

Полупроводниковые материалы и приборы для жёстких условий эксплуатации

Александр Полищук (Москва)

Электронные приборы на основе карбида кремния и эпитаксиальных слоев кремния на изолирующих подложках обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными кремниевыми приборами. В статье рассмотрены результаты воздействия жёстких условий эксплуатации на параметры вышеуказанных приборов и обсуждены перспективы их применения в военной и аэрокосмической технике.

ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия достижения в области новых полупроводниковых материалов и приборов на их основе для жёстких условий эксплуатации претерпевают бурный рост. Под жёсткими условиями эксплуатации обычно подразумевают экстремальные режимы работы, например, температуру ниже -60°C и выше 200°C , а также воздействие жёсткого радиоактивного излучения. Среди областей применения, где требуются подобные приборы, особо можно выделить следующие:

- электроника военного назначения,
- аэрокосмическая электроника,
- авиационная электроника,
- аппаратура для нефтедобычи,
- автомобильная электроника,
- электроэнергетика.

В настоящее время наиболее перспективными полупроводниковыми материалами для рассматриваемого класса приборов являются кремний

на изоляторе (Silicon on Insulator, SOI) и карбид кремния (SiC). Технологии SOI активно развивает компания Honeywell. По производству пластин SiC фактическим монополистом на мировом рынке является компания Cree. Достоинством обоих материалов является устойчивость к высокой температуре и радиационная стойкость. В случае использования кремния на изоляторе высокая устойчивость SOI-приборов достигается технологическим путём. Карбид кремния представляет собой высокотемпературный радиационно-стойкий полупроводник, поэтому SiC-приборы потенциально способны обеспечить характеристики, недостижимые для других материалов.

КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ (SOI)

Технология SOI разрабатывалась специально для получения приборов высокотемпературной электроники

и приложений, требующих устойчивости к воздействию жёсткого радиоактивного излучения. Для понимания принципиальных отличий этой технологии рассмотрим основные проблемы, возникающие в традиционных кремниевых интегральных схемах при воздействии высокой температуры.

Как известно, большинство современных интегральных микросхем построено по монокристаллической технологии кремниевых FET-транзисторов. Однако, традиционные кремниевые полупроводниковые технологии очень критичны к высоким рабочим температурам. При повышении температуры CMOS-структуры возникают три существенные проблемы:

- рост тока утечки CMOS-структуры за счёт наличия в ней биполярных транзисторов (рис. 1);
- возникновение утечки через оксидную изоляцию затвора с возможностью её разрушения;
- возникновение диффузии металлов из мест распайки выводов кристалла и металлизированных участков поверхности в полупроводник.

Ток утечки CMOS-структуры растёт с ростом температуры. При этом в цифровой схеме будут наблюдаться снижение напряжения логической единицы, увеличение уровня логического нуля, снижение гистерезиса, увеличение задержки между логическими элементами и спад скорости нарастания сигналов, что в конечном счёте приведёт к потере работоспособности логической схемы.

В аналоговых схемах рост тока утечки приводит к смещению всех основных её параметров, таких как входной ток смещения, напряжение нуля, усиления, полосы пропускания и уровня шумов.

Жизненный цикл CMOS-компонентов также уменьшается с ростом тока утечки биполярных транзисторов. Рост тока утечки при увеличении

