

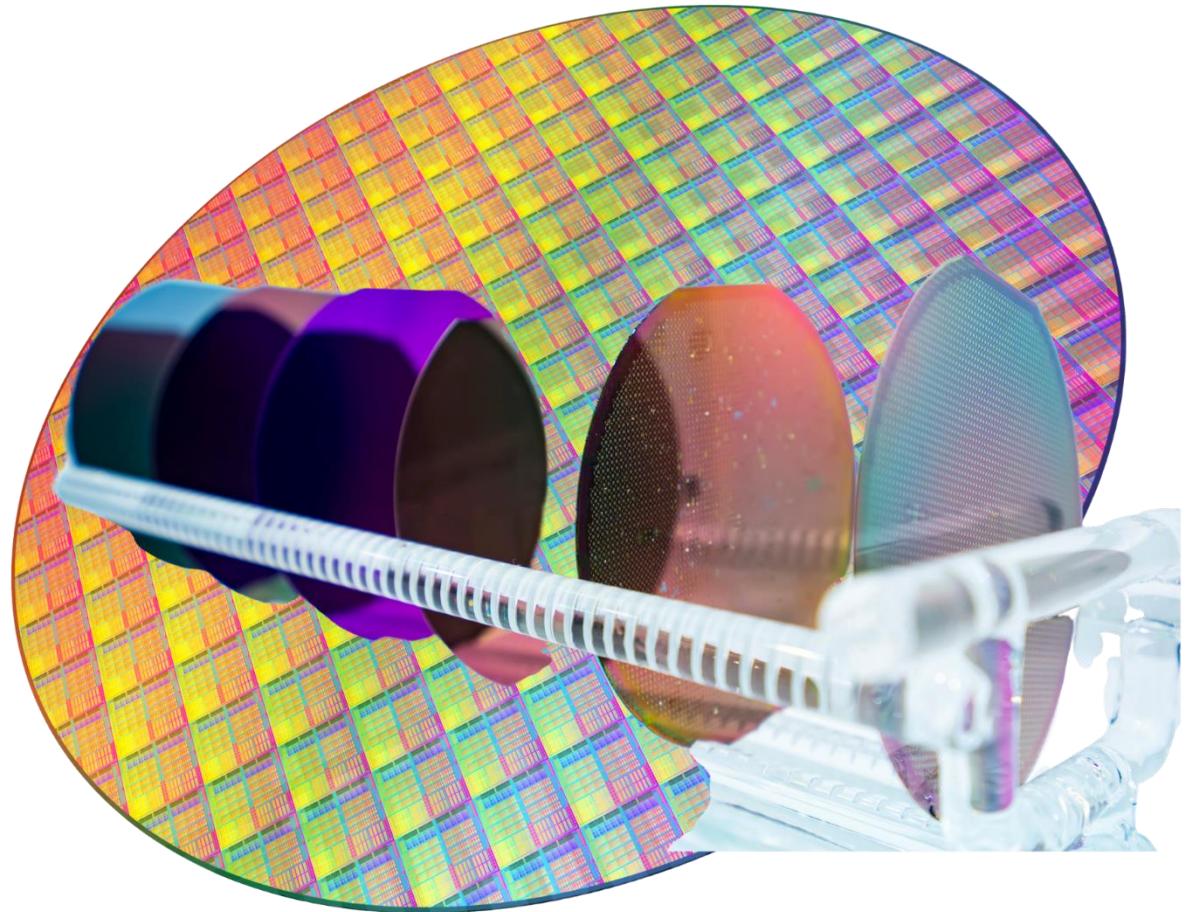
Карбид кремния - современное решение новых задач в силовой электронике



Долгов Владислав
Инженер по применению
направления
«Дискретные
полупроводники
и силовые компоненты»



Роцина Екатерина
Бренд менеджер
«Дискретные
полупроводники
и силовые компоненты»



Программа

Обзор категории

- Преимущества SiC в реальных применениях
- Физические и электрические особенности SiC
- Процесс производства SiC компонентов
- Вектор развития SiC индустрии
- Цена на SiC компоненты
- Компании в SiC индустрии

Дискретные SiC компоненты

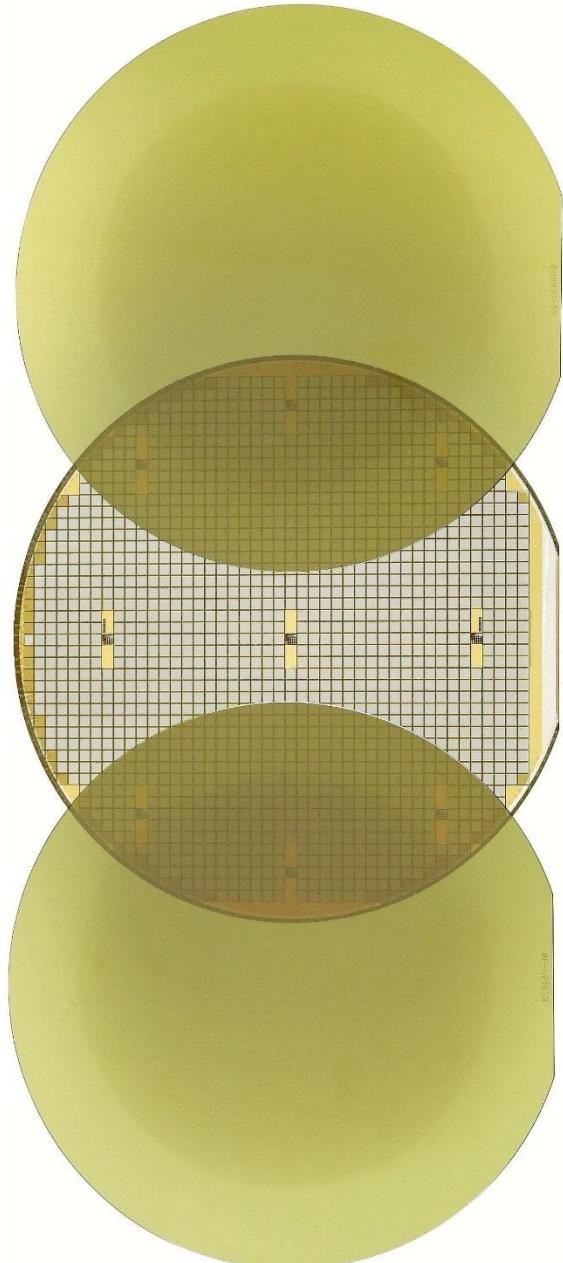
- Портфолио SiC диодов Шоттки
- Портфолио SiC MOSFET
- Доступность

Силовые SiC модули

- Портфолио SiC модулей
- Ограничение SiC модулей

Драйверы

- Особенности управления SiC MOSFET
- Портфолио азиатских драйверов затвора



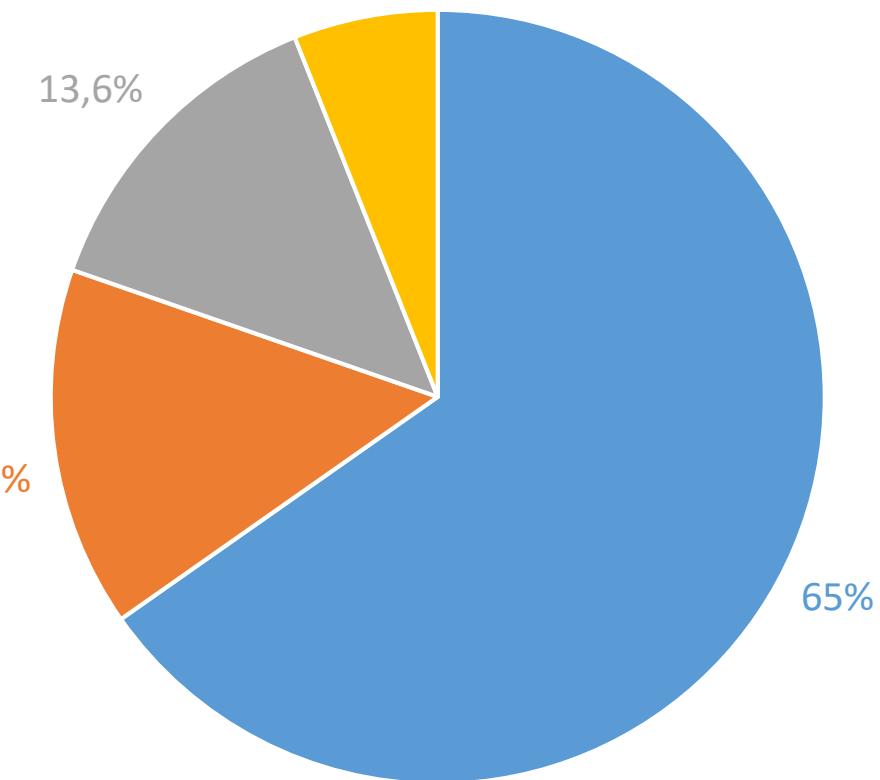
Мировой рынок SiC электроники в 2024 -2025. Обзор и прогнозы

