

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ (ОБЗОР)

В. А. Беспалов, Н. А. Дюжев, Б. К. Медведев

НИУ МИЭТ, Россия, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1

В статье дан обзор технологии приборов на основе карбида кремния. Рассмотрены базовые структуры транзисторов на основе использования проводящих и полуизолирующих подложек карбида кремния и указаны их предельные параметры. Рассмотрена технология изготовления подложек и эпитаксиальных плёнок карбида кремния и указаны их параметры. Отмечена необходимость всестороннего контроля дефектов в слоях карбида кремния. Кратко рассмотрены основные операции (обработка поверхности, изготовление омических контактов и затворов структур транзисторов).

Ключевые слова: основные параметры подложек карбида кремния, основные структуры транзисторов на основе карбида кремния, дефекты подложек карбида кремния, технологические операции при изготовлении транзисторов на карбиде кремния

Сведения об авторах: Беспалов Владимир Александрович, д.т.н., ректор НИУ МИЭТ; Дюжев Николай Алексеевич, к.ф.-м.н., директор ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ, djuzhev@ntc-nmst.ru; Медведев Борис Константинович, д.ф.-м.н., начальник лаборатории аналитических методов исследования поверхности НИУ МИЭТ, medvedev@ntc-nmst.ru.

SILICON CARBIDE POWER ELECTRONIC DEVICES TECHNOLOGY (OVERVIEW)

V. A. Bespalov, N. A. Dyuzhev, B. K. Medvedev

National Research University of Electronic Technology (MIET), Russia, Zelenograd, Shokina sq., 1

In this paper we provide an overview of silicon carbide (SiC) device technology. We investigate basic transistor structures on conducting and semi-insulating SiC substrates, provide their performance capacity values, investigate manufacturing technology of SiC substrates and epitaxial thin-films with corresponding parameters. We emphasize the need for a comprehensive control of defects in SiC films. Also we give a brief review of the basic stages of manufacturing process (surface processing, ohmic contacts and transistor gates creation).

Keywords: SiC substrate main parameters, SiC-based transistor structures, SiC substrate defects, SiC transistor's manufacturing process stages.

Authors: Vladimir Aleksandrovich Bespalov, Doctor of Engineering Sciences, Rector of NRU MIET; Nikolay Alekseevich Dyuzhev, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Director of CCU «Microsystem engineering and electronic components», NRU MIET, djuzhev@ntc-nmst.ru; Boris Konstantinovich Medvedev, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Analytical Methods for Studying Surfaces, NSU MIET, medvedev@ntc-nmst.ru.

Введение

Карбид кремния – это один из наиболее полезных материалов для применения в силовой электронике, где в прошлом веке

преимущественно использовался кремний [1, 2].

Если в конце 90-х г. альтернативы кремниевым и арсенид-галлиевым приборам фактически не существовало, то с начала 2000-х

годов развитие технологий позволило серийно создавать карбид-кремниевые приборы. Обладая почти в 3 раза большей шириной запрещённой зоны, а также гораздо большей теплопроводностью по сравнению с кремнием, этот материал по праву зарекомендовал себя как основа для силовой электроники и электроники специального назначения.

В обстоятельных статьях [1, 2] изложены предпосылки для создания в России мощной инновационной технологической программы и инфраструктуры в области ультрасовременных энергосберегающих технологий на базе силовой электроники.

Из потребляемой во всем мире энергии треть приходится на электроэнергию, мировая доля России в которой – 7% при численности населения в 2%. Однако по энерговооружённости Россия в два раза уступает Китаю, в три раза – США. Поэтому и была поставлена государственная задача: снизить за 10 лет энергопотребление до 40%. К 2020 г. предполагалось сэкономить 3-4 десятка тысяч мегаватт установленной мощности всей энергосистемы страны, что эквивалентно мощности всех АЭС России, вместе взятых. Задача эта в 2010-м году казалась вполне разрешимой, но в наше время (2018-й год) становится ясно, что для решения этой задачи практически не сделано ничего, хотя эту проблему следовало решать только с помощью высоких технологий и в данном случае – через энергоэффективную преобразовательную технику, основой которой является электронная компонентная база (ЭКБ) силовой электроники на основе широкозонных полупроводников.

В начале 2000-х годов за рубежом начинается развитие карбид-кремниевых приборов, флагманом которого становится фирма Cree, производящая как карбид-кремниевые подложки с эпитаксиальными структурами, так и основанные на них приборы. Отечественные разработки в области приборов на основе карбида кремния более или менее успешно велись с 70-х годов, но в 90-е годы большая часть разработок «перекочевала» на запад.

При предельной ёмкости отечественного рынка ЭКБ силовой электроники порядка \$5 млрд сегодня используется ~ \$0,3 млрд в основном импортной продукции, т. е. всего 6%.

Динамичное развитие рынка вторичных источников питания, преобразовательной техники для солнечной энергетики, гибридных автомобилей, электромобилей, беспилотных летательных аппаратов, ветроэнергетики, телекоммуникаций, радиолокации, навигации и других отраслей является важнейшим фактором диверсификации рынка ЭКБ силовой электроники.

Родоначальником мощных кремниевых полевых транзисторов являлся СССР (НИИ «Пульсар», г. Москва), где несколько десятков лет назад была выпущена первая серия мощных горизонтальных полевых транзисторов на 100 В и выше (2П904, 908, 912 и др.).

К сожалению, в настоящее время в России интерес к карбиду кремния и приборам на его основе главным образом ограничивается академическими исследованиями свойств карбида кремния и получением лабораторных приборов.

В связи с вышесказанным создание и организация производства приборов на основе карбида кремния является одной из ключевых задач для обеспечения аппаратуры силовой электроники и аппаратуры специального назначения.

Основные свойства карбида кремния [3]: температура плавления 2730 °С, плотность 3,21 г/см³, твёрдость 9-9,5 по шкале Мооса, коэффициент теплового расширения 4,0·10⁻⁶ К.

Хотя существует несколько десятков политипов карбида кремния, только два из них широко используются для изготовления силовых полупроводниковых приборов – это 4H-SiC и 6H-SiC. Для силовых приборов предпочтительнее политип 4H-SiC благодаря большей подвижности электронов [2].

Кристаллическая структура политипов 4H-SiC и 6H-SiC представлена на рис. 1 [3].

Сопоставление электрических свойств политипов SiC и свойств других полупроводников приведено в табл. 1.