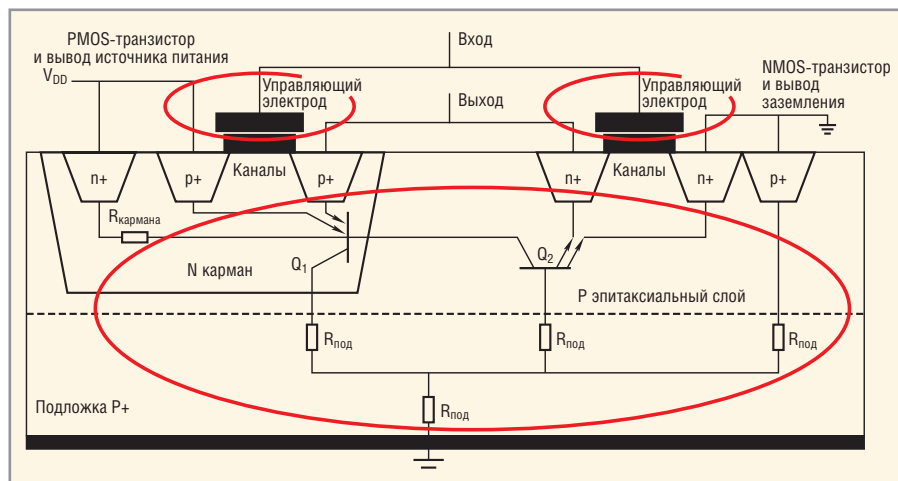


Рис. 1. Фрагмент схемы CMOS-инвертора

температуры приведёт к одновременному открыванию обоих транзисторов – PMOS и NMOS (рис. 1) и выходу из строя окончательного каскада.

Выход из строя кремниевых CMOS-компонентов при высоких температурах может быть обусловлен пробоем оксидной изоляции затворов из-за увеличения тока утечки через неё. Это особенно актуально для микросхем памяти, в которых с ростом температуры наблюдается потеря информации за счёт утечки через изоляцию затворов, а при длительном воздействии высокой температуры наступает необратимый пробой. Эту проблему можно частично решить путём увеличения толщины оксидной изоляции, однако полностью устранить этот эффект не удаётся.

Существует также немаловажная проблема, связанная с диффузией из областей металлизации кремниевых полупроводниковых приборов. Обычно используется стандартный технологический процесс металлизации алюминием. С ростом температуры происходит миграция алюминия в полупроводник, что со временем приводит к короткому замыканию каналов MOS-транзисторов.

Технология SOI во многом решает указанные проблемы при высоких температурах. Суть технологии заключается в дополнительной имплантации кислорода в кремниевую подложку с образованием внутри полупроводника диэлектрического слоя оксида кремния (рис. 2).

Эффект влияния внутреннего оксидного слоя на составляющие тока утечки иллюстрирует рис. 3. В рассматриваемом случае эта технология позволяет устранить большинство источников возникновения утечек в полупроводниковой структуре по сравнению с традиционной CMOS-технологией на кремнии.

В настоящее время лидером в индустрии полупроводниковых приборов по технологии SOI является компания Honeywell. Она производит широкую номенклатуру высокотемпературных полупроводниковых приборов, в том числе микросхемы памяти, микроконтроллеры, датчики, операционные усилители и др.

При использовании металлизации алюминием с барьерным подслоем из сплава титана и вольфрама Honeywell добилась жизненного цикла SOI-приборов 45 000 часов при

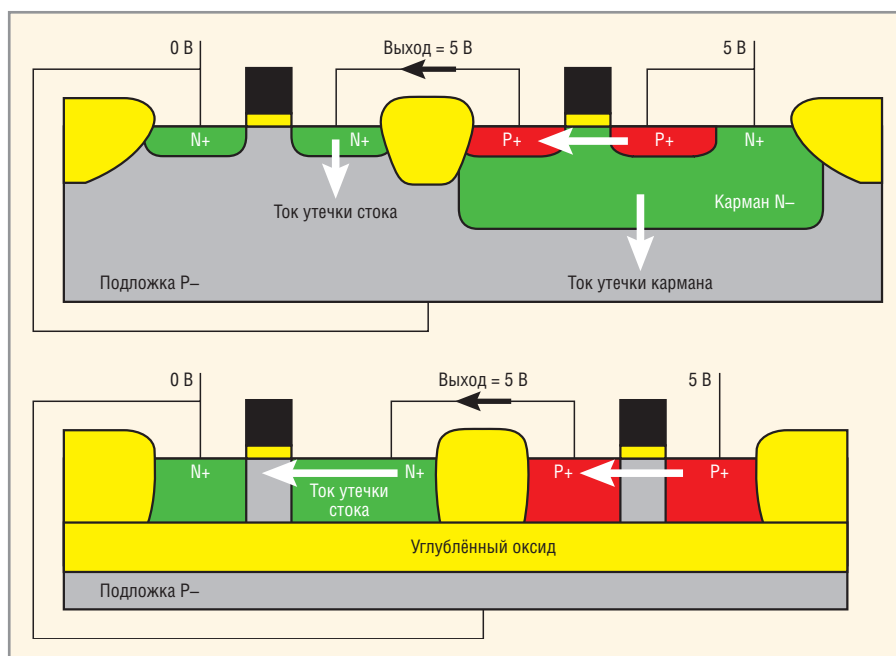


Рис. 2. Сравнение технологий: CMOS (вверху), SOI (внизу)

