

Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния — настоящее и будущее силовой электроники

Выдающиеся динамические характеристики, высокая рабочая температура и сверхнизкие потери проводимости полупроводников из карбида кремния выводят развитие элементной базы для силовой электроники на новый этап.

Александр Полищук

a.polishuk@prosoft.ru

Состояние рынка приборов из карбида кремния

Всего лишь несколько лет назад карбид кремния стал рассматриваться в качестве материала для приборов силовой электроники, что стало возможным благодаря развитию технологии выращивания кристаллов требуемого размера в необходимых количествах. На сегодняшний день всего лишь две компании производят коммерчески доступные изделия из карбида кремния — диоды с барьером Шоттки (ДШ) в диапазоне рабочих напряжений 300–1200 В и токов 1–20 А на кристалл. Объем мирового рынка этих изделий оценивается в \$4 млн в год и может вырасти более чем в 50 раз при условии значительного снижения их стоимости [1]. Это становится возможным уже сейчас, поскольку началось производство SiC-подложек диаметром 7,5 см. Продукция компаний, производящих серийные полупроводниковые приборы SiC, а также корпусирующих готовые кристаллы под своей торговой маркой, приведена в таблице 1 [2–5].

Выдающиеся динамические характеристики, высокая рабочая температура и сверхнизкие потери проводимости полупроводников из карбида кремния выводят развитие элементной базы для силовой электроники на новый этап. Например, уже сейчас применение диодов Шоттки на основе SiC с напряжением 600 В совместно с кремниевыми полевыми транзисторами CoolMOS позволяет получить двукратный выигрыш по эффективности в преобразователях с жестким режимом переключения по сравнению с другими ключевыми прибо-

рами [6]. Их применение в активных корректорах коэффициента мощности вместо кремниевых ULTRAFast-диодов также обеспечивает общее снижение потерь на 40–50%. SiC ДШ с обратным напряжением 300 В с успехом вытесняют аналогичные GaAs ДШ, применяемые в выходных выпрямителях ключевых источников электропитания 48–60 В благодаря меньшим потерям и более высокой рабочей температуре. SiC ДШ с обратным напряжением 1200 В идеально подходят для применения в качестве антипараллельных и рекуперационных диодов для кремниевых IGBT-транзисторов. Начинается их промышленное использование и в DC/AC-инверторах систем регенеративного электропитания, базирующихся на солнечных батареях или топливных элементах.

Свойства и характеристики SiC

Хотя существует около 170 известных полиморфных форм карбида кремния, пока только два из них доступны для серийного изготовления полупроводниковых приборов — это 4H-SiC и 6H-SiC. Полиформы 4H-SiC предпочтительнее для силовых полупроводников благодаря большей подвижности электронов. В таблице 2 приводится сравнение основных электронных свойств 4H-SiC с кремниевыми (Si) и арсенидгалиевыми (GaAs) полупроводниковыми материалами [7].

Ключевые преимущества полупроводниковых материалов SiC в сравнении с Si и GaAs следующие:

- Напряженность электрического поля пробоя 4H-SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии R_{on} . На рис. 1 показана зависимость R_{on} от напряжения пробоя кристалла.

Можно видеть, что при напряжении 600 В SiC-диод имеет $R_{on} \approx 1,4 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, GaAs-диод — $6,5 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, Si-диод — $R_{on} > 70 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$.

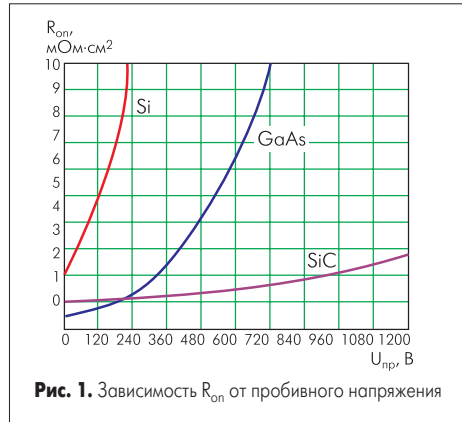
Малое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать

Таблица 1

Компания	Производство подложек SiC	Продукция
CREE	собственное	ДШ 300...1200 В, 1...20 А, СВЧ SiC MESFET 2,7 ГГц, 10 Вт, светодиоды $\lambda = 455...535 \text{ нм}$
Infineon	собственное	ДШ 300...600В, 2...12А
Advanced Power Technology	CREE	ДШ 300...1200В, 1...10А, PT IGBT+антипараллельный SiC ДШ, Модули CoolMOS™+ антипараллельные SiC ДШ
IXYS	Infineon	Однофазные мостовые выпрямители на SiC ДШ 600 В, 10 А, 16 А

