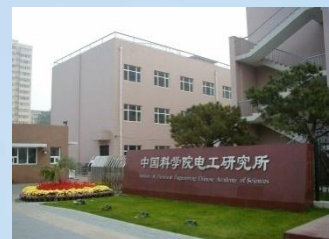


碳化硅在车用电机控制器中的应用探索



宁圃奇

npq@mail.iee.ac.cn

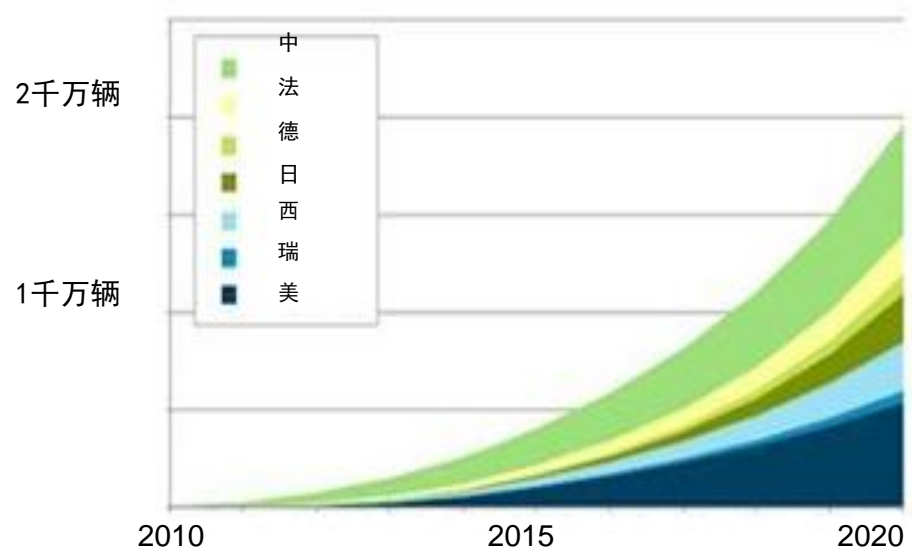


主要内容

1. 碳化硅器件应用概述
2. 碳化硅模块封装新进展
3. 碳化硅变频器系统开发



新能源车降低价格的需求



	常规动力(¥)	混合动力(¥)
凯美瑞	18万	26万
思域	14万	27万
宝马3系	37万	60万
奥迪A8	66万	110万
卡宴	92万	143万

价格昂贵，制约发展
通过提高功率密度降低整车成本

■ 《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)》

到2020年累计产销量达到500万辆

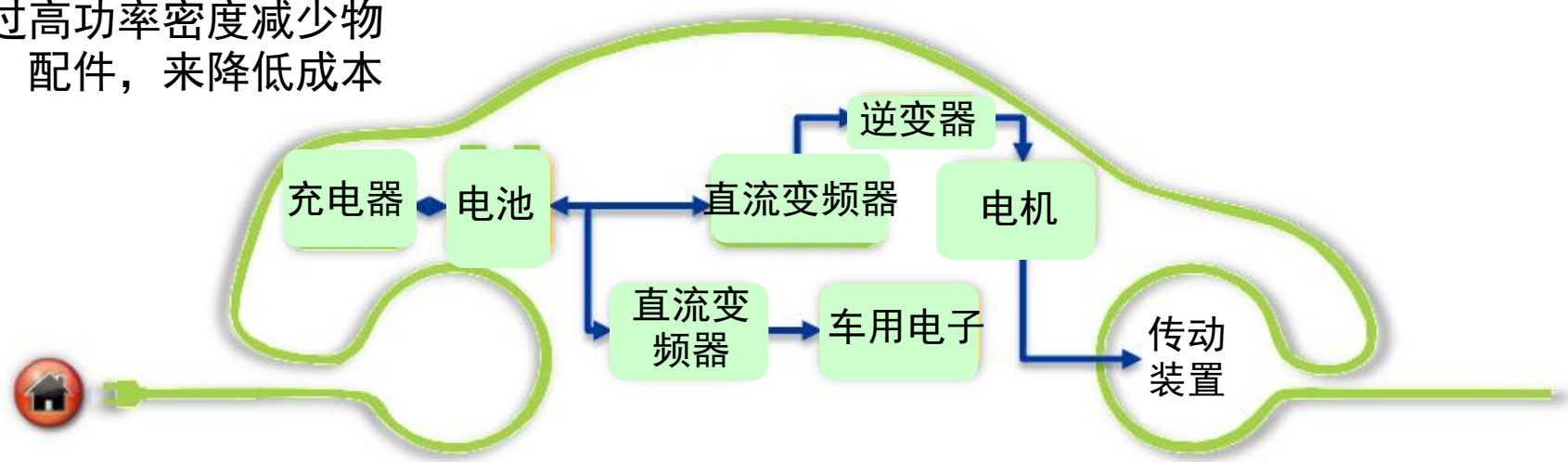
■ 《中国制造2025》

将新能源汽车定为重点领域，提出到2025年，实现与国际先进水平同步的新能源汽车年销量300万辆，在国内市场占80%以上

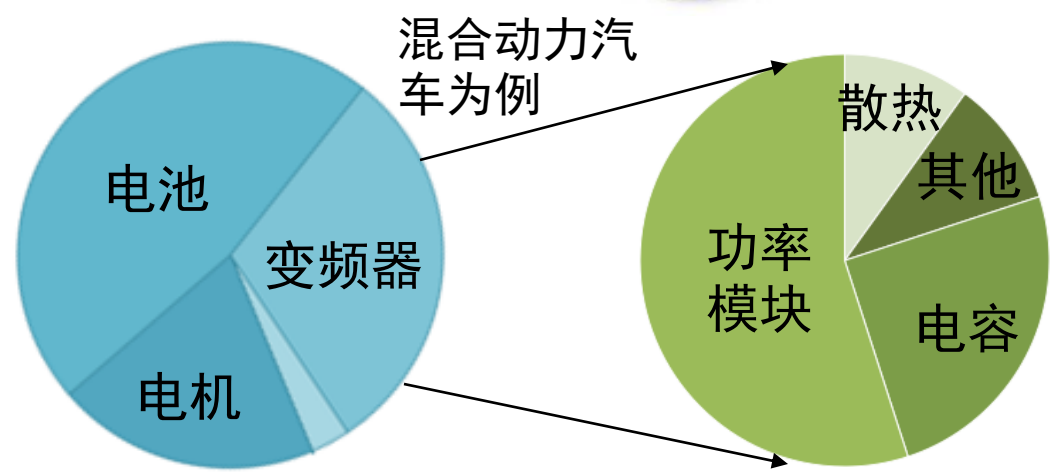


降低成本的途径

通过高功率密度减少物料、配件，来降低成本

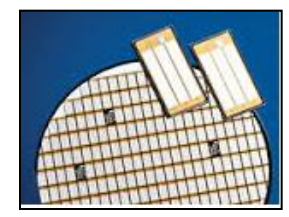
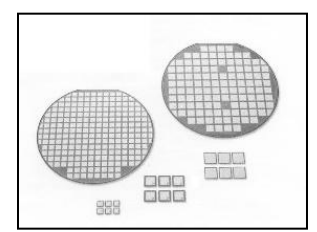
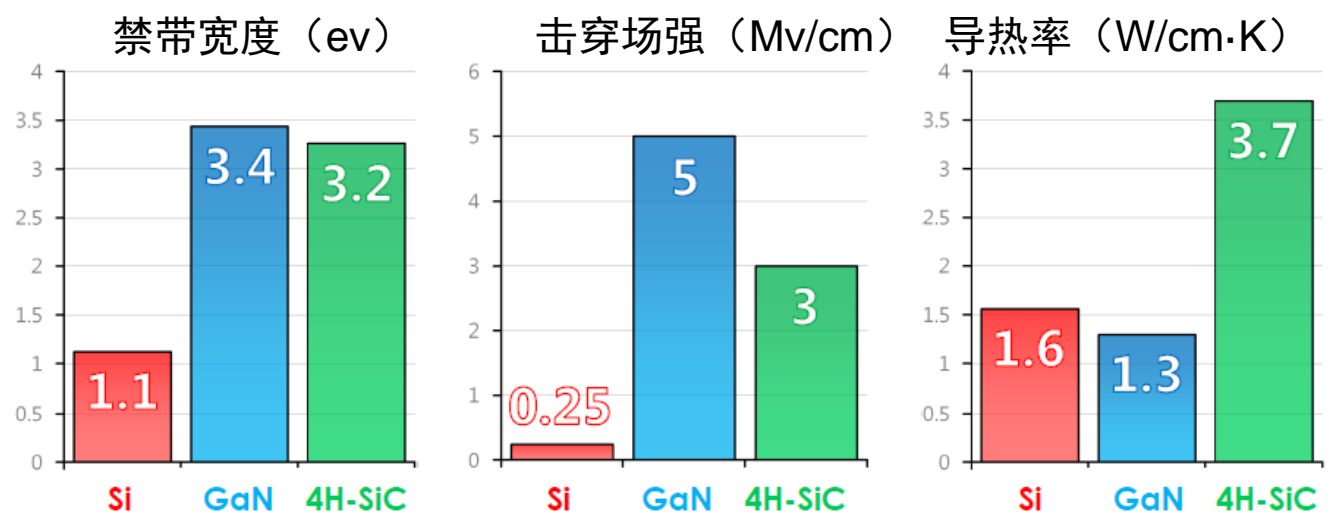