Распределение рынка SiC по регионам



- Азиатско-Тихоокеанский регион
- Северная Америка
- Европа
- Остальной мир

Доли основных применений на рынке SiC-электроники



- Транспорт (Электромобили и гибриды)
- Промышленность и энергетика
- Телекоммуникации
- Другое

Преимущества SiC в реальных применениях

- Повышение КПД
- Сокращение размеров и веса
- Надежность в тяжелых температурных условиях
- Удешевление

Электромобили (EV)



Тяговые преобразователи



Бортовые ЗУ (OBC)

Промышленное оборудование

Энергетика



Инвертор для солнечных панелей



Преобразователи для HVDC

Телеком



Серверные ИП (PSU)



Базовые станции 5G



Драйверы шаговых двигателей

Преимущества SiC в реальных применениях



Инвертор на основе Si IGBT (**слева**) мощностью 200 кВт, частота переключения 10 -15 кГц и инвертор на основе SiC MOSFET (**справа**) мощностью 220 кВт частота переключения 75 -100 кГц

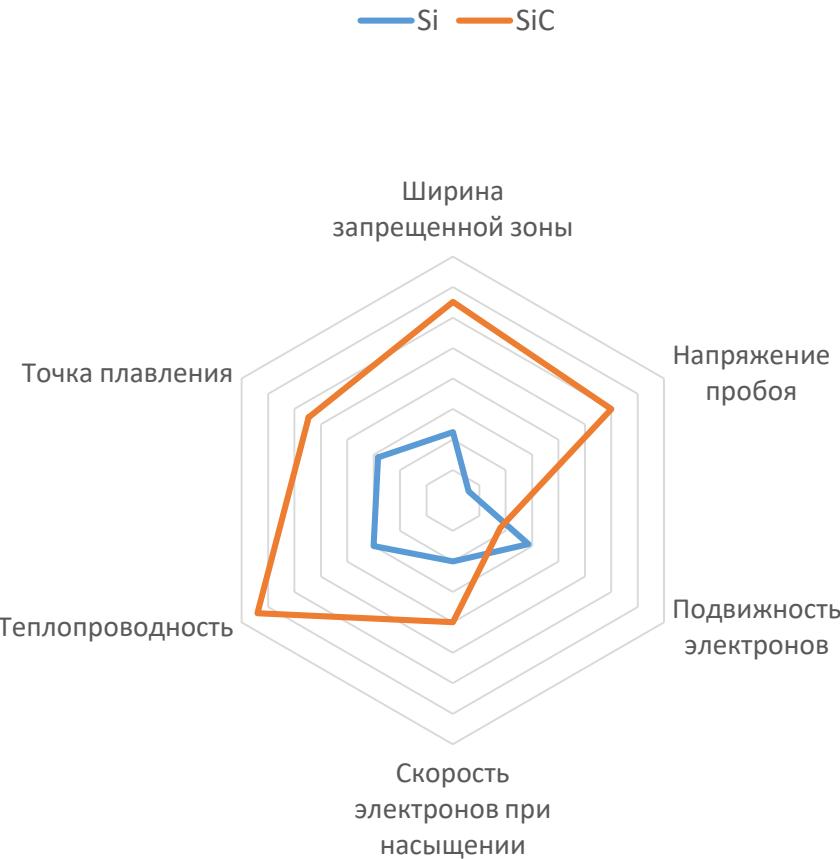
Доля стоимости категорий компонентов в близких по мощности Si и SiC преобразователях



- Ключи
- Пассивные компоненты
- Драйверы
- Охлаждение

Выше частота переключения → Меньше номиналы и габариты пассивных компонентов → Более компактное устройство → Экономия средств

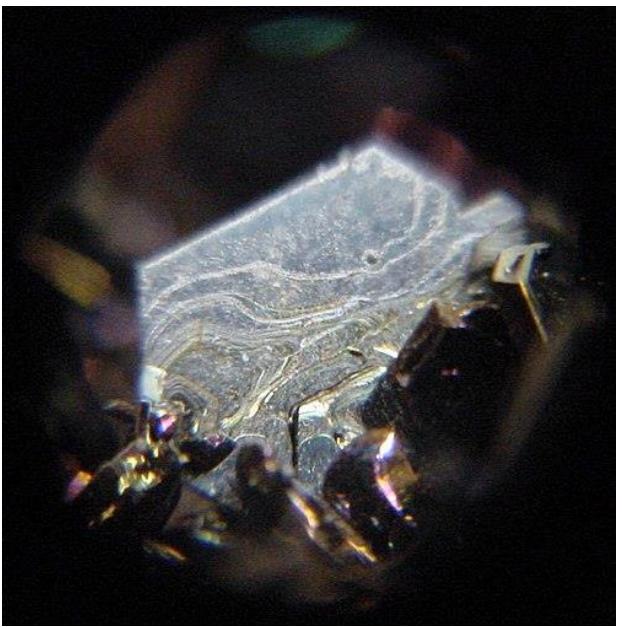
Физические и электрические особенности SiC



Сравнение электрических и физических характеристик Si и SiC

Изменения в структуре чипа для Si и SiC MOSFET

Физические и электрические особенности SiC



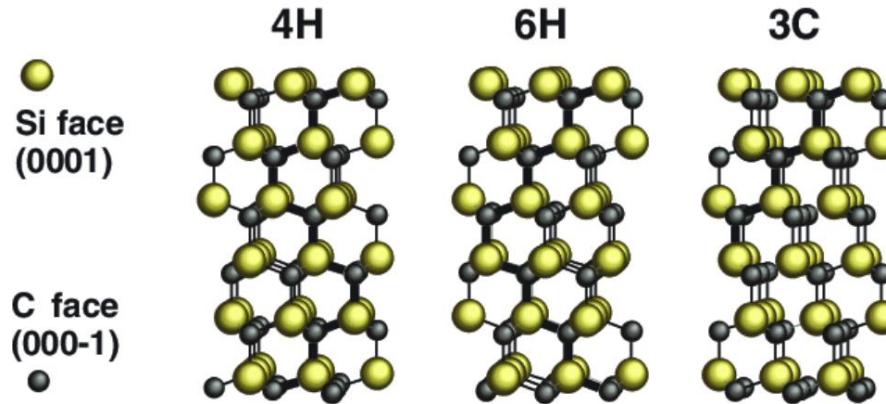
Кристалл муссанита в природе (~1 мм)

Твердость (третий по твердости материал после алмаза и карбида бора)