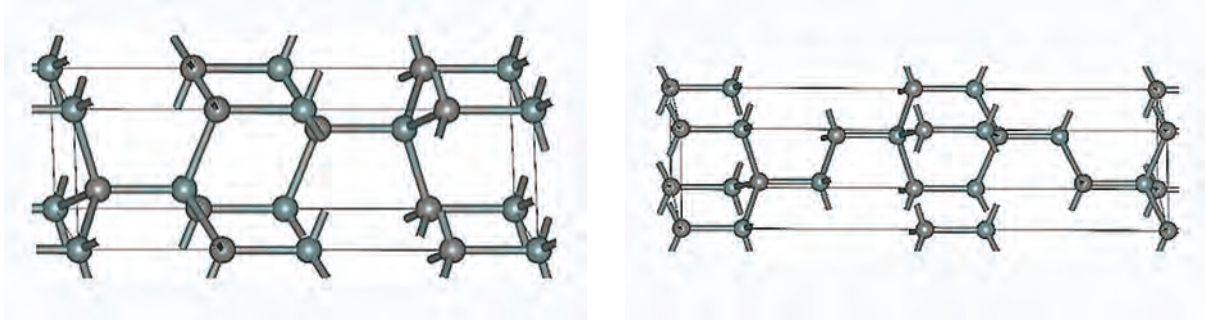


Рис. 1

Кристаллическая структура политипов 4H-SiC (слева) и 6H-SiC (справа)

Таблица 1

Сравнение свойств Si, GaAs и политипов SiC [1]

Свойства	Кремний	GaAs	4H-SiC	6H-SiC
Ширина запрещённой зоны (эВ)	1,1	1,42	3,2	3,0
Относительная диэлектрическая проницаемость	11,9	13,1	9,7	9,7
Поле пробоя при $N_D = 10^{17} \text{см}^{-3}$ (МВ/см)	0,6	0,6	~3,0	3,2
Теплопроводность (Вт/см·К)	1,5	0,5	3-5	3-5
Подвижность электронов при $N_D = 10^{16} \text{см}^{-3}$ ($\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$)	1200	6500	∥оси с: 800 ⊥оси с: 800	∥оси с: 60 ⊥оси с: 400
Подвижность дырок при $N_A = 10^{16} \text{см}^{-3}$ ($\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$)	420	320	115	90
Предельная скорость электронов ($10^7 \text{см}/\text{сек}$)	1.0	1.2	2	2
Энергия донорных уровней (мэВ)	P: 45 As: 54	Si: 5,8	N: 45 P: 80	N: 85 P: 80
Энергия акцепторных уровней (мэВ)	B: 45	C: 28	Al: 200 B: 300	Al: 200 B: 300

Рассмотрим ключевые преимущества SiC в сравнении с Si и GaAs [1].

Напряжённость электрического поля пробоя 4H-SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели для Si и GaAs. Малое 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 способствует более высокому по сравнению с Si и GaAs барьеру Шоттки на границе с разными металлами. В результате формируется малый ток утечки затвора даже при повышенной температуре кристалла. Электронные свойства

приборов на основе SiC очень стабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надёжность изделий. Однако некоторые недостатки SiC транзисторов, которые связаны с дефектами подложек карбида кремния, будут рассмотрены ниже.

Карбид кремния чрезвычайно устойчив к жёсткой радиации, поэтому её воздействие не приводит к такой деградации, как для кремния и арсенида галлия. В табл. 2 приведена связь между постоянной решётки ряда полупроводников и радиационной стойкостью при протонном облучении. Пороговая энергия – это энергия, необходимая для необратимого смещения атома из равновесного положения в решётке.

Таблица 2

Величина пороговой энергии E_d для разных полупроводников в зависимости от постоянной решётки полупроводника – $a_0 \text{ \AA}$ [4]

Полупроводник	GaAs (Ge)	Si	Алмаз	GaN	H-SiC
$a_0, \text{ \AA}$	5,65	5,431	3,57	3,15	3,08
$E_d, \text{ эВ}$	9	12,8	80	145	153

Из табл. 2 видно, что устойчивость к протонному облучению для карбида кремния (H-SiC) в 17 раз выше, чем для арсенида галлия, и примерно в 12 раз выше, чем для кремния. Это связано с плотной упаковкой и сильными ионными связями атомов в решётке карбида кремния.

Возможность работы при повышенных температурах (~ 500 °C) позволяет создавать высоконадёжные приборы для жёстких условий эксплуатации и специальных применений.

Транзисторы на основе SiC для силовой электроники

На рис. 2 показаны основные структуры транзисторов на карбиде кремния [1].

Структура транзистора, показанного на рис. 2 слева, аналогична структуре Si Double Diffused MOS, для которой области p -базы и n^+ -истока получают путём ионной имплантации. В этих приборах положительное смещение на затворе из поликри-

сталлического кремния создаёт инверсный слой на границе раздела между SiO_2 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 необходима для обеспечения высокой электропрочности прибора в закрытом состоянии (высокого пробивного напряжения). Максимальное рабочее напряжение транзистора будет определяться толщиной области дрейфа и концентрацией примеси в ней. При толщине n -области 20 мкм напряжение ограничивается величиной 1600 В.

Один из путей его повышения – использование горизонтальной структуры LDMOS (Lateral Double MOSFET), показанной на рис. 2 справа. В структуре создаётся обеднённая область, которая в закрытом состоянии транзистора при увеличении потенциала также увеличивается и, достигнув изолированной подложки, продолжает распространяться в сторону стока.

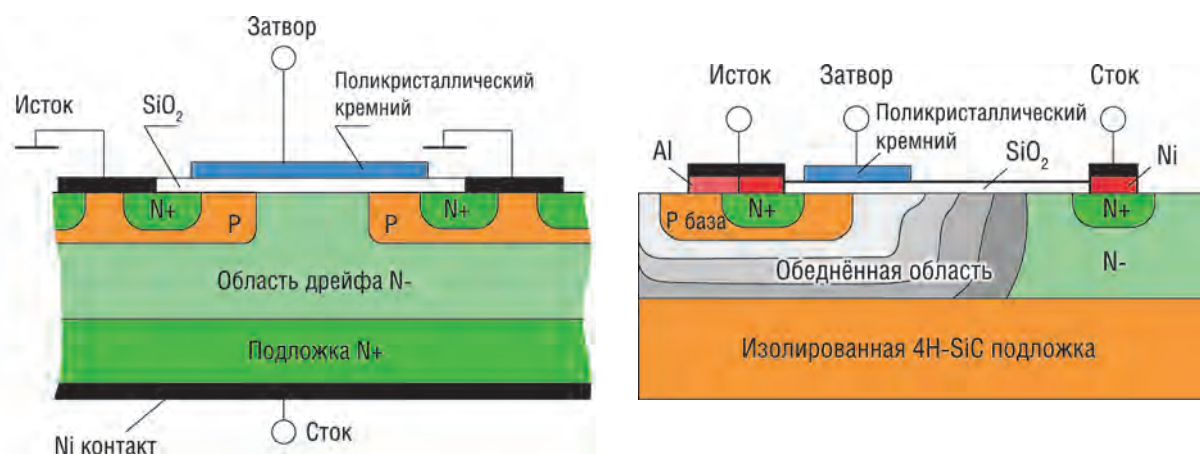


Рис. 2

Структуры транзисторов на основе карбида кремния: слева SiC DMOS, справа SiC LDMOS

В этом транзисторе максимальное напряжение слабо 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.

Сопоставляя структуры приборов, представленных на рис. 2, можно отметить преимущества и недостатки каждой из них. Для структуры, показанной на рис. 2 слева, нельзя получить высокое обратное напряжение. Для структуры, показанной на этом же рисунке справа, эпитаксия может быть более тонкая. Однако стоимость проводящих подложек на порядок меньше стоимости изолирующих подложек.

К 2006 г. основной производитель SiC пластин больших размеров (100 мм) в массовых количествах – компания Cree. Причём более 95% всех пластин идёт на GaN эпитаксию для производства кристаллов синих и зелёных светодиодов, и лишь небольшая часть используется для производства высокотемпературной и радиационно стойкой элементной базы [1].

