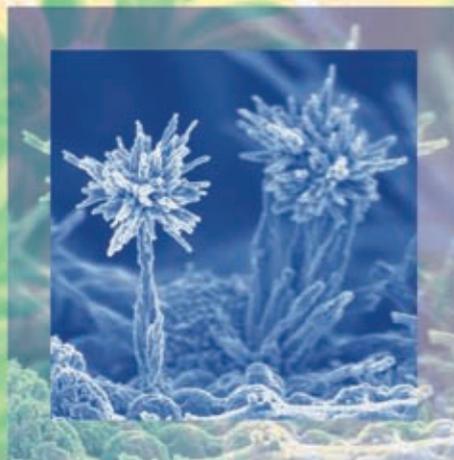


SiC-ЭЛЕКТРОНИКА

ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

Промышленный интерес к полупроводникам возник после того, как В.Шокли с сотрудниками в 1949 году открыл транзисторный эффект в *p-n*-переходах, выполненных на кристаллах германия (Ge). В первой половине 50-х годов начались поиски полупроводниковых материалов, способных работать при более высоких температурах, чем германий. Взоры исследователей обратились к кремнию и карбиду кремния (SiC), и в последующие 10–15 лет был проведен большой объем работ, посвященных исследованию свойств SiC и разработке полупроводниковых приборов на его основе. Однако к началу 70-х годов промышленный интерес к карбиду кремния угас – успехи в развитии кремниевой (Si) и арсенид-галлиевой (GaAs) технологий по сравнению с SiC были слишком велики. Тогда же родилось и прозвище карбида кремния – “вечнозеленый полупроводник”, поскольку чем грязнее SiC, чем больше в нем примеси азота, тем более зеленым он выглядит. Чистые же кристаллы SiC (благодаря ширине запрещенной зоны >3 эВ) прозрачны. Сегодня это прозвище приобретает и переносный смысл, поскольку давно известный полупроводник только-только начинает находить применение для производства полупроводниковых приборов.



А.Лебедев, С.Сбруев
shurs.lebe@mail.ioffe.ru

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Первые кристаллы SiC были обнаружены при исследовании метеоритов в каньоне Дьявола в Аризонской пустыне Генри Муассаном (Moissan), который в 1886 году открыл фтор. В 1905 году минералу было присвоено имя открывателя – “муассанит”. Примерно тогда же Эдвард Ачесон запатентовал промышленный метод получения SiC [1]. Концентрация примесей в выращенных этим методом кристаллах достигала 10^{21} см⁻³, а их размеры были небольшими – $10 \times 10 \times 3$ мм.

Тогда же исследователи установили, что существуют различные виды карбида кремния с одинаковой химической природой, но отличающиеся своими электрофизическими параметрами. Оказалось, что образцы SiC могут иметь различную кристаллическую структуру – кубическую (3C-SiC), гексагональную (2H-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC и nH-SiC), ромбоэдрическую (15 R, 21 R и др.) (рис 1). Сегодня известно около 200 кристаллических модификаций SiC. Таким образом, карбид кремния – один из наиболее ярких представителей политипных соединений. Собственно, термин “политипизм” был введен для карборунда.

В 1907 году Х.Раунд наблюдал свечение при прохождении электрического тока через кристалл SiC [2]. Более подробно электролюминесценцию карбида кремния в 1923–1940 годах исследовал О.В.Лосев, установивший, что один из типов свечения связан с наличием на поверхности кристалла особого “активного слоя” [3, 4]. Позже он показал, что проводимость этого слоя – электронная, а проводимость объема образца – дырочная. Лосев также установил существование

связи между выпрямлением и электролюминесценцией. Кроме того, он наблюдал изменение цвета свечения при увеличении плотности тока через кристалл. Таким образом, два важнейших для полупроводниковой электроники явления – электролюминесценция и выпрямительные свойства *p-n*-структур – впервые были обнаружены на кристаллах SiC. Но в то время в радиотехнической промышленности широко применялись электровакуумные приборы, и эти открытия остались незамеченными.

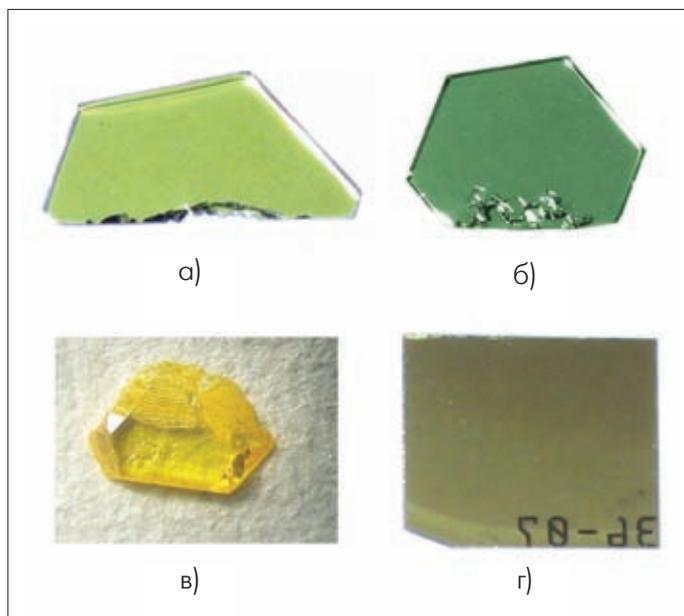


Рис. 1 Политипы карбида кремния с различными кристаллическими структурами: а) 15 R-SiC; б) 6H-SiC; в) 3C-SiC; г) 4H-SiC

Тогда использовались (и широко используются по сей день) такие физические свойства SiC, как твердость и термостойкость. Твердость карбида кремния составляет 9,2–9,3 по шкале Мосса. Уступает он по этому параметру лишь алмазу и нитриду бора (BN). Изделия из карбида кремния и по сей день применяются в машиностроении, химической, нефтедобывающей, атомной и авиакосмической промышленности. В электронике SiC сначала использовался в качестве конструкционного материала. Так, керамика на основе карбида кремния применяется, например, в мощных клистронах. В последние годы определилась еще одна область применения SiC. Чистые (прозрачные) кристаллы SiC при огранке похожи на алмаз, но их стоимость намного ниже (даже при "каратных" размерах). С 1995 года начался выпуск ювелирных изделий на основе SiC, который в этих изделиях был снова назван муассанитом.

Интерес к карбиду кремния усилился в начале 50-х годов, когда Дж. Лели предложил сублимационный метод получения кристаллов карбида кремния, при котором монокристаллы выращивались в результате перегонки SiC через паровую фазу из более горячих в более холодные области реактора [5]. Этим методом удалось получить политипно-однородные кристаллы неправильной шестиугольной формы очень хоро-

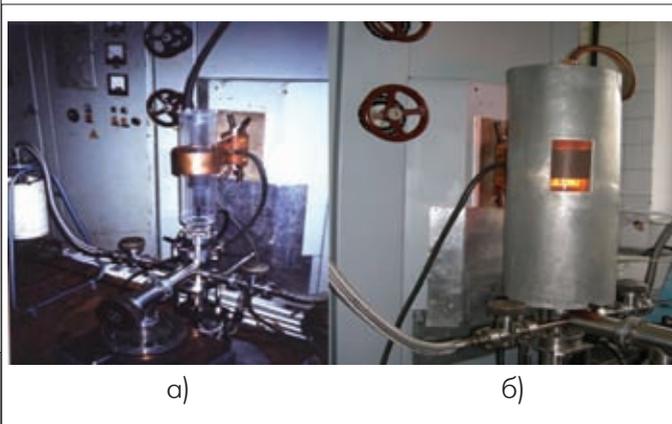


Рис. 2. Установка сублимационной эпитаксии в вакууме пленок SiC (вариант сэндвич-метода): а) подготовленная к процессу, б) в процессе эпитаксии. Светится ростовой графитовый тигль при нагреве высокочастотным генератором

шего структурного совершенства? размером до нескольких сантиметров. Было установлено, что карбид кремния – полупроводник с непрямой зонной структурой, т.е. вероятность излучательной рекомбинации в нем невелика и эффективность (квантовый выход) SiC-светодиодов должна быть на три-четыре порядка меньше, чем в приборах на прямозонных полупроводниках. При этом ширина запрещенной зоны SiC зависит от политипа и изменяется от 2,39 эВ для 3C-SiC до 3,3 эВ для 2H-SiC. Были определены многие оптические, электрические и другие параметры материала.