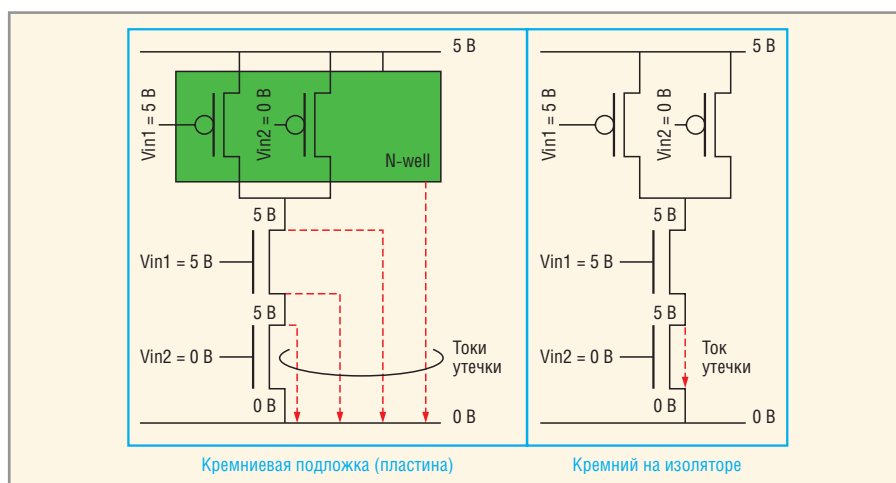


Рис. 3. Влияние внутреннего оксидного слоя на составляющие тока утечки

температуре 225°C и 130 000 часов при температуре 180°C. К недостаткам этой технологии можно отнести рост сопротивления контакта на 10% по сравнению с традиционной металлизацией.

Что касается радиационной стойкости изделий на базе SOI, то в настоящее время достигнут показатель в 1000 крад поглощенной дозы.

КАРБИД КРЕМНИЯ (SiC)

Всего лишь около 10 лет назад карбид кремния стал рассматриваться в качестве доступного материала для полупроводниковых приборов, что стало возможным благодаря развитию технологии выращивания кристаллов требуемого размера в необходимых количествах. На сегодняшний день только одна компания в мире

производит SiC-пластины больших размеров (100 мм) в массовых количествах – это компания Cree. Причём более 95% всех пластин идет на GaN-эпитаксию для производства кристаллов синих и зеленых светодиодов, и лишь небольшая часть используется для производства высокотемпературной и радиационно-стойкой элементной базы. Что касается коммерчески доступных SiC-приборов, то их номенклатура в настоящее время ограничивается высоковольтными диодами Шоттки (до 1200 В) и мощными СВЧ MESFET-транзисторами (до 3,8 ГГц).

Карбид кремния – уникальный полупроводник, позволяющий создавать приборы с характеристиками, недостижимыми для других типов полупроводников, поэтому остановимся подробнее на его основных свойствах.