У SiC MOSFET R_{DSon} может быть на порядок ниже, чем у кремниевых MOSFET. Это уже революция в области мощных приборов с MOS управлением.

На конференции и выставке прикладных технологий силовой электроники (APEC) 21-25 февраля 2010 г. были продемонстрированы SiC MOSFET (30 А, 1200 В) с размером кристалла $1,5 \times 1,5$ мм², практически идентичные по токовой способности кремниевым чипам $4,5 \times 4,5$ мм². Были созданы IGBT на 1200 В, но с одной особенностью: частота переключения для этих приборов была выше в 10 раз, чем у кремниевых IGBT.

Если учесть, что теплопроводность SiC в 3,7-3,8 раза выше, чем для Si, то очевидно, что SiC MOSFET становится исключительно сильным конкурентом не только для Si MOSFET, но и для Si IGBT.

И хотя SiC MOSFET имеют большие потери при переключении в основном из-за высокой плотности ёмкости затвора

на кристалл, но тем не менее общие потери мощности у SiC MOSFET невелики из-за исключительно малого сопротивления R_{DSon} . Структуры MOSFET, как правило, горизонтальные. В итоге ясно, что можно ожидать резкого рыночного и технологического прорыва SiC MOSFET.

Вместе с тем отметим следующее. Есть у биполярных SiC *p-i-n*-диодов, транзисторов, тиристоров и IGBT, выполненных на эпитаксиальных структурах, серьёзные недостатки, выражающиеся в том, что в процессе эксплуатации увеличиваются токи утечки, снижаются пробивные напряжения, ухудшается проводимость. Это связано с тем, что в эпитаксиальных плёнках 4H-SiC или 6H-SiC при больших плотностях электронно-дырочной плазмы в высокоомной области может происходить так называемый Stacking Faults-эффект (SF-эффект). Это обусловлено тем, что энергия безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар в указанных политипах SiC достаточна для преодоления атомом барьера, препятствующего его смещению в другое положение, т. е. происходит перестройка кристаллической решётки SiC из гексагональной в кубическую (образуется политип 3C-SiC). В гексагональной структуре, например политипа 4H-SiC, образуются кубические включения – SF-дефекты, которые возникают на несовершенствах кристаллических 4H-SiC- или 6H-SiC-решётки из-за наличия нанотрубок, дислокаций, нанокластерных образований, точечных дефектов. Чаще всего SF-дефекты зарождаются на границе раздела эпитаксиального слоя с монокристаллом. Под действием высокой плотности тока носителей заряда, увеличения рекомбинации и роста температуры линейные размеры SF-дефектов быстро увеличиваются вдоль оси эпитаксиального роста и, достигая *p-n*-перехода, резко изменяют свойства границы раздела, приводя к катастрофическим отказам.

Эти данные показывают, насколько важно контролировать дефекты пластин карбида кремния, на основе которых будет создаваться технология SiC транзисторов.

Основные технологические операции при производстве пластин и эпитаксиальных структур карбида кремния

Технология производства пластин SiC

В работе [5] продемонстрированы технологические возможности выращивания объёмных монокристаллов SiC на автоматизированной промышленной установке SiC-1, разработанной Экспериментальным заводом научного приборостроения (ЭЗАН).

Установка SiC-1 позволяет выращивать кристаллы SiC диаметром до 100 мм, высотой до 30 мм.

Работа установки заключается в переносе вещества в паровой фазе от источника (порошковый SiC) и осаждении его на ориентированную затравку. Для осуществления этого процесса необходимы высокие температуры до 2500 °С.

Общий вид установки показан на рис. 3.

При выращивании кристаллов наблюдалось образование микротрубок, инициированных кластерами металлов. На рис. 4 представлены пластины карбида кремния с ямками на ростовой поверхности. Дно ямок отражало свет с характерным металлическим блеском. После удаления графита путём отжига кристалла в кислородной атмосфере металлический блеск исчезал.



Рис. 3

Общий вид установки SiC-1 (ЭЗАН)

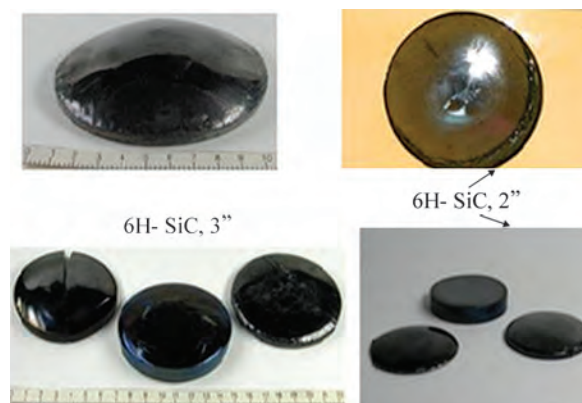


Рис. 4

Типичные дефекты кристалла карбида кремния

Выпуск и продажи полуизолирующих подложек за рубежом

В настоящее время самый большой объём выпуска полуизолирующих подложек SiC осуществляется на фирме Cree [7]. Метод выращивания основан на физическом переносе и осаждении паров (PVT). Кроме того, известен ещё целый ряд продавцов указанных полупроводниковых материалов, например II-VI [8, 9] и Toyota [10].

Фирма Norstel/Ormetec разработала высокотемпературный метод CVD (HTCVD) для выращивания полуизолирующих SiC-подложек. Фирма II-VI выпускает нелегированные двухдюймовые и трёхдюймовые 6H-SiC подложки, выращенные методом PVT (физического осаждения из паровой фазы) [8, 9, 11]. Детальные примеры даны в [12-14].

Изоляция подложки при комнатной температуре больше не представляет проблем с SiC, так как повторяются сообщения о достигнутых уровнях удельного сопротивления 10^9 Ом·см при комнатной температуре [15]. Этот аргумент необходимо уточнить для высокотемпературных операций, так как механизмы изоляции подложки очень чувствительны к температуре в зависимости от метода изолирования [16].

Для полуизолирующих подложек с уровнями изоляции $\geq 10^6$ Ом·см применяют два основных подхода для получения изоляции на подложке. При первом подходе SiC подложки компенсируют обычно ванадием [14].

Правда, возникают трудности вследствие ограниченной растворимости ванадия в SiC [17]. Следующие свойства подложек являются результатом такого легирования:

- глубокие ловушки активируются при высоких рабочих напряжениях и ухудшают работу MESFET на основе SiC;

- легирование ванадием ухудшает качество объёмного кристалла из-за увеличения местных напряжений;

- при указанном легировании возрастает плотность микротрубок;

- указанное легирование уменьшает теплопроводность кристаллической решётки примерно на 25% [18].

Однако по сравнению с проводящими SiC подложками уменьшенный диапазон возможностей также необходимо принимать во внимание при росте HPSI SiC подложек.

Легированные проводящие SiC подложки и их применение

Подложки SiC *n*-типа примерно в десять раз дешевле, чем полуизолирующие подложки, и их возможности по соотношению стоимость-эффективность представлены, например, в [8, 19]. Проводимость достигается введением легирующей примеси – азота.

