



В. Лучинин, П. Мальцев, Е. Маляков

Карбид кремния

стратегический материал электроники будущего

В современной электронике сформировался ряд направлений, которые оказывают серьезное влияние на обороноспособность и безопасность (включая ядерную и экологическую), повышают конкурентоспособность наукоемких отраслей государств, обладающих такими технологиями. Не случайно эти направления получили название критических. Наряду с бурно развивающейся элементной базой для систем обработки информации, целенаправленными исследованиями в области СВЧ и оптоэлектронных систем к их числу, несомненно, относится так называемая экстремальная электроника, объединяющая приборы, предназначенные для экстремальных условий эксплуатации и обеспечивающие при использовании экстремальные характеристики. Перспективнейший материал для таких изделий — карбид кремния, популярность которого среди изготовителей электронной техники продолжает расти.

Приборы экстремальной электроники можно условно объединить в три взаимосвязанные группы: для эксплуатации в условиях высоких температур, радиации и агрессивных сред; для систем с повышенными значениями напряжений и плотности тока; для систем с повышенными значениями показателя «мощность — частота». Определяющим фактором в развитии всех трех групп приборов стало использование широкозонных алмазоподобных материалов: карбида кремния, нитридов алюминия, галлия и бора, а также алмаза.

Характер и интенсивность международных специализированных конференций по материаловедческим и приборостроительным проблемам экстремальной электроники, участие в них крупнейших производителей военной техники, а также большое число проектов, реализуемых в Европе, Америке и Азии при государственной поддержке, свидетельствуют о том, что данное направление электроники — одно из самых престижных и коммерчески перспективных. Последнее определяется тем, что наряду с традиционными потребителями электронной техники для экстремальных условий эксплуатации, т.е. разработчиками военных и космических систем, значительный интерес к таким изделиям проявляют в авиационной, автомобильной, судостроительной, нефтехимической и пищевой промышленности, а также в добывающих отраслях, атомной энергетике и др.

Главным стимулом возникновения и развития экстремальной электроники на первом этапе был военный заказ на разработку приборов с высокой устойчивостью к радиации. Эволюция технологии «кремний на сапфире» (KHC, SOS — Silicon on Sapphire), активно развивающейся с середины 70-х годов, шла по пути улучшения стоимостных показателей, повышения степени интеграции и, как следствие, функциональной сложности изделий. Кроме того, создан целый набор современных модификаций технологии «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI — Silicon on Insulator): SIMOX/SIMNI/SIMOX, HI—FIPOS, BESOI, ZMR, L—IBIEC, MBE—SOI). Развиваясь в первую очередь как технология сверхинтегрированных систем с субмикронными разме-

рами элементов, данное направление сохранило важнейшие черты, которые позволяют по-прежнему относить приборы, создаваемые по технологии «кремний на изоляторе», к экстремальной электронике. Это *повышенная устойчивость к воздействию высоких температур (до 300°С) и радиации, а также возможность создания высоковольтных изделий с рабочими напряжениями до 1000 В и оптоэлектронных схем повышенного быстродействия с высокой помехоустойчивостью процессов обработки и передачи информации.*

Известные фундаментальные ограничения элементной базы на кремнии (ширина запрещенной зоны, температура Дебая), а также коммерческий интерес к экстремальной электронике в конце 80-х — начале 90-х годов стимулировали лавинообразный рост работ в области приборов для экстремальных условий и режимов эксплуатации. Можно совершенно определенно сказать, что сегодня на рынке изделий экстремальной электроники абсолютно доминирует широкозонный полупроводник карбид кремния (SiC), а также его композиции с нитридами галлия и алюминия (GaN, AlN).

В биографии карбида кремния как материала электронной техники с момента разработки в 1893 году Ачесоном промышленного способа его выращивания были и взлеты и падения. Но в историю материаловедения карбид кремния (карборунд) безусловно войдет и как великолепный абразив и как «модельный» материал, на котором впервые проведены фундаментальные исследования в области *политипизма* (одномерный полиморфизм, т.е. многообразие кристаллических форм при единстве основного химического состава). Велика его роль и как материала оптоэлектроники, ведь именно на нем велись первые систематические исследования в области электролюминесценции, приведшие к созданию светоизлучающих диодов.

