

Карбид кремния - современное решение НОВЫХ задач в силовой электронике



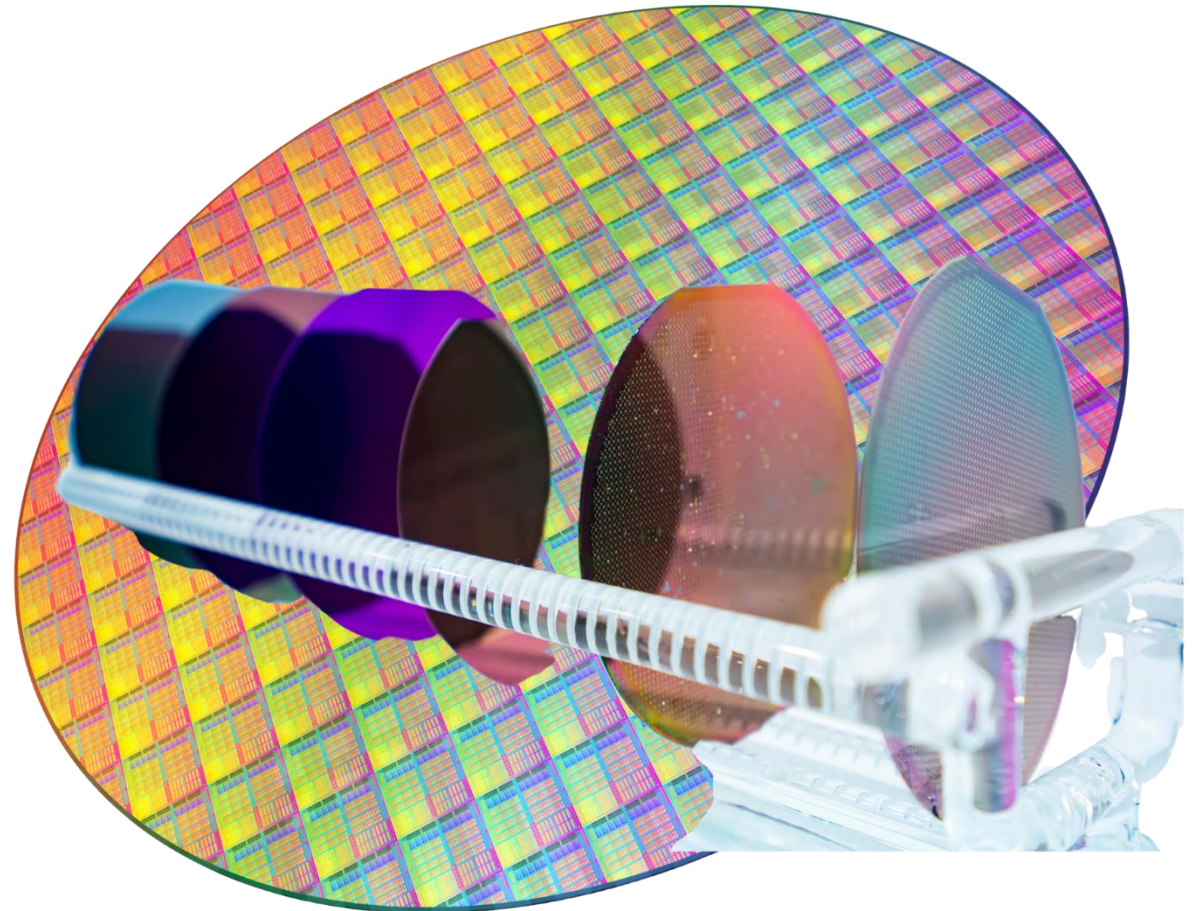
Долгов Владислав

Инженер по применению
направления
«Дискретные
полупроводники
и силовые компоненты»



Рощина 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

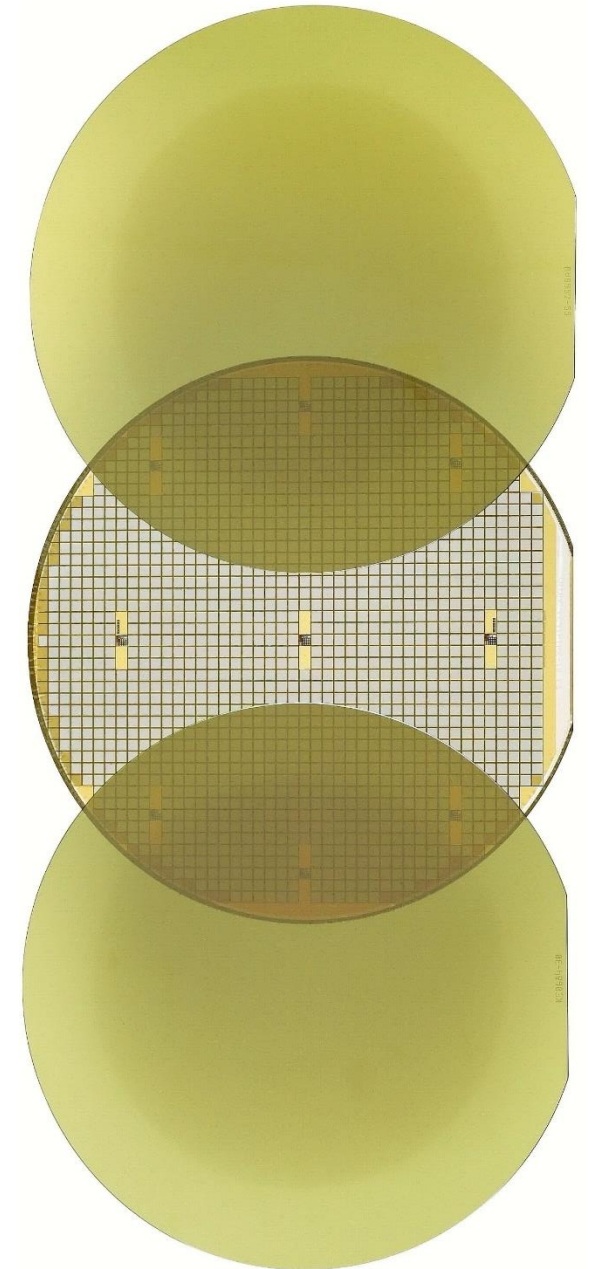
- Портфолио SiC диодов Шоттки
- Портфолио SiC MOSFET
- Доступность