Эпитаксиальное выращивание плёнок карбида кремния методом высокотемпературного осаждения из газовой фазы

Указанная работа была проведена в ЗАО «Научно-производственный комплекс «Элек-

тровопрямитель», г. Саранск [19]. Ключевой технологией в создании полупроводниковых приборов на основе карбида кремния является технология производства высококачественных эпитаксиальных структур монокристаллического карбида кремния.

ЗАО НПК «Электровопрямитель» проводит работу по созданию технологии эпитаксиального роста монокристаллического карбида кремния методом высокотемпературного осаждения из газовой фазы на современной установке VP508GFR производства фирмы Aixtron (Германия).

Данная работа была проведена в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008-2015 гг., финансируемой Министерством промышленности и торговли Российской Федерации.

Для оценки качества эпитаксиальных структур (ЭС) и подложек SiC была создана лаборатория контроля параметров ЭС и разработаны неразрушающие методики контроля их качества.

Значения основных параметров эпитаксиальных структур, выпускающихся в АО НПК ЭВ, в сравнении с параметрами эпитаксиальных структур других фирм-производителей представлены в табл. 3.

Измерение толщин эпитаксиальных слоёв образцов и неоднородности толщин эпитаксиальных слоёв образцов проводились на установке «ИК-Фурье спектрометр типа Nicolet 6700». Измерения проводились в 17 областях каждого образца.

Таблица 3

Параметры эпитаксиальных структур (политип 4H)

Параметры	Cree США	АО НПК «Электровопрямитель» Россия	EpiWorld Китай	Norstel Швеция	TYSiC Китай	PAM-Xiamen Китай	Global Power Китай
Концентрация примеси	$9 \cdot 10^{14}$ - 10^{19} см^{-3}	$9 \cdot 10^{14}$ - 10^{19} см^{-3}	$9 \cdot 10^{14}$ - 10^{19} см^{-3}	-	$1 \cdot 10^{14}$ - 10^{19} см^{-3}	$5 \cdot 10^{15}$ - $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	$2 \cdot 10^{15}$ - $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Толщина	0,2-50 мкм	0,2-50 мкм	0,2-50 мкм	5-30 мкм	0,5-30 мкм	5-15 мкм	1-20 мкм
Эпитаксиальные дефекты	$< 2 \text{ см}^{-2}$	$< 0,5 \text{ см}^{-2}$ $< 1 \text{ см}^{-2}$	$< 1 \text{ см}^{-2}$	$< 2 \text{ см}^{-2}$	$\leq 1 \text{ см}^{-2}$	$\leq 20 \text{ см}^{-2}$	-
Шероховатость	0,3 нм	1 нм	$< 0,3 \text{ нм}$	-	$\leq 1,0 \text{ нм}$	$\leq 2,0 \text{ нм}$	-

Толщина эпитаксиального слоя исследуемых образцов составляла около 13 мкм, а неоднородность толщины эпитаксиального слоя составляла 2%.

Эпитаксиальные дефекты образцов наблюдались с использованием микроскопа типа Nikon 100D. Измерения проводились под увеличением 50X-500X. Виды эпитаксиальных дефектов исследуемого образца приведены на рис. 5.

Уровень легирования (средняя концентрация примеси в образце) составлял $4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а неоднородность легирования (неоднородность концентрации легирующей примеси по поверхности) эпитаксиального образца – 10%.

Измерения шероховатости поверхности проводились на установке «Стилусный профилометр типа Tencor P16+». На рис. 6 приведены результаты измерений. Как указывают авторы работы [19], шероховатость (R_a) составила 0,36 мкм (однако из данных, представленных на рис. 6, видно, что авторы ошиблись: шероховатость составила 32 нм, т.е. примерно в 10 раз меньше).

Из приведённых данных следует, что производимые ЭС по своим параметрам соответствуют лучшим мировым аналогам, в частности, обеспечиваются малая плотность эпитаксиальных дефектов ($<0,5 \text{ см}^{-2}$) и малый разброс по толщине (типичные значения 0,4%).

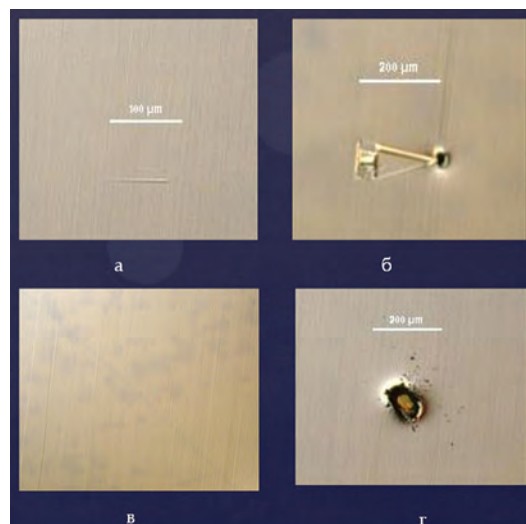


Рис. 5

Виды дефектов:

- а) дефект роста в виде «моркови» (carrots); б) дефект роста в виде «хвоста кометы» (comet tails); в) дефект роста в виде ступенчатых образований (step bunching); г) дефект роста в виде «частицы» (particles)**

В ЗАО «Светлана-Электронприбор» также начато промышленное производство высокоомных ($10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) подложек карбида кремния политипа 6H диаметром три дюйма. Были выращены кристаллы полуизолирующего SiC двух типов: легированные ванадием и без дополнительного легирования. Для получения полуизолирующего материала был разработан процесс синтеза чистого SiC из порошков Si и C.

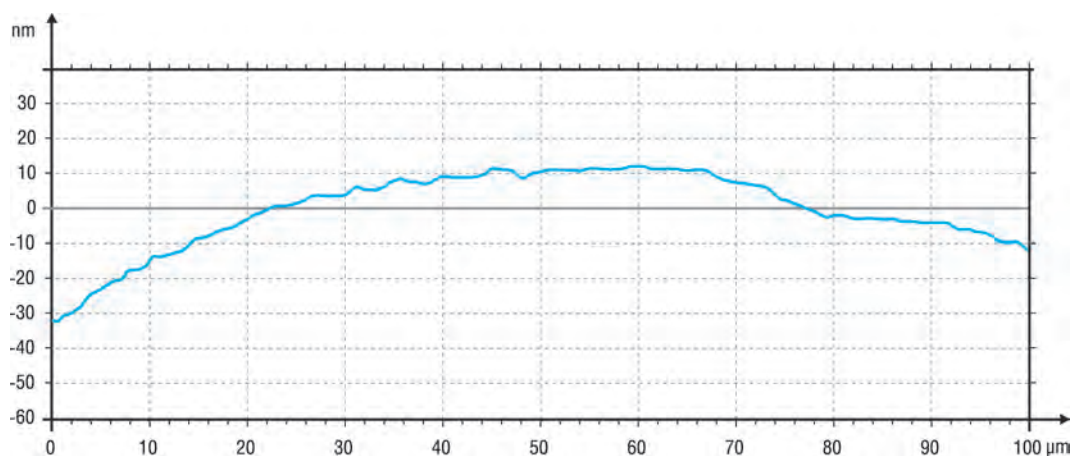


Рис. 6

Распределение шероховатости по площади пластины с эпитаксиальной плёнкой

Согласно полученным экспериментальным данным можно сделать вывод, что данные подложки по своему качеству пока несколько уступают подложкам фирмы Cree.