Таблица 2

Наименование	Si	GaAs	4H-SiC
Ширина запрещенной энергетической зоны, эВ	1,12	1,5	3,26
Подвижность электронов, см ² /с·В	1400	9200	800
Подвижность дырок, см ² /с·В	450	400	140
Концентрация собственных носителей, см ⁻³ при 300 К	1,5×10 ¹⁰	2,1×10 ⁶	5×10 ⁻⁹
Скорость объемного заряда электронов, см/с·10 ⁷	1,0	1,0	2,0
Критическая напряженность электрического поля, МВ/см	0,25	0,3	2,2
Теплопроводность, Вт/см·К	1,5	0,5	3,0-3,8



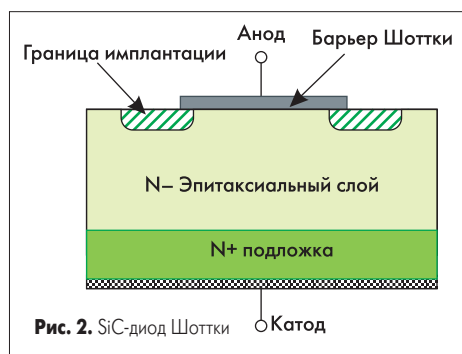
очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.

- Большая ширина запрещенной энергетической зоны является результатом более высокого барьера Шоттки по сравнению с Si и GaAs. В результате чрезвычайно малый ток утечки (менее 70 мкА при 200 °С) при повышенной температуре кристалла снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера.
- Высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла (по сравнению с Si-диодами — почти в два раза).
- Электронные свойства приборов на основе SiC очень стабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий.
- Карбид кремния чрезвычайно устойчив к жесткой радиации, воздействие которой не приводит к деградации электронных свойств кристалла.
- Высокая рабочая температура кристалла (более 600 °С) позволяет создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации и специальных применений.

Силовые полупроводниковые приборы из карбида кремния

Диоды Шоттки

Как отмечалось выше, в настоящее время пока являются единственным коммерчески



доступным продуктом. Структура SiC-диода показана на рис. 2.

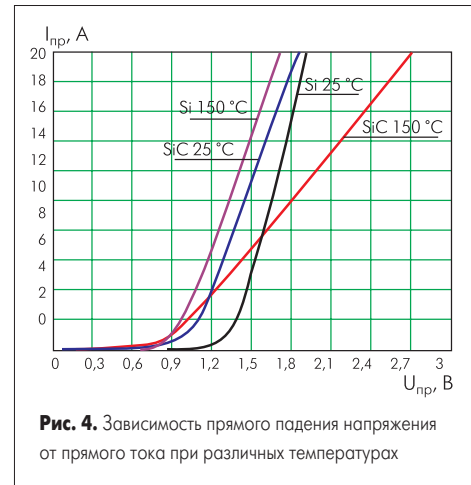
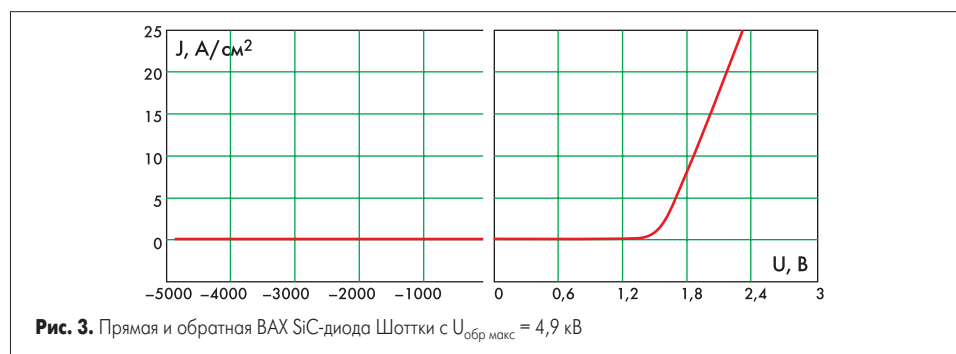
Для производства диодов используется политип 4H-SiC с металлизацией барьера Шоттки никелем или титаном. Для снижения краевой концентрации поля на границе металлического контакта используется дополнительная имплантация атомами бора с последующим отжигом при температуре 1050 °С в течение 90 минут. Высота барьера Шоттки при металлизации Ti и Ni составляет 0,8 В и 1,3 В соответственно. Более низкий барьер позволяет получить меньшее прямое падение напряжения, но при этом возрастает обратный ток утечки. Таким образом, для получения высоковольтных (более 1500 В) диодов перспективно использование металлизации никелем, для низковольтных — титаном. На рис. 3 показаны прямая и обратная вольт-амперные характеристики для диода, имеющего Ni-металлизированный барьер Шоттки и эпитаксиальный слой толщиной 50 мкм [8].

Этот диод имеет диаметр кристалла 425 мкм, максимальное обратное напряжение 4,9 кВ и удельное сопротивление в открытом состоянии 43 мОм·см². Компания Cree Research представила диод Шоттки с максимальным обратным напряжением 10 кВ и прямым падением напряжения 3,7 В при плотности тока 100 А/см². Таким образом, использование карбида кремния в ближайшей перспективе позволит решить проблему создания высокоскоростных высоковольтных выпрямителей на большие токи взамен громоздких низкоэффективных кремниевых столбов.