Силовые SiC модули

- Портфолио SiC модулей
- Ограничение SiC модулей

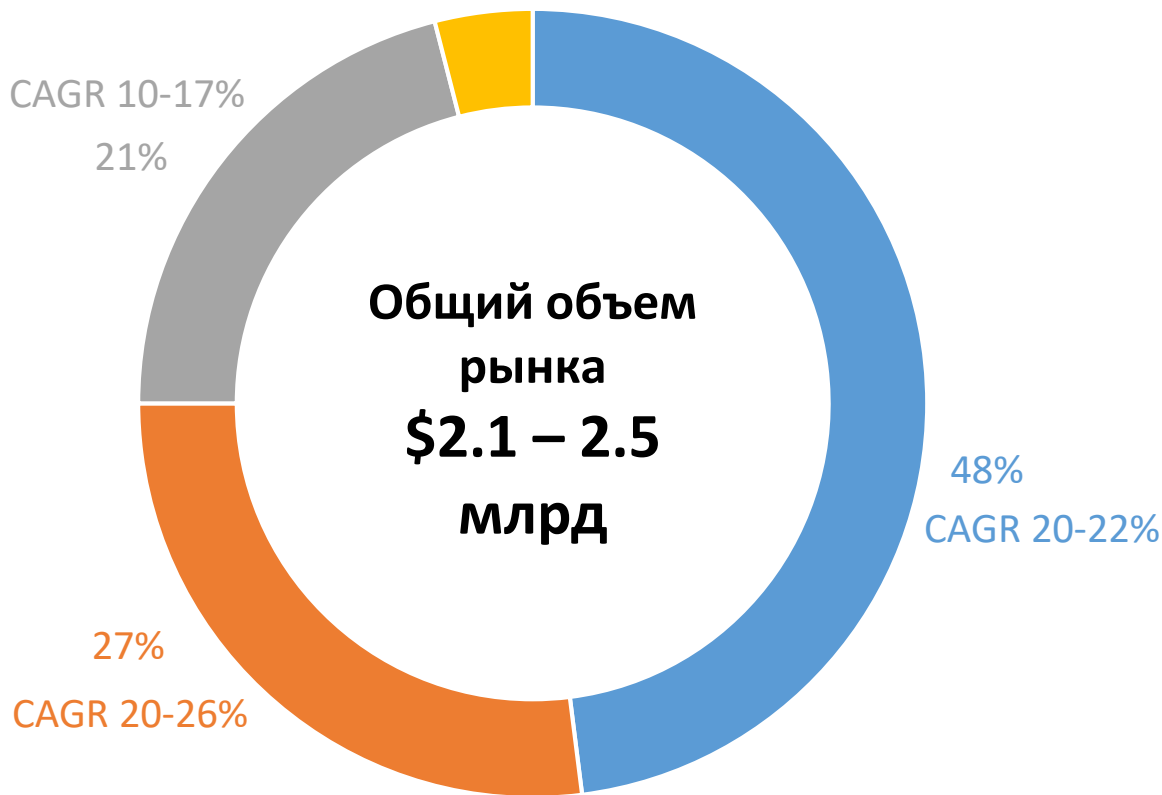
Драйверы

- Особенности управления SiC MOSFET
- Портфолио азиатских драйверов затвора



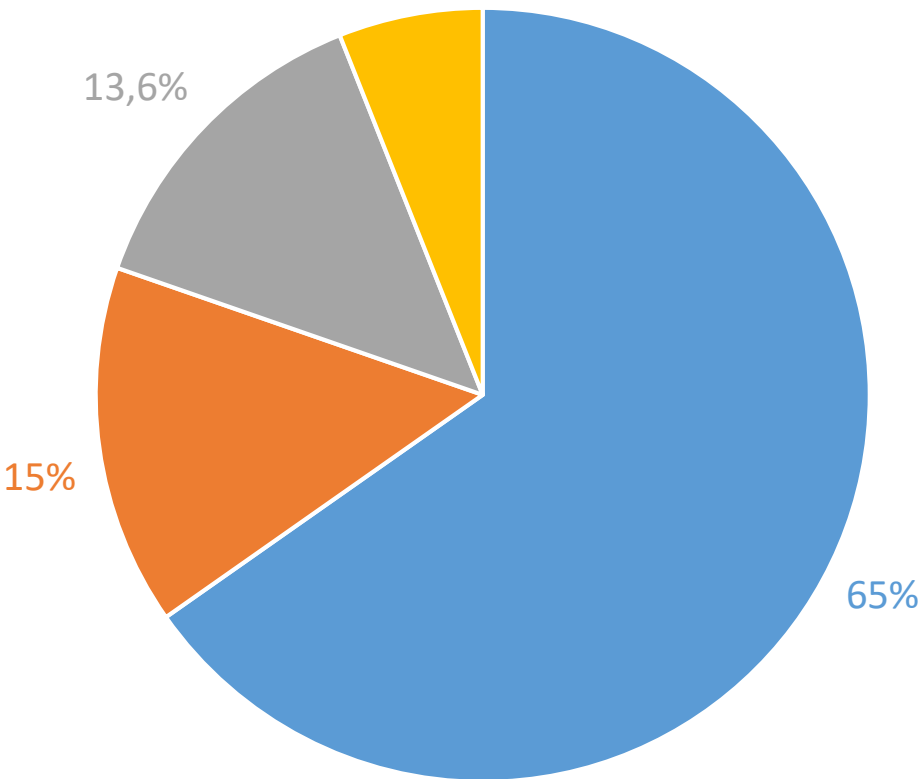
Мировой рынок SiC электроники в 2024 -2025. Обзор и прогнозы

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



Зарядные модули



Инвертор для солнечных
панелей



Преобразователи для HVDC

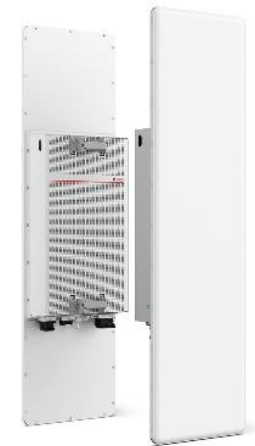
Телеком



Серверные ИП (PSU)