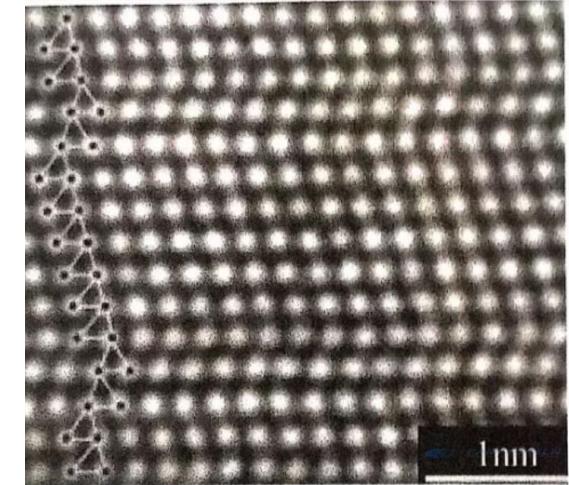
По шкале Мооса	9-13
В единицах ГПа	32

Ширина запрещенной зоны

4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC
3.23 эВ	3.02 эВ	2.36 эВ



Кристаллические решетки самых распространенных модификаций SiC



4H-SiC. Фотография электронным микроскопом

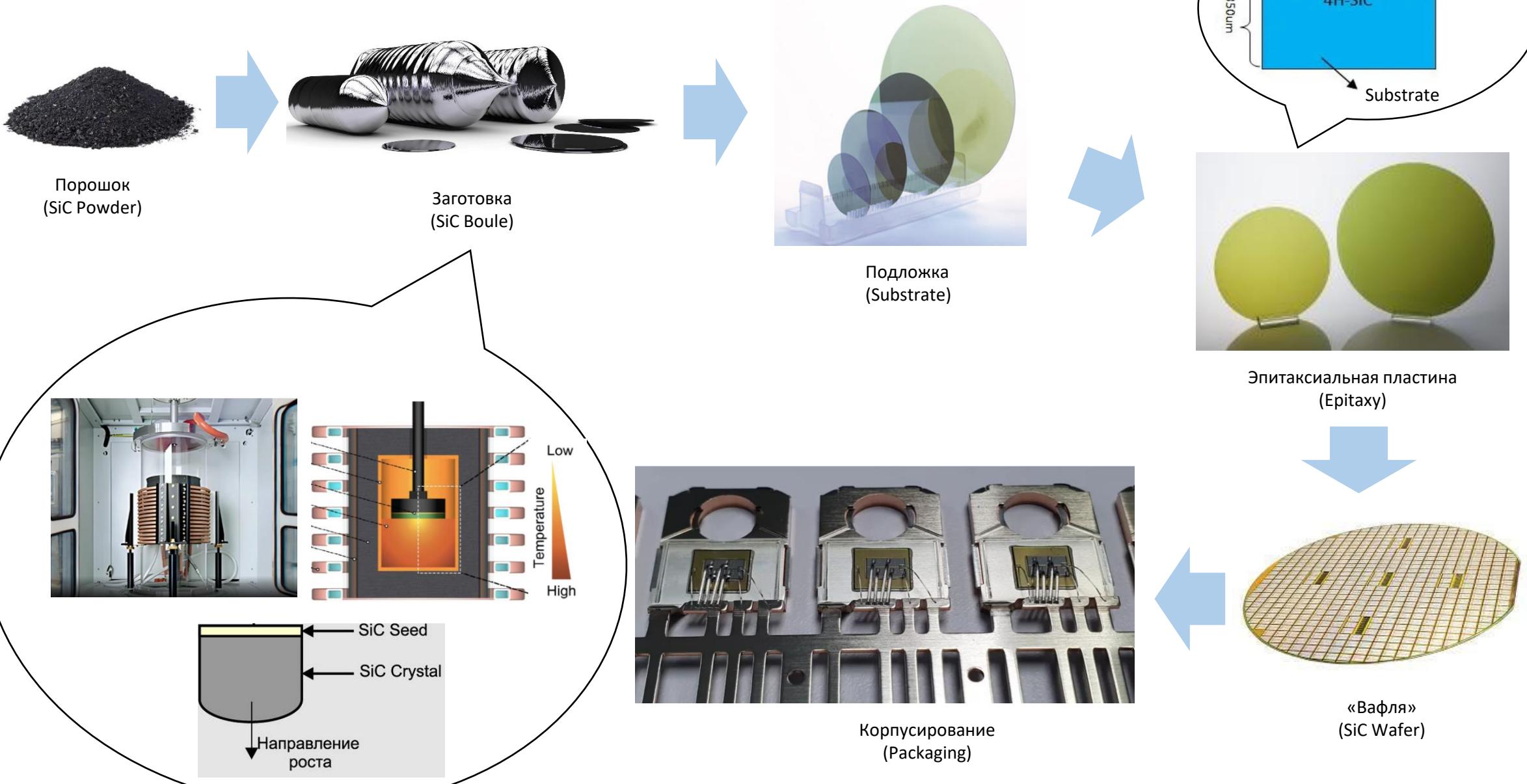
Происхождение. Карбид кремния был впервые синтезирован в XIX веке, а его промышленное производство было запатентовано Эдвардом Ачесоном в 1893 году.

Распространенность. В природе он крайне редок и известен как минерал муассанит, встречающийся в микровключениях в метеоритах и кимберлитовых трубках. Почти весь карбид кремния, используемый в мире, является синтетическим. Известно примерно 250 кристаллических форм карбида кремния.

SiC в космосе. Несмотря на редкость на Земле, карбид кремния широко распространён в космосе — в составе звёздной пыли и метеоритов, его изотопный состав указывает на образование вне Солнечной системы.

Первое применение в электронике. Генри Джозеф Раунд в 1907 году создал первый светодиод

Процесс производства SiC компонентов



Вектор развития SiC индустрии

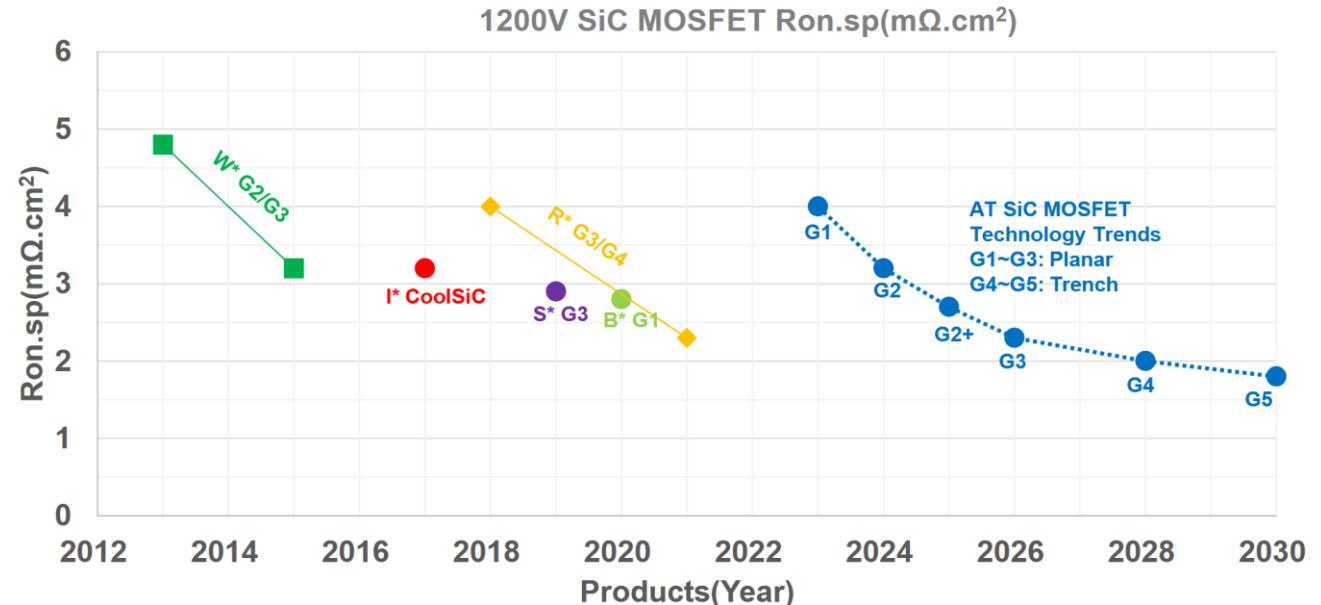
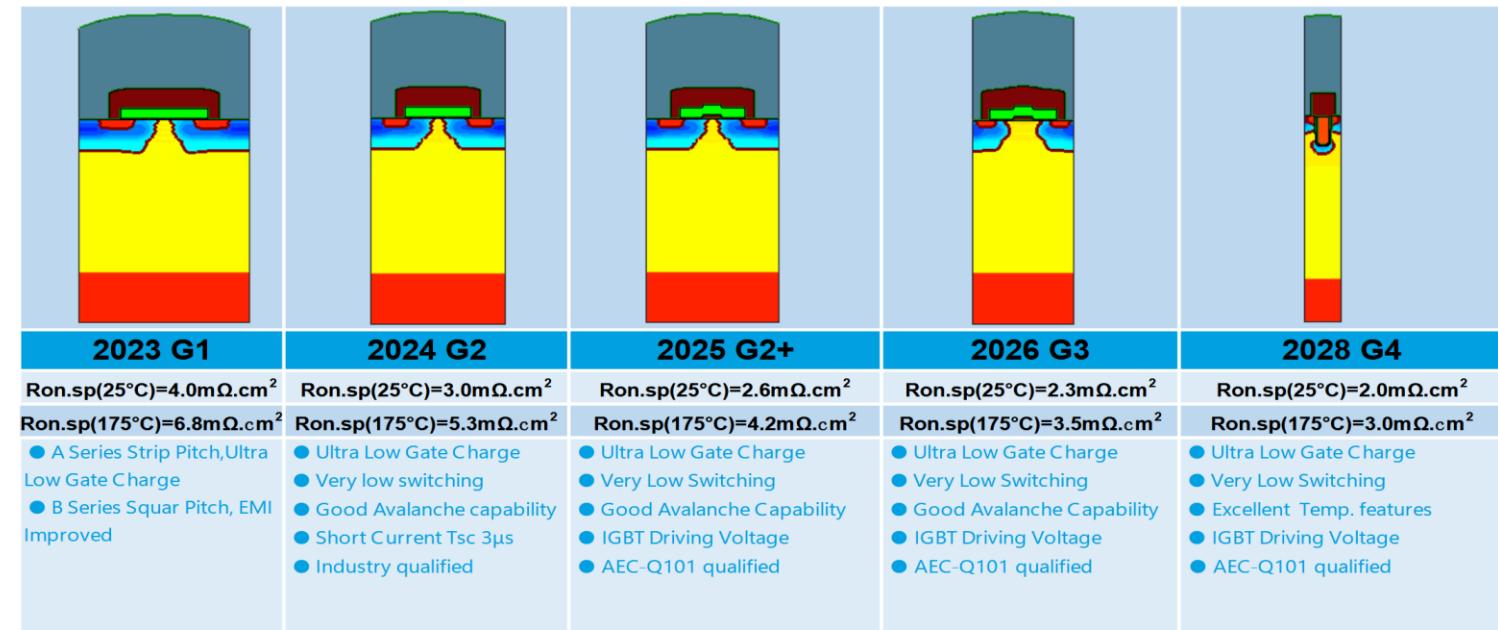
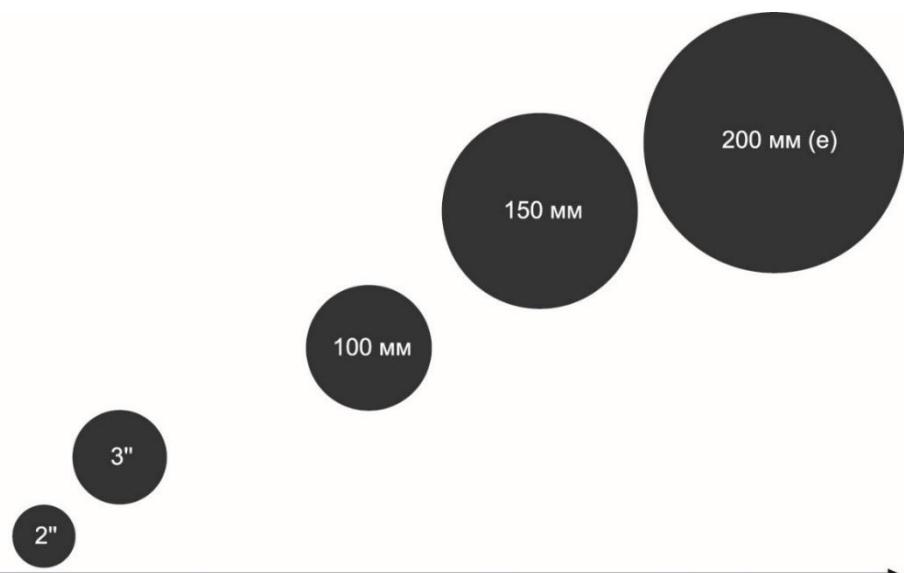