Известно, что наши недостатки часто являются оборотной стороной наших же достоинств. Это оказалось справедливым и для SiC. Большая энергия связи атомов в SiC обуславливает высокую температуру роста (>2000°C), а химическая инертность и механическая стойкость – сложность обработки выращенных кристаллов. Травится SiC, и то очень плохо, только в KOH и в смеси HNO₃+HF. Из-за технологических сложностей параметры SiC-приборов оказались далеки от теоретических ожиданий, и полупроводниковая промышленность потеряла интерес к этому материалу.

В 70-е – начале 80-х годов изучение свойств SiC продолжалось всего несколькими исследовательскими группами, в основном в СССР. В 1970 году Ю.А.Водаков и Е.И.Мохов

предложили сублимационный сэндвич-метод выращивания эпитаксиальных слоев SiC, согласно которому процесс шел при сближении источника паров и подложки [6] (рис.2). Этим методом удавалось управляемо получать эпитаксиальные слои SiC как *n*- , так и *p*-типа проводимости, то есть создавать SiC *p-n*-структуры. А в конце 70-х годов Ю.М.Таировым и В.Ф.Цветковым был предложен модифицированный метод Лели выращивания объемных кристаллов SiC [7]. Метод основан на конденсации пара на монокристаллической подложке. Рост проводился при температурах около 2000°C. Диаметр выращиваемого слитка и его политипная структура определялись параметрами исходной заправки, а его длина – длительностью процесса.

На основе этих технологий и их модификаций в ФТИ им. А.Ф.Иоффе в лабораториях Ю.А.Водакова и В.Е.Челнокова к середине 80-х годов было разработано несколько SiC-полупроводниковых приборов и проведены обширные исследования электрофизических свойств карбида кремния. Было установлено, что введение некоторых примесей либо изменение соотношения Si/C в зоне роста может привести к смене политипа растущего эпитаксиального слоя по сравнению с подложкой.

Окончательно интерес к карбиду кремния как перспективному материалу для полупроводниковой электроники возобновился после разработки С.Нишино (S.Nishino) метода газотранспортной (CVD) эпитаксии пленок 3C-SiC на кремниевых подложках [8]. Применение стандартного технологического оборудования и подложек большого размера открыло возможность использовать полученные результаты для создания коммерческих изделий. Вскоре на основе выращенных этим методом эпитаксиальных пленок были созданы несколько типов полевых транзисторов. Однако параметры этих приборов, как и качество самих пленок, оставались невысокими. Обычно такие пленки используются для изготовления мембран или тензодатчиков. Поскольку 3C-SiC (самый узкозонный из политипов карбида кремния) по максимальной рабочей температуре незначительно превосходит фосфид галлия (GaP), вскоре были отработаны режимы CVD роста пленок 6H-SiC на подложках 6H-SiC. Применение модифицированного метода Лели (подложка), CVD-эпитаксии (эпитаксиальные слои) с последующим плазмохимическим травлением (формирование меза-структур) и металлизацией поверхности позволило создать целый ряд SiC-приборов: светодиодов синей области спектра, фотоприемников УФ-диапазона, выпрямительных диодов, полевых и биполярных транзисторов, тиристоров. В 1993 году в США была разработана и изготовлена первая интегральная схема на SiC.

К сожалению, в 90-е годы работы российских ученых и созданный ими научный потенциал в области физики карбида кремния оказались востребованными в основном лишь западными фирмами и университетами. Уехавшие из СССР

Таблица 1. Параметры некоторых полупроводниковых материалов

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Напряжение пробоя, мВ/см	Подвижность электронов, см ² /В·с	Дрейфовая скорость электронов при V _{нас} , см/с	Теплопроводность, Вт/м·К
Si	1,12	0,6	1,1	1·10 ⁷	150
GaAs	1,42	0,6	6,0	8·10 ⁸	50
GaN	3,39	3,3	1,0	2,5·10 ⁷	130
3C-SiC	2,2	2	750	2,5·10 ⁷	500
4H-SiC	3,26	3	800	2·10 ⁷	490
6H-SiC	3	3	370	2·10 ⁷	490
Алмаз	5,5	6	2200	2,7·10 ⁷	2000

ученые стали "центрами кристаллизации", вокруг которых образовывались фирмы и исследовательские группы в странах Западной Европы и США. В компании Cree (США), мировом лидере по производству и разработке приборов на основе карбида кремния, в начале 90-х годов почти половина научных сотрудников была выходцами из СССР.

SiC – ЧЕМ ОН ХОРОШ?

Чем же привлекает карбид кремния исследователей на протяжении почти 100 лет? Во-первых, большая, по сравнению с Si и GaAs, ширина запрещенной зоны, что означает больший диапазон рабочих температур (теоретически до ~1000°C), а также возможность создания приборов, излучающих во всем диапазоне видимого света.

Во-вторых, благодаря на порядок большему значению поля пробоя SiC, по сравнению с кремнием, при одном и том же значении напряжения пробоя уровень легирования SiC-диода может быть на два порядка выше, чем кремниевого. А следовательно, его последовательное сопротивление будет меньше и в итоге удельная мощность – больше. В этом же причина высокой радиационной стойкости SiC-приборов.

В-третьих, высокая теплопроводность (для поликристаллического SiC – на уровне теплопроводности меди), что упрощает проблему теплоотвода. Это свойство в сочетании с высокими допустимыми рабочими температурами и большими скоростями насыщения носителей (большие токи насыщения полевых транзисторов) делает SiC-приборы весьма перспективными для использования в силовой электронике.

В-четвертых, высокая температура Дебая, определяющая температуру, при которой возникают упругие колебания кристаллической решетки (фононы) с максимальной для данного материала частотой. Температуру Дебая можно рассматривать как параметр, характеризующий термическую стабильность полупроводника. При превышении этой температуры колебания могут стать неупругими и привести к разрушению материала.

В-пятых, наличие собственной (т.е. изготовленной из того же материала, что и полупроводниковая структура) подложки большого размера. Что так же, как и возможность получения SiC *n*- и *p*-типов проводимости и наличие собствен-

**Таблица 2. Компании, ведущие исследовательские работы в области SiC**

Профиль компании	Компания		
	США	Европа	Япония
Военные/аэрокосмические устройства	Northrop Grumman, HRL, NASA (Glen Research Center)	Thales, AMS, EADS, Ericsson MW	-
Высокочастотные/силовые полупроводниковые приборы	Triquint	Infineon, STMicroelectronics, Philips, Dynex,	Hitachi, Toshiba, Toyota/Denso Fujitsu/Eudyna, Oki, NEC, New Japan Radio
Вертикально-интегрированные приборы (подложки, чипы, корпусирование)	Cree, Semisouth, Astralux, Intrinsic, TDI, LCermet, Nitronex	Siced/Sicystal, Linköpings University/TRANSiC	Большие компании частично вертикально-интегрированные
Подложки	Dow Corning, CREE	-	-
Автоматизация, силовая электроника	General Electric, Rockwell	Siemens, ABB, Alstom	Matsushita Electric, Mitsubishi Electric
Автомобильная электроника	-	-	Toyota/Denso
Оптоэлектроника	Lumileds, Cree, Gelcore, Kopin	Osram Opto Semiconductor	Nichia, Toyoda Gosei, Sony, Rohm
Оборудование	Veeco	Aixtron, Epigress, Thomas Swan, Ribber, Jipelec, EMF	Takeuchi, Nippon Sanso

ного окисла (SiO₂), позволят изготавливать на основе SiC новые типы полупроводниковых приборов.

