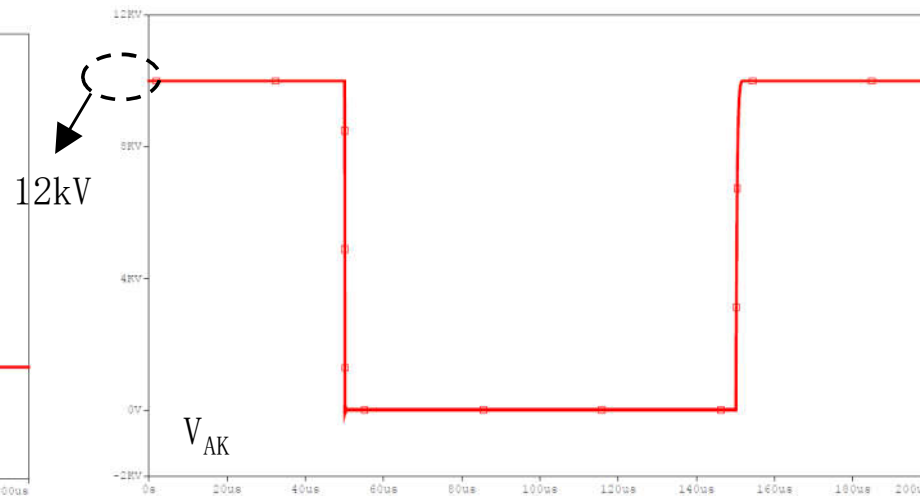


电-磁-热-力耦合仿真实例

➤ GTO模块电-磁-热-力耦合仿真结果（电路仿真）



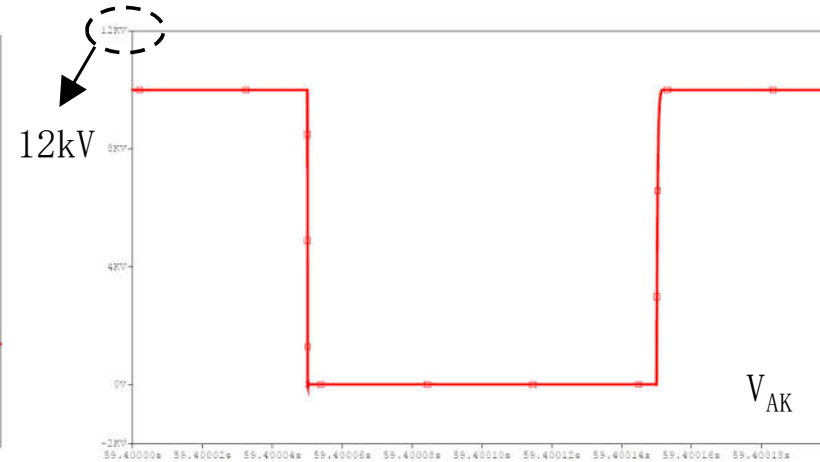
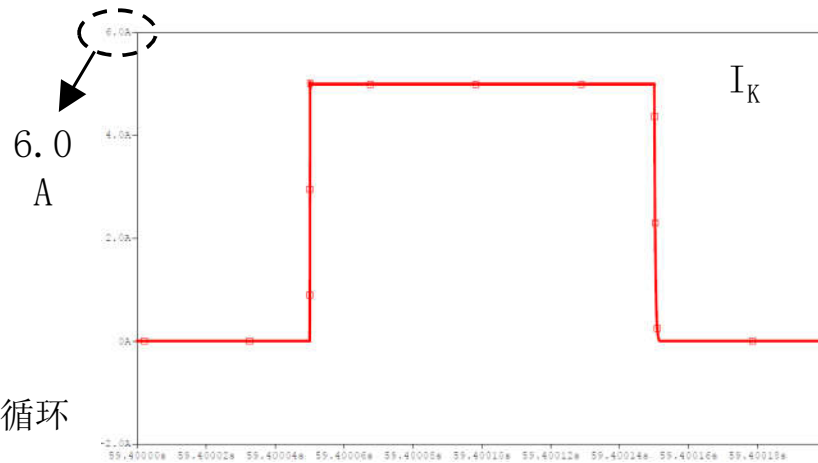
第1次循环
结温
20° C