Роль российской науки в становлении карбида кремния как материала электронной техники чрезвычайно высока. У истоков этого направления (начало 20-х годов нашего столетия) стоял русский ученый О.В.Лосев. Его исследования в области электролюминесценции кристаллов карборунда заложили основу передовой рос-

сийской школы в области инжекционных источников света и оптоэлектронных способов передачи и обработки информации.

Целенаправленные работы по синтезу карбида кремния как материала полупроводниковой электроники и созданию элементной базы на его основе ведутся в нашей стране более 40 лет. Первая попытка преодолеть технологический барьер получения карбида кремния, вслед за германием и кремнием, была предпринята у нас и на Западе в конце 60-х — начале 70-х годов. Однако уровень технологии, в первую очередь низкая производительность процесса выращивания кристаллов карбида кремния и малые размеры его монокристаллов, неприемлемые для интегрально-групповых способов производства элементной базы, не позволил перейти к серийному выпуску большинства разработанных к тому времени карбидкремниевых приборов. В эти годы получили развитие и были внедрены в массовое производство лишь варианты на основе мелкокристаллических порошков карбида кремния и светоизлучающие диоды, создаваемые диффузией бора в карбид кремния.

С конца 70-х и до начала 90-х годов работы в области карбида кремния велись с невысокой интенсивностью. Лишь известные ограничения традиционных материалов (кремния*, арсенида галлия и твердых растворов на его основе), а также потребность в новой элементной базе для создания технических систем следующих поколений с конца 80-х годов значительно повысили интерес к SiC. Из материала далекой промышленной перспективы карбид кремния превращается в стратегический материал XXI века.

Попробуем кратко охарактеризовать этот материал с точки зрения его функциональных возможностей и технологических особенностей.

Карбид кремния как бинарное соединение на основе элементов IV группы периодической системы имеет сильную ковалентно-ионную связь. Следствие этого — энергетическая устойчивость SiC, т.е. высокая энергия испарения соединения. Для

* В первую очередь именно кремния по условиям эксплуатации, допустимым рабочим напряжениям, плотностям тока, коммутируемой мощности.



Рис. 1. Важнейшие функциональные свойства материалов кремния/карбида кремния и теоретическая оценка их влияния на экстремальные характеристики электронных приборов

карбида кремния характерно также высокое значение температуры Дебая, что свидетельствует об устойчивости материала к внешним воздействиям. Это проявляется в высокой твердости, температуре плавления, химической, радиационной и лучевой стойкости SiC.

Среди известных неорганических веществ именно в SiC наиболее ярко проявляются такие особенности, как наличие структурного множества “сфалерит-вюрцит” в виде своеобразных структурных твердых растворов (политипов) при неизменности основного химического состава. Фактически политипы карбида кремния — это естественные сверхрешетки, которые позволяют рассматривать его как целую группу полупроводниковых материалов, сочетающую в себе многообразие электрофизических свойств и единую химическую природу.

Особого внимания заслуживают такие свойства карбида кремния, как относительная простота инвертирования типа электропроводности (уровни легирования донорами и акцепторами более 10^{20} см⁻³), наличие собственно окисла (SiO₂) и маскирующего покрытия (углерода), а также структурных изоэлектронных аналогов в виде широкозонных нитрида алюминия (AlN) и нитрида галлия (GaN). Первый имеет с SiC прекрасную кристаллохимическую совместимость (несоответствие параметров решеток 1%), у второго несоответствие параметров решеток на уровне 3%. С точки зрения создания полупроводниковых приборов наиболее значимы широкая запрещенная зона SiC, варьирующаяся в интервале 2,4–3,3 эВ в зависимости от политипа SiC, высокая теплопроводность (5 Вт/см·К), близкая к теплопроводности ме-

ди, рекордно высокие значения напряженности поля лавинного пробоя (до 6 МВ/см) и насыщенной скорости дрейфа электронов ($2 \cdot 10^7$ см/с). Для карбида кремния также характерны люминесцентная активность во всем видимом спектральном диапазоне вплоть до ультрафиолета, высокая скорость распространения акустических волн и низкий коэффициент их затухания на сверхвысоких частотах.