Таким образом, практически по всем важным критериям карбид кремния превосходит классические полупроводниковые материалы – Si и GaAs (табл. 1).

Интересно сравнить SiC с другими широкозонными материалами. По ряду параметров, в первую очередь по уровню излучательной рекомбинации, SiC уступает нитриду галлия (GaN) и нитриду алюминия (AlN). Однако для GaN пока нет собственных подложек, а собственные подложки AlN малы и очень дороги. Эпитаксиальные пленки этих материалов выращиваются методом гетероэпитаксии на подложках из других материалов (SiC, сапфир). В результате плотность дислокаций пленок очень высока (>10⁷ см⁻²). Дислокации в GaN расположены перпендикулярно поверхности растущего слоя и собираются в кластеры. Выращиваемый слой имеет ячеистую (зернистую) структуру, что приводит к увеличению токов утечки p-n-структур и к их деградации с течением времени. Все это затрудняет создание высоковольтных GaN-приборов. Да и по остальным электрофизическим параметрам (скорость насыщения носителей, поле пробоя, подвижность) объемный GaN не имеет существенных преимуществ перед карбидом кремния. Принципиально недостижимое

(из-за высокой вероятности излучательной рекомбинации) большое время жизни носителей заряда в GaN ограничивает применение этого материала для создания биполярных приборов. Низкая теплопроводность и меньшая температура Дебая других широкозонных полупроводниковых материалов приводят к снижению максимальной рассеиваемой мощности униполярных приборов. Таким образом, в целом SiC – более перспективный материал для создания мощных приборов по сравнению с GaN и другими элементами группы AlIII-N.

Однако формирование GaN/AlGaN-гетеропереходов позволило создать структуры с двумерным электронным газом, подвижность носителей которых значительно выше, чем в структурах на GaN. Такие структуры – основа транзисторов с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor, HEMT), превосходящих по параметрам полевые транзисторы на основе объемного SiC. Поэтому сейчас трудно сказать, какой из двух материалов "выйдет в финал". Возможно, это будет их комбинация, так как лучшие HEMT на основе GaN/AlGaN созданы на SiC-подложках.

Вне конкуренции как по своим параметрам, так и по значениям максимальных рабочих температур, алмаз. Но пока не удается вырастить монокристаллические гетероэпитаксиальные слои алмаза, а размер собственных подложек неве-

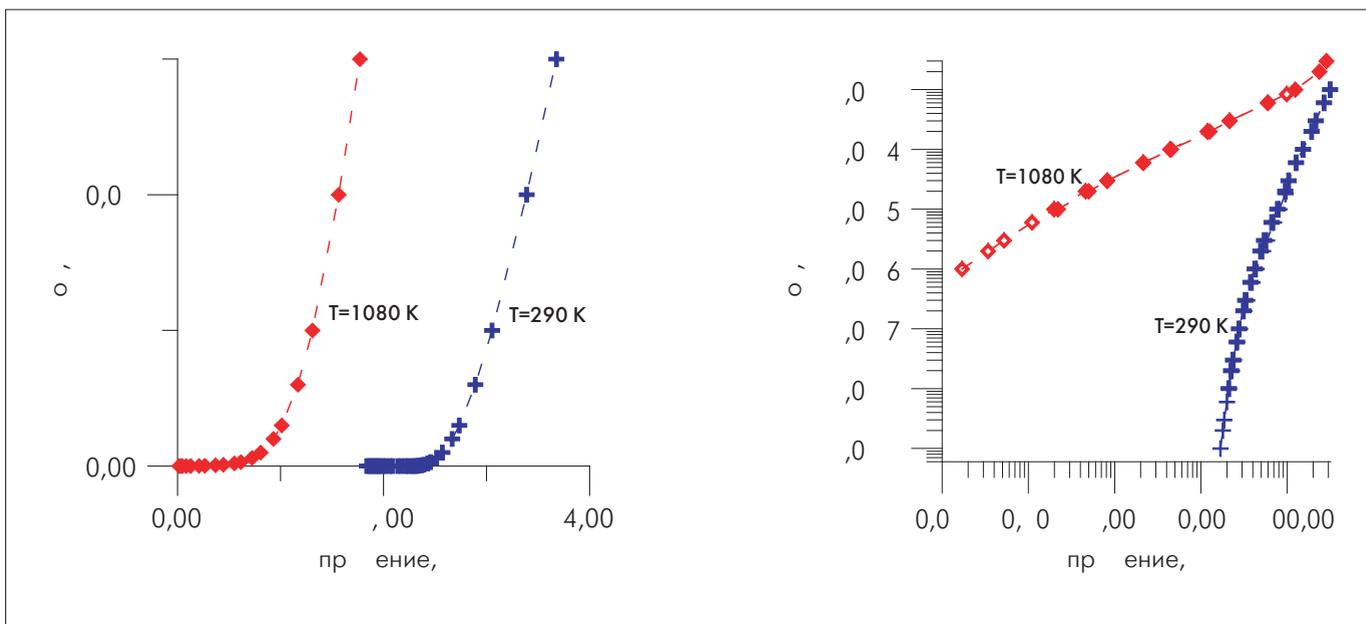


Рис.3. Прямые (а) и обратные (б) вольт-амперные характеристики SiC-диода при различных температурах

лик и, к тому же, они достаточно дорогостоящие. Кроме того, формирование *p-n*-структур на алмазе задача совсем не простая.

ЧТО СДЕЛАНО?

Сегодня крупнейшие полупроводниковые компании интенсивно ведут исследовательские работы в области создания приборов на основе карбида кремния и осваивают их экспериментальный выпуск (табл.2). Высоочастотные SiC-приборы уже нашли применение в базовых станциях сотовых систем связи, РЛС, бортовых спутниковых системах, военных системах связи, телевизионных спутниковых системах; силовые приборы – в устройствах средней (1–10 кВт) и большой мощности (10 кВт–1 МВт). На основе карбида кремния изготавливаются приборы, работающие при высоких значениях температуры и радиации: для скважинных устройств, для автомобилестроения, турбин и другого промышленного оборудования, для атомных и космических систем.

Прежде чем перейти к рассмотрению основных направлений исследований и производства различных SiC-приборов, остановимся на наиболее общих и существенных причинах задержки развития этой отрасли. В середине 90-х годов прошлого века казалось, что первым промышленно выпускаемым SiC-прибором будет силовой выпрямительный диод (рис.3). Практически отсутствие обратных токов при комнатной температуре (благодаря большой ширине запрещенной зоны), большое быстродействие, высокие рабочие температуры – все это обещало существенную экономию при замене SiC-приборами кремниевых диодов и транзисторов в силовой электронике.