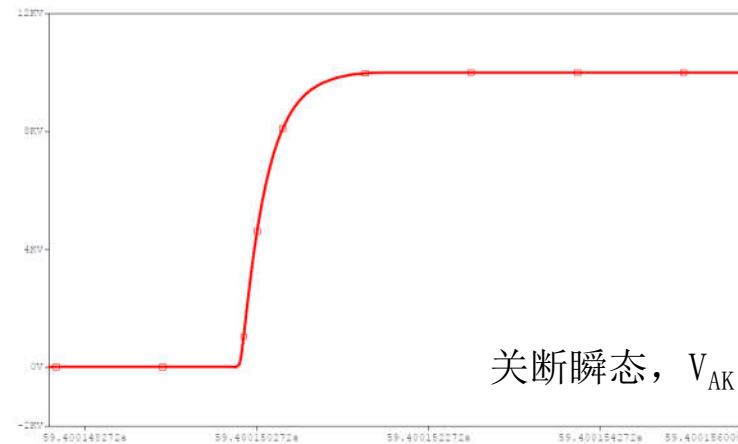
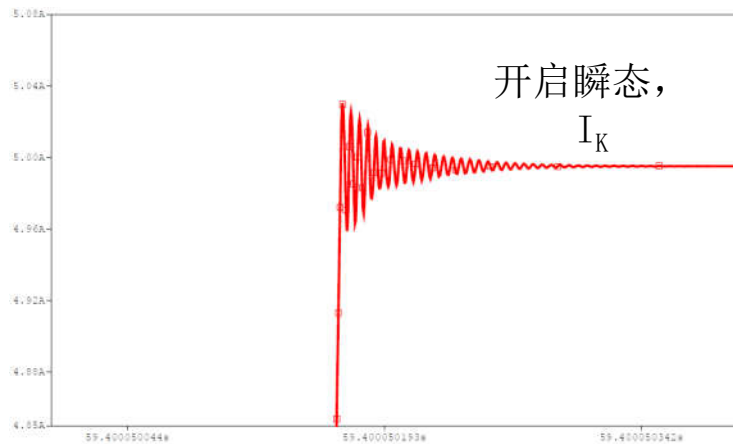


电-磁-热-力耦合仿真实例

➤ GTO模块电-磁-热-力耦合仿真结果（电路仿真）



第100次循环
结温
85.26° C





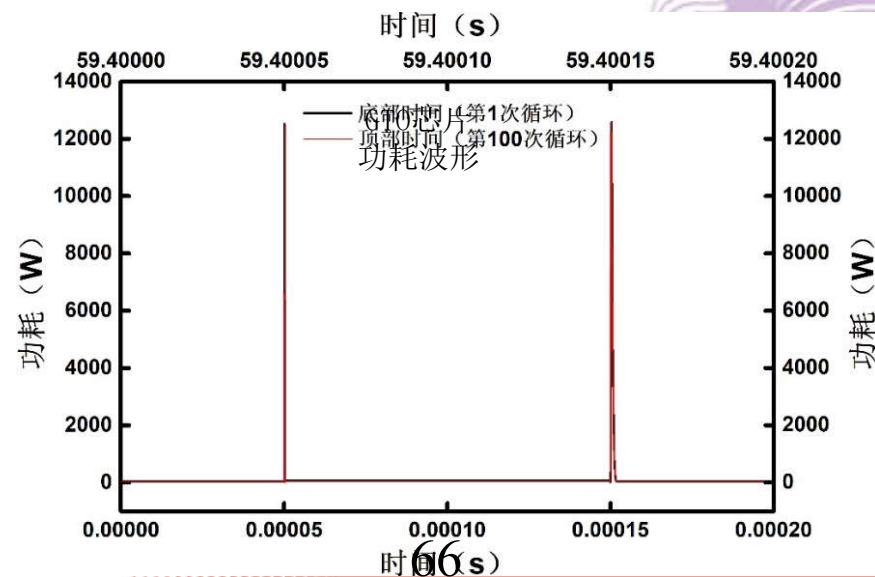
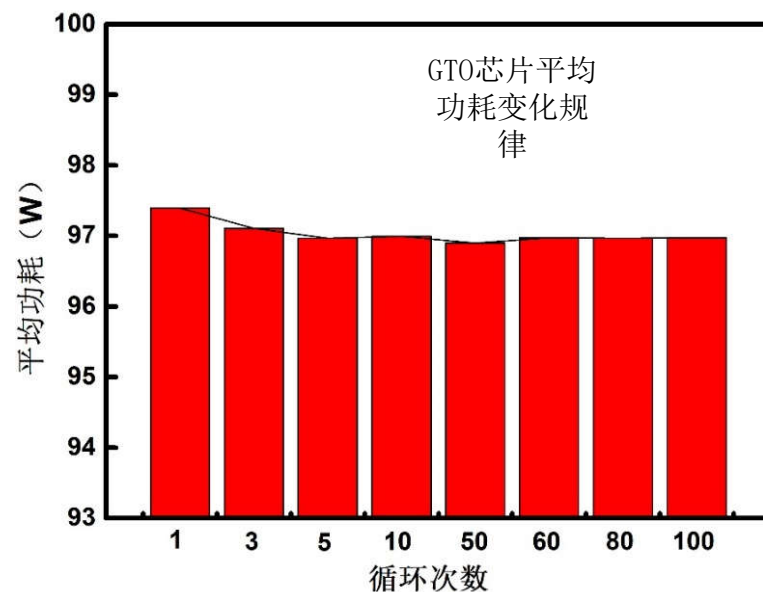
电-磁-热-力耦合仿真实例