Сопоставительный анализ карбида кремния и кремния, представленный на рис. 1 в рамках предложенной нами “тактической характеристики материала” — векторной диаграммы с приведенной метрикой количественных показателей функциональных свойств, а также теоретическая оценка влияния этих свойств на экстремальные характеристики электронных приборов, наглядно иллюстрируют преимущества SiC как оптимального материала для широкого круга потребителей.

Распространенность в природе и доступность получения в чистом виде исходных компонентов карбида кремния, а также так называемая политипная избирательность предопределяют дополнительное многообразие свойств SiC и природную селективность ряда процессов его обработки (диффузия, окисление). Управляемое сочетание политипов в едином объеме позволяет рассматривать искусственно синтезируемые гетерополитипные структуры как своеобразную новую группу материалов с управляемой энергетической структурой в гетерослоевых структурных композициях при едином химическом составе. Дополнительное разнообразие данной группе материалов придает, как отмечалось ранее, наличие изоструктурных

аналогов карбида кремния — широкозонных нитрида алюминия (6,2 эВ) и нитрида галлия (3,44 эВ).

Известно, что функциональные возможности полупроводникового материала определяются не только его фундаментальными (электро- или теплофизическими) свойствами, но и технологией выращивания кристаллов, эпитаксиальных слоев данного материала, а также получения на их основе микроразделочных композиций.

В 1995 году исполнилось 40 лет методу Лели, предложившего выращивать полупроводниковые кристаллы карбида кремния методом сублимации при температурах 2550–2600°C. В определенном плане этот метод является модификацией метода Ачесона. В его основу положено введение в полость роста графитовой диафрагмы, что обеспечило большую устойчивость возникновения кристаллов SiC и частично сняло вопрос о спонтанном их зарождении. В рамках метода Лели не удалось решить основной проблемы — выращивания кристаллов — подложек с размерами и формой граней кристалла (габитусом), приемлемыми для интегрально-групповых принципов производства приборов на карбиде кремния. Прорывом в этом направлении, во многом определившим стремительный рост интереса к карбиду кремния, следует считать разработку метода выращивания крупных объемных кристаллов SiC, получившего название “метод ЛЭТИ” (Ленинградский электротехнический институт, теперь Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, СПбГЭТУ). Разработанный отечественными специалистами в конце 70-х годов и апробированный во многих лабораториях мира, он сейчас абсолютно доминирует, устойчиво обеспечивая получение монокристаллических подложек SiC диаметром более двух дюймов.

Неотъемлемый элемент технологии получения любого полупроводникового материала — развитие методов микротехнологии, обеспечивающих интегрально-групповые принципы производства элементной базы. Состояние базовых процессов микротехнологии SiC (нанесение, удаление, легирование и модифицирование вещества) обобщено в табл. 1. Отметим приоритет отечественных исследователей в области выращивания эпитаксиальных слоев SiC сублимационным сэндвич-методом, направленном получения гетерополитипных и гетероэпитаксиальных композиций, ростового и сухого ионно-химического микропрофилирования SiC, а также широкие целенаправленные исследования

по диффузионному и ионно-имплантационному введению примесей в карбид кремния.

В электронике вопросы изоляции элементов микротехнологических структур являются фундаментальными. Известны и основные критерии при выборе изоляции: степень интеграции, стоимость изделия, режимы и условия эксплуатации. Обычные требования к изоляции элементов сводятся к минимизации размеров изолирующих областей, токов утечки, паразитных емкостей и высокой теплопроводности композиции. Опыт кремниевой электроники показал, что изоляция обратносмещенным *p-n*-переходом неэффективна и практически невозможна в экстремальных условиях эксплуатации. С учетом планируемых областей применения карбидкремневых приборов, безусловно, должен развиваться метод изоляции диэлектриком. Наличие в технологии SiC структурно-изоморфной пары SiC–AlN с прекрасной кристаллохимической совместимостью и близость температурных коэффициентов линейного расширения ($5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$), а также ярко выраженные диэлектрические свойства AlN ($> 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) создают предпосылки для изоляции элементов с использованием структуры “карбид кремния на нитриде алюминия”. Фактически это аналог известной композиции “кремний на сапфире”. Благодаря достаточно совершенной структуре нитрид алюминия можно нанести на подложку кремния и сапфира. В этом еще одно достоинство структуры SiC–AlN. Изложенный подход частично решает проблему “подложки” в технологии карбида кремния. Ограничение связано лишь с условиями нанесения SiC: при проведении этого процесса подложка должна быть устойчива к температурным воздействиям.