DOE功率密度目标		
年	kW/L	kW/kg
2010	6.7	7.1
2015	12	12
2020	13.4	14.1



宽禁带半导体优势

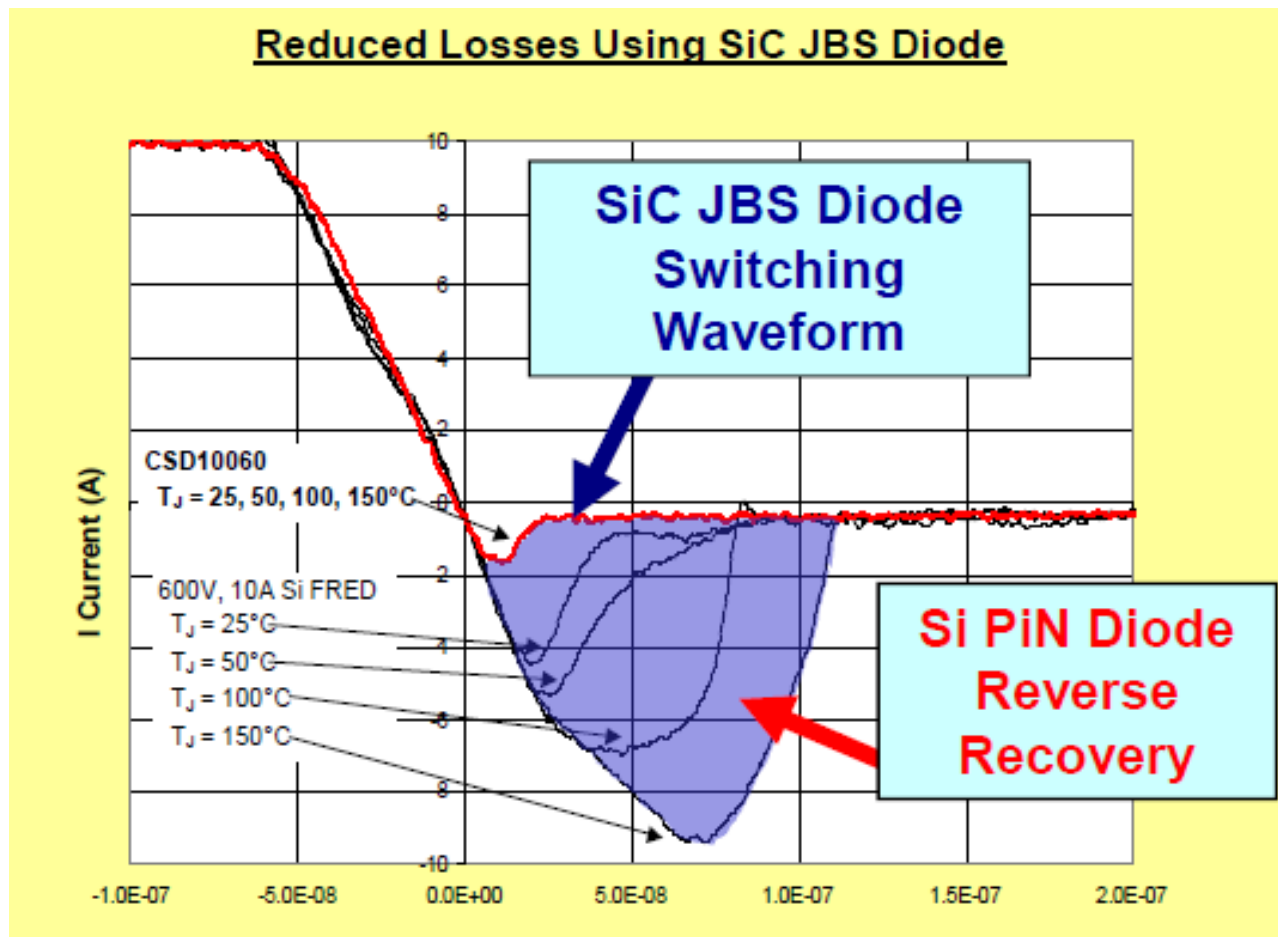
下一代功率半导体芯片，具有多项优势



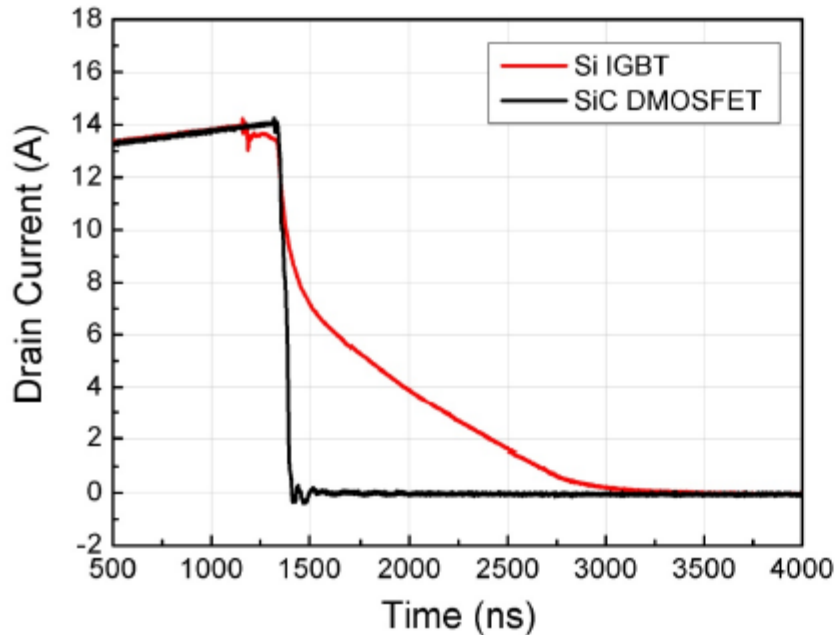
- 导通电阻小 硅器件1/3-1/5
- 可高温工作 硅器件1.5-2倍
- 可高速开关 硅器件3-5倍