2000 г.
диаметр 35 мм

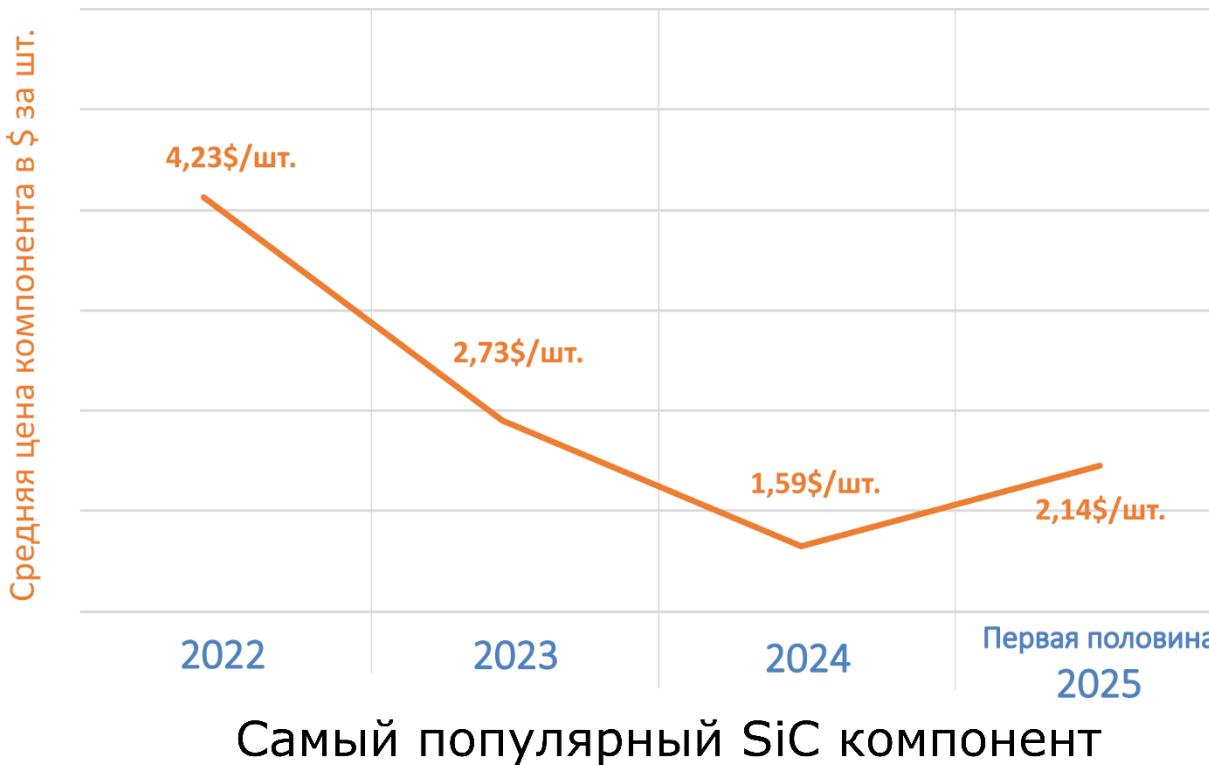


Сегодня
диаметр 150 мм

Сравнение подложек методом двойного
лучепреломления (светлые зоны – это
нарушение структуры)



Цены на SiC компоненты



C2M1000170D
(CREE)
SiC MOSFET
TO-247-3
1700B
5A
10m



G5S12005A
(GPT)
SiC SBD
TO-220-AC
1200B
5A



YJD212040NCTG1
(Yangjie)
SiC MOSFET
TO-247-3
1200B
63A
42mOhm



ASZM040120P
(Anbon)
SiC MOSFET
TO-247-3
1200B
68A
35mOhm

Компании в SiC индустрии

Подложка
Substrate

Эпитаксиальная пластина
Epitaxy

Разработка чипа
Design

«Вафля»
Wafer

Корпусирование
Packaging



И еще более
50 компаний в Китае



YJ

GPT

CR MICRO

BYD

ATS

WAYON

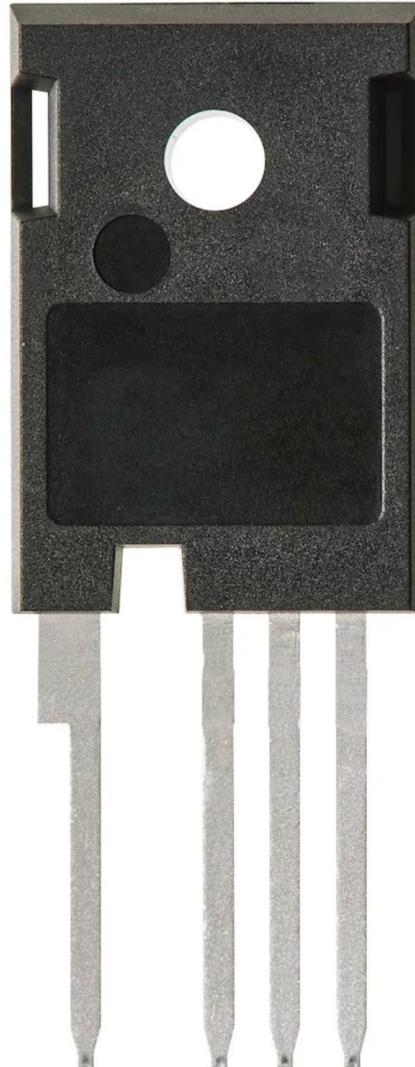
JSCJ

ANBON

STARPOWER

LEAPERS

Дискретные SiC компоненты



Сравнение китайских SiC компонентов с Si решениями и западными аналогами



VRRM/VR = 600/650 В

Наименование	C6D10065A (Wolfspeed)	AS3D012065A (Anbon)	G4S06510AT (GPT)	YJD106508PG1 (Yangjie)	MUR1060L (Yangjie)	MUR10H60 (JSCJ)
Тип устройства			SiC			Ultra-Fast Recovery
Максимальный средний прямой выпрямленный ток, IF(AV)/IO, А @TC = 150 °C	10	12	10	8	10	10
Импульсный (неповторяющийся) прямой ток, IFSM, А	86 (tp = 10 ms)	108 (tp = 8.3ms)	105 (tp=10ms)	45 (tp=10ms)	50	160 (8.3ms)
Время обратного восстановления, trr, нс @ Tj=25°C			0		17	32