На рис. 4 показана типовая зависимость прямого падения напряжения от тока при различных температурах серийно выпускаемых диодов на основе Si и SiC.

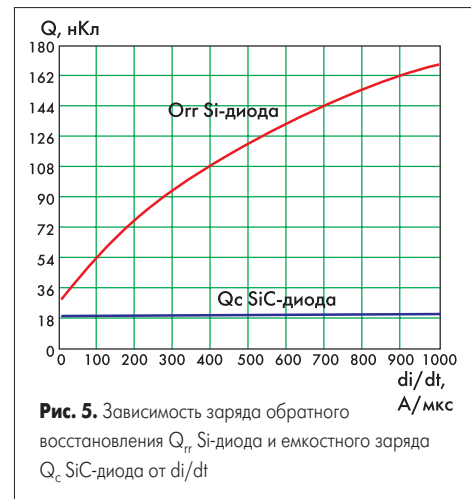
Поскольку с ростом температуры у карбида кремния снижается подвижность электронов и повышается удельное сопротивление в открытом состоянии, прямое падение напряжения, в отличие от кремниевых диодов, имеет положительный температурный коэффициент.

При T_j=25 °С прямое падение у карбид-кремниевых диодов ниже, чем у кремниевых.



С повышением температуры до T_j=50...70 °С величины падений напряжения при характеристическом токе становятся приблизительно одинаковыми. Однако положительный температурный коэффициент имеет важное достоинство: появляется возможность параллельного включения любого количества кристаллов без дополнительных мер по выравниванию токов. С учетом малых по сравнению с кремниевыми диодами размеров кристаллов SiC-диодов, возможно изготовление мощных высоковольтных сборок в малогабаритных корпусах.

В отличие от pn-диодов, выключение pin-диодов Шоттки не сопровождается процессом рассасывания заряда в n-области и ток обратного восстановления отсутствует. Существует лишь незначительный ток заряда емкости перехода. Поэтому по аналогии с зарядом обратного восстановления Q_{rr} pn-диодов вводят понятие емкостного заряда Q_c pin-диодов Шоттки. На рис. 5 показаны зависимости



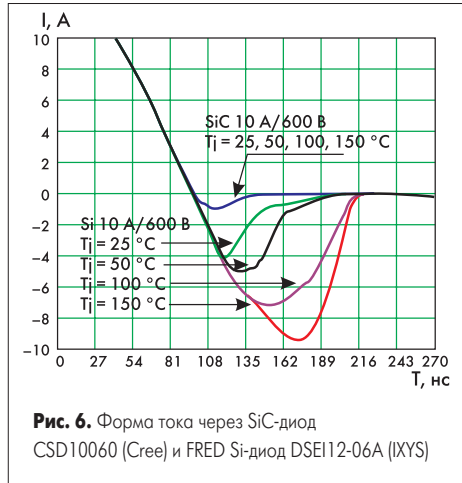


Рис. 6. Форма тока через SiC-диод CSD10060 (Cree) и FRED Si-диод DSEI12-06A (IXYS)

зарядов Q_{rr} и Q_c от скорости спада тока через диод.

Можно видеть, что величина емкостного заряда практически не зависит от di/dt , в то время как заряд обратного восстановления увеличивается, и соответственно растут потери на высоких частотах.

На рис. 6 показаны осциллограммы токов, протекающих через SiC и Si-диоды при их выключении.

Ток через SiC-диод Шоттки имеет характер слабого переходного процесса, амплитуда которого не зависит от температуры, в то время как у ультрабыстрого pn-диода наблюдается ярко выраженный эффект обратного восстановления, причем амплитуда тока и временной интервал его протекания имеют существенную температурную зависимость.

В настоящее время одним из лидеров в производстве кристаллов карбида кремния для компонентов силовой электроники является компания Cree Inc. Номенклатура высоковольтных (600–1200 В) диодов Шоттки ZERO RECOVERY производства Cree Inc. приведена в таблице 3.

Необходимо отметить, что в отличие от Si-диодов, у SiC-диодов Шоттки величина $U_{обр.макс}$ не является напряжением пробоя перехода, иногда ее называют «блокирующим напряжением». При этом значении обычно нормируется обратный ток утечки $I_{обр}$. Зависимость $I_{обр}$ от $U_{обр}$ для диода CSD20120D показана на рис. 7.

При этом хорошо видно, что при напряжении 1500 В и $T_j=175$ °C ток утечки возрастает с 20 до 80 мкА. Это обеспечивает высокую перегрузочную способность SiC-диодов по обратному напряжению.