Однако оказалось, что характеристики выпрямительных SiC-диодов на протяжении срока службы ухудшаются, что выражается в увеличении токов утечки, снижении пробивно-

го напряжения при обратном включении и увеличении сопротивления диода в прямом направлении. Исследования показали, что причина деградации – образование в пленках 4H- или 6H-SiC при протекании прямого тока прослоек кубического SiC, так называемых дефектов типа "stacking faults" (SF). Это обусловлено тем, что энергия, выделяемая при безызлучательной рекомбинации электронно-дырочной пары в SiC, достаточна для преодоления атомом барьера, препятствующего его смещению в другое положение. То есть происходит перестройка решетки гексагонального политапа в кубический, и образуется прослойка кубического политапа. Зародышем SF-дефектов служат дислокации в объеме эпитаксиального слоя или на границе эпитаксиальный слой–подложка. Под действием прямого тока линейные размеры SF-дефектов быстро увеличиваются параллельно кристаллической оси "С" кристалла и при достижении ими границы *p-n*-перехода наступает полная деградация прибора.

Эти проблемы не коснулись приборов, работающих на основных носителях тока, таких как диоды Шоттки и полевые транзисторы, поскольку в них отсутствует электронно-дырочная рекомбинация, и SF-дефекты не образуются. В результате вторым промышленно выпускаемым SiC-прибором стал диод Шоттки. Но созданию достаточно мощных приборов этого типа препятствовало качество подложек, в первую очередь присутствие в них микротрубок, так называемых micropores, максимальный диаметр которых может составлять десятки микрон. Плотность этих дефектов на подложках предыдущих поколений не позволяла создавать достаточно мощные приборы (мощность прибора пропорциональна занимаемой им площади), так как в рабочем поле обязательно оказывались микротрубки, приводящие к неработоспособности прибора или к резкому ухудшению его характеристик,



прежде всего максимально допустимого напряжения. Все это затормозило внедрение полупроводниковых приборов на основе SiC. Итак, начнем...

ПРОИЗВОДСТВО ПОДЛОЖЕК

Сегодня самый востребованный продукт на рынке SiC-приборов – подложки из карбида кремния. С каждым годом улучшается их качество и увеличивается диаметр. Сейчас он составляет 100 мм. По данным фирмы Cree, около 89% поверхности подложек с плотностью дефектов 22 см^{-2} пригодны для изготовления приборов площадью 1 см^2 . Подложки SiC используются как для роста собственно карбида кремния, так и для формирования гетероэпитаксиальных структур GaN/AlGaIn. Хотя SiC дороже сапфира, его рассогласование по кристаллической решетке с GaN меньше, а теплопроводность выше, чем у сапфира. Уже разработана и технология производства полупроводниковых подложек, которые необходимы для изготовления высокочастотных транзисторов. Наибольших успехов в области производства подложек достигли фирмы Cree и Intrinsic Semiconductor. На протяжении последних лет плотность дефектов типа micropipes неуклонно снижалась с более 100 см^{-2} до менее 5 см^{-2} . В начале 2006 года компания Intrinsic Semiconductor объявила о начале коммерческих поставок полностью свободных от micropipes подложек (Zero Micropipe – ZMP) диаметром до 100 мм. А уже в середине года компания Cree сообщила о приобретении фирмы Intrinsic Semiconductor. В результате рынок подложек для высококачественных устройств оказался практически монополизированным. Пожалуй, единственный серьезный конкурент компании Cree – японская фирма Toyota/Denso, производящая виртуально бездефектные (virtually defect free) материалы для приборов силовой электроники [9,10]. А по оценкам компании Wicht Technologie Consulting [11] – крупнейшего аналитика рынка микротехнологий и электроники – рынок SiC-приборов к 2009 году увеличится в три раза и составит 53,2 млн. долл. (рис.4), нам есть о чем подумать.

ПРОИЗВОДСТВО СИЛОВЫХ ПРИБОРОВ

Промышленный выпуск мощных полупроводниковых приборов на основе карбида кремния возможен только при наличии высококачественных подложек. Поэтому естественно, что наибольших успехов в этом направлении добилась компания Cree, выпускающая силовые диоды с барьером Шоттки и мощные СВЧ-приборы. Наиболее совершенный из выпускаемых компанией диодов Шоттки – CSD20120 – состоит из двух диодов с максимально допустимым средним (интегральным) значением тока 10 А. Диод поставляется в корпусе ТО-247-3. Каждый из двух входящих в него диодов выдерживает однократный импульс тока 250 А длительностью 10 мкс или импульсы тока до 50 А, повторяющиеся с частотой 120 Гц. Заряд обратного восстановления при

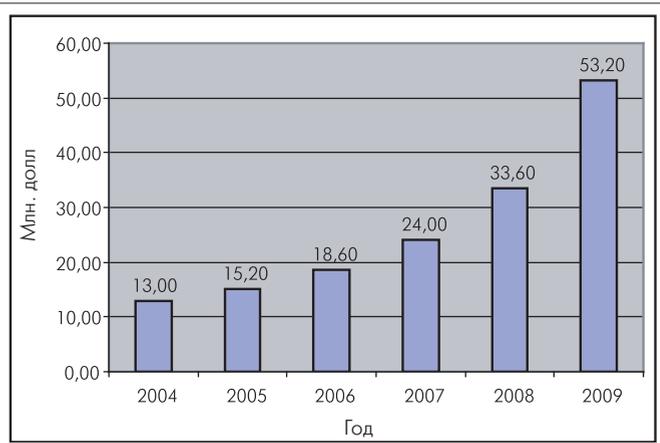
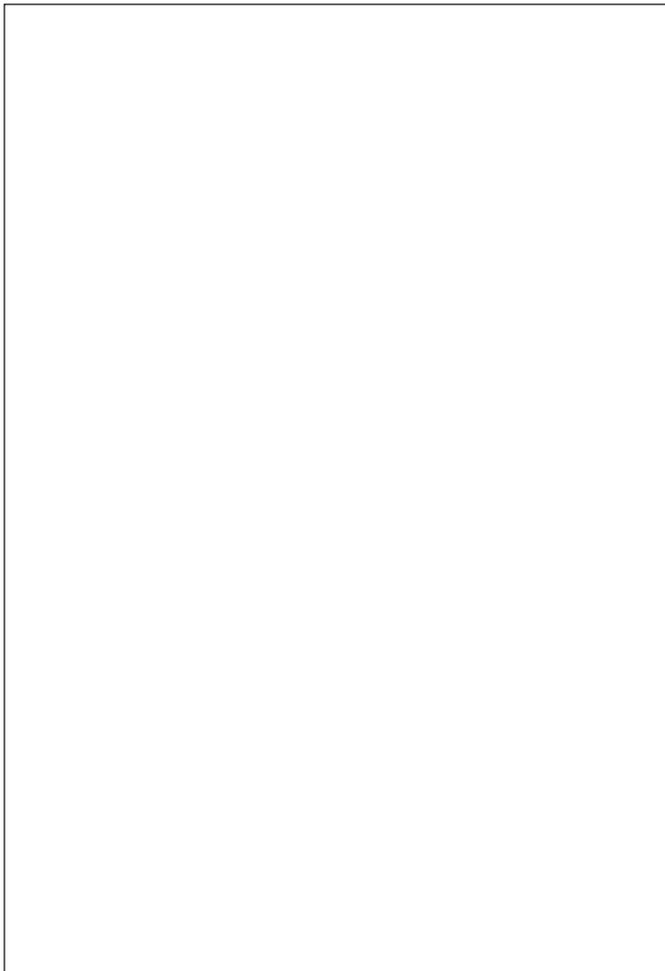


Рис.4. Динамика развития рынка SiC-приборов (транзисторов и диодов)

этом составляет всего 61 нКл. Кроме того, фирма Cree по заказу выпускает мощные силовые сборки таких диодов. Благодаря тому, что при повышении температуры сопротивление SiC-диода увеличивается, происходит автоматическое выравнивание токов параллельно включенных приборов.