Итак, интерес к композиции карбида кремния с нитридами алюминия и галлия объясняется кристаллохимической совместимостью SiC, AlN, GaN, а также возможностью получения эпитаксиальных гетеропереходов на основе сверхширокозонных материалов и образования на основе этих композиций твердых растворов с широкой областью гомогенности. Обращают на себя внимание и такие особенности нитрида алюминия, как устойчивость к внешним воздействиям, в том числе радиационным, что позволяет использовать его в экстремальных условиях. Хорошие диэлектрические свойства дают возможность применять его не только как изолирующий материал, но и как подзатворный диэлектрик. Кроме того, нитрид алюминия имеет ярко выраженные пьезоэлектрические свойства. Пьезоэлектрический коэффициент AlN варьируется в пределах 0,5–1,5 Кл·м⁻². Для него характерна высокая скорость распространения акустических волн (6 км/с) и малое затухание звука на сверхвысоких частотах (3 дБ/см на частоте 1 ГГц). Вот почему композиция SiC–AlN чрезвычайно перспективна как для силовой высокотемпературной электроники, так и для сверхвысокочастотной, включая устройства обработки информации на основе акустоэлектронных компонентов.

Наиболее значимым научно-практическим результатом последнего времени

по использованию другого материала в композиции с карбидом кремния следует считать получение на GaN лазерных излучателей в коротковолновой области спектра. Функцию подложки в лазерной структуре выполняет карбид кремния.

Жизнеспособность новых научно-технических решений определяется не только техническими параметрами изделия и экономической эффективностью, но и потребностью в их применении. Применительно к системам специального назначения составлена таблица-матрица “Разработка – применение карбидкремневых материалов и приборов (табл.2). Экспертным путем выявлена потребность в приборах на основе карбида кремния, а также определены перспективы применения SiC в связи с созданием новых технических систем для военных целей. Анализ матрицы позволил выделить приоритетные направления разработок в области карбидкремниевой элементной базы с учетом ее функционально-параметрических особенностей, условий эксплуатации и реальной потребности.

Наибольшую потребность в применении карбидкремневых приборов сегодня испытывают объекты ядерной энергетики, технические средства хранения и утилизации ядерных отходов, а также аэрокосмический комплекс. Для таких систем особенно важны надежность и стабильность работы, что обуславливает повышенное внимание к контрольно-измерительной аппаратуре и контурам управления. Это потребует развития различных типов датчиков, а также аналоговой и цифровой элементной базы для обработки и передачи сигналов в экстремальных условиях.

Таблица 1
Базовые процессы микротехнологии карбида кремния

| Эпитаксия | Травление | Легирование, модифицирование |
|--|---|---|
| <u>Газофазная*</u> - низкотемпературная - высокотемпературная <u>Сублимационная*</u> - сэндвич-метод - метод свободно растущего кристалла <u>Жидкостная</u> - метод взвешенной капли - зонная плавка с градиентом температуры <u>Атомно-молекулярная</u> <u>Ионно-химическая</u> <u>Твердофазная (эндотаксия)</u> | <u>Жидкостное*</u> - расплав щелочи <u>Ионно-химическое</u> <u>Газовое</u> - высокотемпературное <u>Термическое</u> - сублимационное <u>Электролитическое</u> <u>Корпускулярно-лучевое</u> - ионное - электронное - лазерное | <u>Ионная имплантация*</u> <u>Диффузия*</u> - высокотемпературная - низкотемпературная (стимулированная) <u>Окисление*</u> - термическое - анодное - ионно-плазменное - имплантационное <u>Протонизация</u> <u>Графитизация</u> - термическая - корпускулярно-лучевая <u>Реструктуризация</u> - термическая - электролитическая - корпускулярно-лучевая |