Драйверы шаговых двигателей



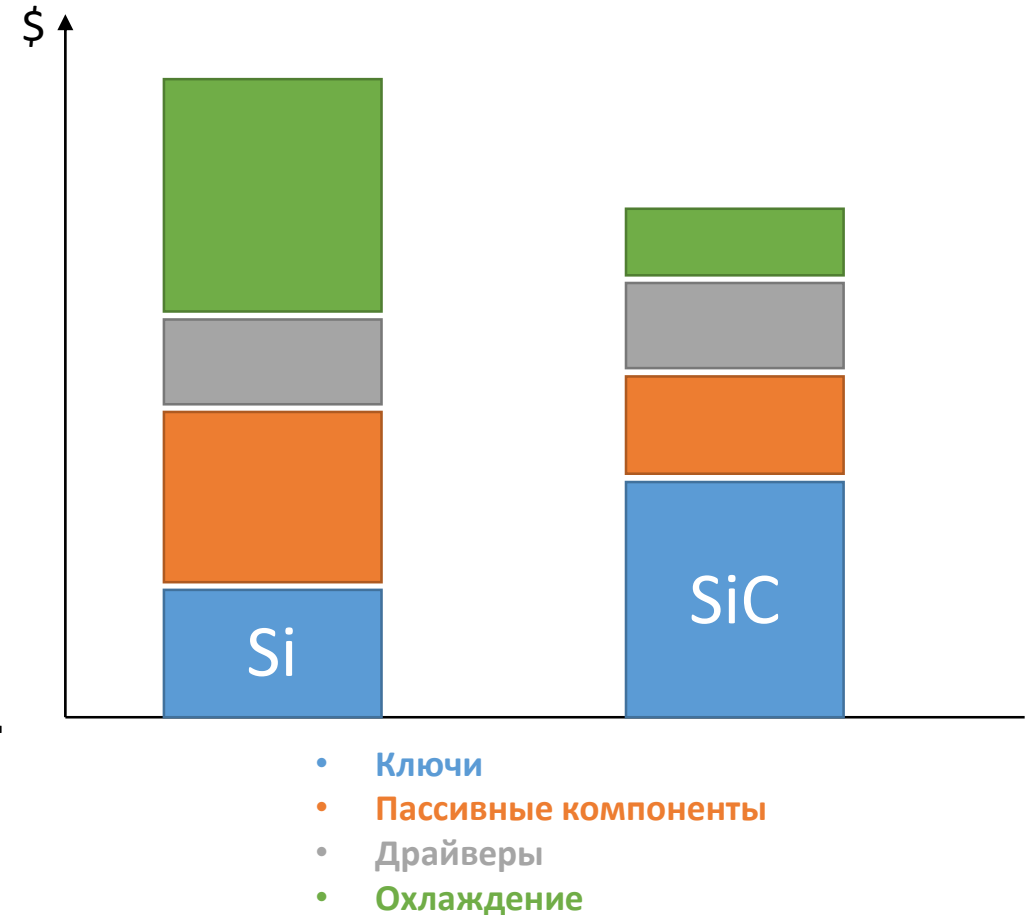
Базовые станции 5G

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

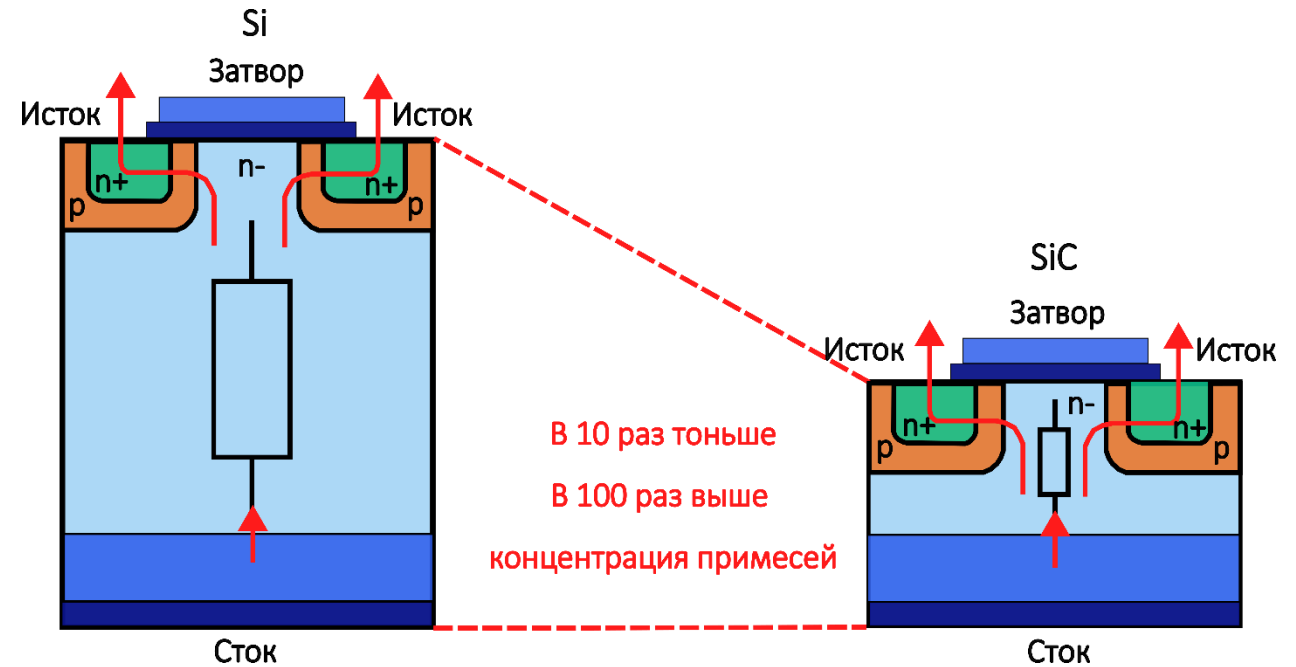


Выше частота переключения → Меньше номиналы и габариты пассивных компонентов → Более компактное устройство → Экономия средств

Физические и электрические особенности SiC



Сравнение электрических и физических характеристик Si и SiC

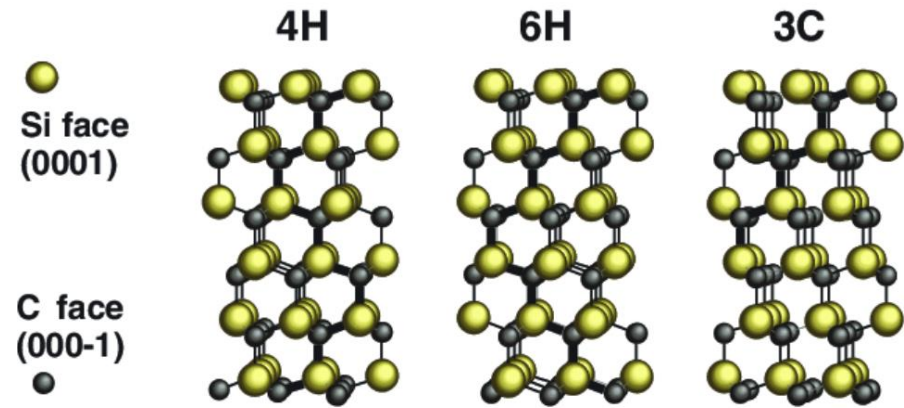


Изменения в структуре чипа для Si и SiC MOSFET

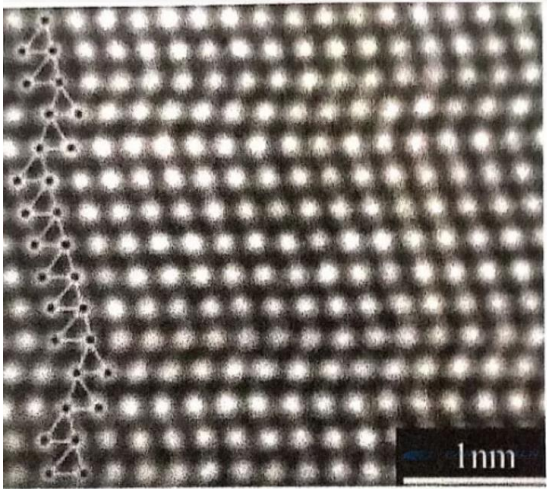
Физические и электрические особенности SiC



Кристалл муссанита в природе (~1 мм)



Кристаллические решетки самых распространенных модификаций SiC



4H-SiC. Фотография электронным микроскопом

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

По шкале Мохса	9-13
В единицах ГПа	32

Ширина запрещенной зоны

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

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

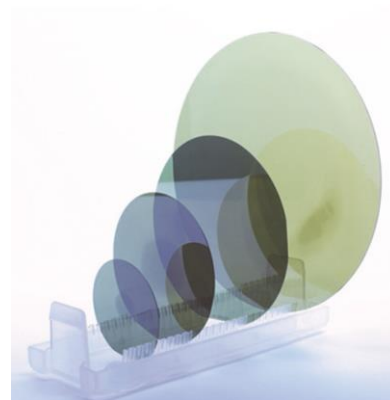
Процесс производства SiC компонентов



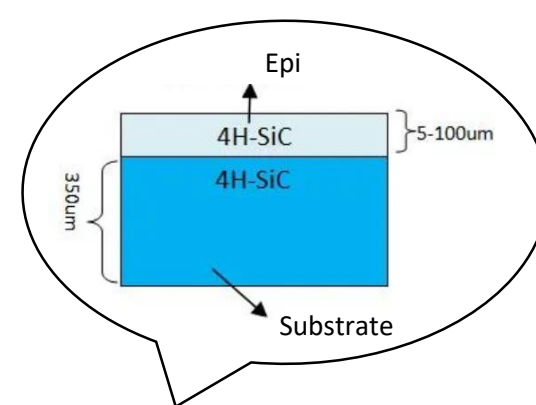
Порошок
(SiC Powder)



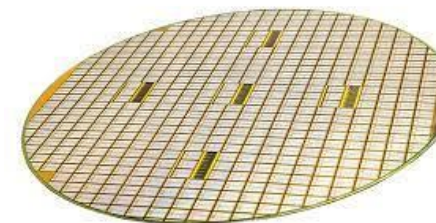
Заготовка
(SiC Boule)



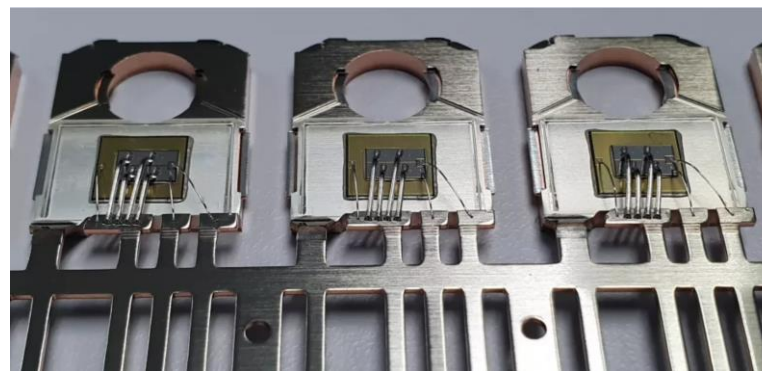
Подложка
(Substrate)