碳化硅二极管优势



碳化硅开关器件优势



Switching at 150°C

Switching Energies

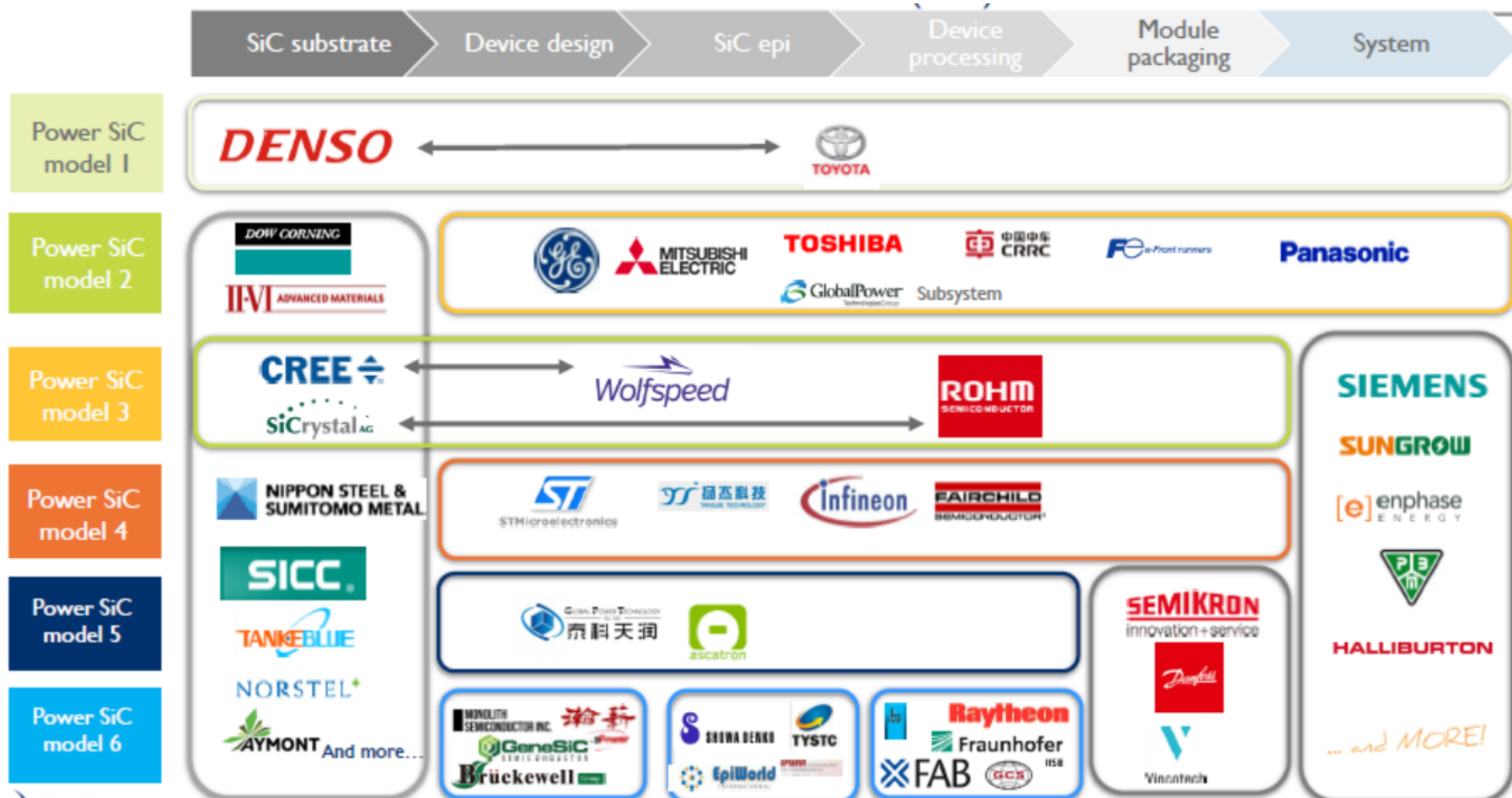
SiC DMOSFET: 457 μJ

Si IGBT: 4490 μJ

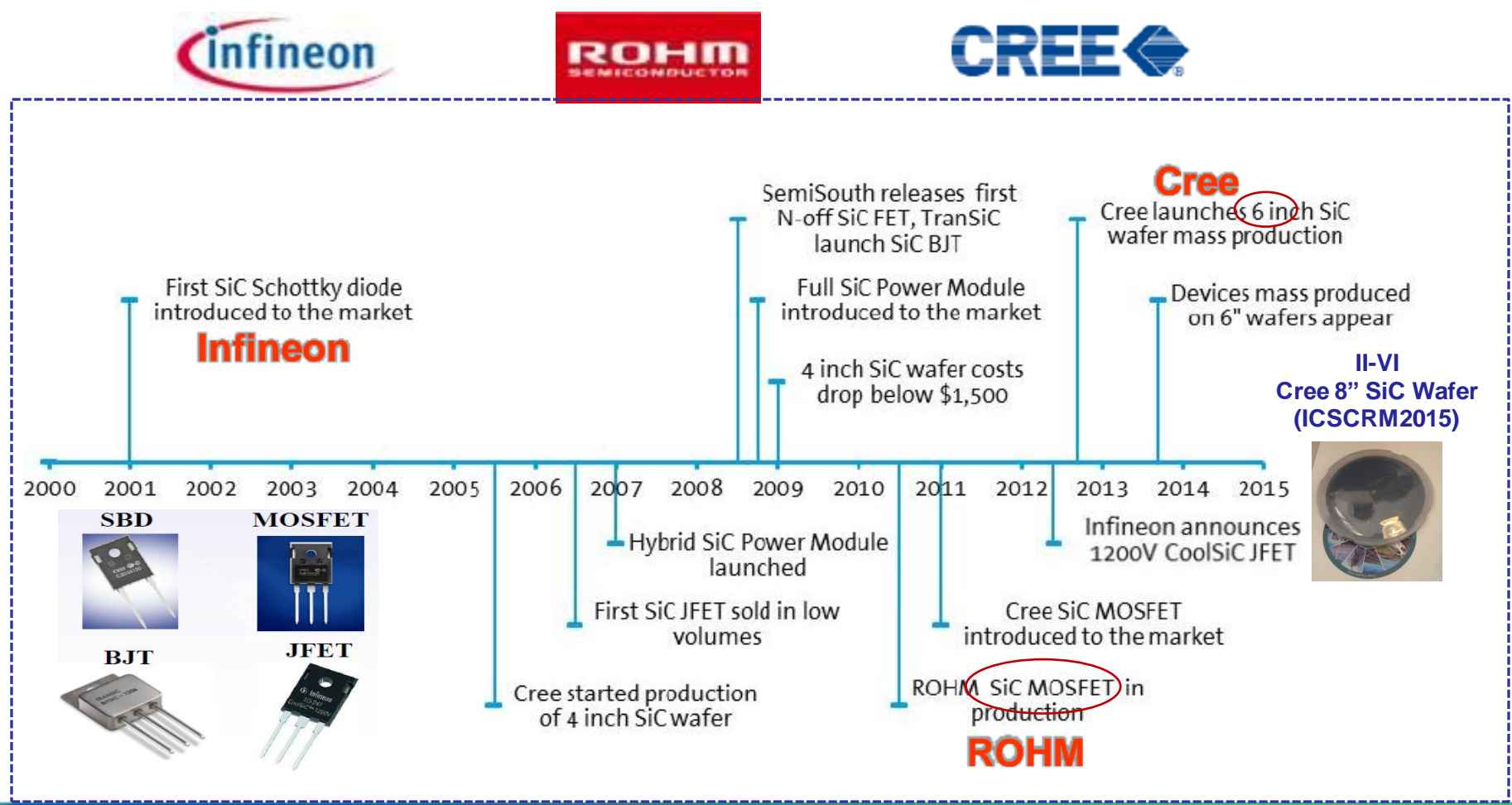
Switching Losses (μJ)

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Turn On		Turn Off	
	SiC DMOS	Si IGBT	SiC DMOS	Si IGBT
25	423	303	84	973
50	381	335	82	1310
75	369	373	87	1710
100	362	413	96	2240
125	352	455	104	2980
150	348	500	109	3990

SiC功率产业的商业模式

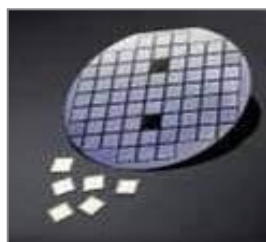
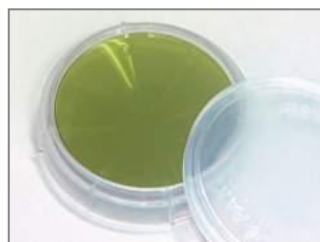


国外：SiC产品系列化, 已逐步应用于装备



国内：应用需求旺盛，产业化亟待突破

- 单晶衬底：天科合达，山东天岳
目前天科合达已有**6寸SiC**单晶衬底产品
- 外延生长：厦门瀚天天成、广东东莞天域
可量产**600~1700V**外延材料；可定制厚度至**100 μ m**的外延层，以及**P型掺杂的SiC**外延层
- 器件研制：中科院微电子所、中车时代电气、中电**55**所、**13**所、电子科技大学，西安电子科技大学、浙江大学、国网、泰科天润等
泰科天润已实现**600~1200V/1~50A**肖特基二极管产业化，另有**1700V**和**3300V**电压等级产品。
- 模块应用：中车、中科院电工所等



材料

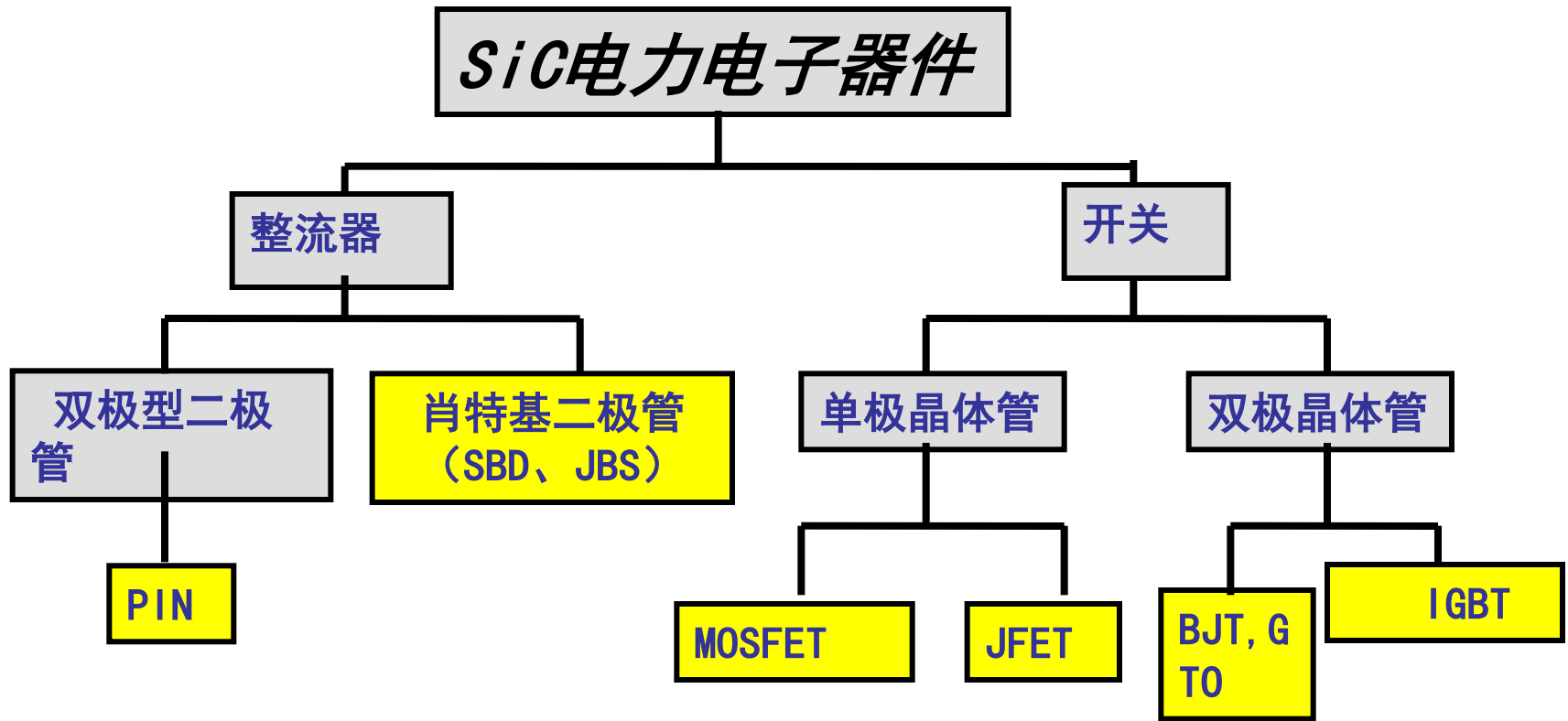
器件

模块

组件

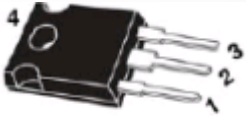
应用

碳化硅器件类型



国外：多种器件系统研发，其中低功率器件已经产品化。

碳化硅器件价格对比



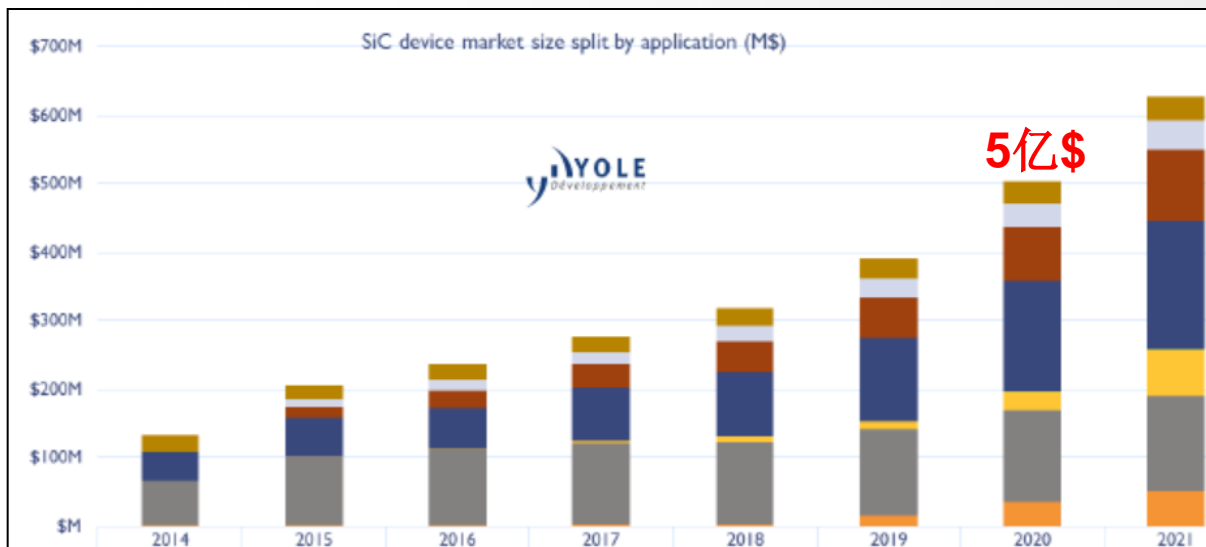
型号	电压 (伏)	电流 (安)	单支价格 (美元)
ST SiC MOSFET SCT50N120	1200	65	35.13
IXYS SiC MOSFET IXFN70N120SK	1200	68	109
CREE SiC MOSFET C2M0025120D	1200	90	69.8
Rohm SiC MOSFET SCT3030KL	1200	72	44.21
Microsemi SiC MOS APT80SM120J	1200	56	78.36
Infineon Si IGBT IGW60T120FKSA1	1200	100	7.12
IXYS Si IGBT IXYH82N120C3	1200	160	13.44