Неплохо обстоят дела и у фирмы Infineon, серийно выпускающей диоды Шоттки IDT16S60C с максимальным напряжением 600 В и средним током 16 А. Компания Solid State Devices поставляет диоды Шоттки типа SSR40C30CT на 40 А и 300 В, а Rockwell Scientific – опытные образцы диодов Sch1200_7P5 на 7,5 А и 1200 В. Однофазный мостовой вы-



прямитель SHB636053E с током 5 А и максимальным напряжением 2500 В выпускается компанией Sensitron Semiconductor.

С серийным производством силовых транзисторов на основе SiC дело пока обстоит хуже. Только шведская фирма TranSiC объявила о намерении выпустить в этом году биполярные транзисторы в корпусе TO-247 на максимальное напряжение 1200 В и ток 6 А. Ситуация понятна. Схемотехнические решения устройств на основе дешевых кремниевых транзисторов позволяют значительно снизить потери на переключение, а у лучших из них потери прямой проводимости даже ниже, чем достигнутые сегодня для SiC-транзисторов. КПД устройств силовой электроники на кремниевых транзисторах достигает 95–97%. Поэтому сейчас гораздо выгоднее выпускать мощные SiC СВЧ-транзисторы. Стоимость их значительно выше, а себестоимость, по сравнению с силовыми транзисторами, ниже. Да и конкуренцию им в этой нише традиционные GaAs-транзисторы практически составить не могут. Пока рынок СВЧ-транзисторов не насытится, трудно ожидать перехода к серийному выпуску SiC-транзисторов средней мощности. Выпуск же опытных образцов и даже изготовление на их основе гибридного преобразователя на 100 кВт уже свершившийся факт [12]. Фирма Cree совместно с японской компанией Kansai Electric Power продемонстрировала ультракомпактный трехфазный инвертер с выходной мощностью 110 кВт. Кроме того, благодаря возможности создавать на базе высоковольтных SiC-приборов быстродействующие ключи с отличными характеристиками, способные работать при высоких температурах, существует громадный потенциальный рынок относительно маломощных драйверов высоковольтных силовых транзисторов.

Современные достижения схемотехники в сочетании с уникальными свойствами SiC-приборов позволяют создавать мощные, полностью интегрированные, интеллектуальные силовые модули с отличными электрическими и массогабаритными характеристиками.

ПРОИЗВОДСТВО СВЧ-ПРИБОРОВ

Проблемы технологии силовых приборов заметно не коснулись приборов СВЧ-диапазона, например диодов (*p-i-n*- и лавинно-пролетных) с малыми рабочими площадями (диаметр ~100 мкм) и соответственно малыми значениями паразитной емкости. При этом вероятность попадания дислокации на рабочую площадь достаточно мала. Но все же следующим серийно выпускаемым стал гораздо более совершенный прибор – мощный полевой СВЧ-транзистор. Впечатляющих результатов в области создания полевых транзисторов с затвором Шоттки (MESFET) S-диапазона (2–4 ГГц) опять же добилась компания Cree. В июне 2000 года компания представила первый MESFET на карбиде кремния планируемого семейства мощных СВЧ-транзисторов для беспро-

водных и широкополосных систем – транзистор CRF-20010 мощностью 10 Вт и на частоту 2 ГГц, а через год – CRF 22010 той же мощности на частоту 2,2 ГГц. Эти транзисторы имели практически одинаковые параметры, но не были достаточно отработаны для серийного производства. Кроме компании Cree в 2003 году SiC MESFET S-диапазона T4200 с выходной мощностью 25 Вт в импульсном режиме продемонстрировала и фирма Rockwell Scientific.

В 2004 году Cree начала выпуск MESFET второго поколения – CRF24010 с предельной рабочей частотой 2,7 ГГц и максимально допустимым напряжением сток-исток 100 В. А еще через год компания выпустила транзистор CRF 35010 той же мощности с предельной рабочей частотой до 3,8 ГГц. Следующий шаг Cree – выпуск транзистора CRF 24060 с выходной мощностью 60 Вт на частотах до 2,4 ГГц, рассчитанный, как и предыдущие MESFET семейства CRF, на напряжение 48 В.

На этом короткая история освоения серийного производства СВЧ-приборов на карбиде кремния пока заканчивается.

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Первыми промышленно выпускаемыми SiC-приборами были светодиоды. При этом одна и та же технология изготовления светодиодов на основе различных политипов позволяла получать максимум излучения при различных значениях энергии. В определенной степени спектральное положение максимума электролюминесценции при прямом смещении диода зависит от примесного состава карбида кремния. Так, легирование 6H-SiC бором (акцепторная примесь) позволяло получать желтый цвет электролюминесценции, собственный структурный дефект – зеленый, донорно-акцепторные пары Al-N – синий и экситон – фиолетовый цвет (рис.5). По мере совершенствования качества и чистоты материала остался только синий пик люминесценции, и в 80-е годы основное внимание уделялось созданию SiC-светодиодов синего свечения. Конечно, интенсивность свечения этих приборов была очень слабой, но

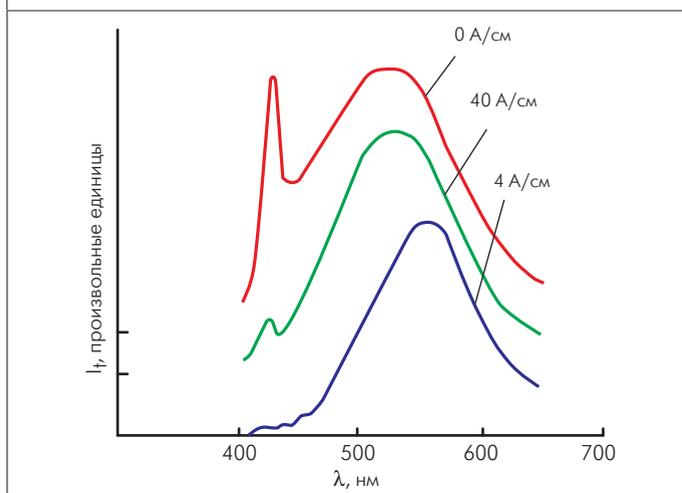


Рис.5. Спектр электролюминесценции 6H-SiC-диода при комнатной температуре и различных плотностях прямого тока

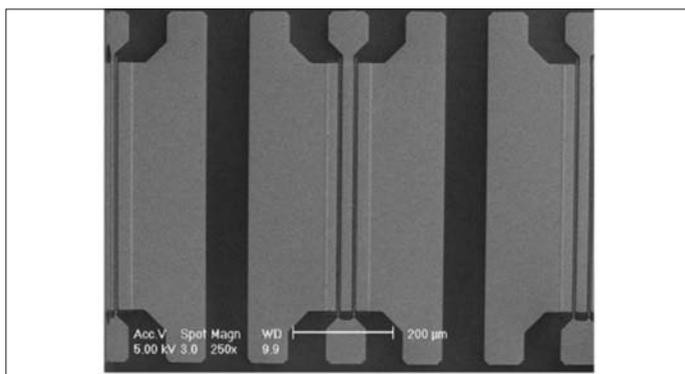


Рис.6. Фотография топологии MESFET

других приборов такого свечения не было, и в начале 90-х годов в мире выпускалось несколько миллионов SiC-светодиодов. Экспериментальное производство SiC-светодиодов в СССР было начато совместно ФТИ АН (Ленинград) и ОКБ завода "Старт" (Москва).

После разработки технологии *p-n*-структур на GaN и появления светодиодов и лазеров на их основе нитрид галлия и его твердые растворы оказались вне конкуренции для производства оптоэлектронных устройств. Единственными электронно-оптическими приборами на карбиде кремния остались УФ-детекторы. Благодаря большой ширине запрещенной зоны SiC почти не фоточувствителен в видимой области спектра и к тому же SiC УФ-фотодетекторы практически не деградируют с течением времени.