Vds/Vce = 1200В

Параметр	C3M0040120K (Wolfspeed)	ASZM040120T (Anbon)	ATSCM40G120W (ATelect)	YJD212040NCFGH (YJ)	DG40F12T2 (Starpower)	DGW40N120CTL (YJ)	NCE40TD120LT (NCE)
Тип транзистора	SiC MOSFET					IGBT	
Макс. ток (Id), А				40А			
Потери на переключение (Eon)	243μJ	352μJ	240μJ	83μJ	4.2mJ	5.8mJ	2.4mJ
Потери на переключение (Eoff)	104μJ	170μJ	40μJ	128μJ	4.2mJ	3.0mJ	1.8mJ
td(on) (нс)	13 (RG = 2.5Ω)	23 (RG = 5Ω)	13 (RG = 2Ω)	26 (RG = 2.7Ω)	27 (RG=10Ω)	53 (RG = 12Ω)	19 (RG=8Ω)
tr (нс)	17	9	15	50	40	60	17
td(off) (нс)	23	27	26	7	181	260	170
tf (нс)	9	11	8	11	45	90	18

Портфолио SiC диодов Шоттки

Классификация по току

Ток If	0,6...8 А	10...20 А	30...40 А	50...100 А
Корпус	SOD123, SMA, DFN5*6, DFN8*8, TO-220AC, ITO-220AC, TO-252, TO-263, TO-247AC	SMC, DFN8*8, TO-220AC, ITO-220AC, TO-252, TO-263, TO-247AC, TO- 247AB, TO-3PH	TO-263, TO-247AC, TO-247AB	TO-263, TO-247AC, TO- 247AB, TO-247PLUS
YJ	650 1200	650 1200 1700	650 1200 1700	650 1200
GPT	600 650 1200 1700 3300	650 1200 1700 2000	650 1200	650 1200 1700
CR Micro	650 1200	650 1200	650 1200	1200
Wayon	650 1200	650 1200	650 1200	1200
ATS	650	650 1200	650 1200	1200
Anbon	650 1200	650 1200 1700 2000	650 1200	650 1200 1700

Портфолио SiC MOSFET

Классификация по току

Ток Id	5...20 A	20...30 A	30...50 A	50...80 A	80...150 A	150...200 A
Корпус	TO-263-2L, TO-263-7L, TO-247, TO-247-4L, TO-3PF	TO-263-2L, TO-263-7L, TO-220, TO-247, TO-247-4L, TOLL	TO-263-7L, TO-247, TO-247-4L, T2PAK, TOLL, QDPAK	TO-263-7L, TO-247, TO-247-4L, T2PAK, TOLL	TO-247, TO-247-4L, T2PAK, TOLL, QDPAK	TO-263-7L, TO-247, TOLL, QDPAK
YJ	650 1200 1700	650 1200	650 1200	650 1200	650 750 1200	1200
CRMICRO	1200 1700		650 1200	1200 1700	650 1200	
GPT	1200	1200	1200	1200		
ATS	1200 1700		650 1200	650	1200	
Wayon	750 1200 1700	650 1200 1700	650 750 1200 1700	650 1200	650 750 1200	750
Anbon	650 800 1200 1700	650 800 1200	650 900 1200	650 1200 3300	650 1200	750
JSCJ					1200	1200

Доступность SiC компонентов

1 000+

Количество уникальных
артикулов в каталоге Компэл



100+

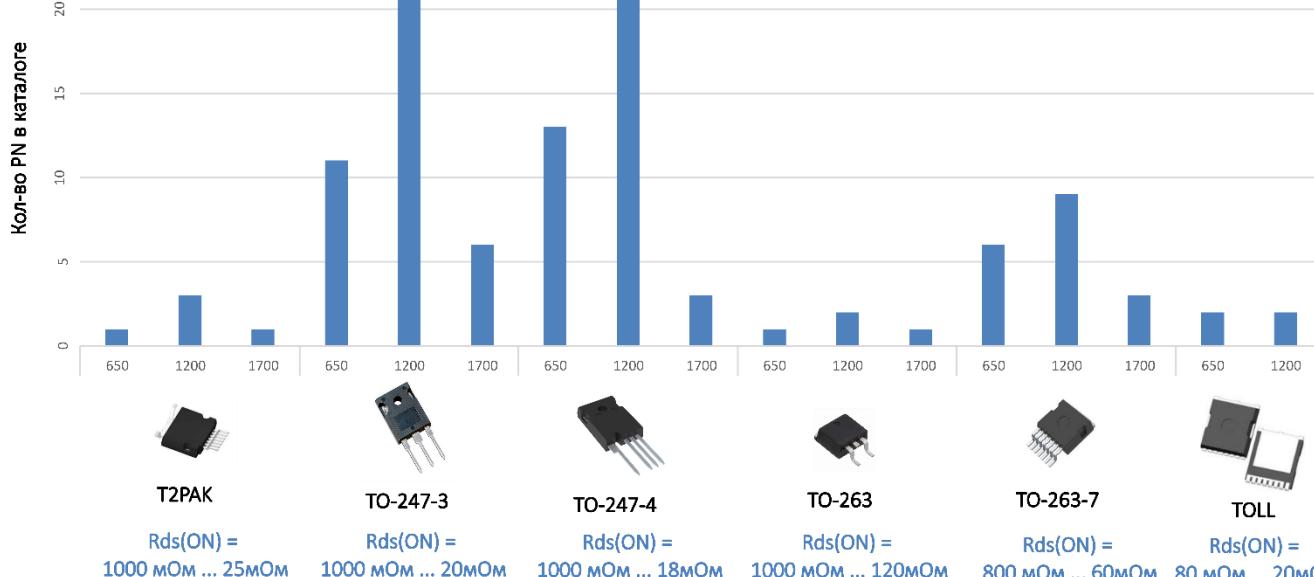
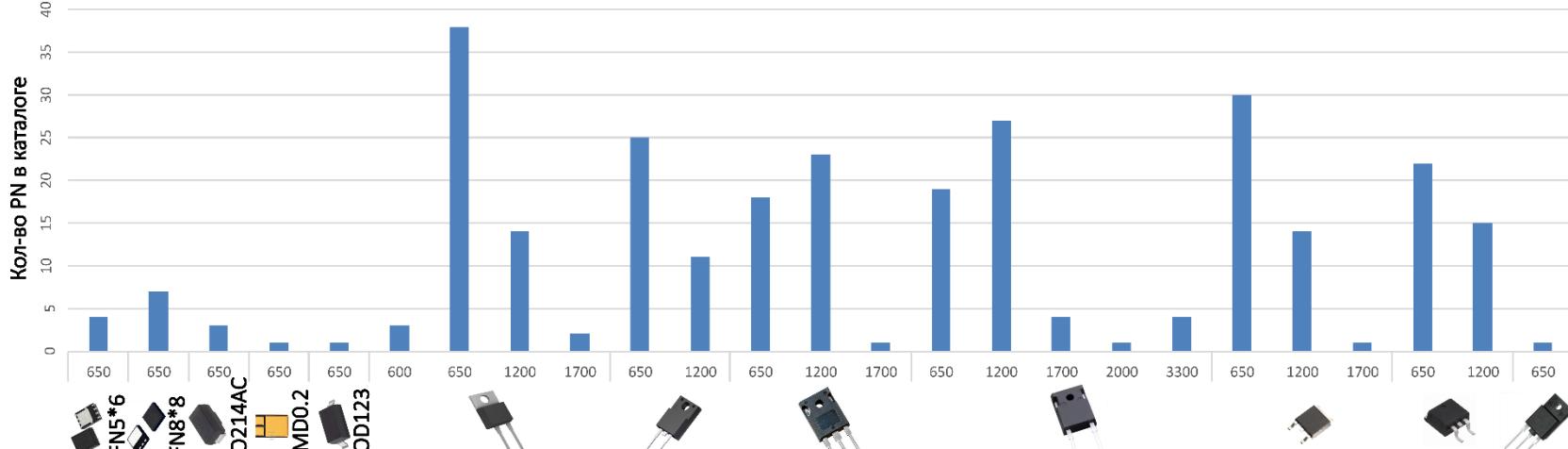
Уникальных артикулов
на складе Компэл