型号	电压 (伏)	电流 (安)	单支价格 (美元)
Infineon SiC MOSFET DF11MR12W1M1_B11	1200	50	119.04
Rohm SiC MOSFET BSM180D12P3C007	1200	180	506.97
Rohm SiC MOSFET BSM300D12P2E001	1200	300	668.18
CREE/ Wolfspeed SiC MOS CAS120M12BM2	1200	193	330
Infineon Si IGBT FF400R12KT3	1200	580	145.33
Microsemi APTGLQ400A120T6G	1200	625	184.36

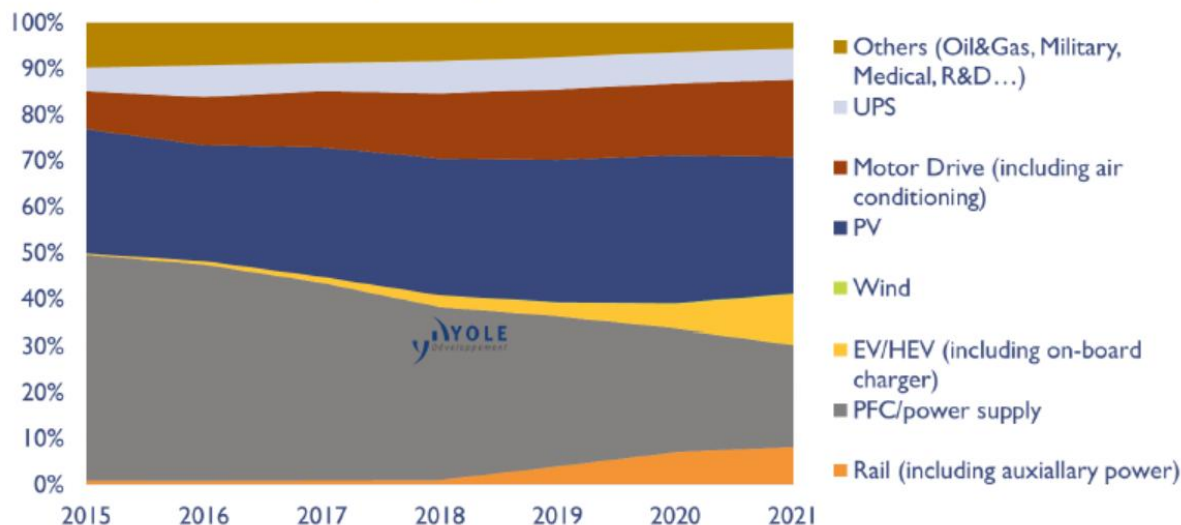
ref: mouser.com



SiC器件市场及预测

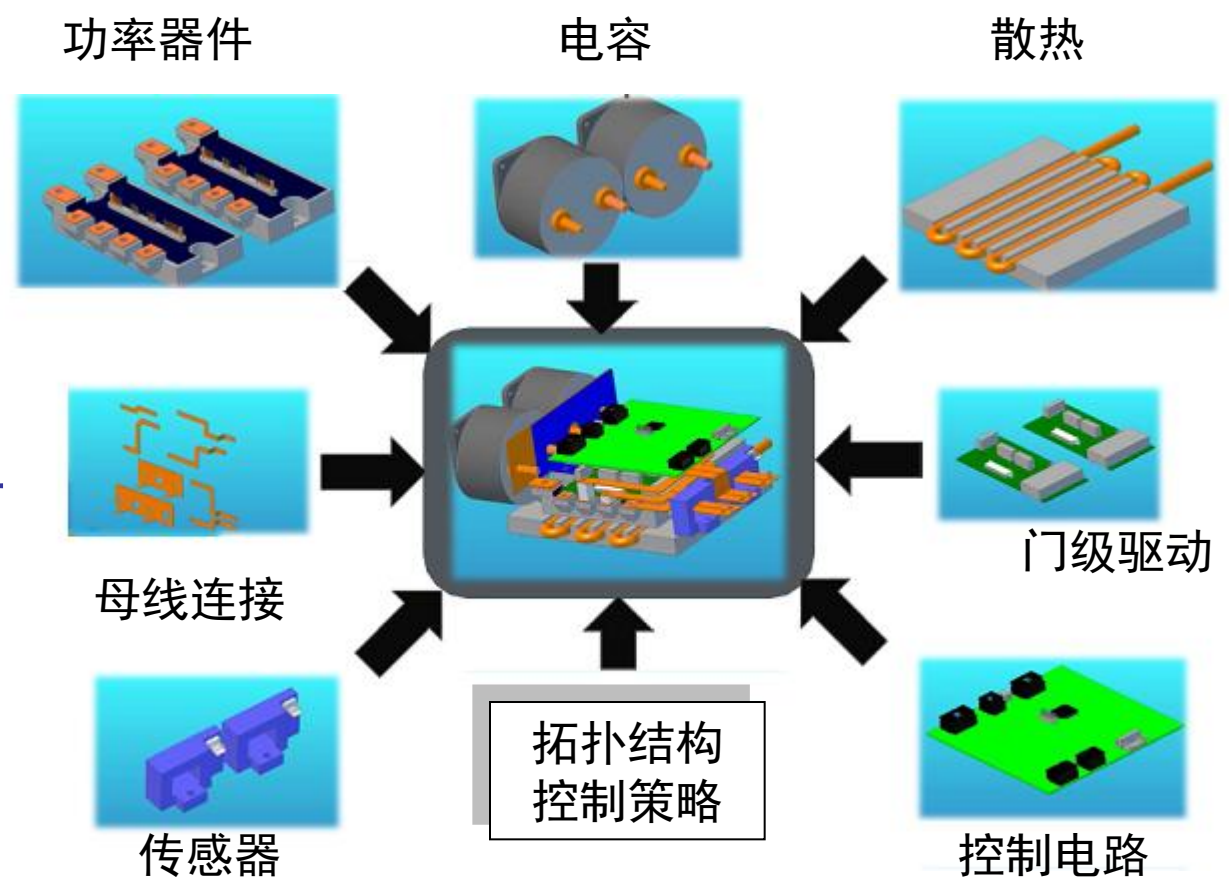


SiC power application market share

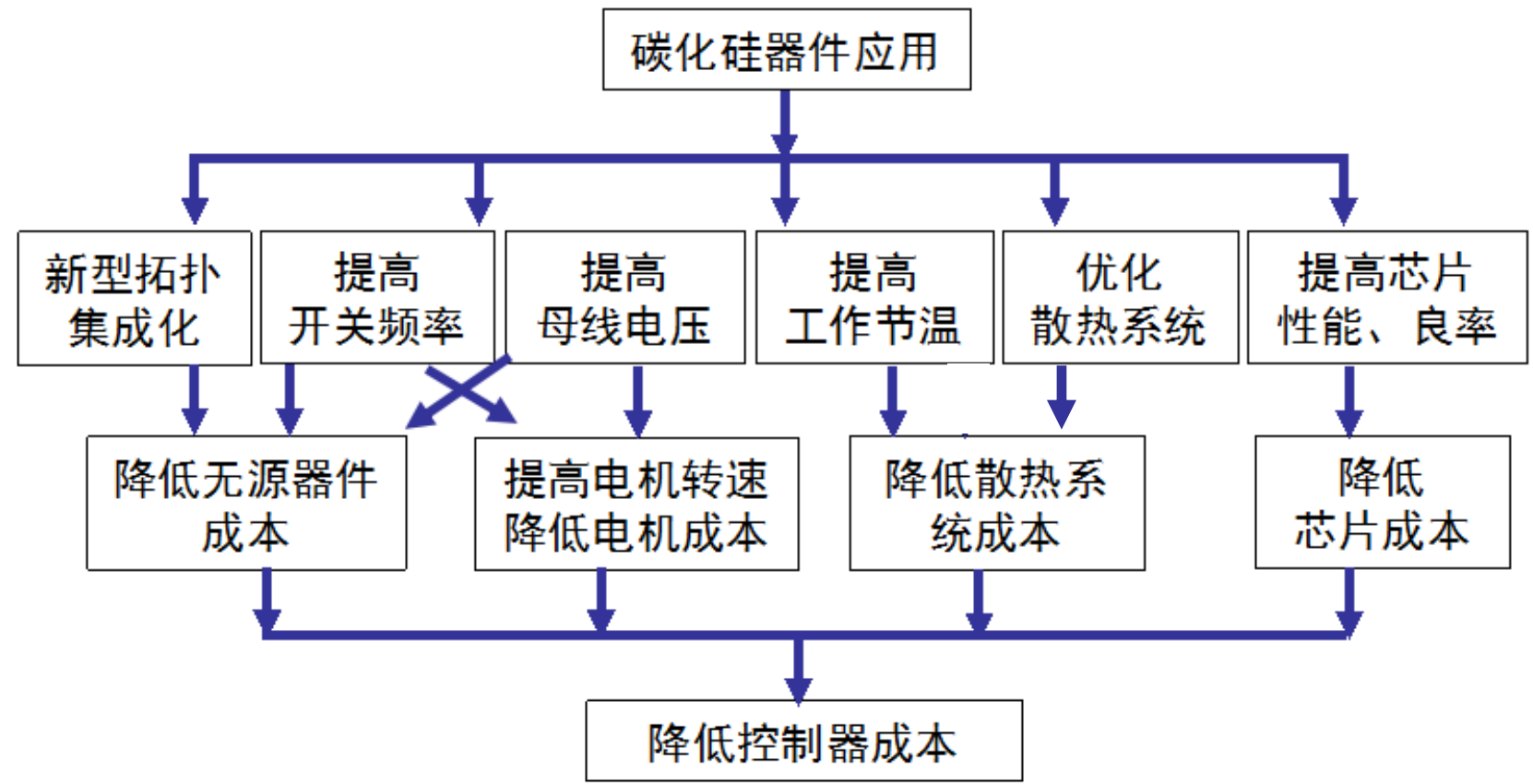


碳化硅芯片需要匹配其他部件

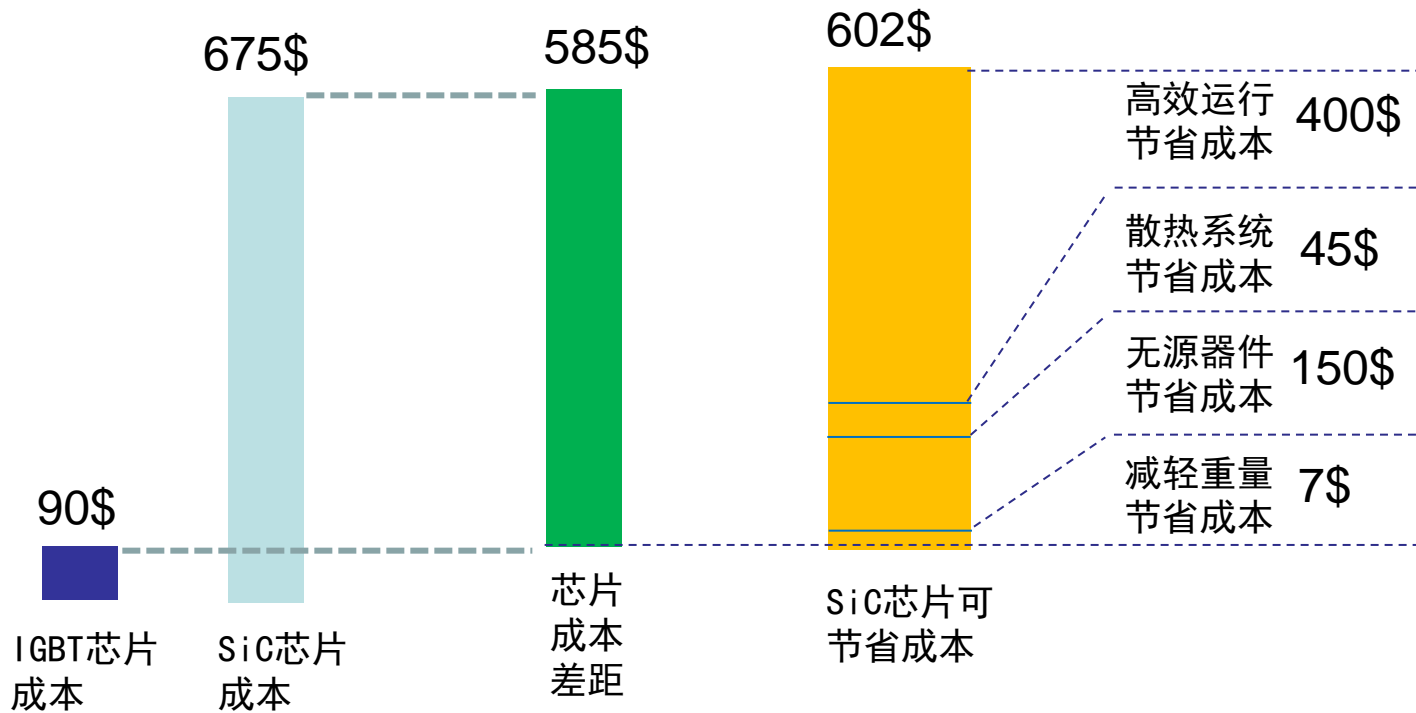
功率芯片发展不独立
各部分紧密联系
提高功率密度
保持可靠性
降低成本



碳化硅器件降低成本的技术路线



碳化硅器件降低整体成本的可行性



ref: EV Everywhere





主要内容

1. 碳化硅器件应用概述
2. 碳化硅模块封装新进展
3. 碳化硅变频器系统开发

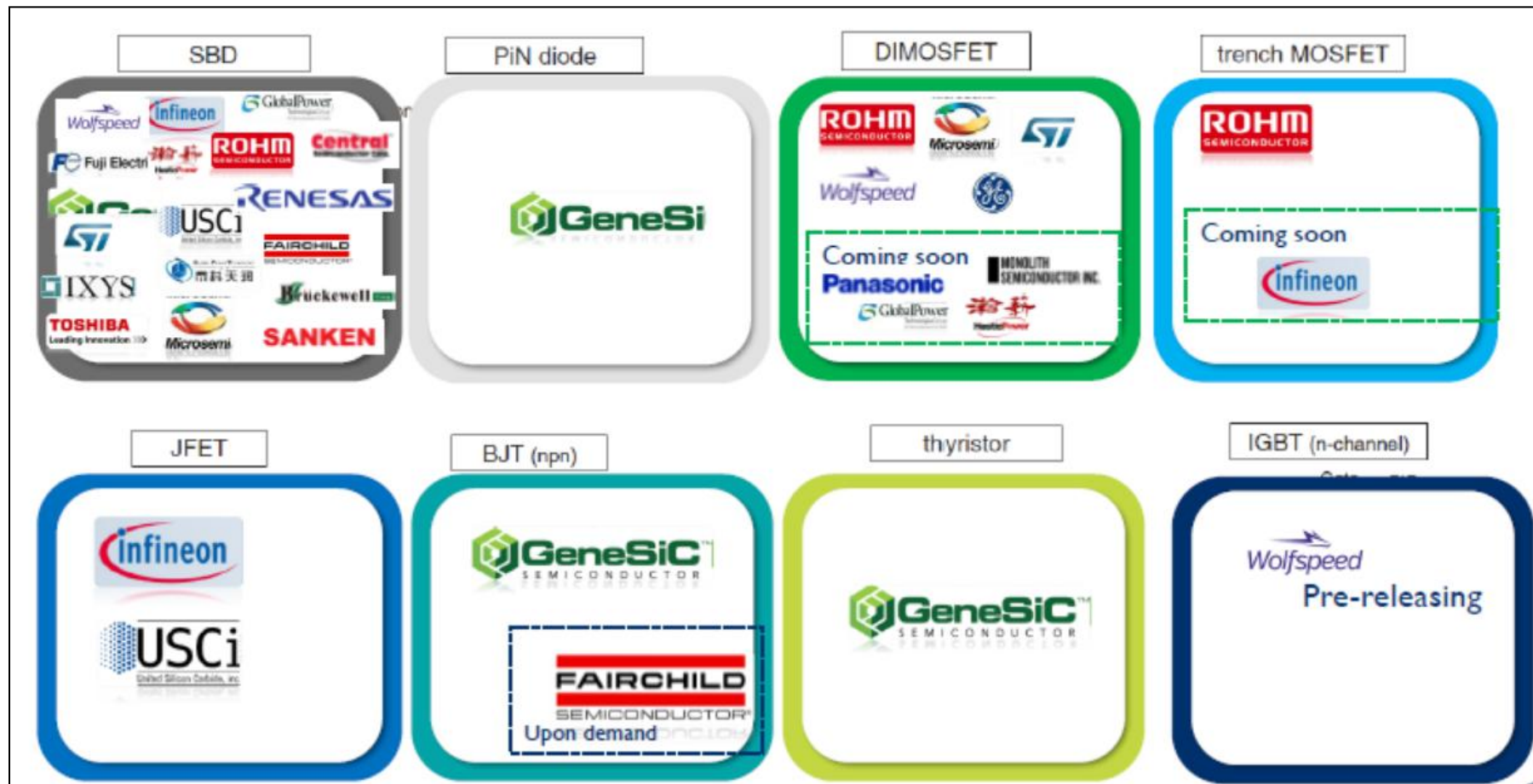


电动汽车驱动用模块需求

项目	工业应用 	汽车应用 
封装尺寸	空间不受限制，可用标准封装配套各种应用	布置空间有限，必须根据具体产品进行特殊设计
工作环境	环境温度适中（-20~+40°C）； 静止应用，震动较小	温度变化大（-40 ~ +105°C）； 振动剧烈；
可靠性要求	较高以保证生产效率	很高以保障乘车者安全
冷却方式	通常为风冷（体积大）	通常为水冷（体积小）