Разбившиеся в годы отсутствия приемлемых подложек надежды на серийное производство SiC-полупроводниковых приборов воплотились в большом объеме исследовательских и опытных работ, наиболее значительные результаты которых и рассмотрим далее.

ИССЛЕДОВАНИЯ И ДОСТИЖЕНИЯ

Разработки большинства компаний пока далеки от уровня, достигнутого компаниями Cree и Intrinsic Semiconductor в области производства подложек карбида кремния. Поэтому особое внимание благодаря описанным выше свойствам SiC следует уделить вопросам создания SiC-устройств с минимальной рабочей площадью, а именно СВЧ- и маломощных высоковольтных приборов, а также приборов, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

Приборы радиочастотного диапазона. В Лаборатории микроволновой электроники Шведского Технологического университета (Chalmers University of Technology) создан балансный смеситель на диодах с барьером Шоттки на центральную частоту 2 ГГц. Там же разработан 4H-SiC MESFET с выходной мощностью 1,8 Вт на частоте 3,1 ГГц. Ширина канала транзистора – 1,6 мм, а максимально допустимое напряжение стока – 50 В [13]. Кроме того, в Лаборатории созданы MESFET с длиной затвора 0,5 мкм, 0,35 мкм, 0,25 мкм и шириной затвора 100, 200, 400 мкм. Транзисторы изготовлены на подложках компании Cree с буферным

p-слоем (концентрация примеси $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной 0,2 мкм. Толщина канального слоя *n*-типа (концентрация $3 \cdot 10^{17} \cdot \text{см}^{-3}$) равна 0,3 мкм, толщина слоя под омические контакты (концентрация носителей $1,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) – 0,15 мкм. Наибольшую частоту $f_t = 12,5 \text{ ГГц}$ имел транзистор с геометрией $0,35 \times 400 \text{ мкм}$. Его удельная мощность – 1,5 Вт/мм [14].

MESFET с пробивным напряжением 120 В, током насыщения 250 мА/мм и $f_t = 14,5 \text{ ГГц}$ ($f_{\text{max}} \cong 40 \text{ ГГц}$) создан на факультете электро- и компьютерной техники Корнельского университета Итаки, шт. Нью-Йорк [15,16]. Длина затвора транзистора – 0,45 мкм, ширина канала – $2 \times 200 \text{ мкм}$.

На Объединенной международной конференции 2004 года специалисты Сеульского национального университета представили MESFET с удельной мощностью 1,7 Вт/мм и $f_t = 8,2 \text{ ГГц}$ [17]. При длине затвора 0,5 мкм и ширине 100 мкм ток стока в режиме насыщения составил 500 мА/мм.

Там же и по этой же технологии, на полуизолирующих подложках компании Cree с буферным слоем *p*-типа толщиной 0,55 мкм с низким уровнем концентрации примеси и активным слоем *n*-типа (концентрация основных носителей $2,79 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной 0,3 мкм, изготовлено несколько приборов с затвором, состоящим из двух "пальцев". Длина затвора варьировалась в пределах 0,3–3 мкм, а ширина – в пределах 50–500 мкм (рис.6). Максимальная частота $f_t = 9,3 \text{ ГГц}$ и $f_{\text{max}} = 34 \text{ ГГц}$ были получены для транзистора с длиной затвора 0,5 мкм. Ток насыщения достигал ~500 мА/мм [18].

Выходная мощность транзистора с одним затвором шириной 21,6 мм (удельная мощность 2,9 Вт/мм), созданного по той же технологии отделением электронных и разведывательных систем ВМС компании Lockheed Martin, превышала 60 Вт на частоте 450 МГц [19]. Аналогичный транзистор, но с шириной затвора 14,4 мм позволил получить выходную мощность 27 Вт на частоте 3 ГГц.

Компанией Thales (Франция) разработан MESFET с выходной мощностью 57 Вт на частоте 1,5 ГГц. Транзистор был представлен на Симпозиуме по технологии широкозонных

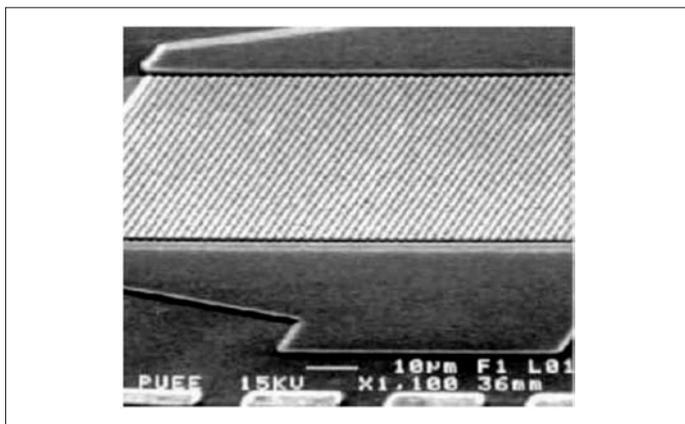


Рис.7. Фотография структуры SIT

полупроводников 2001 [20]. Там же компания Northrop Grumman сообщила о создании транзистора со статической индукцией (Static Induction Transistor, SIT) с выходной мощностью 770 Вт на частоте 1,3 ГГц.

SIT представляют собой класс более мощных транзисторов, рассчитанных на менее высокие частоты (рис.7). SIT с выходной мощностью 470 Вт на частоте 600 МГц и 38 Вт на частоте 3 ГГц были описаны еще в 1996 году [21]. Совершенствование этих транзисторов и улучшение их частотных свойств позволило создать SIT с $f_t = 7$ ГГц и удельной мощностью 3,2 Вт/мм, что оказалось сопоставимым с характеристиками лучших MESFET подобной мощности [22]. Расстояние между затворными канавками составило 0,5 мкм, размер канавок – 0,5 мкм, а полная ширина канала – 10 мкм (100 "пальцев"). Максимальное напряжение стока 250 В, ток стока в открытом состоянии (напряжение на затворе $U_g=0$) 80 мА/мм, т.е. 800 мА.

Созданные к 2002 году 4H-SiC SIT и MESFET транзисторы продемонстрировали следующие, весьма впечатляющие результаты [23]:

- SIT с импульсной мощностью 900 Вт и КПД = 78% на частоте 425 МГц;
- MESFET S-диапазона с КПД = 36% и удельной мощностью 5,6 Вт/мм;
- опытный образец MESFET X-диапазона с удельной мощностью 4,3 Вт/мм [24].

Главный недостаток MESFET и SIT – большой ток утечки затвора, но благодаря их высокой технологичности они по праву привлекают внимание разработчиков всего мира.

Другой интересный класс мощных высокочастотных приборов на основе карбида кремния – биполярные транзисторы (Bipolar Junction Transistor, BJT). В 2005 году был разработан первый СВЧ-транзистор этого класса с $f_T/f_{\text{макс}} = 7/5,2$ ГГц, выполненный на полуизолирующей 4H-SiC-подложке [25]. Эмиттер состоял из четырех "пальцев" шириной 3 мкм и длиной 15 мкм. При напряжении коллектор-эмиттер 20 В (пробивное напряжение более 100 В) максимальное усиление составило 12,4 дБ на частоте 1 ГГц и 18,6 дБ на частоте 500 МГц. В том же году на SiC BJT был создан усилитель с выходной

мощностью 2100 Вт на частоте 450 МГц [26]. Группой мощных изделий компании Microsemi (ранее Advanced Power Technologies) изготовлен усилитель класса А на BJT с выходной мощностью 215 Вт на частоте 450 МГц. Граничная частота его $f_t = 2,4$ ГГц, а удельная мощность – 4,13 Вт/мм [27].