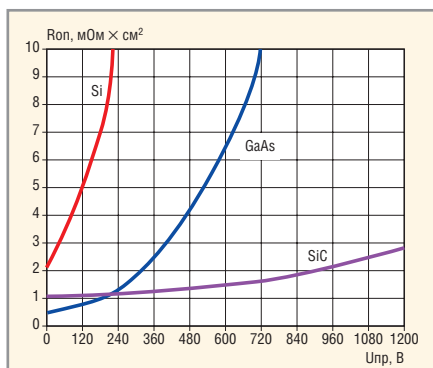


Рис. 4. Зависимость $R_{он}$ от пробивного напряжения

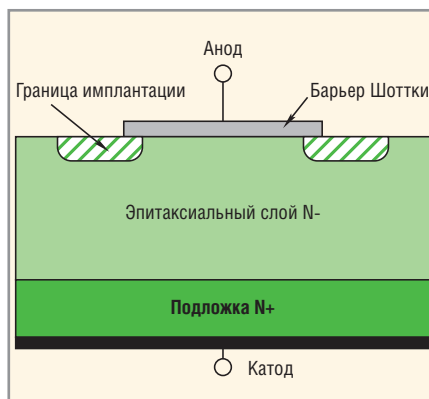


Рис. 5. SiC-диод Шоттки

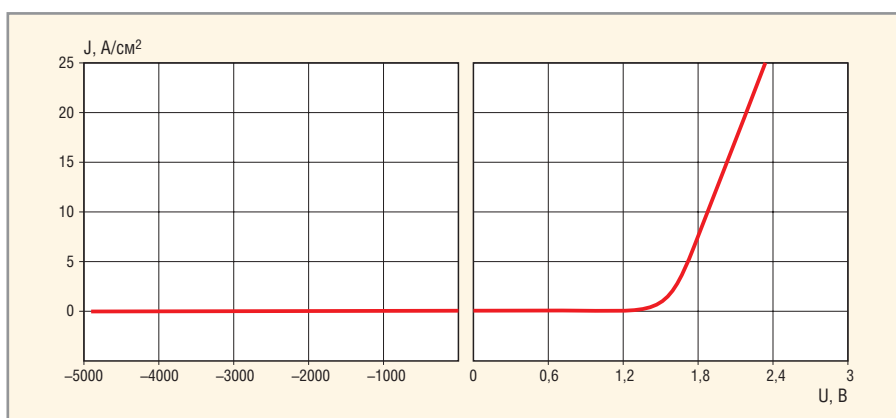


Рис. 6. Прямая и обратная ветви ВАХ SiC-диода Шоттки с $U_{обр. макс} = 4,9$ кВ

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ SiC

Хотя существует около 170 известных политипов карбида кремния, только два из них широко используются для изготовления полупроводниковых приборов – это 4H-SiC и 6H-SiC. Для силовых полупроводников предпочтительнее политип 4H-SiC благодаря большей подвижности электронов. В таблице приводится сравнение основных электронных свойств 4H-SiC с кремниевыми (Si) и арсенидгалиевыми (GaAs) полупроводниковыми материалами [1].

Рассмотрим ключевые преимущества SiC-полупроводника в сравнении с Si и GaAs.

Пробивная напряжённость электрического поля 4H-SiC более чем на поряд-

док превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии ($R_{он}$). На рис. 4 показана зависимость $R_{он}$ от напряжения пробоя кристалла p-i-n-диода. Можно видеть, что при напряжении 600 В SiC-диод имеет $R_{он} \approx 1,4$ мОм см², GaAs-диод – $R_{он} \approx 6,5$ мОм см², Si-диод – $R_{он} > 70$ мОм см².

Малое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.

Большая ширина запрещённой энергетической зоны SiC является результатом более высокого по сравнению с Si и GaAs барьера Шоттки. В ре-

зультате чрезвычайно малый ток утечки при повышенной температуре кристалла (менее 70 мкА при 200°C) 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 надёжность изделий.

Карбид кремния чрезвычайно устойчив к жёсткой радиации, поэтому её воздействие не приводит к деградации электронных свойств кристалла. Высокая рабочая температура кристалла (более 600°C) позволяет создавать высоконадёжные приборы для жёстких условий эксплуатации и специальных применений.

Диоды Шоттки – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Как отмечалось выше, в настоящее время единственным коммерчески доступным продуктом из карбида кремния являются диоды Шоттки. Структура SiC-диода показана на рис. 5.

Для производства диодов используется 4H-SiC-политип 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°C в течение 90 мин. Высота барьера Шоттки при металлизации Ti и Ni составляет 0,8 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 перспективна металлизация никелем, для низковольтных – титаном. На рис. 6 показаны прямая и обратная вольт-амперные характеристики для диода, имеющего металлизированный Ni-барьер Шоттки и эпитаксиальный слой толщиной 50 мкм [2].

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

Сравнение основных электронных свойств полупроводниковых материалов

Наименование	Si	GaAs	4H-SiC
Ширина запрещённой энергетической зоны, эВ	1,12	1,5	3,26
Подвижность электронов, см²/с В	1400	9200	800
Подвижность дырок, см²/с В	450	400	140
Концентрация собственных носителей при 300°K, см⁻³	$1,5 \times 10^{10}$	$2,1 \times 10^6$	5×10^{-9}
Скорость объёмного заряда электронов, см/с × 10⁷	1	1	2
Критическая напряжённость электрического поля, МВ/см	0,25	0,3	2,2
Теплопроводность, Вт/см °K	1,5	0,5	3,0...3,8

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.