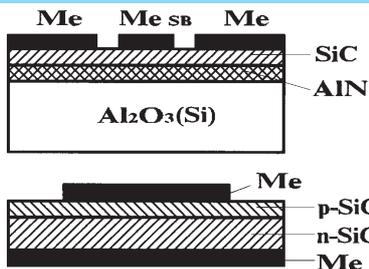
Примечание. Звездочкой помечены доминирующие процессы.

К началу 90-х годов по большинству направлений фундаментальных исследований и практических разработок в области технологии выращивания карбида кремния, микротехнологии SiC и карбидкремниевой элементной базы передовые позиции занимала российская школа, в частности СПбГЭТУ, Физико-технический институт РАН, НПО “Луч” и РИЦ “Курчатовский институт”. В СПбГЭТУ основной вклад в сохранение и развитие карбидкремниевой тематики вносят кафедра микротехники и Центр микротехнологии и диагностики. Сегодня там занимаются разработкой и широким использованием модифицированного сублимационного варианта выращивания объемных кристаллов SiC, теорией и практикой управляемого синтеза политипов и гетерополитипных композиций этого материала, микротехнологией карбида кремния, в том числе процессами локальной эпитаксии и сухого прецизионного травления. Наряду с этим разрабатывается метод выращивания гетероэпитаксиальных структур “карбид кремния на изоляторе”, обеспечивающий эффективную изоляцию элементов карбидкремневых микротехнологических приборов. Создается ряд приборов на основе карбида кремния, включая варисторы, полицветные излучатели, фотоприемники, датчики

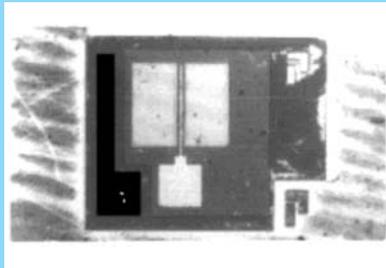
Таблица 2
Матрица “Разработка–применение карбидкремневых материалов и приборов”

| Области применения | Направления разработок | | | |
|-------------------------------------|--|--|----------------------------------|------------------------|
| | Аналоговые и цифровые радио- и оптоэлектронные системы | Силовые и высоковольтные системы энергообеспечения | Контрольно-измерительные системы | Защитно-функциональные |
| Системы специального назначения | | | | |
| Космические аппараты | + | 0 | + | + |
| Авиационная техника | + | + | + | + |
| Наземные транспортные средства | 0 | + | + | + |
| Ядерные энергетические установки | 0 | + | + | + |
| Средства утилизации ядерных отходов | 0 | 0 | + | + |
| Радиолокация и связь | + | + | 0 | 0 |

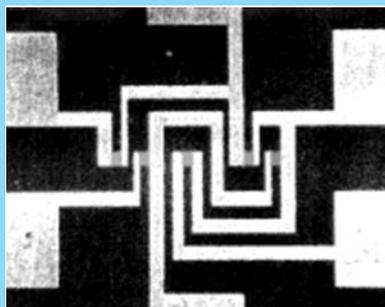
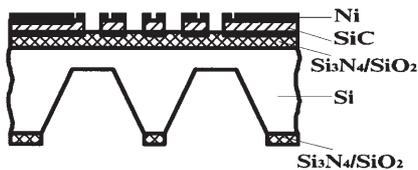
Физическая структура



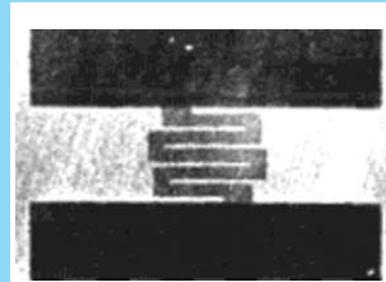
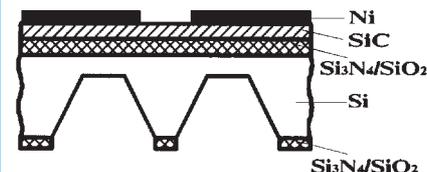
Реальная топология