Пока не упоминались транзисторы с изолированным затвором, хотя они гораздо лучше показали себя в области менее высоких частот и больших мощностей.

Силовые транзисторы

Еще в 1975 году фирма Hitachi представила высоковольтный SIT с пробивным напряжением 2000 В и максимальным током стока 5 А. [28]. Транзистор состоял из 4486 элементарных ячеек размером 10 мкм и занимал площадь 2,5x2,5 мм. В 2002 году специалисты компании Kansai Electric Power (Япония) сообщили о разработке 5,3-кВ JFET с током стока 3,3 А [23]. Большой объем работ в этом направлении ведут Исследовательский центр SiCLAB (Rutgers University) и компания United Silicon Carbide. К их наиболее интересным разработкам относятся [29]:

- VJFET (Vertical Junction Field Effect Transistor) – полевой транзистор с затвором на основе *p-n*-перехода с максимально допустимым напряжением на стоке 1200 В и током стока 10 А, удельное сопротивление во включенном состоянии не превышает 4 мОм·см²;
- MOSFET с максимально допустимым напряжением на стоке 2400 В и током стока 5 А, удельное сопротивление во включенном состоянии 13,5 мОм·см²;
- BJT с максимально допустимым напряжением коллектор-эмиттер 1800 В и током коллектора 10 А, удельное сопротивление во включенном состоянии 4,7 мОм·см².

Ну и, конечно, нельзя обойти вниманием приборы компании Cree. К ним относится тиристор с пробивным напряжением 5200 В, прямым током 300 А и током утечки менее 100 мкА. Испытаны опытные образцы 1200-В/50-А и 600-В/100-А диодов с барьером Шоттки и размером рабочей области 5,6x5,6 мм. Ток стока нового 1200-В SiC MOSFET компании Cree с рабочей площадью 3,8x3,8 мм составляет 10 А, а $R_{DS(ON)} = 0,1$ Ом при температуре 150°C. Ток коллектора BJT размером 3x3 мм с напряжением коллектор-эмиттер 1700 В и напряжением насыщения 1 В составляет 20 А. Размер рабочей области 4H-SiC *p-i-n*-диода с импульсной мощностью ~3 МВт (средний ток 20 А, максимальный импульсный ток более 300 А, ток утечки 300 мкА) и обратным напряжением более 9 кВ – 8,5x8,5 мм. Параметры корпусированного *p-i-n*-диода – 10 кВ, 20 А [30]. По-видимому, приведенных данных пока достаточно для оценки современного состояния разработок силовых приборов на основе карбида кремния.

Но в конце раздела хотелось бы развеять одно устойчивое заблуждение о запредельной стоимости производства



Таблица 3. Оценка стоимости СВЧ-транзисторов на базе различных материалов (по данным компании M/A-COM за 2003 год)

Технология	Размер, мм	Частота, ГГц	Напряжение стока, В	Усиление, дБ	Выходная мощность, дБмВт	Удельная стоимость, долл./Вт
GaAs MESFET	0,63	14	10	8	27	0,07
GaAs PHEMT	0,8	10	9	11	28	0,13
Si LDMOS	3	2	26	16,8	32,8	0,02
SiC MESFET	0,25	3,5	50	11,1	31,1	0,05
HV GaAs MESFET	0,48	3	25	12	29,4	0,03
HV GaAs PHEMT	0,3	1,9	12	22,8	27,8	0,05

SiC-приборов. Как показали расчеты компании M/A-COM [31], крупного изготовителя полупроводниковых приборов радиочастотного, микроволнового и миллиметрового диапазонов, по себестоимости СВЧ-транзисторы на карбиде кремния не уступают приборам на других полупроводниковых материалах (табл.3). К тому же, себестоимость производства SiC-приборов постоянно снижается.

ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ ПОДЛОЖКИ

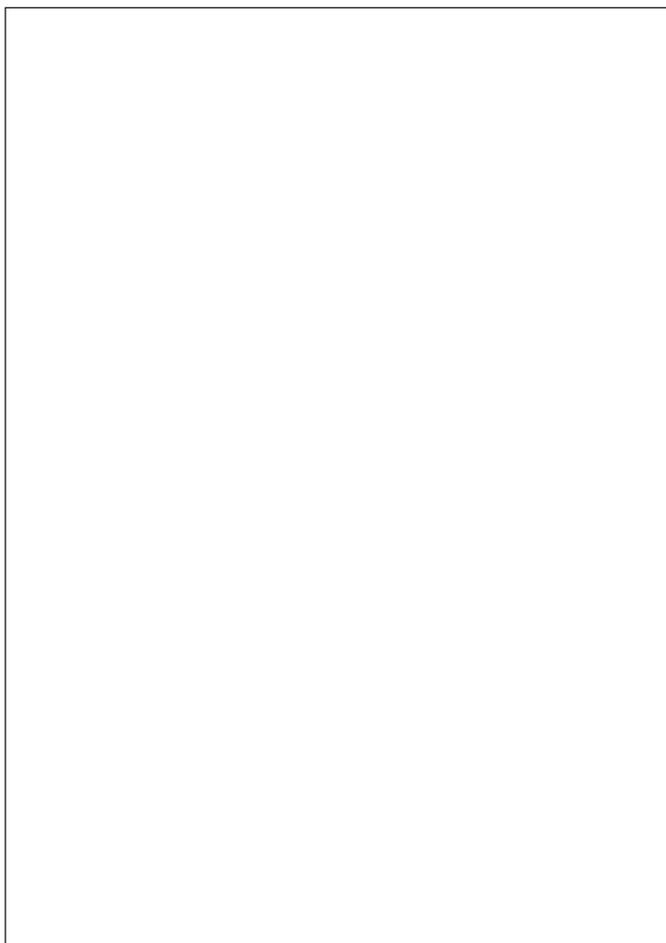
Успехи в области как СВЧ-, так и силовой электроники невозможны без высококачественных теплопроводящих подложек. Карбид кремния и здесь не ударил в грязь лицом. Хотя по уровню теплопроводности разнообразные керамики на основе карбида кремния и композиционный материал AlSiC на металлической матрице уступают моно- или поликристаллическому карбиду кремния, они практически не имеют конкурентов и широко используются в силовой электронике и гибридных модулях, работающих в жестких условиях. Пожалуй, только керамика на основе нитрида алюминия (AlN), обладающая меньшей теплопроводностью, но высоким электрическим сопротивлением и часто используемая в сочетании с SiC или AlSiC, может считаться их конкурентом или, скорее, партнером. Подложки на основе оксида бериллия (BeO), хотя обладают отличными теплопроводящими свойствами, и высоким электрическим сопротивлением, дороги и весьма токсичны. Незаменимыми они пока являются при изготовлении СВЧ-транзисторов, так как их потери на высоких частотах очень низки. Но и здесь, при производстве приборов на основе SiC, намечается более изящное решение. Если транзистор или диод имеют планарную конструкцию, тончайшая пленка AlN, выращенная на обратной стороне SiC-подложки, благодаря высокому пробивному напряжению обеспечивает надежную изоляцию, практически не препятствуя отводу тепла. Работа SiC-полупроводниковых приборов при температуре более 200–250°C даже на подложках из BeO невозможна из-за значительной разницы в коэффициенте линейного расширения, а, скажем, Toyota планирует применять силовую электронику в гибридных автомобилях при температуре 300–500°C.

ЧТО ДАЛЬШЕ?