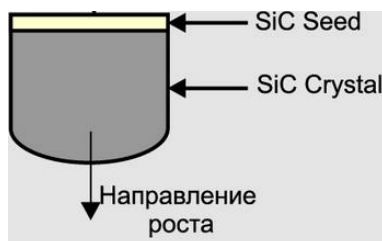
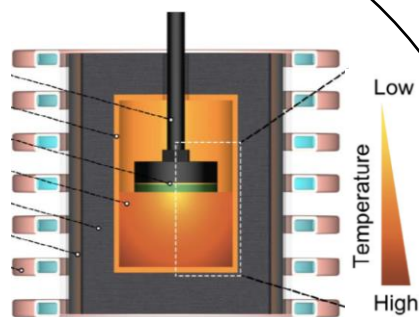
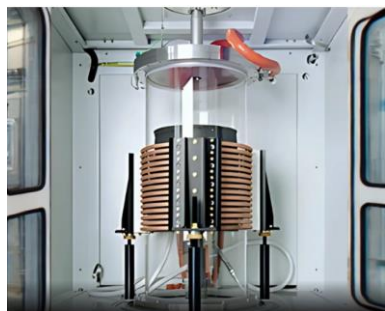
Эпитаксиальная пластина
(Epitaxy)



«Вафля»
(SiC Wafer)



Корпусирование
(Packaging)



Вектор развития SiC индустрии

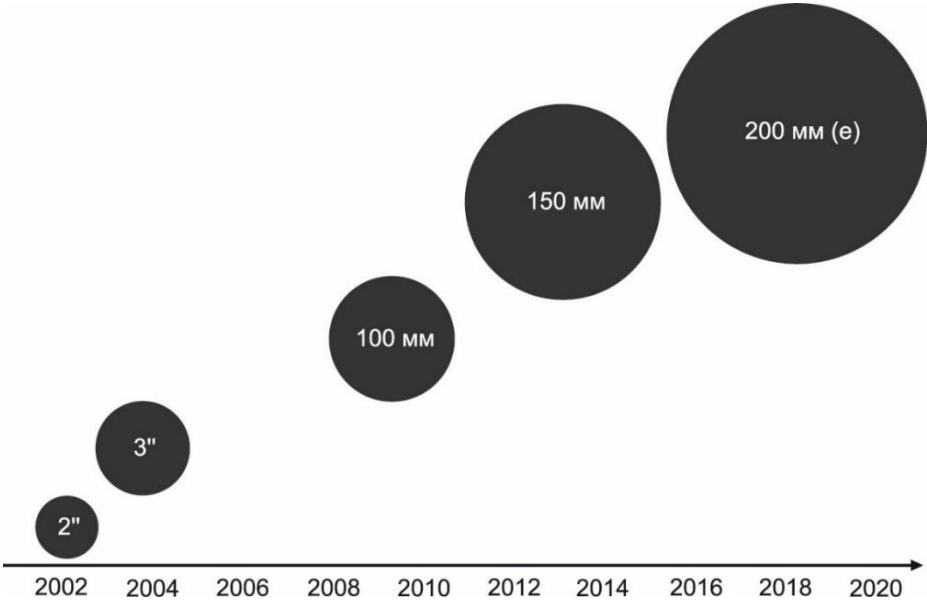
2000 г.
диаметр 35 мм



Сегодня
диаметр 150 мм

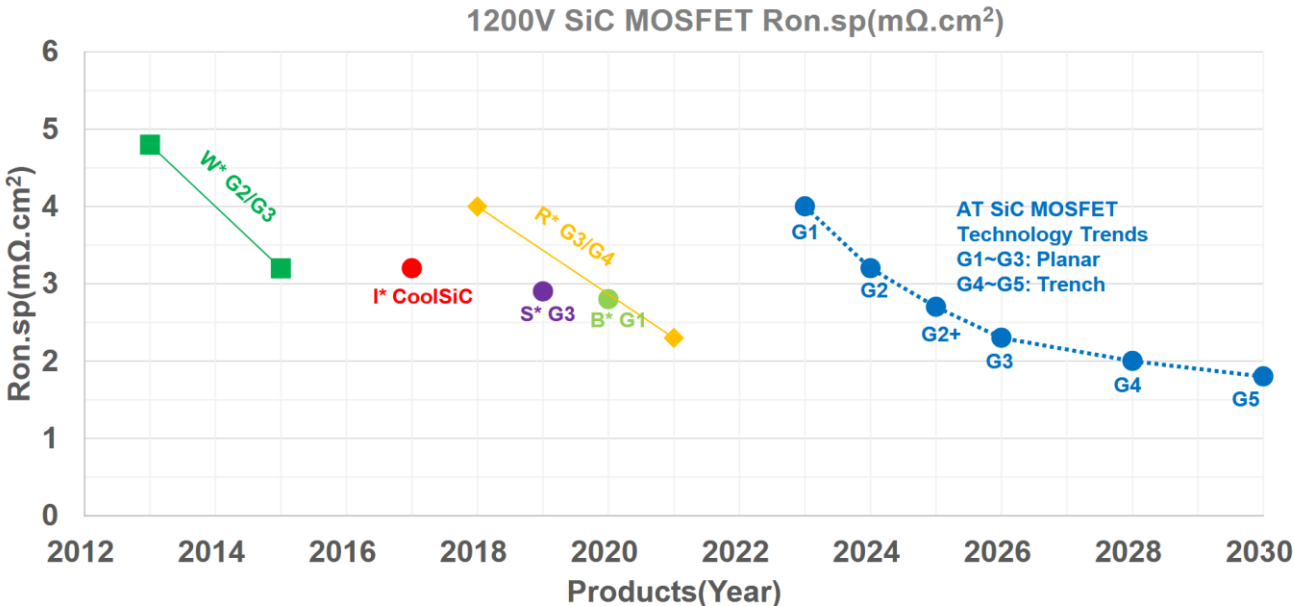


Сравнение подложек методом двойного
лучепреломления (светлые зоны – это
нарушение структуры)