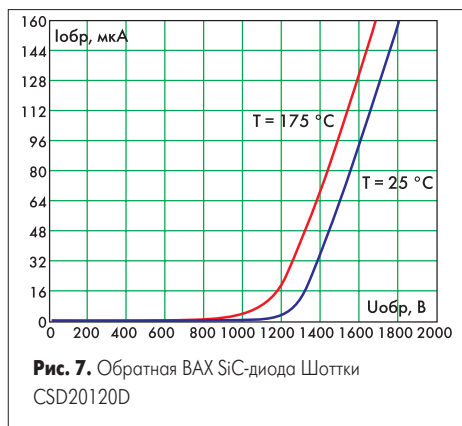


Рис. 7. Обратная ВАХ SiC-диода Шоттки CSD20120D

Таблица 3. Высоковольтные SiC-диоды от Cree Inc. ZERO RECOVERY

Наименование	CSD04060A CSD04060D CSD04060E	CSD06060A CSD06060D CSD06060G	CSD10060A CSD10060D CSD10060E	CSD20060D	CSD05120A	CSD10120A CSD10120D	CSD20120D
$U_{обр.макс}$, В	600	600	600	600	1200	1200	1200
$I_{постр}$, А	4	6	10	20	5	10	20
$U_{пр}$, В	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
$C_{обр}$, пФ	20	30	50	50	33	33	59
Типы корпусов	TO220-2 TO220-3 DPAK	D ² PAK TO220-2 TO220-3	D ² PAK TO220-2 TO220-3	TO247-3	TO220-2	TO220-2 TO247-3	TO247-3

Ключевые SiC MOSFET

В настоящее время силовые ключевые приборы имеют фундаментальное ограничение на рабочее напряжение, обусловленное низкой пробивной напряженностью электрического поля полупроводникового кремния. По сравнению с Si, у карбида кремния более чем в 10 раз выше пробивная напряженность поля и в 400 раз ниже удельное сопротивление в открытом состоянии, что делает его «идеальным» материалом для силовых полупроводников. Хотя на сегодняшний день пока нет коммерчески доступных ключевых SiC-транзисторов, ряд компаний и научных центров разрабатывает и демонстрирует образцы таких приборов. По разным оценкам, появление первых серийных транзисторов можно ожидать уже в ближайшие 1–3 года.

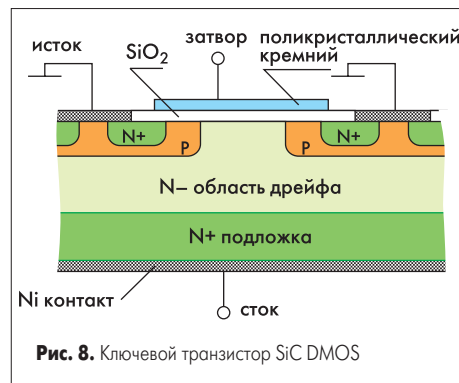


Рис. 8. Ключевой транзистор SiC DMOS

Структурно можно выделить несколько типов MOSFET — это DMOS, UMOS и JFET. DMOS — Double-implanted MOS (рис. 8) — аналогичен кремниевому double-Diffused MOS, у которого области P базы и N+ истока получают путем ионной имплантации.

В этих приборах положительное смещение на затворе из поликристаллического кремния создает инверсный слой на границе раздела между SiO₂ и SiC P-типа. Электроны протекают из N+ истока через инверсный слой в N- область дрейфа и затем в N+ подложку (сток). Толстая примесная N- область

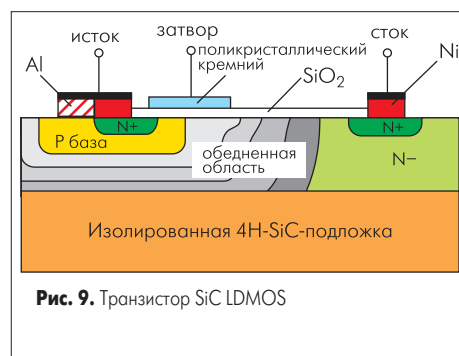


Рис. 9. Транзистор SiC LDMOS

необходима для обеспечения высокой электропрочности прибора в закрытом состоянии. Максимальное рабочее напряжение транзистора будет определяться толщиной области дрейфа и концентрацией примеси в ней. Поскольку максимальная толщина эпитаксиального слоя коммерчески доступных SiC-подложек не превышает 10 мкм, напряжение ограничивается величиной 1600 В. Один из путей его повышения — использование горизонтальной структуры или LDMOS (Lateral DMOSFET, рис. 9).

В структуре создается обедненная область, которая в закрытом состоянии транзистора при увеличении потенциала также увеличивается и, достигнув изолированной подложки, продолжает распространяться в сторону стока, блокируя приложенное между стоком и истоком напряжение. В этом транзисторе максимальное напряжение не зависит от толщины эпитаксиального слоя и ограничивается только уровнем начала поверхностного электрического пробоя между электродами. В образцах LDMOSFET (Cree Inc.) достигнут уровень максимального напряжения 10 кВ.

Для снижения удельного сопротивления в открытом состоянии у транзисторов UMOS затвор выполняется в форме U-образной «канавки» («trench-gate», рис. 10).