Эпитаксиальные структуры карбида кремния для высоковольтных диодов и транзисторов

Настоящий раздел составлен на основе анализа обзора [20]. В обзоре отмечено, что несмотря на технологические проблемы, которые обусловлены исключительной термостабильностью, механической прочностью и химической инертностью SiC, в начале 90-х годов был достигнут прорыв, обеспечивший до времени, указанного в обзоре [20] (2005 г.), устойчивый прогресс, что в основном связано с развитием газовой эпитаксии SiC (CVD) [21, 22].

В табл. 4 указана концентрация доноров в базе высоковольтных диодов.

Таблица 4

Параметры структур для высоковольтных диодов

Напряжение р ⁺ -N ₀ -n ⁺ диодов	Концентрация доноров в базе, см ⁻³	Толщина базы, мкм
6 кВ	1·10 ¹⁵	50
10 кВ	3·10 ¹⁴	150
20 кВ	1·10 ¹⁴	200

Разработанные в Cree SiC технологии позволяют изготавливать высококачественные многослойные меза-эпитаксиальные p-n-структуры. Концентрация как донорных (азот), так и акцепторных (алюминий) примесей в эпитаксиальных слоях может варьироваться в широких пределах от 10¹³ до 10¹⁹ см⁻³, а толщины слоёв – в пределах от 0,1 до 200 мкм. Для изготовления биполярных приборов используется в основном 4H-политип карбида кремния, который обладает (как и указывалось выше) рядом преимуществ по сравнению с другими политипами: высокой и почти изотропной подвижностью основных носителей, относительно небольшими величинами энергии активации легирующих примесей. Кроме того, техноло-

гия этого политипа к 2005 г. была отработана лучше, чем для других SiC-политипов.

Параметры эпитаксиальных слоёв в биполярных SiC транзисторах

В транзисторах фирмы Cree (1,8 кВ, 10 А) коллекторный n₀-слой толщиной 20 мкм легирован азотом с концентрацией 2,5·10¹⁵ см⁻³ [23]. Базовый слой толщиной 1 мкм легирован алюминием с концентрацией 2,5·10¹⁷ см⁻³. Эмиттерный n⁺-слой толщиной 0,75 мкм легирован азотом с концентрацией порядка 10¹⁹ см⁻³.

В указанной работе приведены и другие параметры эпитаксиальных структур транзистора, которые отображены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры эпитаксиальных структур

Фиксированные параметры	Значение
Подвижность электронов в базе, μ_{nB}	700 см ² /В·с
Подвижность дырок в базе, μ_{pB}	150 см ² /В·с
Подвижность дырок в эмиттере, μ_{pE}	50 см ² /В·с
Концентрация дырок в базе, p_B	4·10 ¹⁶ см ⁻³
Подгоночные параметры	Значение
Амбиполярная диффузионная длина носителей заряда в базе, L_a , мкм	5,7
Диффузионная длина дырок в эмиттере, L_p , мкм	0,2
Скорость поверхностной рекомбинации, s , см/с	4000

Контроль технологии производства пластин и эпитаксиальных структур карбида кремния

Поскольку пластины карбида кремния широко используются в виде подложек в технологии GaN СВЧ транзисторов и в силовой электронике на основе GaN, можно успешно использовать для контроля качества материалов и приборов на основе SiC методы и аппаратуру, применяющуюся в технологии GaN приборов [24-28].

Контроль структурных дефектов в пластинах SiC

Микротрубки рассматриваются как основные дефекты, препятствующие получе-

нию высококачественных подложек SiC. Они привлекли много внимания к вопросу определения качества подложек, например в [8]. Микротрубки представляют собой винтовые дислокации с большим вектором Бюргерса, проходящие через весь кристалл, пока идёт объёмное выращивание. На рис. 7 дано оптическое изображение микротрубок в полуизолирующей SiC подложке.

Управление политипом и фоновыми примесями представляет собой проблему первостепенной важности. Шероховатость поверхности – это другой критерий качества подложки. На рис. 8 представлено микроизображение одиночной микротрубки на поверхности, где остаточная шероховатость (среднеквадратичное значение, RMS) = 3 нм [24].

В противовес рис. 8 на рис. 9 показано микроизображение поверхности с шероховатостью RMS, равной 0,3 нм.

Средняя плотность микротрубок уменьшается постоянно в ходе развития технологии изготовления подложек, как указано, например, в [15]. Однако поскольку микротрубки являются «убийственными» дефектами для любых активных [29] приборов, уменьшение средней плотности микротрубок является чрезвычайно важной задачей, особенно при увеличении диаметра подложки [17]. Приповерхностные нарушения можно удалить путём химико-механической полировки, как сообщается в [30].

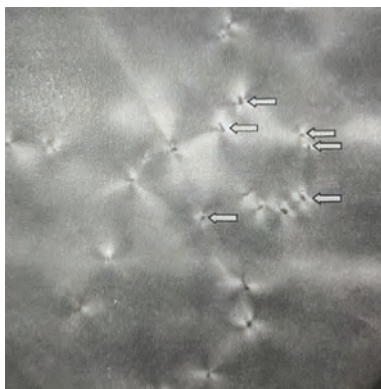


Рис. 7

Изображение кластеров «микротрубок» в полуизолирующем SiC под микроскопом (размер снимка 1×1 мм)

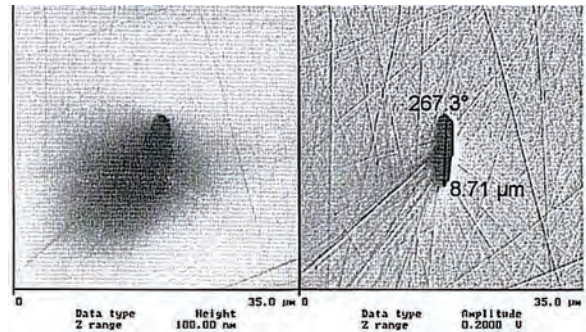


Рис. 8

АСМ-изображение микротрубок в полуизолирующем SiC



Рис. 9

АСМ-изображение ХМП-полированной поверхности полуизолирующего SiC

Для характеристики свойств подложки на заключительной стадии возможно применение нескольких методов [24, 27].

Конструкция зарубежной аппаратуры неизвестна, однако в книге [24] приведены фотографии пластин SiC с большим и малым числом дефектов (рис. 10).

Аналогичные снимки приведены в [26, 27].

Определение плотности дислокаций в пластинах карбида кремния осуществляется с помощью метода селективного травления в расплаве щёлочи (KOH) [31]. Температура расплава составляет 550-600 °С, а время травления – от 5 до 20 минут. Для идентификации дефектов используется оптическая микроскопия.