➤ GTO模块电-磁-热-力耦合仿真结果（电路仿真）

循环迭代中GTO芯片电参

时间	结温 (°C)	导通 压降 (V)	导通 电流 (A)	导通 电阻 (Ω)	导通功耗 (W)	平均功耗 (W)
第1次 循环 (0~0.6s)	20	9.895	4.995	1.981	68.92	97.394
第3次 循环 (1.2~1.8s)	74.483	9.783	4.995	1.959	68.36	97.106
第50次 循环 (29.4~30s)	85.235	9.726	4.995	1.947	68.075	96.899
第100次 循环 (59.4s~60s)	85.260	9.726	4.995	1.947	68.075	96.973

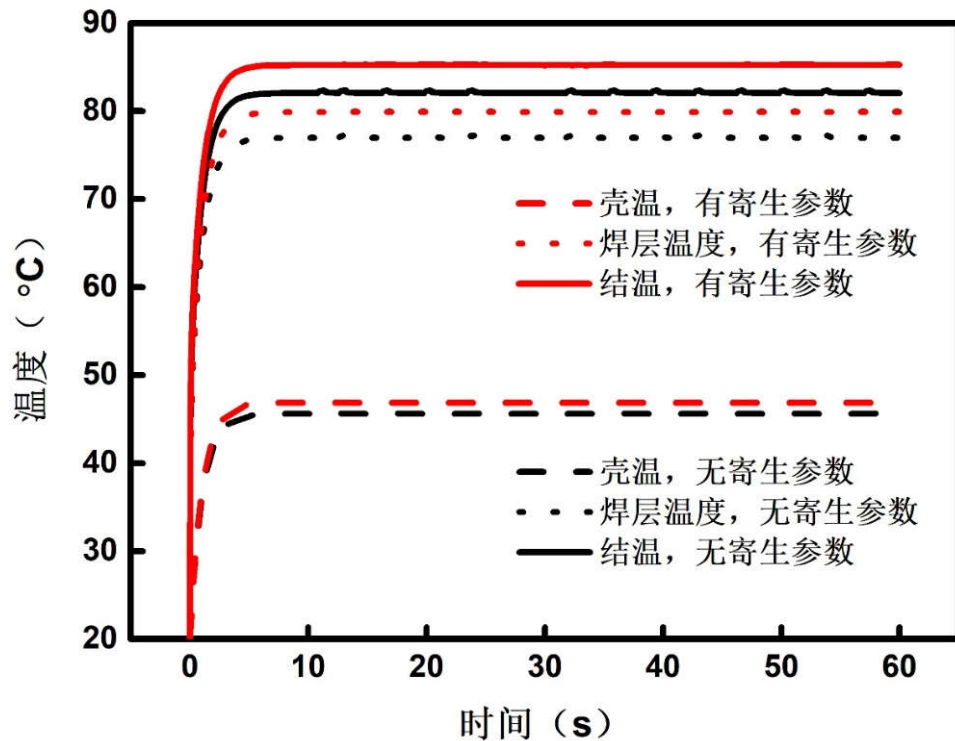
包括
驱动回
路
部分



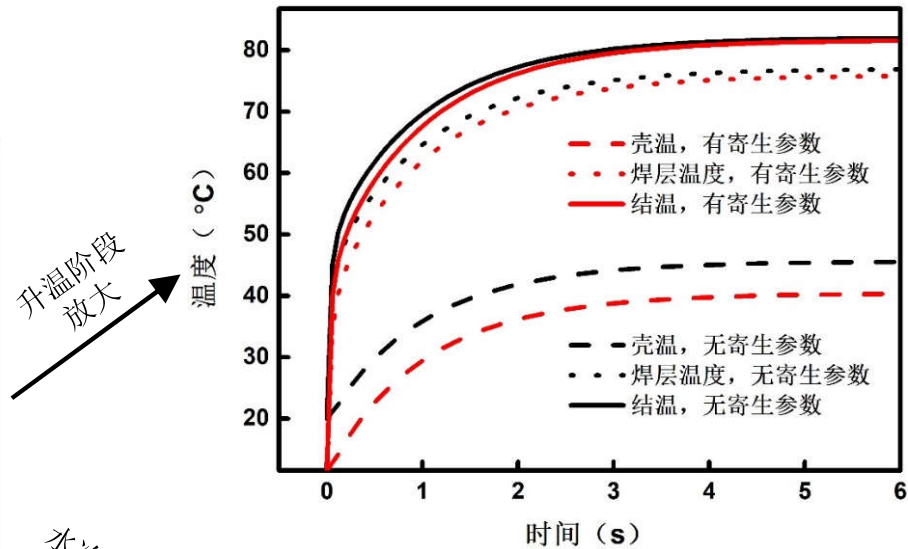


电-磁-热-力耦合仿真真实例

➤ GTO模块电-磁-热-力耦合仿真结果（热力耦合仿真，温度场）