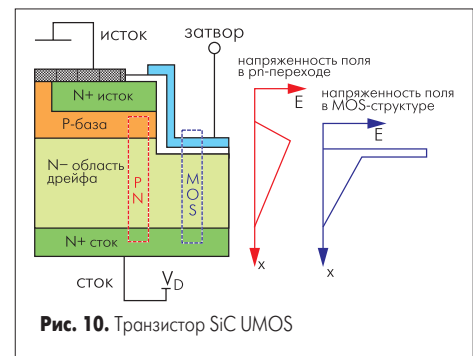


Рис. 10. Транзистор SiC UMOS

На рисунке показаны диаграммы распределения электрического поля в pn-переходе и на MOS-структуре. Можно видеть, что в области оксидной изоляции затвора наблюдается скачок потенциала, превышающий пиковую напряженность поля в полупроводнике в 2,5 раза. Это приводит к необратимым пробоям в транзисторе и накладывает основное ограничение на величину рабочего напряжения. Решение этой проблемы предложено исследовательским центром Purdue University WBG Research Group [9]. Была создана структура с так называемой «интегральной защитой», которая ограничила напряженность поля в оксидном слое затвора и одновременно снизила удельное сопротивление в открытом состоянии (рис. 11).

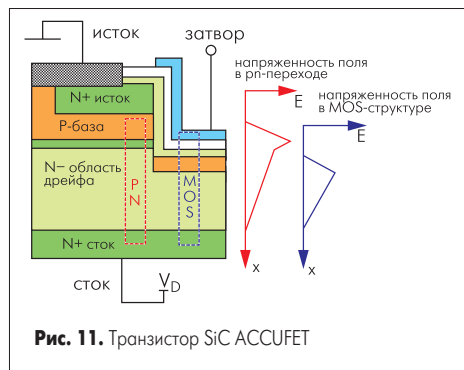


Рис. 11. Транзистор SiC ACCUFET

В прибор введена дополнительная область P-типа, расположенная под «канавкой» затвора, позволяющая снизить напряженность поля на границе раздела «оксид — полупроводник» до нуля, защищая тем самым оксид от пробоя в закрытом состоянии. Дополнительный эпитаксиальный слой под P-базой предотвращает отсечку канала проводимости в открытом состоянии и способствует протеканию тока в область дрейфа. Прибор также содержит обогащенный N- эпитаксиальный слой, выращенный на боковой стенке «канавки». Этот слой превращает прибор в так называемый «MOSFET с обогащенным слоем» — accumulation-layer MOSFET или ACCUFET, у которого увеличена подвижность электронов и одновременно снижено удельное сопротивление в открытом состоянии. Полученные образцы ACCUFET обеспечивают максимальное напряжение 1400 В, удельное сопротивление 15,7 мОм·см² и добротность 125 МВт/см², что в 25 раз превышает теоретический предел для кремниевых MOSFET.

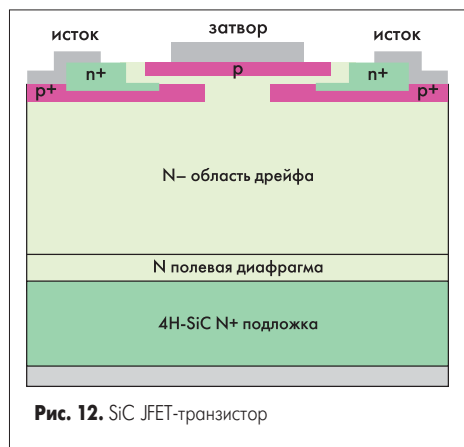


Рис. 12. SiC JFET-транзистор

Рассмотренные приборы имеют высокую, но пока недостаточную степень готовности для начала серийного производства. В отличие от MOSFET, полевые транзисторы с управляющим рп-переходом и каналом р-типа (JFET-транзисторы, рис. 12) отработаны до уровня начала серийного производства, и появление их на рынке силовых полупроводников можно ожидать в ближайшее время.

Транзисторы обеспечивают сверхвысокое быстродействие (более 100 кВ/мкс), удельное сопротивление в открытом состоянии 5–60 мОм·см², максимальное рабочее напряжение до 14 кВ (доступны для серийного производства приборы с U_{си макс} ≤ 4 кВ), плотность тока до 1000 А/см². Недостатком JFET является то, что при пулевом напряжении на затворе транзистор полностью открыт. Свободна от этого недостатка каскадная схема, состоящая из высоковольтного SiC JFET и низковольтного Si MOSFET. Такой гибридный прибор управляется как обычный MOSFET, при этом обеспечивает значительно более низкое сопротивление в открытом состоянии и высокое рабочее напряжение. На рис. 13 показана схема каскода и фотографии опытных образцов, разработанных исследовательским центром SiCED (Siemens AG) и скорпсированных фирмами IXYS и SEMIKRON на базе кристаллов, произведенных компанией Infineon.

На рис. 14 показан сравнительный график зависимости плотности тока и прямого падения напряжения от удельного сопротивления в открытом состоянии для транзисторов на основе SiC и Si.