100 000+

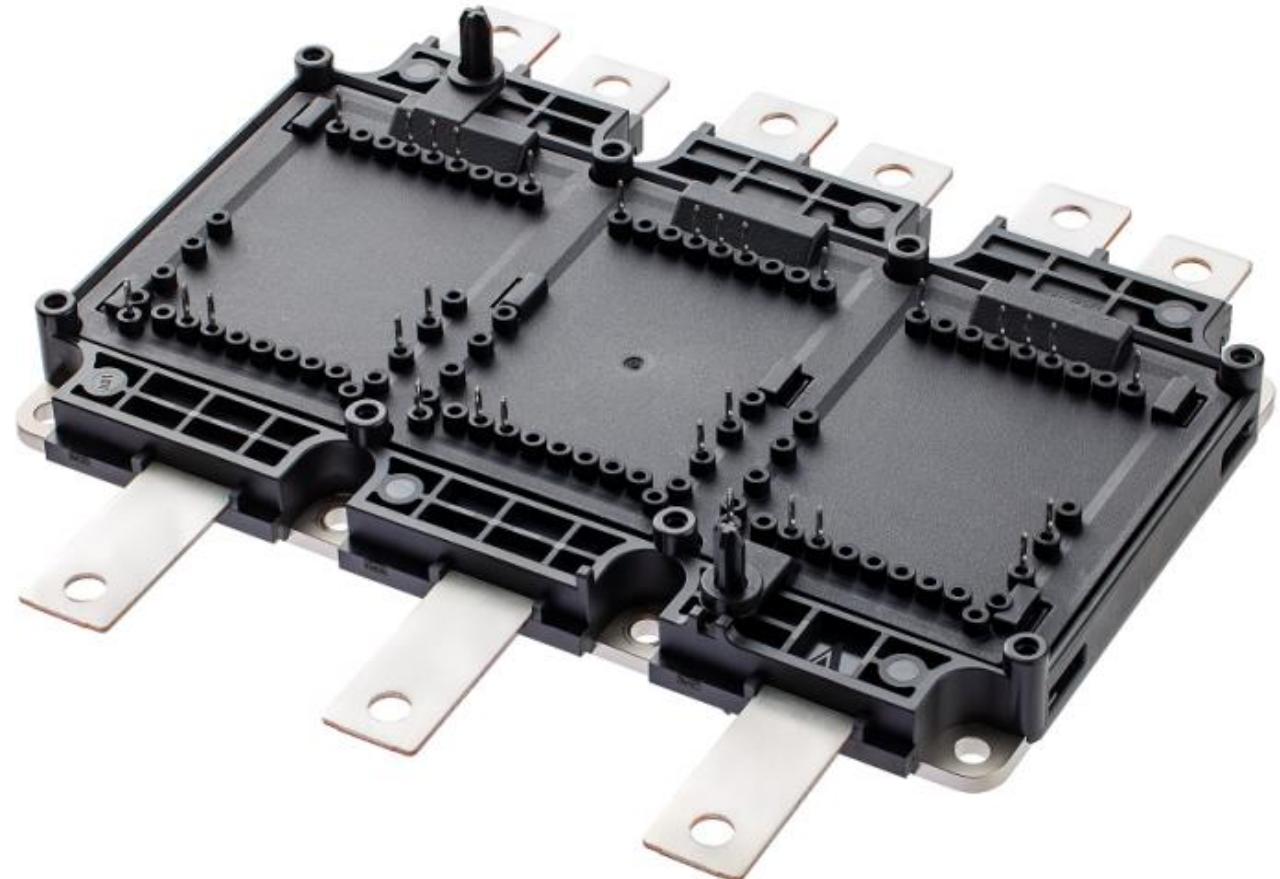
Штук в наличии на
складе Компэл



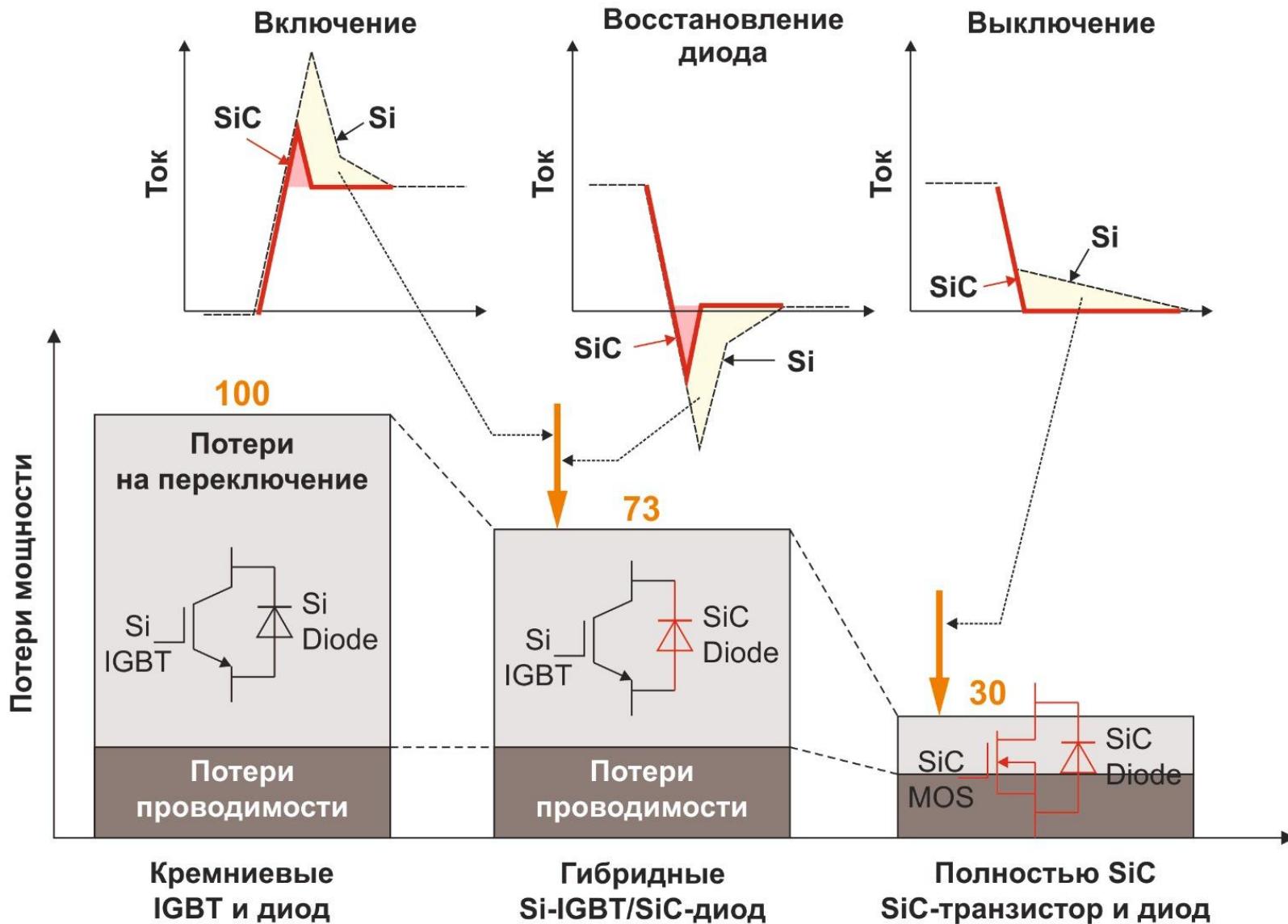
Популярность номиналов дискретных SiC компонентов