控制性能	多为变频调速控制，动态性能较差	需要精确的力矩控制，动态性能较好
功率密度	较低（0.2kW/kg）	较高（1 - 1.5kW/kg）
总体性价比	--	如\$20/kW



SiC器件厂家及产品



SiC模块国内外研究进展对比



外现状

CREE产品模块1200-1700V, 50-325A



南车混合模块1200-1700V, 200-1600A



Rohm、三菱产品模块1200V, 400A



Infineon产品模块1200V, 400A



斯达样品混合模块1200V, 50-800A

- 国外SiC已有产品模块，具有部分可靠性测试结果，与汽车级有一定距离
- 混合模块最大电流为800 A, 纯碳化硅模块限制在400 A
- 套用Si模块标准封装，键合型单面散热，杂散阻抗大，散热能力低，芯片结温限制在150° C
- 缺乏SiC专用高温驱动
- 未能充分发挥SiC优势

- 国内SiC模块刚刚起步，已有样品模块，缺乏可靠性测试数据
- 套用Si模块标准封装，键合型单面散热，杂散阻抗大，散热能力低，芯片结温限制在150° C



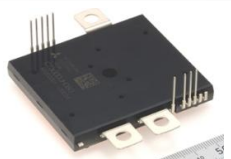
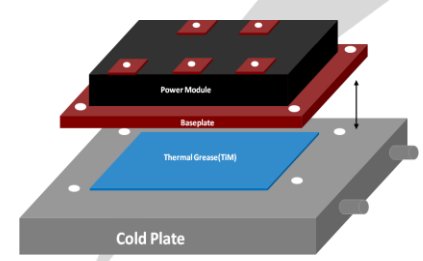
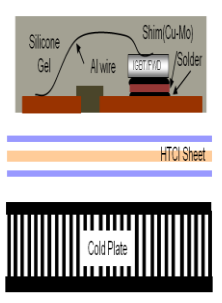
车用碳化硅功率模块——常规封装规格



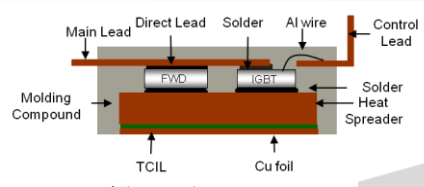
模块散热发展



第一代
▪ 引线键合
▪ 单面冷却

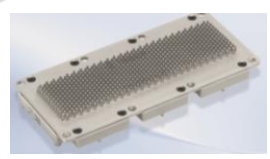


Mitsubishi TPM

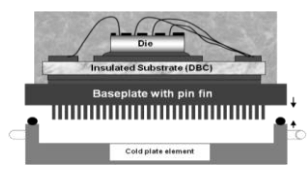


第二代

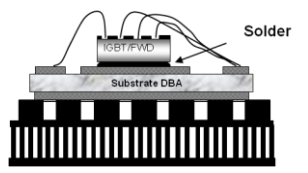
▪ 平面封装
▪ 集成冷却



Infineon HybridPack

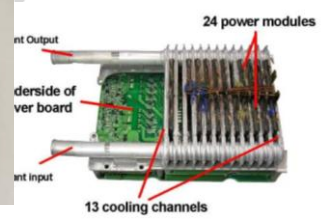
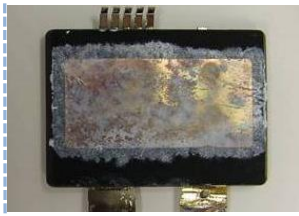