После двадцатиминутного травления следы механической полировки полностью исчезают и на поверхности остаются только

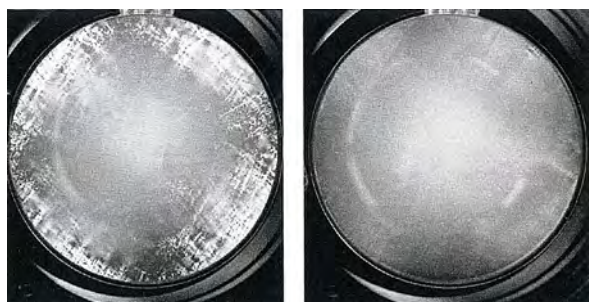


Рис. 10

Поляризационно-оптическое изображение трёхдюймовых пластин полуизолирующего SiC

ямки травления, обусловленные различного рода дислокациями, присутствующими в пластинах SiC. При этом размеры ямок увеличиваются до 10-15 мкм.

Как видно из рис. 11, плотность дислокаций неоднородна по поверхности. Встречаются как области с малой плотностью одиночных дислокаций (плотность дислокаций $\sim 1 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$), так и области с линейными цепочками дислокаций. Данные цепочки могут быть обусловлены блочностью пластины SiC, в результате чего на границе доменов образуется избыточное количество дефектов упаковки. В таком случае плотность дислокаций возрастает как минимум на порядок ($> 1 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$).

Рентгеновская дифрактометрия

Рентгеновская дифрактометрия, детальное описание которой приведено в [28], является одним из основных методов, поз-



Рис. 11

Распределение плотности дислокаций по поверхности подложки

воляющих оценить качество пластин и эпитаксиальных слоёв карбида кремния.

Исследование рентгеновских кривых качания на пластинах карбида кремния фирмы «Светлана-Электронприбор» показало, что угловая ширина кривой качания на полувысоте примерно равна 200 угл. секунд. Почти такая же величина была получена при измерении трёхдюймовых полуизолирующих пластин фирмы Cree.

Технологические операции при изготовлении полевых транзисторов на карбиде кремния

Селективное легирование

Так как коэффициенты диффузии алюминия и азота очень малы, термическая диффузия не используется и заменяется ионной имплантацией. Используются два диффузанта p -типа – алюминий и бор, для которых акцепторные уровни 211 мэВ и 300 мэВ соответственно, но алюминий используется чаще вследствие меньшей энергии ионизации [40]. Чтобы свести к минимуму аморфизацию во время имплантации, обычно её проводят при повышенной температуре: 650 °С для азота и до 1100 °С для алюминия. Имплантация бора производится обычно при комнатной температуре [32].

Формирование омических контактов

Омические контакты чрезвычайно важны для мощных приборов и из-за высокой плотности тока, они должны иметь малое сопротивление. Омические контакты к материалу формируются при напылении никеля и его отжиге. Контакты отжигаются при высокой температуре (850-1050 °С) в аргоне или в вакууме. Удельное контактное сопротивление обычно меньше чем $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при легировании слоёв электронной проводимости. Контакты к материалу p -типа получить более трудно, они формируются при отжиге напылённого алюминия или при нанесении алюминия с последующим нанесением титана. Температура отжига такая же, как для никелевых контактов, но удельное контактное сопротивление находится в пре-

делах 10^{-5} - 10^{-3} Ом·см². Никелевые контакты формируются для областей *n*-типа и весьма стабильны в области высоких температур: они не изменяются при отжиге в течение 329 часов при температуре 650 °С с последующим кратковременным отжигом при температуре до 1300 °С. Для алюминиевых контактов аналогичные исследования не проводились.

Пороговое напряжение полевых транзисторов обычно измеряется при токе 250 мА между истоком и стоком, обычно оно составляет 2-4 В для высоковольтных приборов при толстом окисле и 1-2 В при тонком окисле [33].

Мощные DiMOSFET

В этих приборах дрейфовая область делится на 3 части. Размеры областей в 4H-SiC DiMOSFET представлены в таблицах 6 и 7 [34].

Таблица 6

Параметры структуры DiMOSFET

Ширина канала	400 мкм
Длина канала	1 мкм
Толщина окисла	500 ангстрем
Участки <i>n</i> -диодов	20 мкм
Толщина эпислоя	20 мкм

Таблица 7

Параметры легирования областей DiMOSFET

Область	Уровень легирования	Примесь
<i>n</i> -дрейфовая	$4 \cdot 10^{15}$ см ⁻³	азот
<i>p</i> -область	$4 \cdot 10^{17}$ см ⁻³	алюминий
<i>n</i> ⁺ -область	$1,5 \cdot 10^{20}$ см ⁻³	азот

Изготовление DiMOSFET начинается с использованием пластин SiC *n*-типа с концентрацией электронов $2,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, на которые наносится эпитаксиальный слой толщиной 20 мкм. *P*-область формируется путём имплантации алюминия, которая выполняется после имплантации высокой

дозы азота для формирования истоков *n*⁺-типа. Сильнолегированная имплантация алюминия проводится для формирования подконтактной области *p*⁺-типа. Вся имплантация производится при температуре 1600 °С. Затем производятся осаждение оксидного слоя толщиной 2 мкм и окислирование затвора тонким окислом толщиной 500 ангстрем, который термически выращивается при 1200 °С в сухом O₂ и отжигается в NO при температуре 1175 °С в течение 2-х часов, как указано в [35]. Далее напыляется молибденовый слой толщиной 0,25 мкм для создания электрода затвора. Контакты истока и стока и *p*-области формируются при осаждении никеля. Затвор далее металлизирован составом никель-золото толщиной 0,25 мкм, чтобы уменьшить сопротивление затвора. Оксидные слои осаждаются на металлические слои. В этих слоях формируются отверстия для контактов. Финальная операция: осаждение толстых 2-мкм слоёв Ti/Pt/Au при использовании взрывной фотолитографии [35].

Вольт-амперные характеристики DiMOSFET представлены на рис. 12.

Пробивное напряжение здесь выше 2500 В. Как видно из рис. 12, здесь достаточно малый ток, что, по-видимому, связано с малыми размерами кристалла.

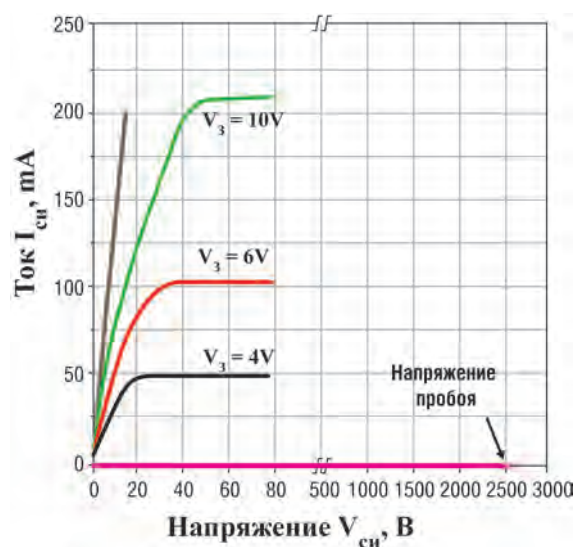


Рис. 12

ВАХ 4H- DiMOSFET

Выводы

1. Рассмотрены основные типы структур мощных полевых транзисторов на карбид-кремниевых подложках: 4H-SiC DiMOSFET на проводящих подложках и 4H-SiC LDMOSFET на изолирующих подложках. Указаны пределы токов и напряжений пробоя для этих типов транзисторов.