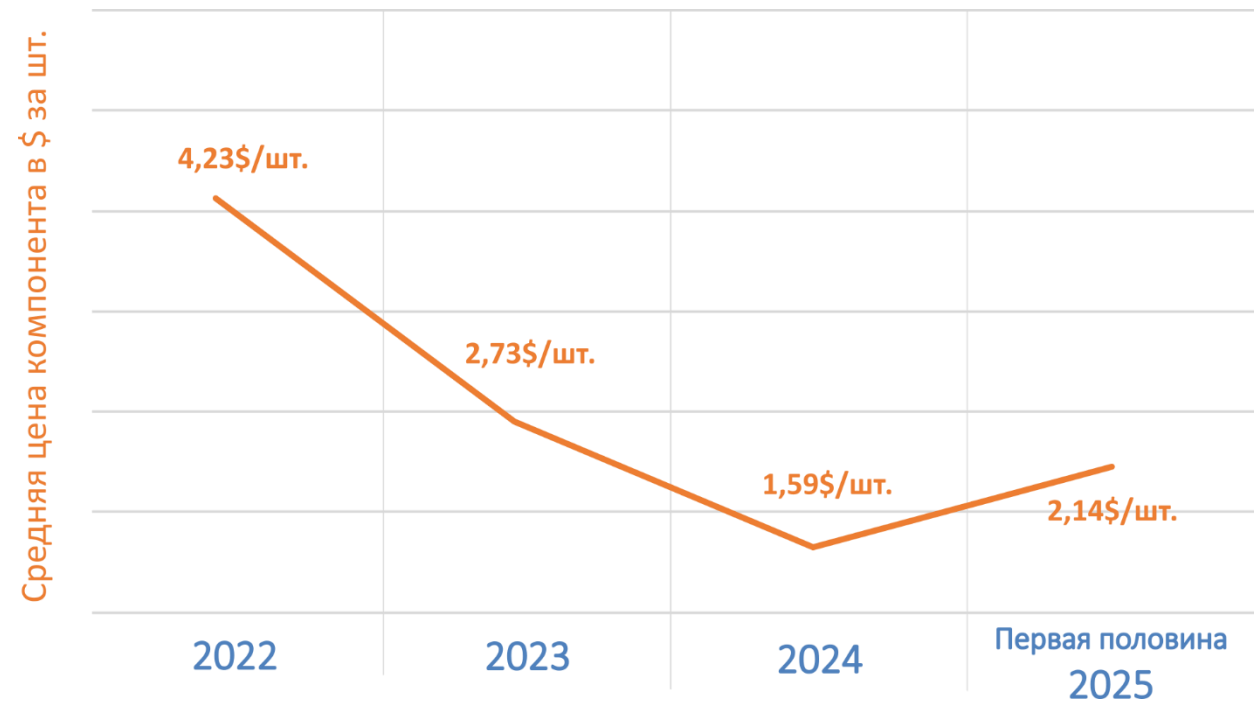


Эволюция размеров подложек

2023 G1	2024 G2	2025 G2+	2026 G3	2028 G4
Ron.sp(25°C)=4.0mΩ.cm ² Ron.sp(175°C)=6.8mΩ.cm ² <ul style="list-style-type: none">● A Series Strip Pitch, Ultra Low Gate Charge● B Series Squar Pitch, EMI Improved	Ron.sp(25°C)=3.0mΩ.cm ² Ron.sp(175°C)=5.3mΩ.cm ² <ul style="list-style-type: none">● Ultra Low Gate Charge● Very low switching● Good Avalanche capability● Short Current Tsc 3μs● Industry qualified	Ron.sp(25°C)=2.6mΩ.cm ² Ron.sp(175°C)=4.2mΩ.cm ² <ul style="list-style-type: none">● Ultra Low Gate Charge● Very Low Switching● Good Avalanche Capability● IGBT Driving Voltage● AEC-Q101 qualified	Ron.sp(25°C)=2.3mΩ.cm ² Ron.sp(175°C)=3.5mΩ.cm ² <ul style="list-style-type: none">● Ultra Low Gate Charge● Very Low Switching● Good Avalanche Capability● IGBT Driving Voltage● AEC-Q101 qualified	Ron.sp(25°C)=2.0mΩ.cm ² Ron.sp(175°C)=3.0mΩ.cm ² <ul style="list-style-type: none">● Ultra Low Gate Charge● Very Low Switching● Excellent Temp. features● IGBT Driving Voltage● AEC-Q101 qualified



Цены на SiC компоненты



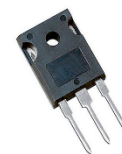
Самый популярный SiC компонент



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



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



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



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

Компании в SiC индустрии

Подложка
Substrate

Эпитаксиальная пластина
Epitaxy

Разработка чипа
Design

«Вафля»
Wafer

Корпусирование
Packaging

SICC

TANKEBLUE

San'an

TYSiC

И еще более
50 компаний в Китае



YJ



GPT



CR MICRO



BYD



ATS



WAYON



JSCJ



ANBON

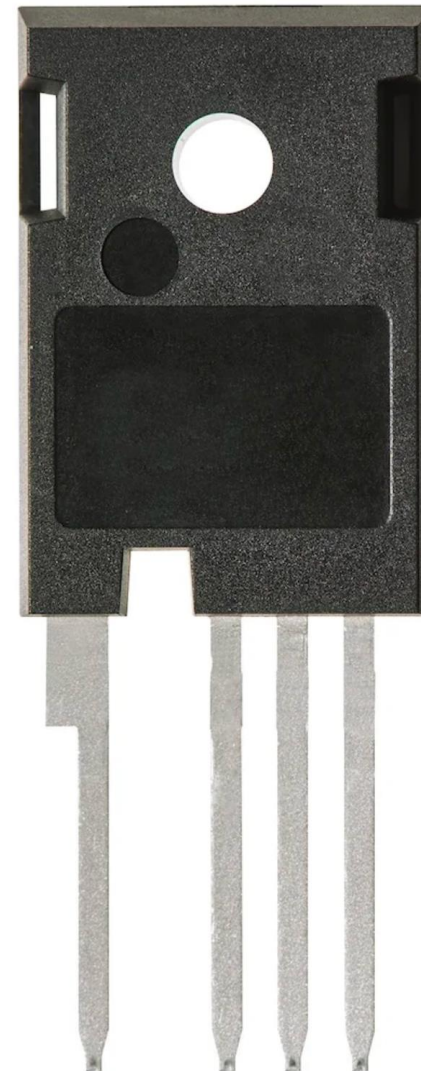


STARPOWER



LEAPERS

Дискретные SiC компоненты

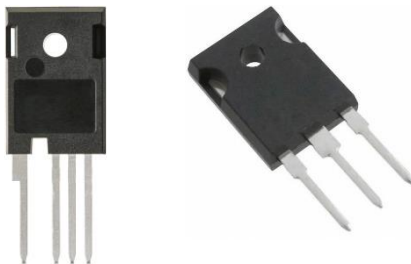


Сравнение китайских SiC компонентов с Si решениями и западными аналогами



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), A	40A						
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 A	10...20 A	30...40 A	50...100 A
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

Портофолио 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+

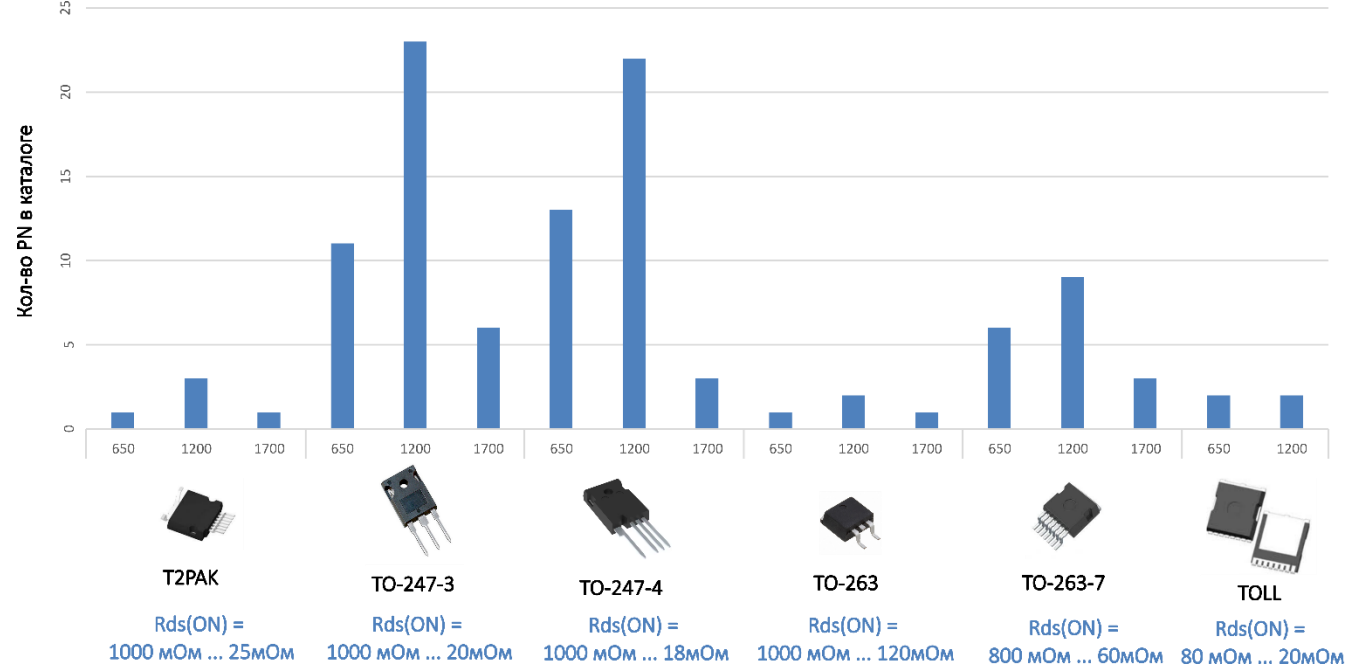
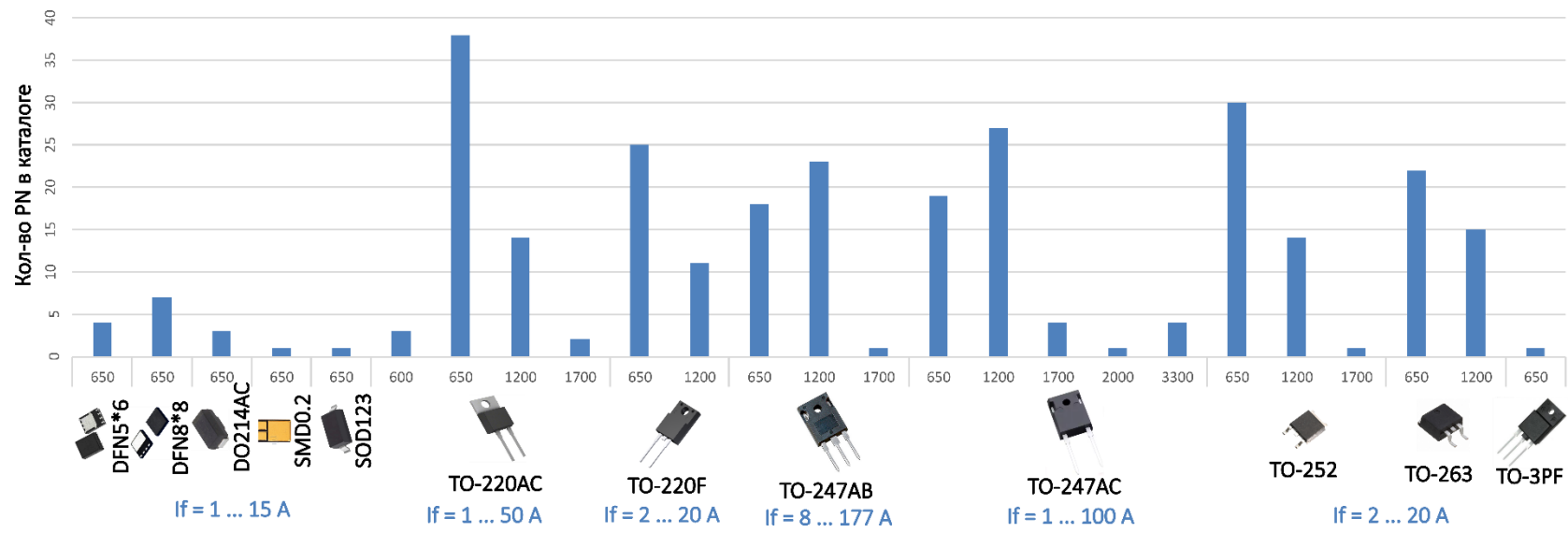
Штук в наличии на
складе Компэл