Toyota Prius '10



第三代
▪ 集成型双面冷却

Toyota LS600

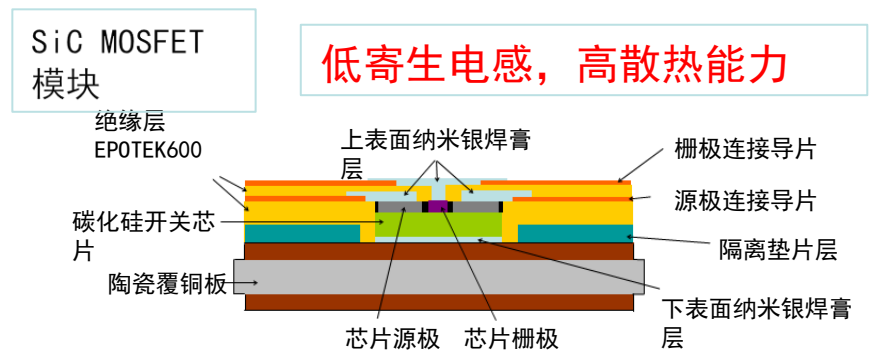
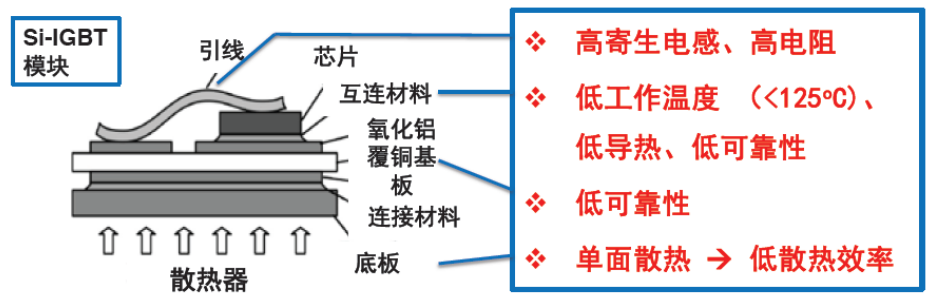


Hitachi DCPM



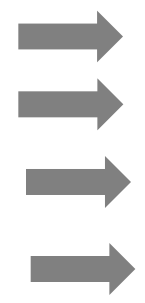
平面性封装和双面冷却技术

可靠性



低寄生电感，高散热能力

低寄生电感
高散热能力
柔性互连、缓冲层
无键合线



电压过冲减小
降低局部热点温度
抗热应力能力提高
功率循环可靠性提高



平面性封装硅模块对比

		<p>IR COOLiR2Bridge 1200 V 200 A</p>	<p>55 X 50 mm²</p>	<p>单相、双面冷却 导热硅脂，功率 端子异向</p>
		<p>Mitsubishi CT600J1A060 650 V/ 600 A</p>	<p>115 X 125 mm²</p>	<p>单相、单面冷却 导热硅脂，功率 端子异向</p>
		<p>Infineon FF400R0 7A01E3_S6 700 V/ 400 A 100 Arms</p>	<p>42 x 42.4 42 X 70 mm²</p>	<p>单相、单面冷却 导热硅脂，功率 端子同向</p>
		<p>Hitachi DWDCPM 650 V/ 500 A 325 A rms</p>	<p>Daimler S500 PLUG-IN HYBRID</p>	<p>单相、双面冷却 Pinfin，功率端 子同向</p>
		<p>Fuji M653 750 V/800 A 150 kW</p>	<p>116 X 162 X 24 mm²</p>	<p>三相、单面冷却 冷却槽，功率端 子异向</p>



电工所1200V SiC 模块研制

	1200V/300A SiC 键合型模块	1200V/400A SiC 平面型模块
封装材料	高铅焊片, 超声焊接端子, 高温硅凝胶, PPS高温壳体	纳米银焊膏, 硅凝胶, PPS高温壳体
模块体积	140×113×27 mm ³ (比产品模块体积缩小27%)	70×42×10 mm ³ (比产品模块体积缩小60%)
散热结构	Pinfin 底板	双面Pinfin 底板
驱动电路	高温磁隔离驱动设计	高温磁隔离驱动设计



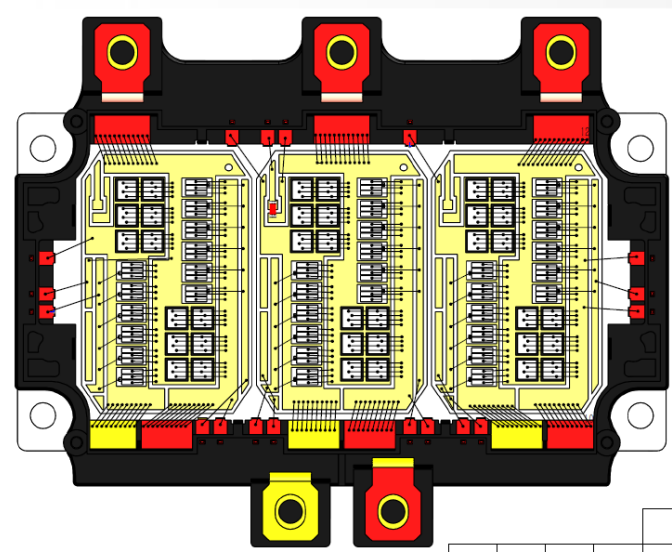
三相1200V/300A SiC 平面型模块及散热



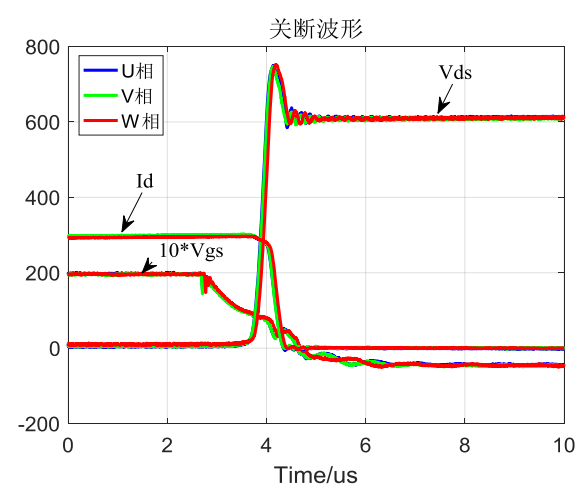
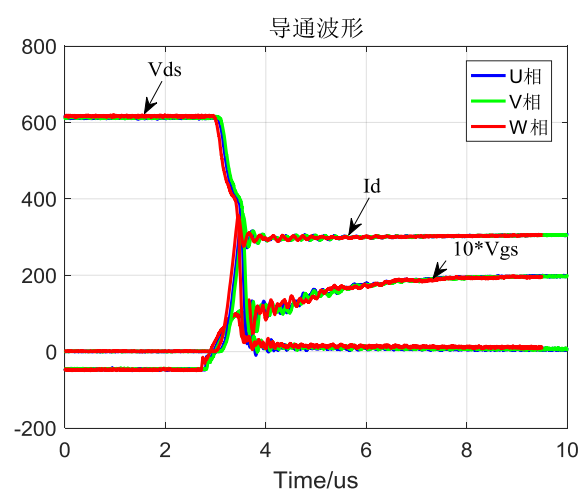
单相1200V/400A SiC 平面型模块及散热



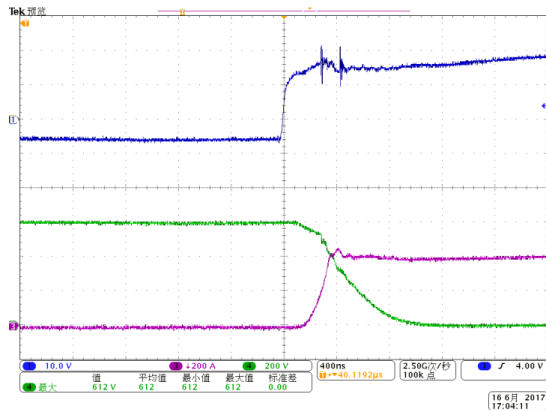
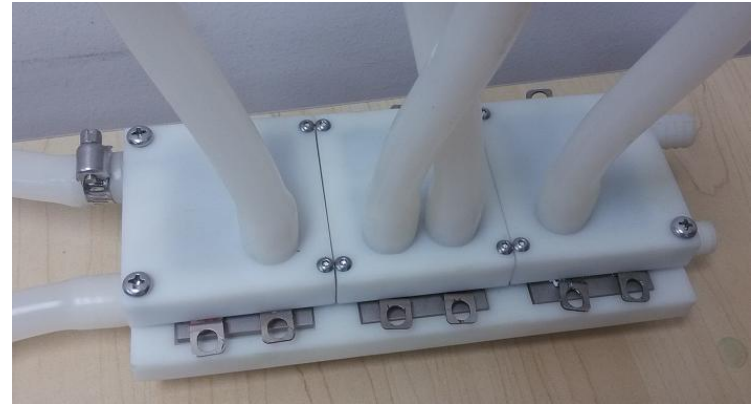
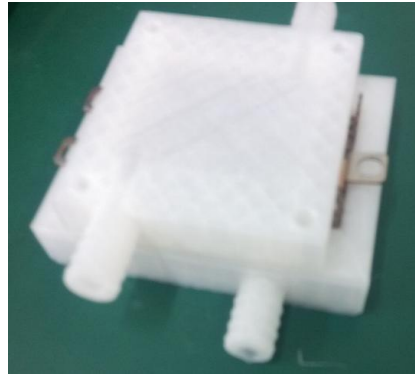
1200 V 300 A SiC 三相模块 (有diode)