КЛЮЧЕВЫЕ MOSFET-ТРАНЗИСТОРЫ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В настоящее время силовые ключевые приборы имеют фундаментальное ограничение на рабочее напряжение, обусловленное низкой пробивной напряжённостью электрического поля полупроводникового кремния. По сравнению с Si, у карбида кремния пробивная напряжённость поля выше более чем в 10 раз, а удельное сопротивление в открытом состоянии ниже в 400 раз. Эти два качества делают карбид кремния идеальным материалом для силовых полупроводников. Хотя на сегодняшний день нет коммерчески доступных ключевых SiC-транзисторов, ряд компаний и научных центров разрабатывают и демонстрируют экспериментальные и лабораторные образцы таких приборов. По разным оценкам, появление первых серийных SiC-транзисторов можно ожидать уже в начале 2007 г.

Структурно можно выделить несколько типов MOSFET – это DMOS-, UMOS- и JFET-приборы. DMOS-прибор (Double-implanted MOS) показан на рис. 7. Он аналогичен структуре на Si Double-Diffused MOS, у которой области р-базы и п⁺-истока получают путем ионной имплантации.

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

ки доступных SiC-подложек не превышает 10 мкм, напряжение ограничивается величиной 1600 В. Один из путей его повышения – использование горизонтальной структуры LDMOS (Lateral Double MOSFET), показанной на рис. 8.

В структуре создается обеднённая 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) достигнут уровень максимального напряжения 10 кВ.

Для снижения удельного сопротивления в открытом состоянии у UMOS-транзисторов затвор выполняется в форме U-образной «канавки» (trenchgate). На рис. 9 показаны диаграммы распределения электрического поля в р-п-переходе и на MOS-структуре. Можно видеть, что в области оксидной изоляции затвора наблюдается скачок потенциала, превышающий пиковую напряжённость 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 [3]. Была создана структура с так называемой «интегральной защитой», которая ограничила напряжённость поля в оксидном слое затвора и одновременно снизила удельное сопротивление в открытом состоянии (рис. 10).

В прибор введена дополнительная область р-типа, расположенная под «канавкой» затвора, позволяющая снизить напряжённость поля на границе оксид/полупроводник до нуля, защищая тем самым оксид от пробоя в закрытом состоянии. Дополнительный эпитаксиальный слой под р-базой предотвращает отсечку канала проводимости в открытом состоянии и способствует протеканию тока в область дрейфа. Прибор также включает в себя обогащённый n-эпитаксиальный слой, выращенный на боковой стенке «канавки». Этот слой пре-