Можно видеть, что SiC JFET с напряжением 3,3 кВ имеет потери проводимости ниже, чем Si CoolMOS с напряжением 600 В.

Для построения высоковольтных ключей можно использовать схему «суперкаскада» — линейку из последовательно включенных транзисторов SiC JFET и управляющего низковольтного Si MOSFET, как показано на рис. 15.

В открытом состоянии на затвор VT5 подается положительное напряжение, превышающее пороговый уровень. При этом SiC JFET находится в нормально открытом состоянии и эквивалентны резисторам, включенным последовательно с Si MOSFET. При подаче на затвор нулевого напряжения VT5 закрывается и напряжение на затворе

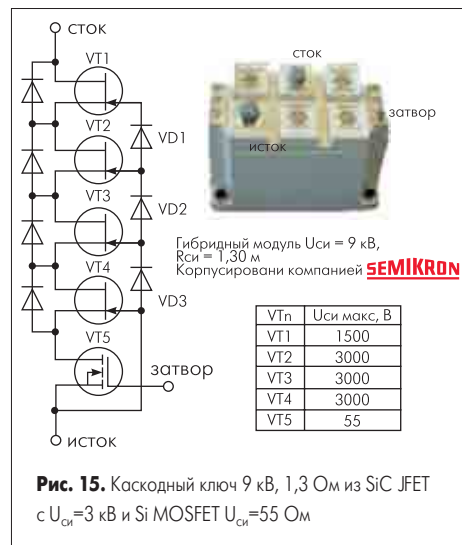


Рис. 15. Каскодный ключ 9 кВ, 1,3 Ом из SiC JFET с U_{си} = 3 кВ и Si MOSFET U_{си} = 55 Ом

VT4 (отрицательное относительно его стока) начинает увеличиваться. Когда оно достигает величины напряжения отсечки, VT4 закрывается и далее происходит лавинный процесс запираения остальных JFET-ключей. На рис. 16 и 17 показаны осциллограммы напряжения и тока при открывании и закрывании ключа при работе на индуктивную нагрузку.

Скорость переключения такого каскода превышает 80 кВ/мкс. Можно вычислить динамические потери при жестком переключении, приняв время нарастания и спада тока приблизительно равными:

$$P_{sw} = \frac{U_{ds}^2 \times i_{ds} \times f_{sw}}{V} \quad (1)$$

При $i_{ds} = 8 \text{ А}$, $U_{ds} = 8 \text{ кВ}$, $V = 80 \text{ кВ/мкс}$,

$$P_{sw} = 6,4 \times 10^{-3} \times f_{sw} \quad (2)$$

мощность — в ваттах, частота — в герцах. Полученная величина практически совпадает со значением, полученным для ключа из 10 последовательно соединенных Si MOSFET с U_{си} = 1000 В, при этом у последнего сопротивление в открытом состоянии будет более чем в 30 раз выше, а управление затворами потребует сложной высокопотенциальной схемы с гальванической развязкой каждого из 10 каналов.

В таблице 4 приведены характеристики SiC-приборов, достигнутые на начало 2004 года [10].

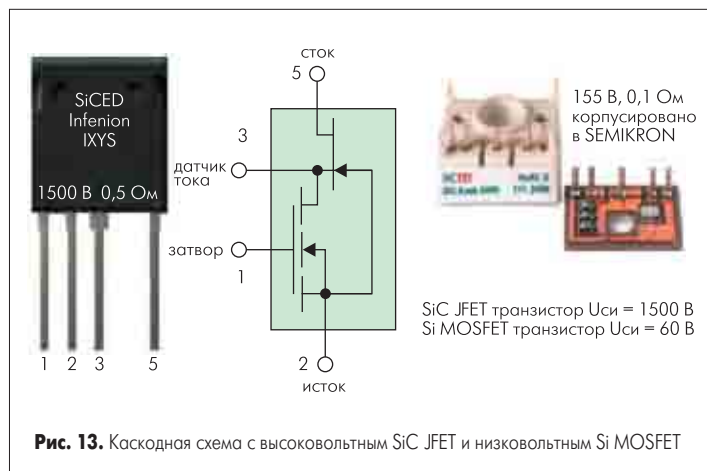


Рис. 13. Каскодная схема с высоковольтным SiC JFET и низковольтным Si MOSFET

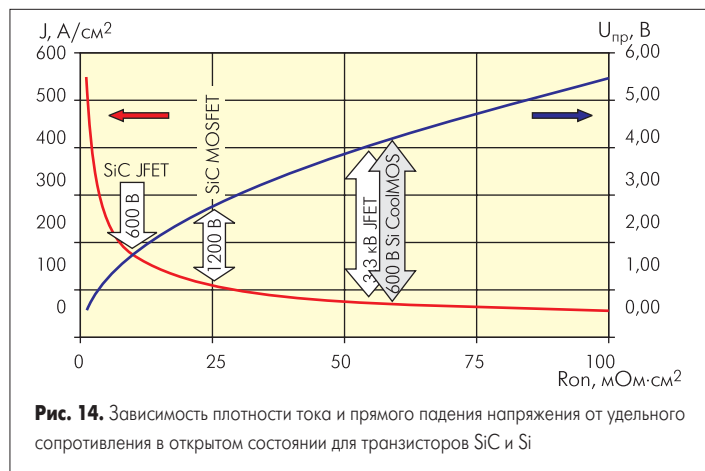


Рис. 14. Зависимость плотности тока и прямого падения напряжения от удельного сопротивления в открытом состоянии для транзисторов SiC и Si