Силовые SiC модули



Влияние технологии на энергоэффективность

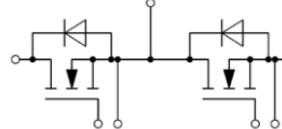


Сравнение SiC модулей 1200V

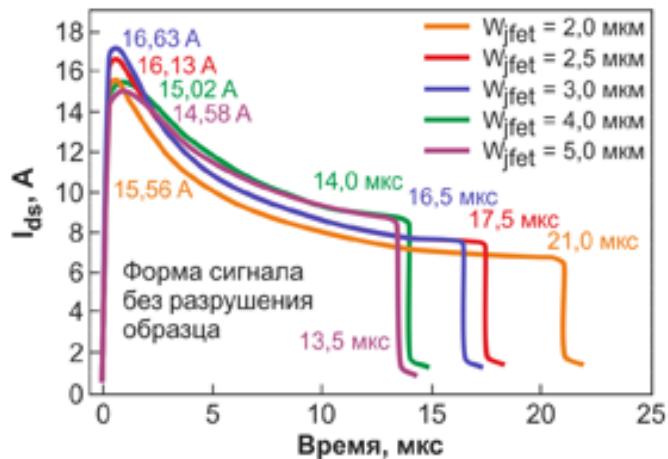


Производитель	Infineon	Mitsubishi	Wolfspeed	AT SEMI	Leapers	Yangjie
Материал подложки	Al2O3	AlN	AlN	Si3N4	Si3N4	Si3N4
Номинальный ток (ID, A) @ 25°C	280	400	424	400	360	400
RDS(on) @ 25°C, VGS = 18 V (mΩ)	2.94	3.6	4.0	3.5	5.3	3.3
RDS(on) @ 175°C, VGS = 18 V (mΩ)	6.32	5.1	7.2	5.78	7.5	5.3
Eon (мДж) @ 600V	11.1 @ 280A, RG=5.6, 175°C	12 @RG=1.5, 150°C	4.4 @ 350A, RG=0.5, 150°C	4.15 @ 400A, RG=2.1, 175°C	4.4 @ 360A, RG=7.5, 150°C	8.34 @ 300A, RG=5.1, 150°C
Eoff (мДж) @ 600V	5.1 @ 280A, RG=5.6, 175°C	9 @RG=1.5, 150°C	4.9 @ 350A, RG=0.5, 150°C	6.95 @ 400A, RG=2.1, 175°C	8.7 @ 360A, RG=7.5, 150°C	16.74 @ 300A, RG=5.1
td(on) (нс) @175°C	109 @ 180A	140 @ 400A	—	66 @ 400A	70 @ 360A	96 @ 300A
tr (нс) @175°C	115 @ 180A	65 @ 400A	—	44 @ 400A	41 @ 360A	60 @ 300A
td(off) (нс) @175°C	144 @ 180A	185 @ 400A	—	188 @ 400A	198 @ 360A	448 @ 300A
tf (нс) @175°C	29 @ 180A	40 @ 400A	—	56 @ 400A	58 @ 360A	72 @ 300A
Ptot (W)	-	1360	1293	1540	1500	1120

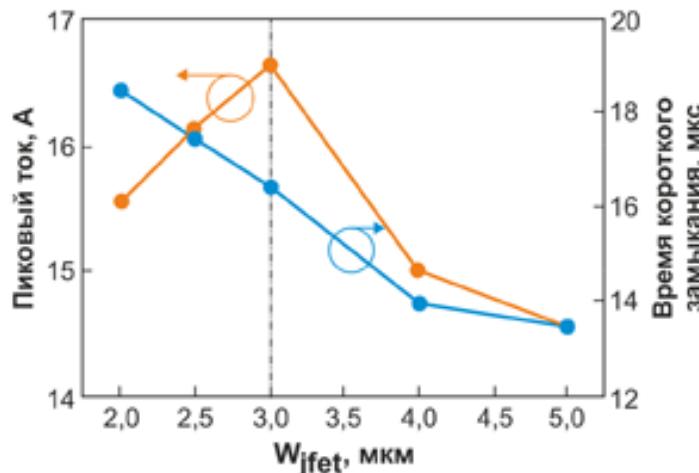
Портфолио SiC силовых модулей от китайских брендов

Полумост								3 фазы				
		Easy1	Easy2	34mm	62mm	EconoDual	DCM	Easy1	Easy2	EconoPIM	EconoPACK3	HybridPACK
ATS (ATELECT)		650 1200	650 1200		650 1200 1700	650 1200 1700	1200	650 1200	650 1200	650 1200	650 1200	650 1200
Leapers		1200	1200	1200	1200 1700	1200 1700 2200		1400				750 1200 1400
YJ				1200	1200			1200				
Starpower					1200 1700		750 1200	1200				750 1200
BYD							1200					1200

Ограничение SiC модулей



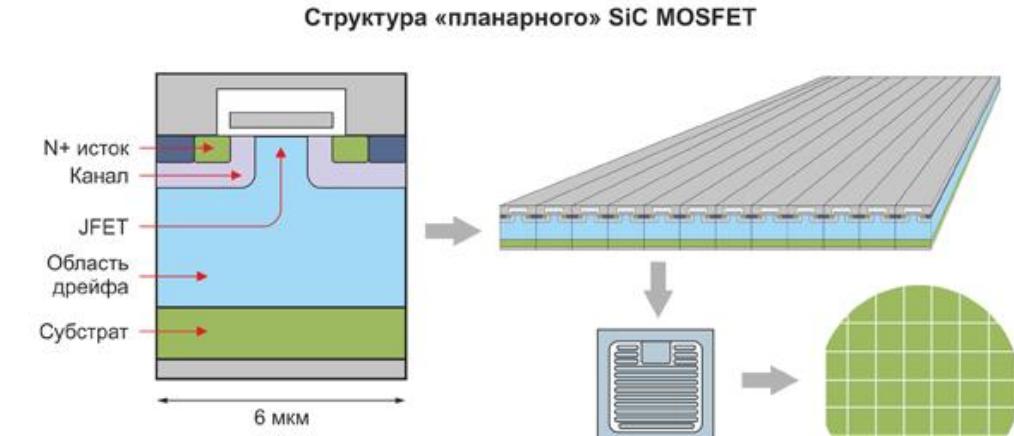
a)



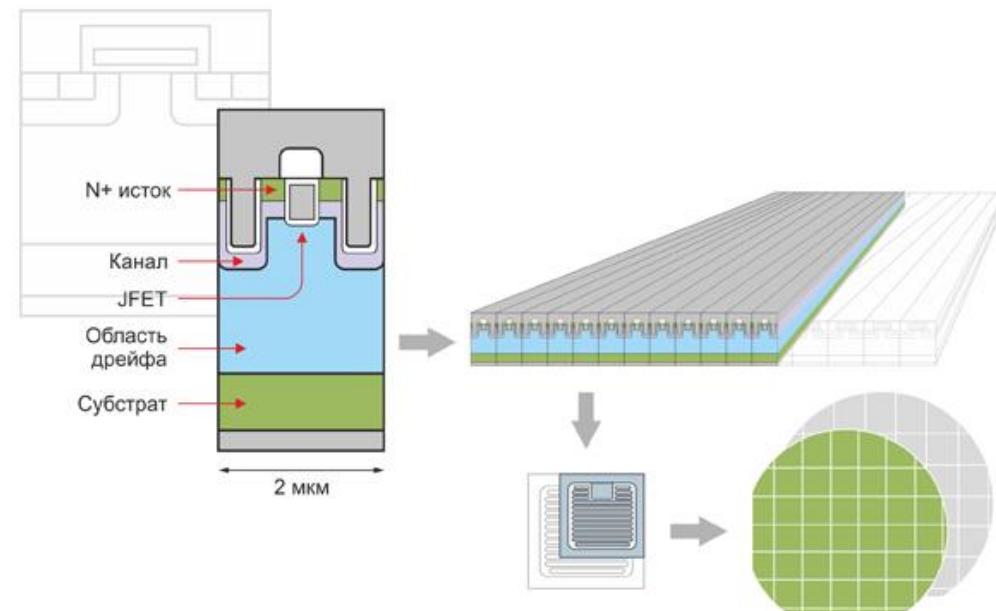
б)

а) зависимость тока короткого замыкания от времени для структур с различной шириной JFET-области.

б) Зависимость пикового тока и времени короткого замыкания для планарной (оранжевая линия) и Trench (синяя линия) структур чипа от ширины W_{JFET} -области



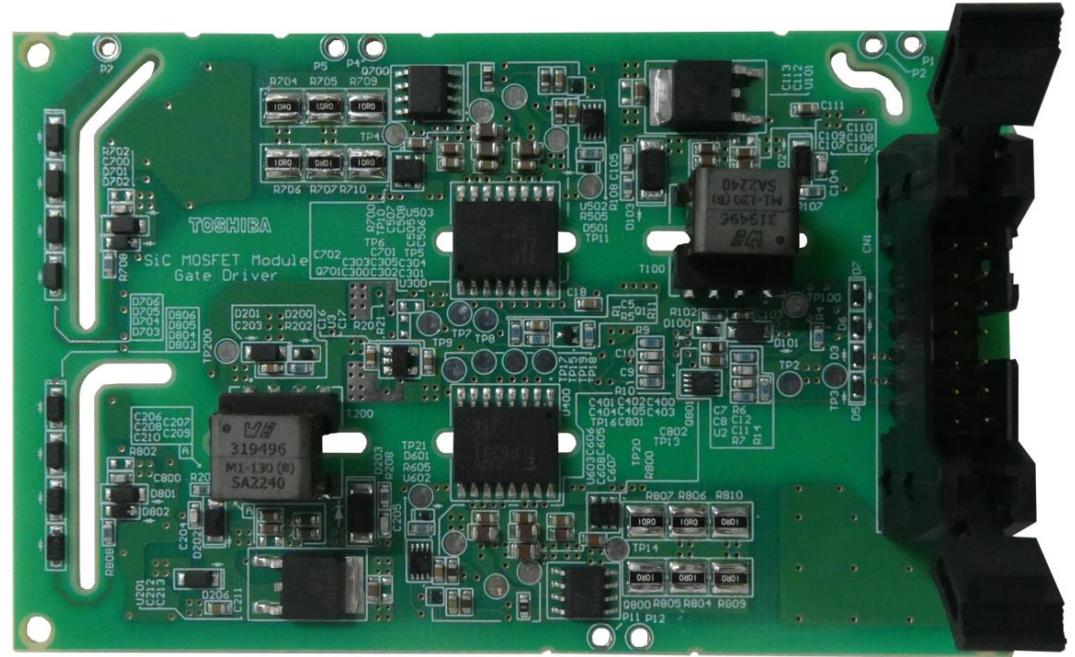
Структура «trench» SiC MOSFET



Портфолио SiC силовых модулей от японских производителей

Полумост				
	62mm	EconoDual	LV100	DCM
MITSUBISHI	1200 1700	1200 1700	3300	
TOSHIBA		1200 1700	3300	
FUJI	1200 1700			
HITACHI				750 1200
ROHM		1200		