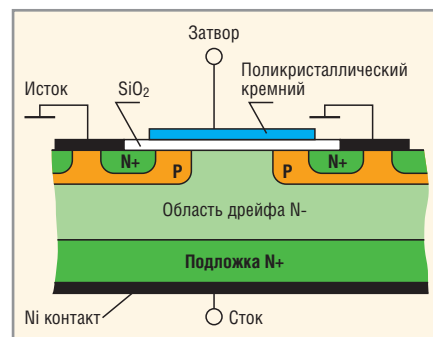


Рис. 7. SiC DMOS-транзистор

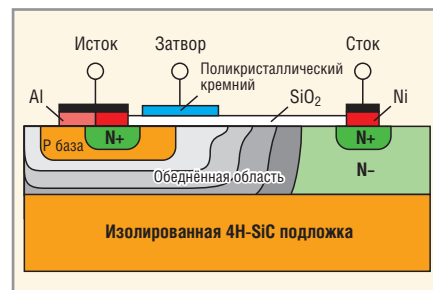


Рис. 8. SiC LDMOS-транзистор

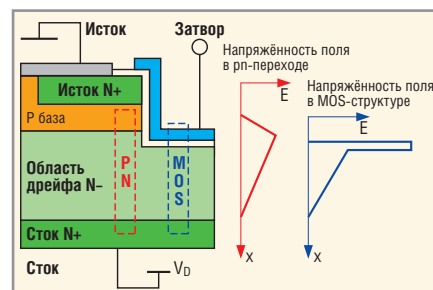


Рис. 9. SiC UMOS-транзистор

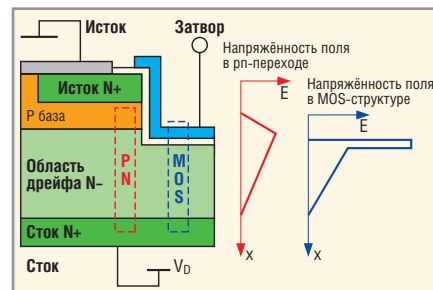


Рис. 10. SiC ACCUFET-транзистор

вращает прибор в так называемый «MOSFET с обогащённым 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-транзисторов.

Рассмотренные приборы имеют высокую (но пока недостаточную) степень готовности к началу серий-

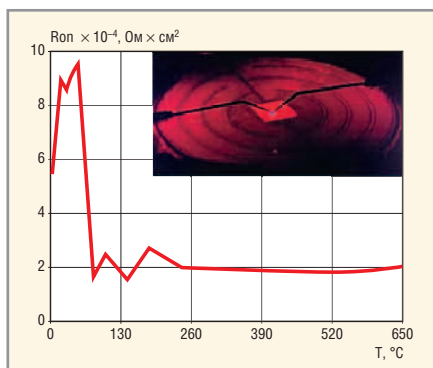


Рис. 11. Изменение удельного сопротивления контакта SiC эпитаксиального слоя во времени при температуре 500°C

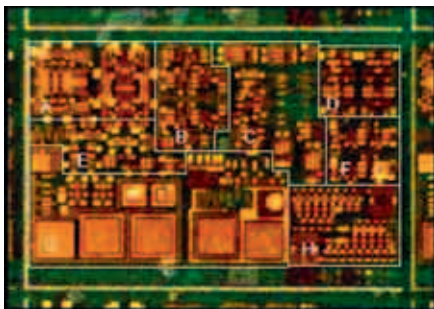


Рис. 12. Цифровая SiC интегральная схема

ного производства. Компания Cree анонсировала коммерческую доступность первых MOSFET-транзисторов из карбида кремния в 2007 г.

ПРИБОРЫ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ЖЁСТКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

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

Одним из решений указанной проблемы служит использование многослойной металлизации, предложенной исследовательским центром NASA Glenn Research Center [4]. Применение трёхслойной металлизации Ti (100 нм) – TaSi₂ (200 нм) – Pt (300 нм) политипа 6H-SiC позволило добиться температурной стабильности вольт-амперной характеристики и омического сопротивления контакта на воздухе в течение более 600 ч при 500°C (рис. 11).

Особенностью такого контакта является то, что первоначальное окисление кремния создаёт 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-пластинах. Наибольший интерес представляет CMOS-технология на карбиде кремния, обеспечивающая низкую потребляемую мощность, высокие радиационную и тепловую стойкость.

Первая SiC CMOS интегральная схема была представлена компанией Cree Research в 1996 г., однако проблемы, связанные с высоким пороговым напряжением P-MOSFET-транзисторов не позволили использовать данную технологию для серийного производства. В настоящее время разработан новый технологический процесс, позволивший решить указанную проблему и получить образцы со стандартными уровнями напряжения питания и сигналов [5]. На рис. 12 показан фрагмент SiC-цифровой интегральной схемы, работающей в температурном диапазоне –55...300°C.