2. Как изолирующие подложки, так и проводящие подложки карбида кремния могут быть приобретены как в России, так и за рубежом. Указаны предприятия, изготавливающие подложки и эпитаксиальные слои на карбиде кремния. Стоимость зарубежных изолирующих подложек примерно в 10 раз выше, чем стоимость проводящих подложек.

3. Важнейшими параметрами подложек являются их структурные свойства. Подложки карбида кремния содержат огромное количество разнообразных дефектов, перечень которых и методы их контроля изложены в настоящем обзоре. Нужно иметь в виду, что нет никаких гарантий, что как зарубежные, так и отечественные подложки будут пригодны для производства мощных силовых SiC транзисторов. Поэтому необходим всесторонний входной и технологический контроль, например такой, который применяется при производстве GaN HEMT на карбиде кремния (в частности, в [26] указано на использование 28-ми методов такого контроля).

4. Кратко рассмотрена технология изготовления SiC силовых транзисторов, и, как видно, эта технология является более сложной, чем технология кремниевых транзисторов.

Некоторые исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база», поддержанного Минобрнауки России.

Литература

1. В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич. Силовая электроника. Сравнение, новые возможности / Силовая электроника. – 2010. – №28. – С. 4-10.
2. А. Полищук. Полупроводниковые материалы и приборы для жёстких условий эксплуатации / Современная электроника. – 2006. – №4. – С. 20-24.
3. Википедия. Карбид кремния.
4. В. М. Барбашов, Д. В. Громов. Радиационные эффекты в наногетероструктурных СВЧ-приборах и интегральных схемах / Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – С. 9.
5. А. А. Жохов, Г. А. Емельченко, А. В. Бородин, В. В. Кведер. Выращивание объёмных монокристаллов карбида кремния с использованием автоматизированной промышленной установки NIKA-SiC и их характеристикация // Институт физики твёрдого тела РАН, (ИФТТ РАН), Экспериментальный завод научного приборостроения РАН (ФГУП ЭЗАН). (Доклады в сборнике [6]).
6. Карбид кремния: основные свойства и панорама его исследований в России (по материалам российско-белорусских научно-технических конференций «Элементная база отечественной радиоэлектроники»), Нижний-Новгород 2016 г.
7. R. Singh, J. Cooper, M. Melloch, T. Chow, J. Palmour, IEEE Trans. Electron Devices 49, 665 (2002).
8. E. Emorhokpor, T. Kerr, I. Zwieback, W. Elkington, M. Dudley, T. Anderson, J. Chen, in Proceedings of the International Conference on the GaAs Manufacturing Technology, Miami, 2004, pp. 139-142.
9. G. Martin, T. Kerr, W. Stepko, T. Anderson, in Proceedings of the International Conference on the GaAs Manufacturing Technology, Miami, 2004, pp. 291-294.
10. D. Nakamura, I. Gunjishima, S. Yamaguchi, T. Ito, A. Okamoto, H. Kondo, S. Onda, K. Takatori, Nature 430, 1009 (2004).
11. T. Anderson, D. Barrett, J. Chen, W. T. Elkington, E. Emorhokpor, A. Gupta, C. Johnson, R. Hopkins, C. Martin, T. Kerr, E. Semenas, A. Souzis, C. Tanner, M. Yonathan, I. Zwieback Matirial Science Forum, 457-460, 75 (2004).
12. Compound Semiconductor, Epigress Licenses HTCVD Technology from Oktemic. Comp. Semicond. 6, (2002).
13. H. Jacobsen, J. Birch, R. Yakimova, M. Syvajarvi, J. Bergman, A. Ellison, T. Tuomi, E. Janzen, J. Appl. Phys. 91, 6354 (2002).
14. F. Villard, J. Pringent, E. Morvan, C. Dua, C. Brylinski, F. Temcamani, P. Pouvil, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 51, 1129 (2003).
15. M. Rosker, in Compound Semiconductor IC Symposium Technical Digest, Palm Springs, 2005, pp. 13-16.
16. A. Zhang, L. Rowland, E. Kaminsky, J. Tucker, R. Beaupre, J. Kretchmer, J. Garrett, A. Vertiatichikh,

- G. Koley, H. Cha, A. Allen, J. Cook, J. Foppes, V. Edward, *J. Electron. Mater.* 32 437 (2003).
17. M. Spencer, J. Palmour, C. Carter, *IEEE Trans. Electron Devices* 49, 940 (2002).
18. Cree, Silicon Carbide Substrates and Epitaxy: Product Specifications (2007), <http://www.cree.com>.
19. Гейфман Е.М., Чибиркин В.В., Гарцев Н.А., Давыдова Н.М. Исследование эпитаксиальных структур монокристаллического карбида кремния, выращенных методом высокотемпературного осаждения из паровой фазы (ЗАО «НПК «Электровыпрямитель», г. Саранск) / Материал в сборнике 8а.
20. П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Т.Т. Мнацаканов (ВЭИ), J.W. Palmour, A. K / Agarwal (CREE Inc. 27703 Durham NC, USA). Мощные биполярные приборы на основе карбида кремния / Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – Вып. 8. – С. 897-913.
21. O. Kordina, C. Hallin, R. C. Glass et al. / *Inst. Phys. Conf.*, 1994. Ser. N 137, P. 45.
22. D. J. Larkin, P. G. Neudeck, J. A. Powell, L. G. Matus / *Inst. Phys. Conf.* 1994. Ser., N 137, P.51.
23. S. H. Ryu, A. K. Agarwal, R. Singh, J. W. Palmour. / *IEEE Trans.*, EDL-22, 124 (2001).
24. Кузй Р. Электроника на основе нитрида галлия. // Пер. с англ. д.т.н. Ю.А. Концевой и к.т.н. Е.А. Митрофанова, под ред. д.ф.м.н. А.Г. Васильева. – М.: Техносфера. – 2011. – 592 с.
25. А.Г. Васильев, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. Приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера. – 2011. – 416 с.
26. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. – М.: Техносфера. – 2016. – 328 с.
27. В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. Входной и технологический контроль материалов и структур твердотельной СВЧ электроники (лабораторные работы). – М.: Техносфера. – 2017. – 96 с.
28. К.Л. Енишерлова, А.В. Лютцау, Э.М. Темпер. Однокристалльная рентгеновская дифрактометрия гетероструктур. – М.: ОАО НПП «Пульсар». – 2016. – 144 с., ил.
29. H. Bang, T. Mitani, S. Nakashima, H. Sazawa, K. Hirata, M. Kosaki, H. Okumura, *J. Appl. Phys.* 100, 114502 (2006).
30. M. Kanamura, T. Kikkawa, J. Joshin, in *IEDM Technical Digest*, San Francisco, 2004, pp. 799-802.
31. А.А. Лебедев, С.В. Белов, С.П. Лебедев и др. Полуизолирующие 6H-SiC подложки для применения в современной электронике. <http://jre.cplire.ru/iso/feb14/5/text.html>, 2014 г.
32. T. Kimoto, A. Itoh, H. Matsunami, T. Nakata, and M. Watanabe, *J. Elec. Matls.*, 25 (1996).
33. MOSFET Basics By Vrej Barkhordarian, International Rectifier, El Segundo, Ca.
34. Design, Modeling, and Characterization of Power MOSFET in 4H-SiC for Extreme Environment Applications Md Hasanuzzaman, Syed K. Islam, Leon M. Tolbert.
35. G. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams, J. K. McDonald, M. Di Ventra, S. T. Pantelides, L. C. Feldman, R. A. Weller, «Effect of Nitric Oxide Annealing on the Interface Trap Densities Near the Band Edges in the 4H Polytype of Silicon Carbide», *Applied Physics Letters*, 76 (13) pp. 1713-1715, March 2000.