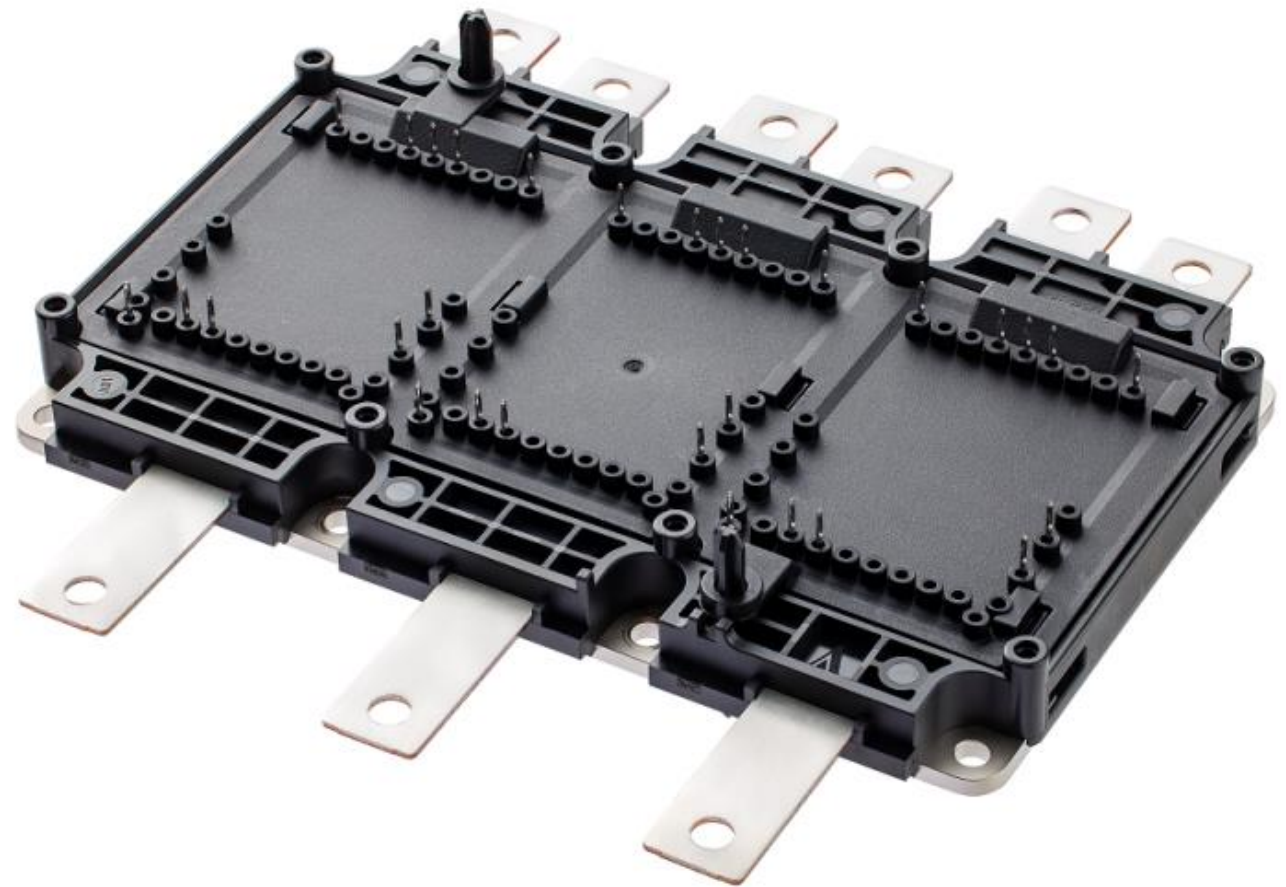
Широкий ассортимент продукции под заказ
Надежные каналы поставки
Средний срок поставки под заказ 4-8 недель



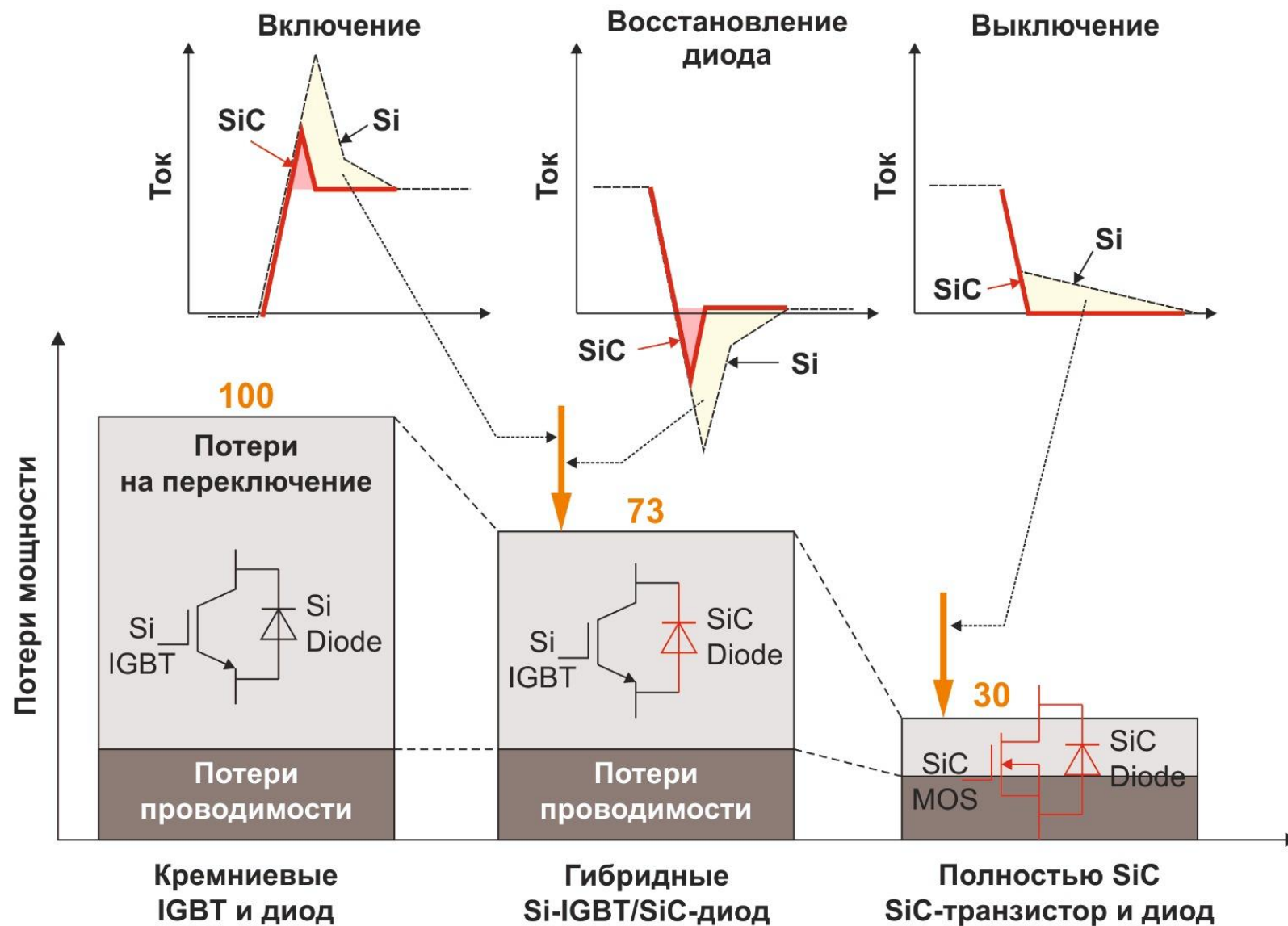
Популярность номиналов дискретных SiC компонентов