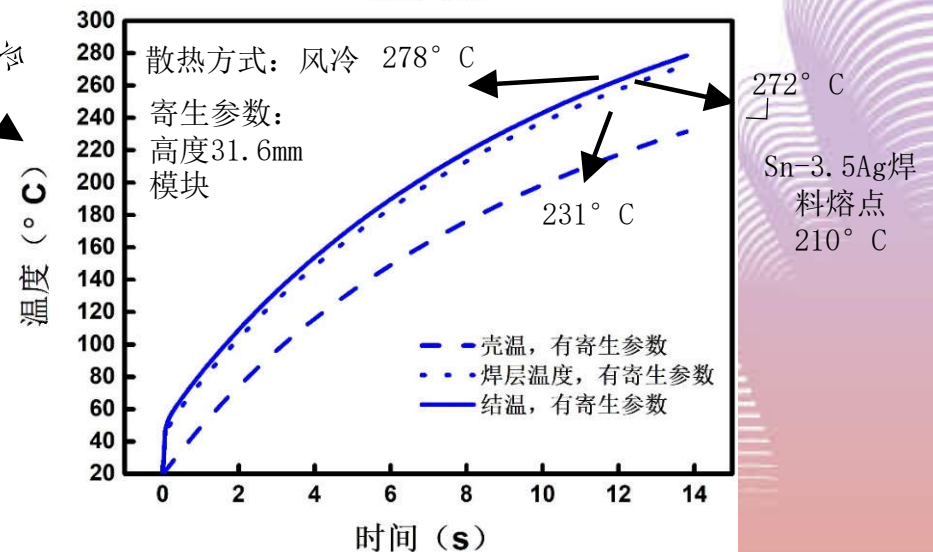


散热方式: 水冷, 寄生参数: 高度31.6mm模块



升温阶段放大

水冷与风冷对比





模组设计——多物理场仿真

- 基于建立的元器件模型和提取的寄生参数，进行EMI/EMC分析
- 基于电路拓扑进行并联均流设计
- 基于电路模型进行模块的热分析与优化设计
- 基于了方针的结果进行热管理设计
- 开展封装材料的承受高温、高电场以及粘附性等性能研究。



提纲

- 背景
- SiC的产业链
- 三个层级的仿真设计
 - 器件级仿真——TCAD
 - 芯片级仿真——Spice model
 - 模组级仿真——多物理场仿真
- 小结



- 随着功率器件与模块的发展，设计和仿真对分析电路和系统性能的影响是必要的评估；
- 器件级仿真解决元胞的优化设计
- 芯片级仿真解决元器件spice模型和考虑寄生参数的电路优化设计
- 模块级仿真解决利用电热力磁的多物理场仿真解决封装可靠性问题；
- 我们致力于建立一个仿真平台，把各个层次的仿真在一个平台下完成。



谢谢!