Датчик температуры



Датчик давления



Датчик потока, расхода

Рис.2. Семейство SiC датчиков, работающих в экстремальных условиях эксплуатации

ядерных излучений, температуры, давления, потока жидкости или газа (рис. 2), а также элементной базы устройств обработки информации для экстремальных условий эксплуатации.

В Физико-техническом институте РАН разработан и успешно используется субли-

мационный сэндвич-метод выращивания эпитаксиальных слоев SiC, комплексно исследованы процессы легирования карбида кремния, теоретически обоснована и по ряду позиций реализована элементная база силовой электроники, созданы усиленные элементы для эксплуатации в ус-

ловиях повышенных температур. Одновременно в НПО "Луч" (г. Подольск Московской области) разрабатывалась промышленная технология получения сверхчистого карбида кремния, а в РНЦ "Курчатовский институт" созданы макетные образцы светодиодов, по светимости в 10–100 раз превосходящие кремниевые, и изготовлены переходы с барьером Шоттки.

К сожалению, из-за недостаточного финансирования интенсивность исследований в области карбида кремния в России явно недостаточна для сохранения лидирующих позиций. Несмотря на это отечественная научная школа в этой области по-прежнему остается наиболее сильной с точки зрения кадрового потенциала.

В заключение следует отметить, что карбид кремния, безусловно, становится стратегическим материалом электроники будущего. Внедрение в практику как SiC, так и широкозонных композиций на его основе, повысит надежность элементной базы электронной техники, особенно при эксплуатации в экстремальных условиях, позволит создать элементную базу нового поколения, обеспечивающую экстремально возможные функциональные параметры приборов. За счет разработки приборов, объединяющих электрические и оптические способы передачи и обработки информации увеличится номенклатура, расширятся функциональные возможности элементной базы. Все это откроет новые возможности для создания систем специального и гражданского применения с ранее недостижимыми техническими характеристиками и условиями эксплуатации.

Литература

1. Карбид кремния./под ред. Г. Хениша, Р.Роя. — М.: Мир, 1972, 349с.
2. Иванов П.Л., Челюков В.Е. Полупроводниковый карбид кремния — технология и приборы. — ФТП, 1995, т.29, вып. 11, с. 1921–1943.
3. Capano M.A., Trew R.J. Silicon Carbide Electronic Materials and Devices. — MRS Bulletin, 1997, v.22, N3, p.19–22

Представляем авторов статьи

ЛУЧНИН Виктор Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент. Директор Научно-учебного центра микротехнологии и диагностики интегральных устройств. Закончил Ленинградский электротехнический институт в 1974 году. Сфера научных интересов: полупроводниковые материалы, микроэлектроника, датчики, микротехнология и диагностика интегральных устройств. Автор более 100 публикаций. Много раз приглашался с докладами на международные конференции, проводившиеся за рубежом.

МАЛЬЦЕВ Петр Павлович, доктор технических наук, профессор, член экспертного совета ВАК России, действительный член Международной академии информатизации, член Секции прикладных проблем при Президиуме РАН. Закончил Ташкентский электротехнический институт связи в 1971 году. Сфера научных интересов: полупроводниковые материалы, микроэлектроника, радиотехнические устройства, радиационная стойкость интегральных микросхем и полупроводниковых приборов. Автор более 100 публикаций, в том числе пяти монографий в области микроэлектроники.

МАЛЯКОВ Евгений Павлович, действительный член Академии качества и надежности, начальник Заказывающего управления Министерства обороны России. Закончил Харьковскую радиотехническую академию в 1973 году. Сфера деятельности: микроэлектроника, полупроводниковые приборы, радиационная стойкость интегральных схем и полупроводниковых приборов. Организатор ежегодных совещаний по надежности электрорадиоизделий для изготовителей и потребителей.