Силовые SiC модули



Влияние технологии на энергоэффективность



Сравнение SiC модулей 1200V

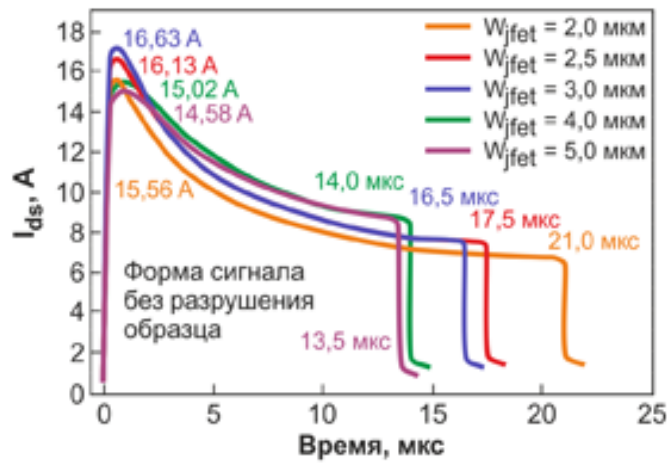


Производитель	Infineon	Mitsubishi	Wolfspeed	AT SEMI	Leapers	Yangjie
Материал подложки	Al ₂ O ₃	AlN	AlN	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄
Номинальный ток (ID, A) @ 25°C	280	400	424	400	360	400
RDS(on) @ 25°C, VGS = 18 V(mΩ)	2.94	3.6	4.0	3.5	5.3	3.3
RDS(on) @ 175°C, VGS = 18 V (mΩ)	6.32	5.1	7.2	5.78	7.5	5.3
Eon (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

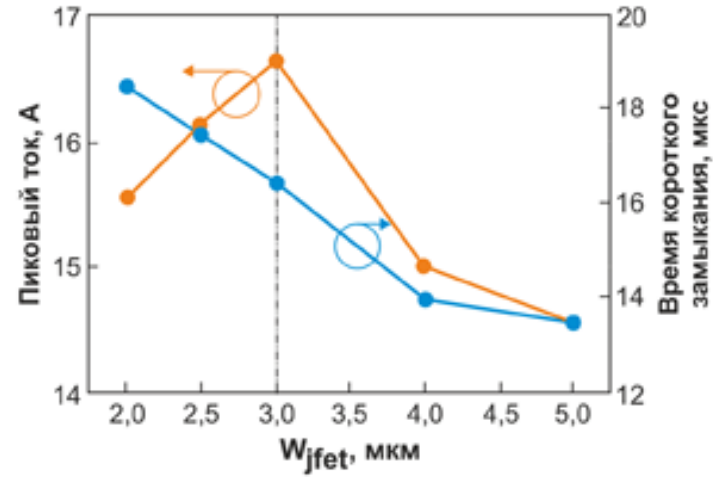
Портфолио SiC силовых модулей от китайских брендов

	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



а)

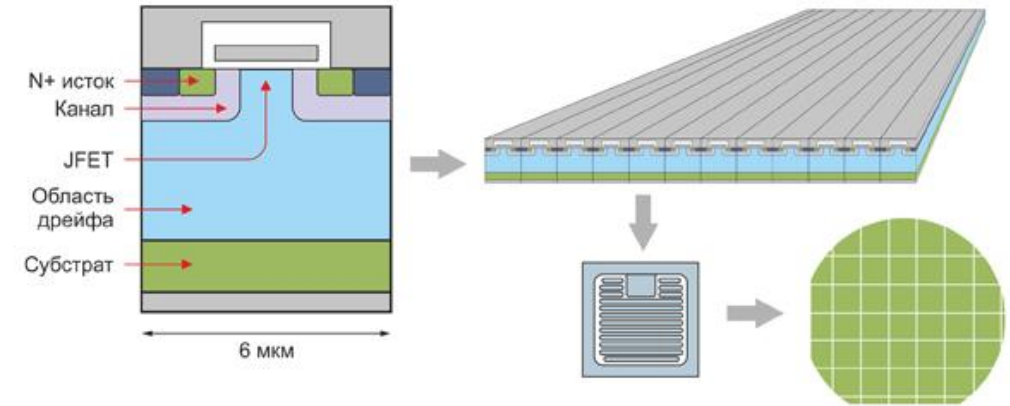


б)

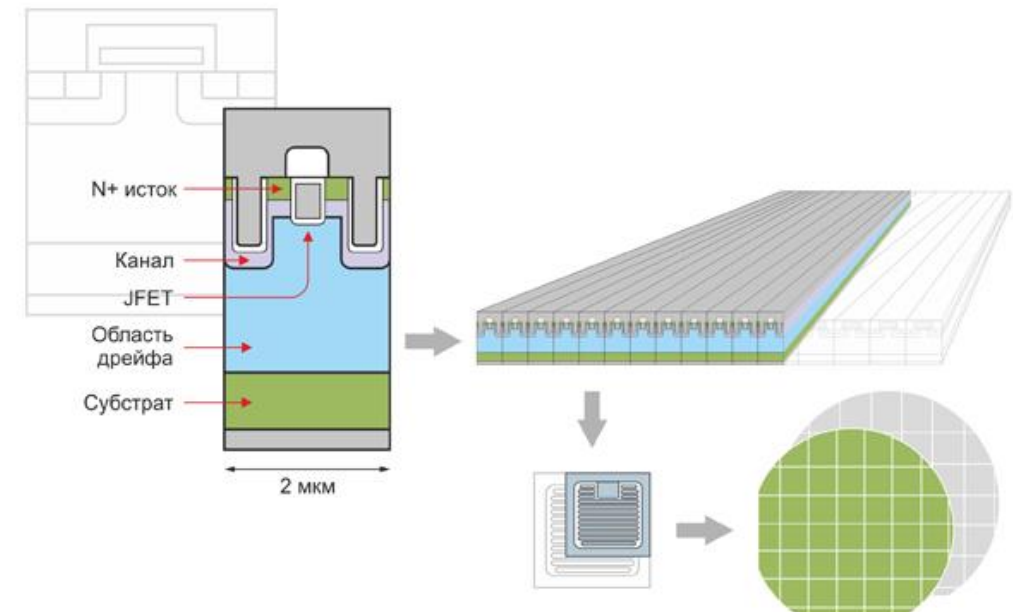
а) зависимость тока короткого замыкания от времени для структур с различной шириной JFET-области.