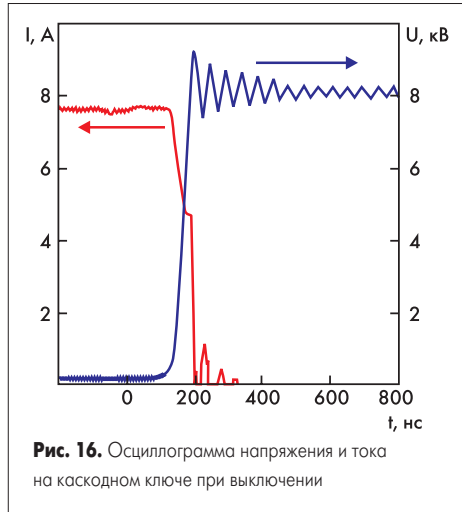


Рис. 16. Осциллограмма напряжения и тока на касковом ключе при выключении

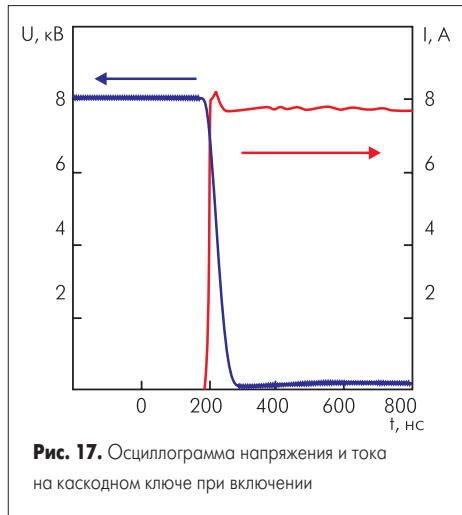


Рис. 17. Осциллограмма напряжения и тока на касковом ключе при включении

Приборы из карбида кремния для жестких условий эксплуатации

Как уже отмечалось выше, высокая рабочая температура и радиационная стойкость делают карбид кремния практически незаменимым материалом для разработки полупроводниковых приборов, работающих в жестких условиях эксплуатации, в частности для военного и космического применения.

Одно из наиболее важных направлений — создание высокотемпературных полупроводниковых приборов. Так, объем рынка высокотемпературной электроники в 2003 году составил \$400 млн и по прогнозам увеличится до \$900 млн к 2008. Это заставляет разработчиков полупроводниковых приборов интенсивно вести исследования в области SiC-технологий.

Для максимального использования температурных характеристик SiC прежде всего требуется решить проблему получения надежного электрического контакта. Связано это с тем, что при температуре свыше 500 °C металлизация контакта сильно деградирует из-за взаимной диффузии между слоями, окисления контакта и композиционных и микроструктурных изменений на границе раздела «металл — полупроводник». Это приводит к выходу прибора из строя. Вакуумирование полупроводника в специальном корпусе многократно увеличивает его стоимость, габариты и массу, делая непригодным к широкому применению.

Таблица 4. Характеристики SiC-приборов на начало 2004 года

Изделие	Блокирующее напряжение U_b , кВ	Удельное сопротивление в открытом состоянии $R_{он}$, мОм·см ² ($U_{пр}$, В)	Добротность, $U_b^2/S_w R_{он}$, МВт/см ²	Разработчик
4H-Диод Шоттки	4,9	43	558	Purdue Univ.
4H-Диод Шоттки	10,8	97	1202	Rutgers Univ.
4H-Диод Шоттки	10,0	3,7 В@100 А/см ²	—	Cree Inc.
4H-Диод Шоттки	19,2	7,5 В@100 А/см ²	—	Kansai EP/Cree
4H-UMOSFET	3,06	121	77	Purdue Univ.
4H-UMOSFET	5,05	105	243	Purdue Univ.
4H-DMOSFET	7,0	189	259	Cree Inc.
4H-DMOSFET	10,0	123	813	Cree Inc.
4H-JFET	5,5	218	139	Kansai EP/Cree
4H-TI-JFET	11,0	168	720	Rutgers Univ.
4H-JFET	3,5	25	490	SiCED
4H-биполярный транзистор	9,28	49	1759	Rutgers Univ.
4H-тиристор	3,1	4,79В@12А	62кВт	Cree Inc.