Драйверы затвора



Особенности SiC MOSFET и GaN HEMT

Особенность №1

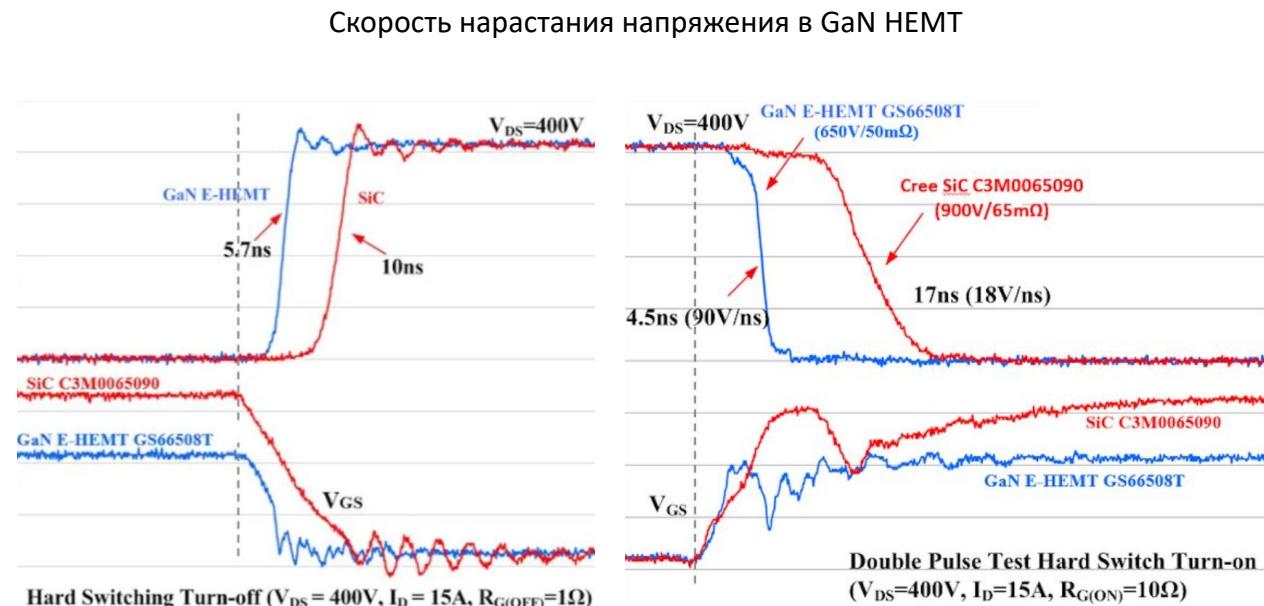
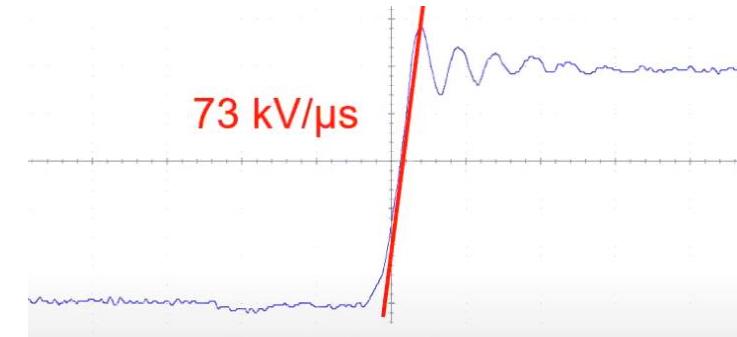
- Высокая скорость переключения

В чем проблема?

- Высокие значения dv/dt приводят к «звонам», что может привести к сбою в управлении
- Высокое требование к параметру «задержка распространения сигнала / Propagation Delay»
- Высокая степень влияния паразитных индуктивностей в цепи управления

Решение

- Проектирование узла цепи управления на печатной плате устройства с прицелом на уменьшение паразитной индуктивности.
- Добиться от схемы управления параметра подавления синфазной помехи (CMIL) $\Rightarrow 100$ кВ/мкс
- Выбор драйверов с параметром Propagation Delay ≤ 80 нс
- Максимально короткая длина соединителей от платы драйверов до модуля.



Временные диаграммы включения и выключения SiC MOSFET и GaN HEMT

Особенности SiC MOSFET и GaN HEMT

Требования к управляющим компонентам

Особенность №2

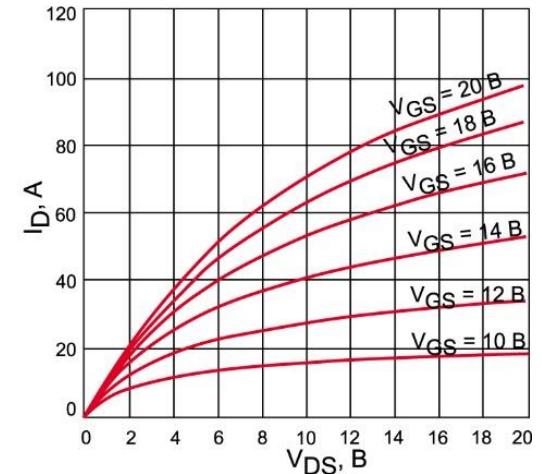
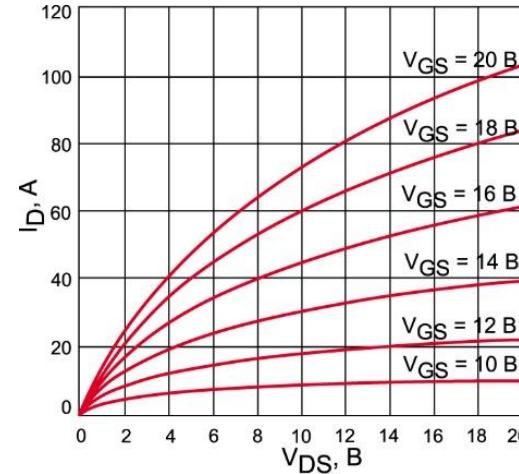
- Широкий диапазон изменения напряжения на затворе

В чем проблема?

- Управляющее напряжение SiC MOSFET в диапазоне 18...25В
- Управляющее напряжение GaN HEMT в диапазоне 1.4...6В

Решение

- Для SiC MOSFET выбор драйверов с параметром выходного напряжения (Output Voltage Range) => 25В
- Для GaN HEMT выбор драйверов с параметром выходного напряжения (Output Voltage Range) => 8В



Семейство входных характеристик SiC MOSFET при температуре кристалла $T_j = +25^\circ$ (слева) и $T_j = 125^\circ\text{C}$ (справа)



Амплитуда напряжения на затворе SiC MOSFET

Портфолио азиатских драйверов затвора

Тип драйвера	Особенности	SGMicro	3PEAK	Novosense	Chipown	EGMicro	Belling	Silan	UTC	UMW (YOUTAI)	Runic	Ruimeng	Silergy	2PAI	Chip Analog
Low-Side	1CH	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
	2CH	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
	SiC	●	●	●											
	GaN	●	●	●							●				
Half-Bridge	< 300V (1-phase)	●		●	●	●	●	●	●	●			●		
	> 600V (1-phase)			●	●	●	●	●	●	●				●	
	< 300V (3-phase)				●	●	●								
	> 600V (3-phase)				●	●	●	●	●						
Isolated Driver	Standard		●	●	●									●	●
	Smart			●									●	●	
Automotive	AEC-Q100 Qualified	●	●	●										●	●

● - новая продукция