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

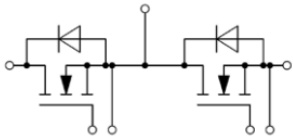




Структура «планарного» SiC MOSFET



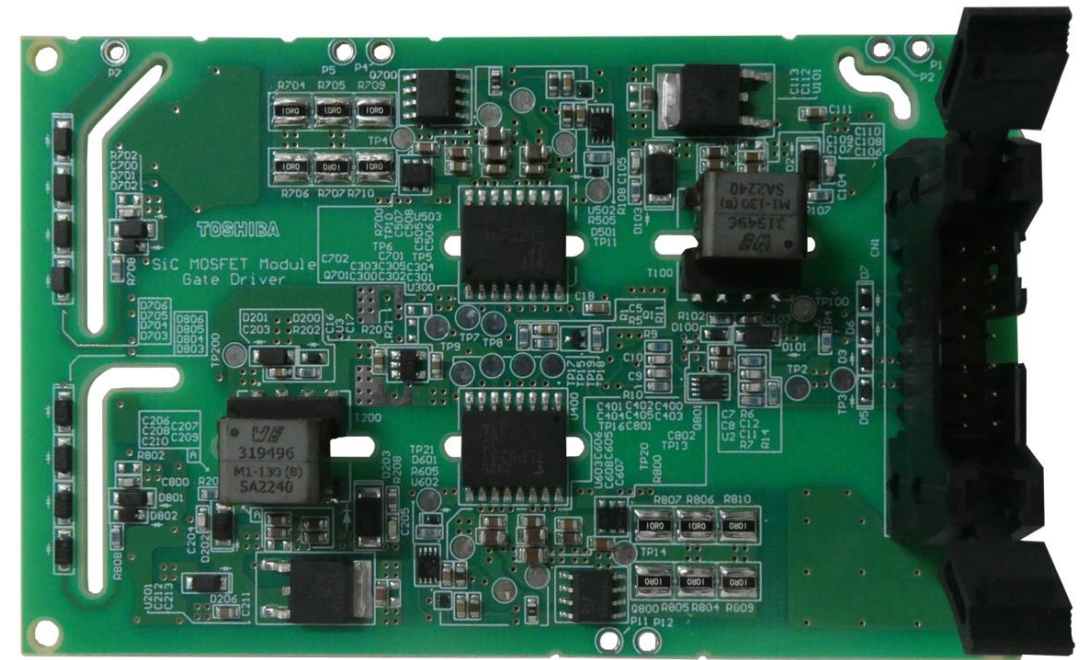
Структура «trench» SiC MOSFET



Портфолио SiC силовых модулей от японских производителей

	<div></div> <div>Полумост</div>			
	<div>62mm</div> <div></div>	<div>EconoDual</div> <div></div>	<div>LV100</div> <div></div>	<div>DCM</div> <div></div>
MITSUBISHI	1200	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

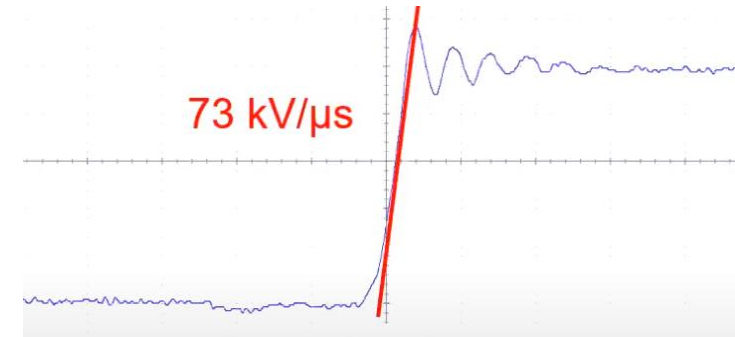
- Высокая скорость переключения

В чем проблема?

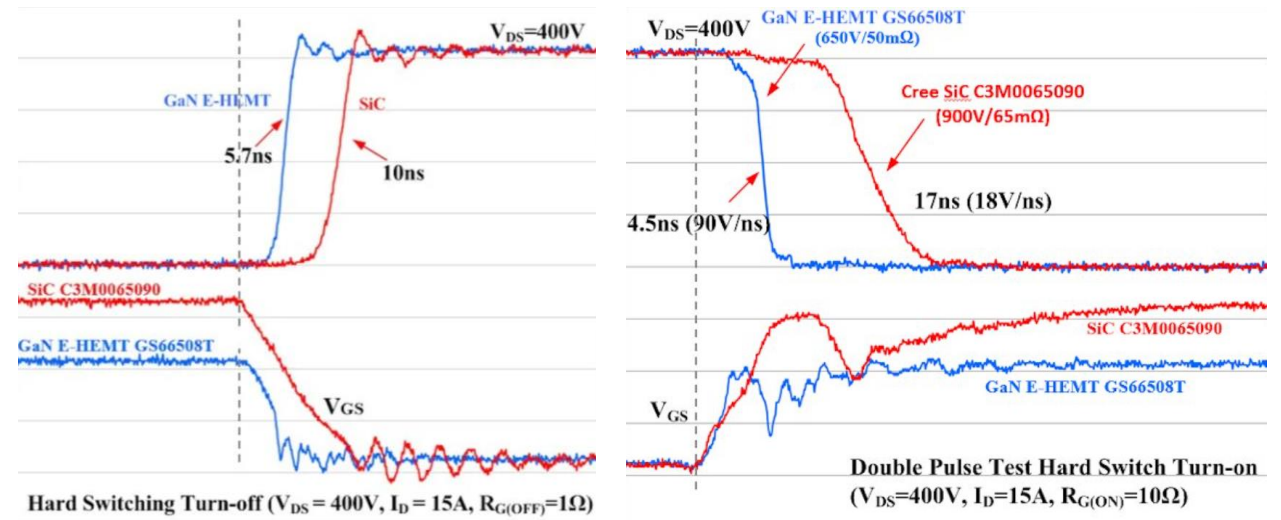
- Высокие значения dv/dt приводят к «звонам», что может привести к сбою в управлении
- Высокое требование к параметру «задержка распространения сигнала / Propagation Delay»
- Высокая степень влияния паразитных индуктивностей в цепи управления

Решение

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



Скорость нарастания напряжения в GaN HEMT



Временные диаграммы включения и выключения SiC MOSFET и GaN HEMT

Особенности SiC MOSFET и GaN HEMT

Требования к управляющим компонентам

Особенность №2

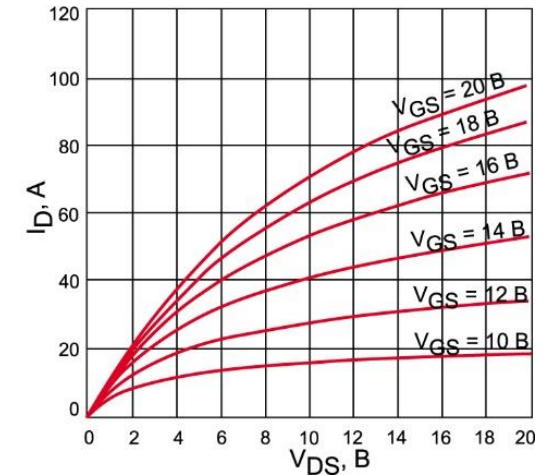
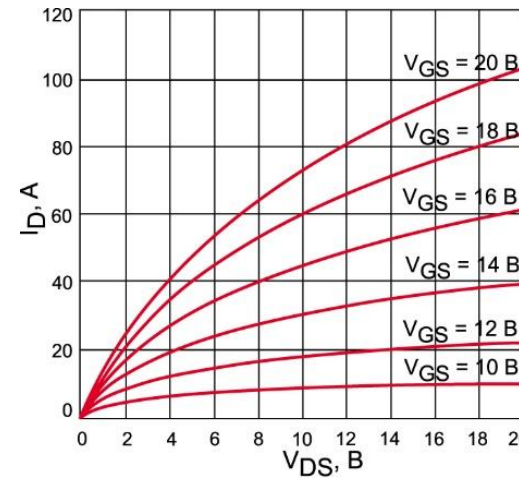
- Широкий диапазон изменения напряжения на затворе

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