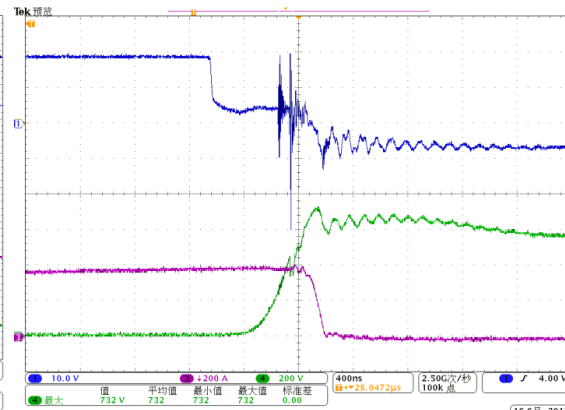
1200 V, 300 A, HP1, pinfin



1200 V 400 A SiC 三相模块 (有diode)



600 V 400 A on



600 V 400 A off

1200 V, 400 A, 双面pinfin
70mm X 42 mm X 20mm
有 SiC diode
比产品模块体积**缩小62%**
可拓展为1200 V, 400 A 3相模块



主要内容

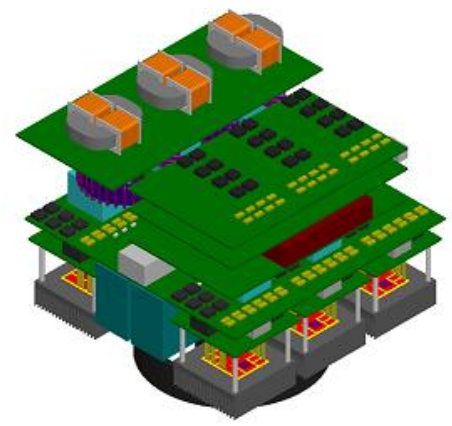
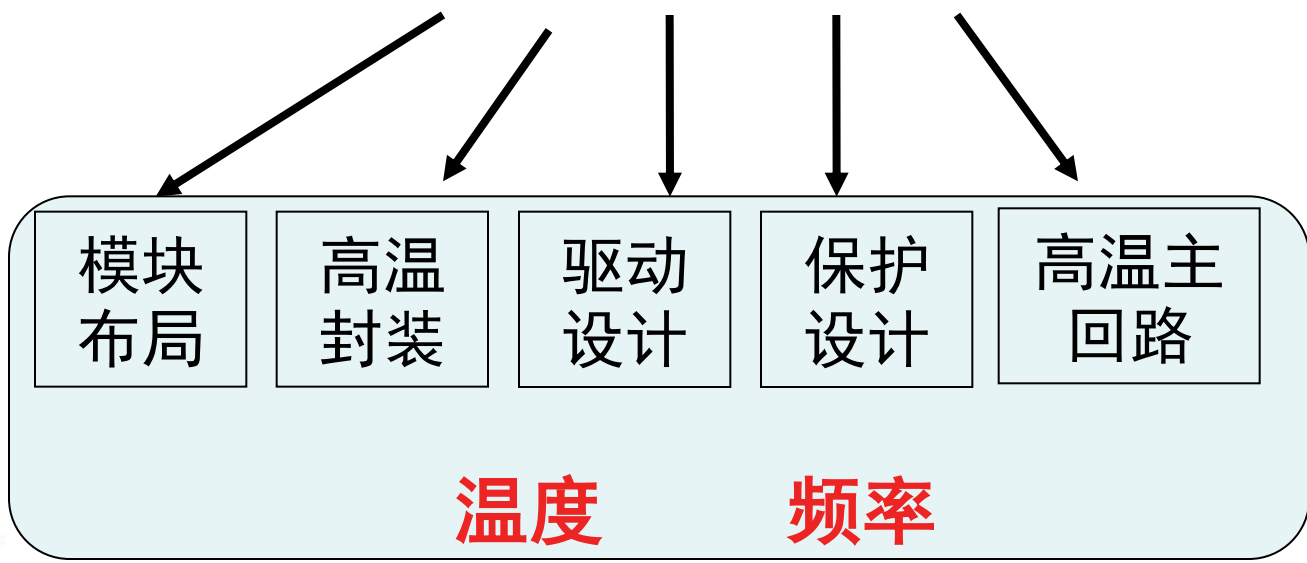
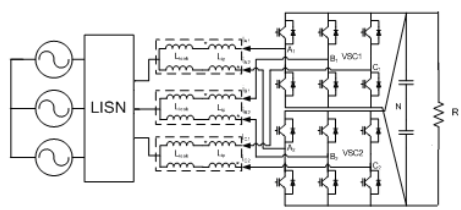
1. 碳化硅器件应用概述
2. 碳化硅模块封装新进展
3. 碳化硅变频器系统开发



碳化硅高密度变频器系统设计

系统要求分析

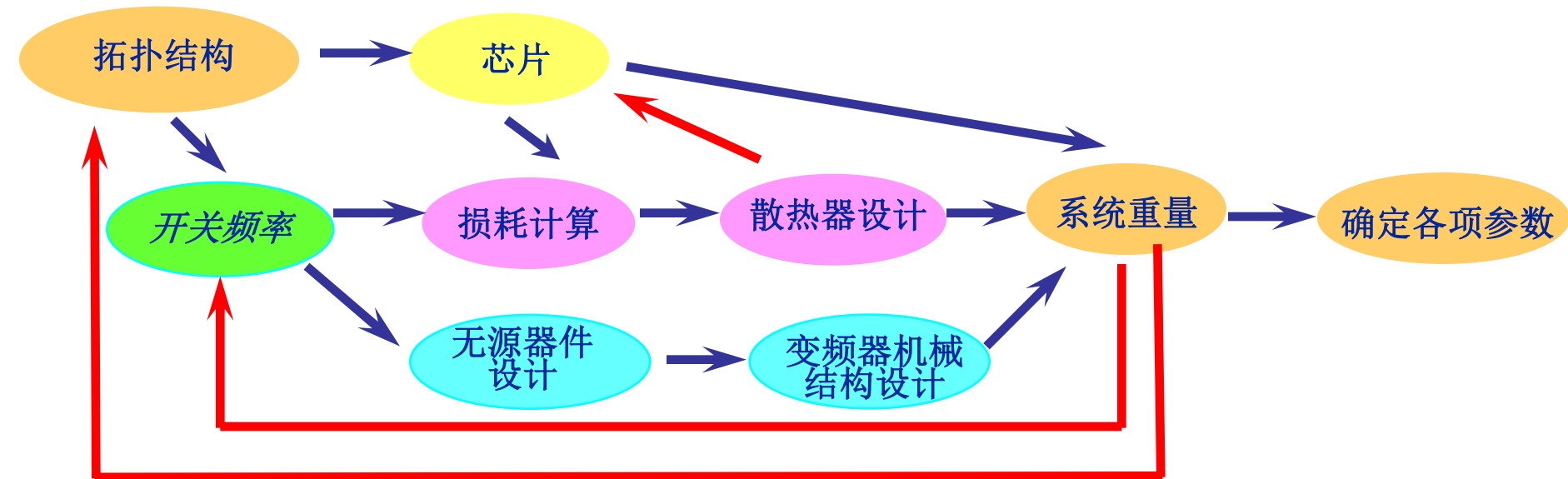
确定系统参数



高功率密度变频器



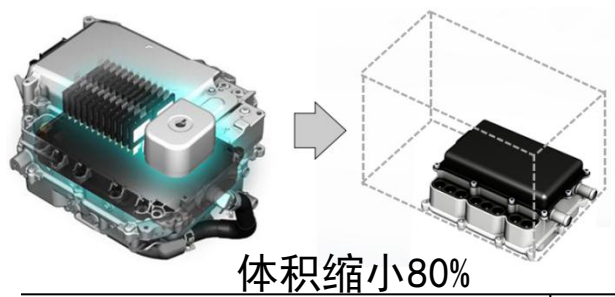
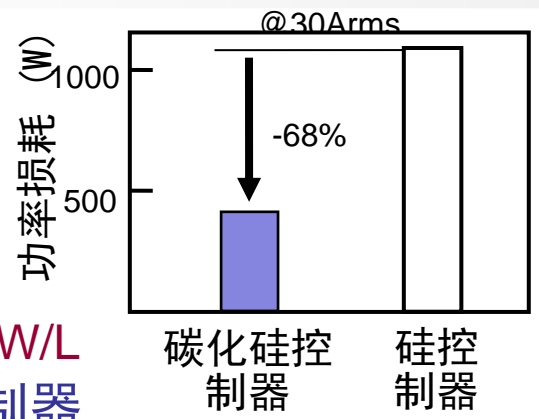
变频器参数优化