Рис. 18. Изменение удельного сопротивления контакта SiC эпитаксиального слоя во времени при температуре 500 °C

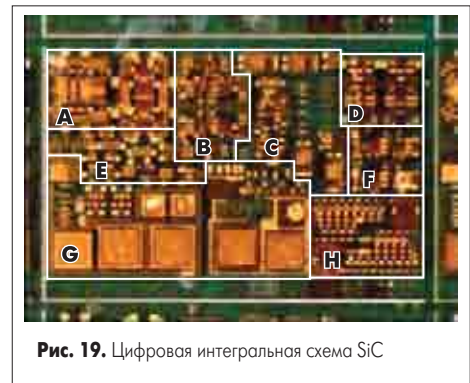


Рис. 19. Цифровая интегральная схема SiC

вый технологический процесс, позволивший решить указанную проблему и получить образцы со стандартными уровнями напряжения питания и сигналов [12]. На рис. 19 показан фрагмент цифровой интегральной схемы SiC, работающей в температурном диапазоне от -55 до +300 °C.

Она содержит различные логические схемы, такие, как дифференциальные усилители (A), сумматор по модулю 2 (B), инверторы (C), триггеры (D), И-НЕ, ИЛИ-НЕ (E), включающее ИЛИ (F), MOS-конденсаторы, диоды, MOSFET (G), автогенераторы (H). Микросхема имеет напряжение питания в диапазоне 5–15 В.

Исследовательский центр NASA Glenn Research Center продемонстрировал логический элемент ИЛИ-НЕ, состоящий из двух JFET-транзисторов и резистора, работающий при температуре 600 °C [13]. Основная область применения подобных приборов — авиационная техника, в частности электроника для турбогенераторов.

В заключение хотелось бы отметить, что несмотря на традиционную ориентацию российской электронной промышленности на рынок компонентов для промышленного и военного применения, появление отечественных технологий в области SiC-полупроводников скорее всего не предвидится из-за нехватки финансирования отрасли. В то же время в петербургском физико-техническом институте им. Иоффе уже несколько лет над технологией карбида кремния успешно работает команда русских ученых, однако результаты исследований, согласно контракту, принадлежат исключительно компании Cree Research.

Одним из решений указанной проблемы служит использование многослойной металлизации, предложенной исследовательским центром NASA Glenn Research Center [11]. Применение трехслойной металлизации Ti (100 нм)/TaSi₂ (200 нм)/Pt (300 нм) поли-типа 6H-SiC позволило добиться температурной стабильности ВАХ и омического сопротивления контакта на воздухе в течение более 600 часов при 500 °C (рис. 18).

Особенностью такого контакта является то, что первоначальное окисление кремния создает механизм образования критического диффузионного барьера, предотвращающего дальнейшее проникновение кислорода в слой металлизации. Это открывает перспективы создания высокотемпературных полупроводниковых приборов в более экономичных корпусах либо в бескорпусном исполнении.

Другим важным направлением является создание интегральных схем на SiC. Наибольший интерес представляет технология SiC CMOS, обеспечивающая низкую потребляемую мощность, высокую радиационную и тепловую стойкость.

Первая интегральная схема SiC CMOS была представлена компанией Cree Research в 1996 году, однако проблемы, связанные с высоким пороговым напряжением транзисторов P-MOSFET, не позволили использовать данную технологию для серийного производства. В настоящее время разработан но-

Литература

1. Dietrich Stephani. The Industrial Utilization of SiC Power Devices — Aspects and Prospects. SiCED Electronics Development GmbH & Co. Germany
2. www.cree.com
3. www.infineon.com
4. www.advancedpower.com
5. www.ixys.com
6. А. Полищук. Проблемы выбора ключевых транзисторов для преобразователей с жестким переключением // Компоненты и технологии: Силовая электроника. № 2'2004.
7. P. G. Neudeck. Progress Towards High Temperature, High Power SiC Devices // in Institute of Physics Conference Series. No. 141. Compound Semiconductors 1994. Bristol, UK: IOP Publishing, 1995.
8. H. M. McGlothlin, D. T. Morissette, J. A. Cooper. 4kV Silicon Carbide Schottky Diodes for High-Frequency Switching Applications / IEEE Device Research Conf. Santa Barbara, USA. June 1999.
9. J. Tan, J. A. Cooper, Jr., M. R. Melloch. High-Voltage Accumulation-Layer UMOSFETs in 4H-SiC / IEEE Electron Device Lett. 19, 487, 1998.
10. Best Reported WBG Power Device Performance / Purdue University WBG Research Group. June 2004.
11. R. S. Okojie. Thermally Stable Ohmic Contacts on Silicon Carbide developed for High-Temperature Sensors and Electronics / NASA Glenn Research Center.
12. S. Ryu, K. T. Kornegay, J. A. Cooper, Jr., M. R. Melloch. Digital CMOS ICs in 6H-SiC Operation on 5V Power Supply / IEEE Trans. on Electron Device. 1998.
13. P. G. Neudeck. Silicon Carbide Junction Field Effect Transistor Digital Logic Gates Demonstrated at 600 °C / NASA Glenn Research Center.