Она содержит различные логические схемы, такие как дифференциальные усилители (А), сумматор по модулю 2 (В), инверторы (С), триггеры (D), И-НЕ, ИЛИ-НЕ (Е), исключающее 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 [6]. Основная область применения подобных приборов – авиационная техника, в частности, электроника для турбогенераторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на традиционную ориентацию отечественной электронной промышленности на рынок компонентов для промышленного и военного применения, появление серийных отечественных технологий в области SiC-полупроводников, скорее всего, в ближайшие годы не предвидится из-за недостаточного финансирования. Однако ряд российских компаний проявляют большой интерес к разработке SiC-приборов. Особо в этой связи хочется отметить совместный проект Томилинского электронного завода (НПП ТЭЗ) и компании ПРОСОФТ, начавших производство высокотемпературных и радиационно-стойких карбид-кремниевых диодов Шоттки и высоковольтных столбов. В частности, проведённые испытания по программе «Климат-7» подтвердили чрезвычайную радиационную стойкость приборов: поглощенная доза 50 000 крад не привела к изменению характеристик приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neudeck P.G. Progress Towards High Temperature, High Power SiC Devices. Inst. of Physics Conf. Ser. No. 141. Compound Semiconductors 1994, H. Goronkin, U. Mishra, Eds. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 1995.
2. McGlothlin H.M., Morissette D.T., Cooper J.A. 4kV Silicon Carbide Schottky Diodes for High-Frequency Switching Applications. IEEE Device Research Conf. Santa Barbara, CA, June 28–30, 1999.
3. Tan J., Cooper J.A., Jr. and Melloch M.R. High-Voltage Accumulation-Layer UMOSFETs in 4H-SiC. IEEE Electron Device Lett., 19, 487, 1998.
4. Robert S. Okojie. Thermally Stable Ohmic Contacts on Silicon Carbide developed for High-Temperature Sensors and Electronics. NASA Glenn Research Center.
5. Ryu S., Kornegay K.T., Cooper J.A., Jr. and Melloch M.R. Digital CMOS ICs in 6H-SiC Operation on 5V Power Supply. IEEE Trans. on Electron Device. 1998.
6. Neudeck P.G. Silicon Carbide Junction Field Effect Transistor Digital Logic Gates Demonstrated at 600°C. NASA Glenn Research Center.



Первые российские карбид-кремниевые диоды и столбы с барьером Шоттки



Совместный проект компаний CREE, ПРОСОФТ, НПП «ТЭЗ»



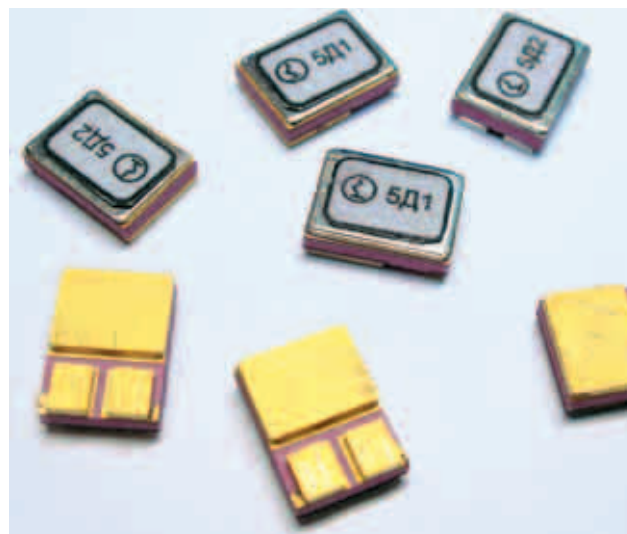
$T_j=175^{\circ}\text{C}$

Высоковольтные столбы

- $U_{обр. макс} = 4 \text{ кВ}; 5 \text{ кВ}; 9 \text{ кВ}$
- $I_{пр.ср.} = 600 \text{ мА}; 500 \text{ мА}; 250 \text{ мА}$
- $t_{обр} < 15 \text{ нс}$

Основные достоинства

- Отсутствие эффекта обратного восстановления
- Высокая рабочая температура перехода
- Допустимая безопасная доза облучения свыше $5 \times 10^7 \text{ рад}$



$T_j=200^{\circ}\text{C}$

Диоды Шоттки

- $U_{обр. макс} = 500 \text{ В}; 600 \text{ В}$
- $I_{пр.ср.} = 1 \text{ А}$
- $t_{обр} < 15 \text{ нс}$

Области применения

- Источники электропитания с преобразованием частоты
- Корректоры коэффициента мощности (бустерный диод)
- Выходные выпрямители (более 48В)
- Антипараллельные диоды в инверторах
- Электроприводы
- Антипараллельные диоды в инверторах
- Снабберные диоды
- Высоковольтные выпрямители
- Выходные выпрямители (2 кВ – 100 кВ)
- ИВЭП радиопередающих устройств РЛС, рентгеновские установки и т.п.