碳化硅车用变频器产品研发



60 kW/L
丰田碳化硅控制器



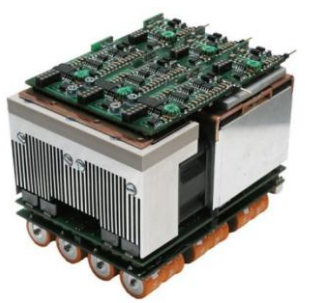
2020年投入实用



电装碳化硅
控制器
60 kW/L



60 kW,
总体积14.1L
三菱碳化硅
电子电机



120°C环境
8.3 kW/L
ETH
碳化硅
控制器



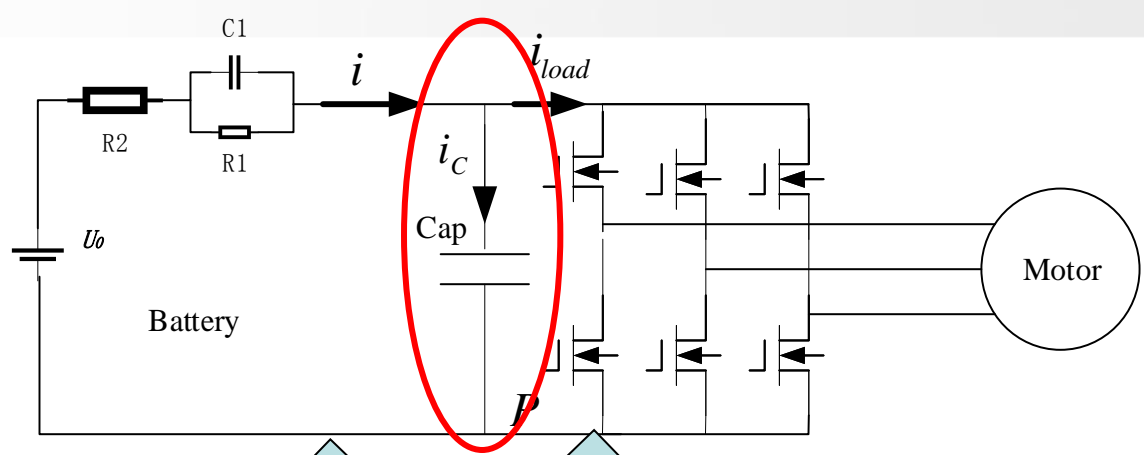
驱动部分
60 kW/L
明电舍
碳化硅
电子电机



体积削减32%
重量减轻69%
电产碳化硅
电子电机

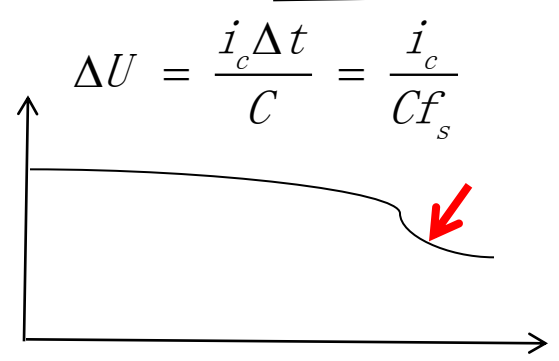


直流母排电容器的功能分析

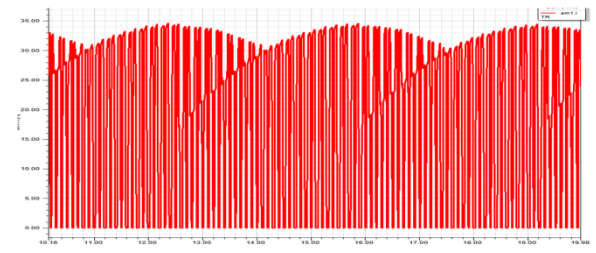


平抑母线电压波动

提供逆变器纹波电流



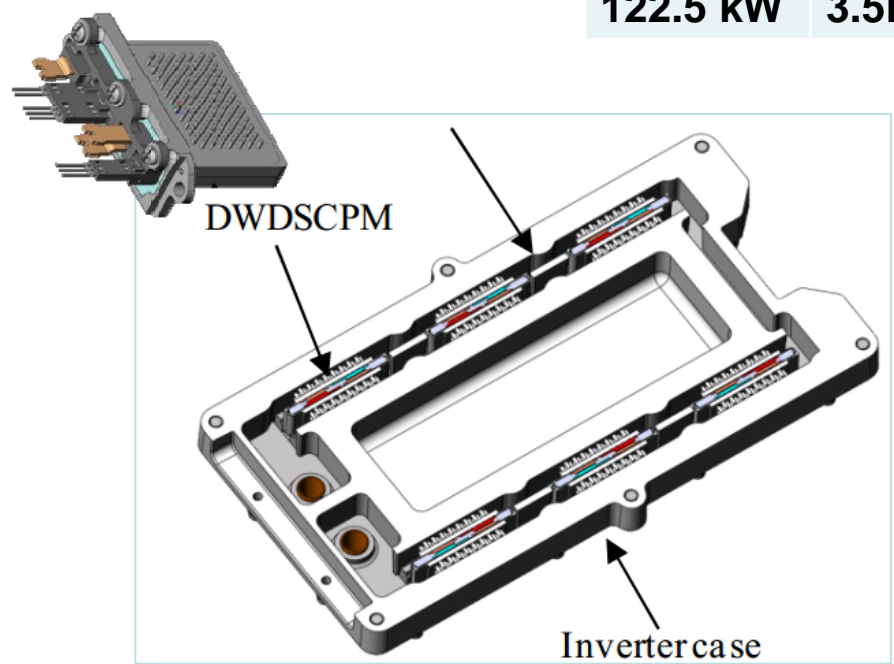
$$I_{C,rms} = I_{\phi,rms} \sqrt{2M \left[\frac{\sqrt{3}}{4\pi} + \cos^2 \phi \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} - \frac{9}{16} M \right) \right]}$$



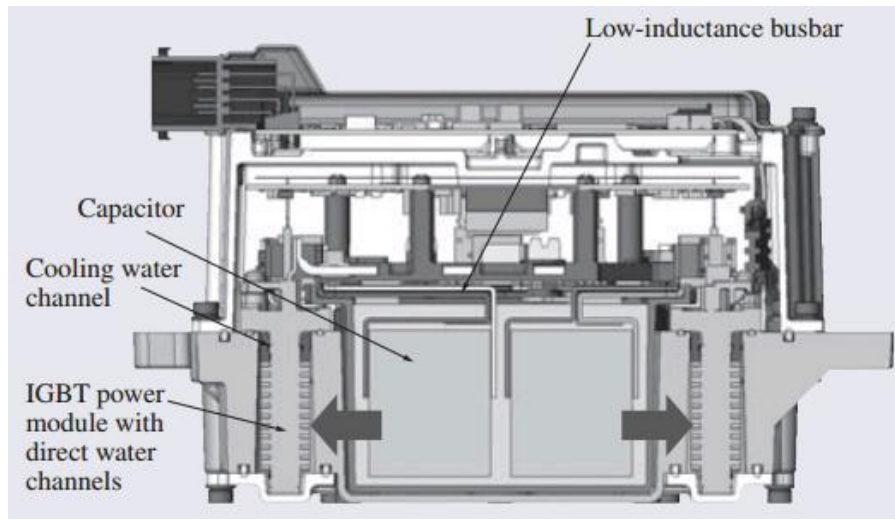
国外高密度Si变流器研究

- 2014 日本Hitachi硅基变频器
- 应用Pinfin双面冷却模块，电容水冷

峰值功率	体积	功率密度
122.5 kW	3.5L	35 kW/L



模块放置结构



控制器总体结构



复合功能电容器研发

- 集成直流母排，替代传统独立母线，减小控制器体积；
- 集成散热器，电容器和SiC模块同步散热，降低电容器热阻，提升许用电流；
- 集成传热且抗冲击的铝制外壳，实现电容器封装与控制器封装复用。



车用复合功能电容器

主要规格参数

电容值	700 μ F
最大峰值电压	450Vdc
许用纹波电流	180A rms (间接冷却) 300A rms (25 $^{\circ}$ C水冷)
外形尺寸	58mm*145mm*155mm
体积	1.3L

复合功能电容器研发

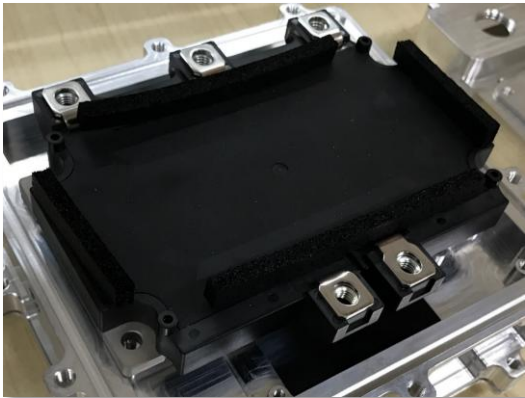
电流	阻值	流量	水温	环境温度	测试点平均温度	测试最高温度
A	毫欧	m ³ /h	°C	°C	°C	°C
180	0.18	0	——	25	59.1	60.8
300	0.18	0.33	25	25	44.4	55.2
398	0.18	0.33	25	25	61.1	80.7

按照芯子平均温度计算，许用纹波电流从180提升为398Arms，2.21倍。

按照热点温度计算，许用纹波电流从180提升为300Arms，1.67倍。

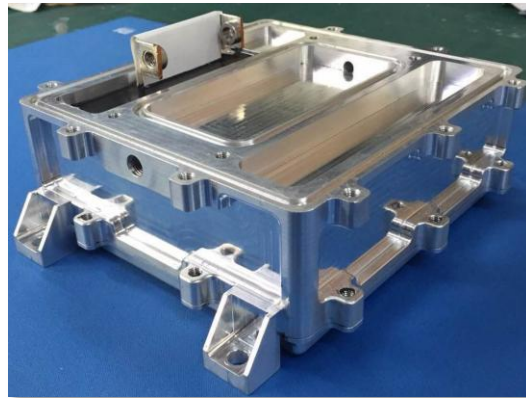
**复合功能电容器增大许用纹波电流至间接冷却的1.67倍以上，
可以用于减小电容器容值及体积**

电工所高功率密度全SiC电机控制器研发



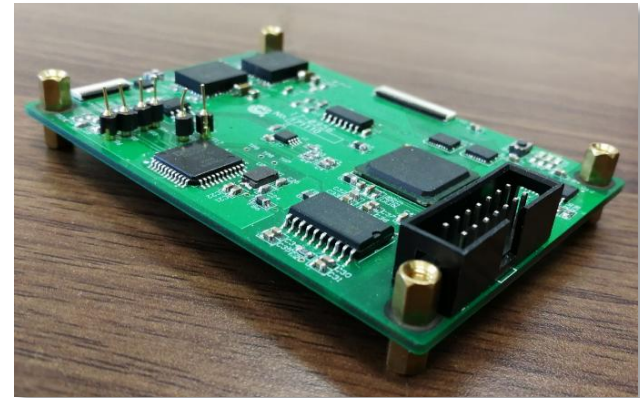
P3封装形式的全SiC功率器件

- 基于进口SiC芯片
- 1200V/300A
- 集成PINFIN



复合功能电容器

- 集成直流母排
- 集成散热器
- 具有抗冲击和高导热系数的防护性壳体

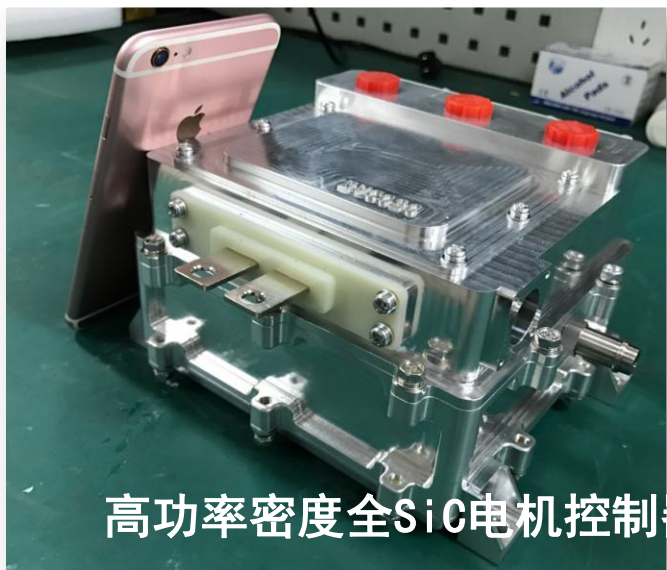


高密度主控板

- 信用卡大小
- 计算与保护功能
- 中断执行时间 $<13\mu\text{s}$ ，**适配50kHz的控制频率。**

高功率密度全SiC电机控制器研发

特色 600Vdc供电条件下，EVC020可适配85kW电动车驱动电机能力的控制器，功率密度达37kW/L。



高功率密度全SiC电机控制器

主要技术规格

供电电压	600V
输出功率	85kW
体积	2.29L
冷却方式	水冷
防护等级	IP54

厂家	峰值功率	直流母线电压	体积	开关频率	功率密度
Cree	110kW	650Vdc	4.8L	20kHz	22.9kW/L
FUPET	10kW	600Vdc	0.25L	50kHz	40kW/L
IHI	35kW	400Vdc	0.5L	20kHz	70kW/L
项目团队	85kW	600Vdc	2.29L	20kHz	37kW/L

谢谢！