References

1. V. Voytovich, A. Gordeev. A. Dumanovich, Power Electronics, Comparison, new possibilities / *Power Electronics*. 2010. No.28, pp.4-10.
2. A. Polishchuk, Semiconductor materials and devices for harsh environments. *Modern electronics*. 2006. No.4, pp.20-24.
3. Silicon carbide. Article at Wikipedia web-site, accessed at https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_carbide.
4. V.M. Barbashov, D.V. Gromov. Radiation effects in microwave nanoheterostructure devices and integrated circuits. M.: NRNU MEPhI. 2013. p.9.
5. A.A. Zhokhov, G.A. Emelchenko, A.V. Borodin, V.V. Kveder. Growing of bulk SiC monocrystals using automated system NIKA-SiC and their parameters. The Institute of Solid State Physics RAS (ISSP RAS), Experimental Factory of Scientific Engineering (FSUE EZAN). Collection of Papers.
6. Silicon carbide: basic properties and the landscape of SiC research in Russia (based on the materials of Russian-Belorussian scientific and technical conferences «Electronic Components of Domestic Radio-Electronics»). Nizhniy Novgorod. 2016.
7. R. Singh, J. Cooper, M. Melloch, T. Chow, J. Palmour, *IEEE Trans. Electron Devices* 49, 665 (2002).
8. E. Emorhokpor, T. Kerr, I. Zwieback, W. Elkington, M. Dudley, T. Anderson, J. Chen, in *Proceedings of the International Conference on the GaAs Manufacturing Technology*, Miami, 2004, pp. 139-142.
9. G. Martin, T. Kerr, W. Stepko, T. Anderson, in *Proceedings of the International Conference on the GaAs Manufacturing Technology*, Miami, 2004, pp. 291-294.

10. D. Nakamura, I. Gunjishima, S. Yamaguchi, T. Ito, A. Okamoto, H. Kondo, S. Onda, K. Takatori, Nature 430, 1009 (2004).
11. T. Anderson, D. Barrett, J. Chen, W. T. Elkington, E. Emorhokpor, A. Gupta, C. Johnson, R. Hopkins, C. Martin, T. Kerr, E. Semenas, A. Souzis, C. Tanner, M. Yonathan, I. Zwieback Matirial Science Forum, 457-460, 75 (2004).
12. Compound Semiconductor, Epigress Licenses HTCVD Technology from Oktemic. Comp. Semicond. 6, (2002).
13. H. Jacobsen, J. Birch, R. Yakimova, M. Syvajarvi, J. Bergman, A. Ellison, T. Tuomi, E. Janzen, J. Appl. Phus. 91, 6354 (2002).
14. F. Villard, J. Pringent, E. Morvan, C. Dua, C. Brylinski, F. Temcamani, P. Pouvil, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 51, 1129 (2003).
15. M. Rosker, in Compound Semiconductor IC Symposium Technical Digest, Palm Springs, 2005, pp. 13-16.
16. A. Zhang, L. Rowland, E. Kaminsky, J. Tucker, R. Beaupre, J. Kretchmer, J. Garrett, A. Vertiatchikh, G. Koley, H. Cha, A. Allen, J. Cook, J. Foppes, B. Edward, J. Electron. Mater. 32 437 (2003).
17. M. Spencer, J. Palmour, C. Carter, IEEE Trans. Electron Devices 49, 940 (2002).
18. Cree, Silicon Carbide Substrates and Epitaxy: Product Specifications (2007), <http://www.cree.com>.
19. E. M. Geyfman, V. V. Chibirkin, N. A. Gartsev, N. M. Davydova. Investigation of monocrystalline SiC epitaxial structures, grown by high-temperature vapour deposition. «NPK Elektropyryamitel» CJSC. Saransk. Collection of Papers.
20. P. A. Ivanov, M. E. Levinshtein, T. T. Mnatsakanov, J. W. Palmour, A. K. Agarwal, SiC-based bipolar power devices. Semiconductor physics and engineering. 2005. Vol.39, Issue.8. pp.897-913.
21. O. Kordina, C. Hallin, R. C. Glass et al. / Inst. Phys. Conf., 1994. Ser. N 137, P. 45.
22. D. J. Larkin, P. G. Neudeck, J. A. Powell, L. G. Matus / Inst. Phys. Conf. 1994. Ser., N 137, P.51.
23. S. H. Ryu, A. K. Agarwal, R. Singh, J. W. Palmour. / IEEE Trans., EDL-22, 124 (2001).
24. R. Quay. Gallium Nitride Electronics. Translated in Russian by Yu. A. Kontsevov, E. A. Mitrofanov. Ed. By A. G. Vasilyev. M.: Tekhnosfera. 2011. p.592.
25. A. G. Vasilyev. Yu. V. Kolkovskiy. Yu. A. Kontsevov. Wideband-gap Semiconductor Devices. M.: Tekhnosfera. 2011. p.416.
26. V. V. Gruzdov, Yu. V. Kolkovskiy, Yu. A. Kontsevov. Advances Technology Control in Solid-state Microwave Electronics. M.: Tekhnosfera. 2016. p.328.
27. V. V. Gruzdov. Yu. V. Kolkovskiy. Yu. A. Kontsevov. Incoming and process control of solid-state microwave electronic materials and structures (laboratory research). M.: Tekhnosfera. 2017. p.96.
28. K. L. Enisherlova, A. V. Lyuttsau, E. M. Temper. Monocrystalline diffractometry of heterostructures. Moscow. «S&PE «Pulsar» JSC. 2016. pp.144.
29. H. Bang, T. Mitani, S. Nakashima, H. Sazawa, K. Hirata, M. Kosaki, H. Okumura, J. Appl. Phys. 100, 114502 (2006).
30. M. Kanamura, T. Kikkawa, J. Joshin, in IEDM Technical Digest, San Francisco, 2004, pp. 799-802.
31. A. A. Lebedev, S. V. Belov, S. P. Lebedev et al. Semi-insulating 6H-SiC substrates for modern electronic applications. <http://jre.cplire.ru/iso/feb14/5/text.html>, 2014 г.
32. T. Kimoto, A. Itoh, H. Matsunami, T. Nakata, and M. Watanabe, J. Elec. Matls., 25 (1996).
33. MOSFET Basics By Vrej Barkhordarian, International Rectifier, El Segundo, Ca
34. Design, Modeling, and Characterization of Power MOSFET in 4H-SiC for Extreme Environment Applications Md Hasanuzzaman, Syed K. Islam, Leon M. Tolbert
35. G. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams, J. K. McDonald, M. Di Ventra, S. T. Pantelides, L. C. Feldman, R. A. Weller, «Effect of Nitric Oxide Annealing on the Interface Trap Densities Near the Band Edges in the 4H Polytype of Silicon Carbide», Applied Physics Letters, 76 (13) pp. 1713-1715, March 2000.