За последние 10–15 лет размеры коммерческих SiC-подложек увеличились более чем в десять раз, а плотность их дефектов уменьшилась на три порядка. С каждым годом улучшаются параметры SiC-приборов и растет число компаний, занимающихся их разработкой. Похоже, что в истории развития SiC-электроники больше не будет периодов забвения. Исследования карбида кремния все больше переходят из университетских лабораторий в лаборатории промышленных компаний. Согласно прогнозам компании Cree, в 2007 году появятся изделия со следующими параметрами [30]:

Тип прибора	Параметры
Диоды Шоттки, <i>p-i-n</i> -диоды и VJT	1200 В, 150 А
MOSFET	1200 В, 75 А
SiC силовые модули	1200 В, 600 А

Не исключено, что SiC еще раз скажет свое слово и в физике полупроводников. Образование SF обычно рассматривается как отрицательное явление. В то же время было показано, что SF толщиной порядка нескольких постоянных решеток являются квантовой ямой 3C-SiC внутри более широкого зонного *nH-SiC*. Такая структура зон приводит к размерному квантованию, фактически превращающему прослойку 3C-SiC в прямозонный полупроводник, в результате чего на-



блюдается интенсивная фотолюминесценция в синей области спектра. Таким образом, на основе карбида кремния возможно создание гетеропереходов нового типа – не между различными материалами, а между различными кристаллическими модификациями одного того же материала. Это расширяет понятие гетероперехода и открывает дополнительные технологические возможности. Чаще всего и наиболее успешно проводятся эксперименты по созданию гетероструктур между кубическим и одним из гексагональных (пН-SiC) политипов карбида кремния. Такие гетероструктуры формируются путем эпитаксиального выращивания на подложке карбида кремния гексагонального политипа слоя 3C-SiC. Чтобы представить, как происходит встраивание кубической решетки в гексагональную, нужно посмотреть сверху на кубик, стоящий на одной из своих вершин. Проекция такого кубика на горизонтальную плоскость имеет форму шестиугольника. При этом растущая пленка 3C-SiC будет иметь другую кристаллическую ориентацию, чем подложка пН-SiC: если подложка имела ориентацию (0001), то выращенный эпитаксиальный слой будет иметь ориентацию (111). Эти кристаллографические особенности эпитаксии пленок 3C-SiC на подложках пН-SiC приводят к так называемому "псевдоморфному росту" (pseudomorphic growth), т.е. в плоскости роста постоянные решетки кубического и гексагональных политипов практически совпадают (рассогласование решеток не превышает 0,1% – меньше, чем для классической гетеропары GaAs/AlGaAs). Это свидетельствует о теоретической возможности получения близких к идеальным гетероструктур на базе политипов SiC.

По-видимому, гетерополитипные переходы на основе SiC (и, возможно, других политипных полупроводников) будут иметь следующие преимущества перед традиционными гетеропереходами [32]:

- отсутствие взаимной диффузии компонент гетеропар;
- незначительное рассогласование постоянных решетки (квазиаморфный рост);
- одинаковые химические свойства;
- возможность создания гетероперехода в уже выращенной структуре (stalking faults).

Таким образом, можно ожидать, что структурное совершенство гетерополитипных структур будет выше, чем у гетеропереходов, образуемых полупроводниковыми материалами различной химической природы. Меньшая плотность структурных дефектов должна привести к большей подвижности двумерного электронного газа и большей вероятности излучательной рекомбинации в приборах на основе гетерополитипных структур. Приведенный в литературе анализ говорит о возможности создания на основе гетеропереходов между политипами SiC-структур, излучающих в сине-зеленой области спектра. Теоретические оценки показывают, что и HEMT на основе SiC-гетерополитипных структур по своим

характеристикам будут превосходить HEMT на основе GaN/AlGaIn. Именно SiC-HEMT позволят значительно улучшить частотные свойства СВЧ-транзисторов, а высокая теплопроводность SiC обеспечит эффективный отвод тепла из микроскопически малых рабочих зон, что необходимо для создания мощных СВЧ-транзисторов.

Карбид кремния выделяется среди других политипных соединений как наличием большого числа стабильных политипов и большой разницей в их электрофизических свойствах, так и высокой термической, химической и радиационной стойкостью. Поэтому после отработки технологии роста SiC гетерополитипных структур приборы на их основе смогут составить серьезную конкуренцию приборам на основе соединений элементов АIII-N. Таким образом, можно предположить, что создание приборов на основе гетеропереходов станет одним из наиболее актуальных направлений развития SiC-электроники ближайшего будущего.

Правда, нельзя забывать о нависшем дамокловом мече алмаза. Но пока приборы на основе алмаза по своим параметрами находятся на уровне SiC-приборов 60-х годов прошлого века. При этом в технологии алмаза существует ряд нерешенных проблем, которых не было в технологии SiC. Поэтому можно ожидать, что к середине нашего столетия вся силовая полупроводниковая электроника (а может быть, и не только она) окажется под сенью SiC.

ЧТО В РОССИИ?

В конце 80-х годов СССР занимал ведущие позиции по исследованию карбида кремния и приборов на его основе. К сожалению, недостаточное финансирование этих работ в последующее десятилетие привело к утрате Россией лидерства в этой области. Тем не менее, до сих пор российским ученым удается проводить исследования, соответствующие лучшим мировым стандартам. Так, в 2001 году во ФТИ РАН совместно с АОЗТ "Светлана" впервые в мире на основе SiC был создан лавинно-пролетный диод (ЛПД) с однопролетной p^+-n-n^+ -структурой [33]. Лавинный пробой начинался при напряжении 300 В. При импульсном лавинном токе 2 А сопротивление диодов, обусловленное лавинным сопротивлением структуры, было равно 6 Ом. Излучение мощностью 300 мВт было зарегистрировано на частоте 10 ГГц при длительности импульса 40 нс и токе питания 0,35 А. Тем же коллективом были изготовлены экспериментальные образцы SiC $p-i-n$ -диодов с входной импульсной мощностью 1–2 кВт в 3-см диапазоне [34].

В ФТИ РАН также был проведен цикл работ по исследованию гетероэпитаксиальных структур, образуемых политипами SiC [32,35]. Экспериментальные результаты подтвердили образование 3C-6H SiC $p-n$ -гетероперехода с достаточно хорошим структурным совершенством [35]. Определенные значения разрыва зон $\Delta E_c = 0,55$ эВ; $\Delta E_v = 0-0,05$ эВ хоро-



шо согласовались с теоретическими расчетами и экспериментальными значениями для сродства электронов в 6H- и 3C-SiC. Такая структура зон показала принципиальную возможность создания HEMT на основе гетероперехода 3C-6H-SiC.

Исследования также показали, что радиационная стойкость SiC-датчиков, по крайней мере, не уступает кремниевым. Это объясняется тем, что значения времени жизни носителей заряда в облученных карбиде кремния и кремнии примерно равны [36]. Низкая скорость термической ионизации с R-центра в SiC, по сравнению с E-центром в Si, должна обеспечить лучшие шумовые характеристики SiC-детекторов.

На базе Санкт-Петербургского Государственного электротехнического университета – родине используемого во всем мире метода объемного роста SiC – освоено экспериментальный выпуск 6H- и 4H-SiC подложек диаметром 2–3" (50–75 мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возвращаясь к упомянутому в начале статьи прозвищу SiC, хочется сделать упор на слове "вечно". Действительно, SiC – один из наиболее старых полупроводниковых материалов, на котором были сделаны важнейшие для физики полупроводников открытия. Но он и один из тех, которые имеют большие перспективы в будущем. Рассматривая современ-

ный уровень развития SiC-электроники, можно сказать, что это направление уже "выросло" в достаточно могучее древо и приносит плоды. А в будущем можно ожидать более обильного урожая. Благодаря дружественной конкуренции с полупроводниковыми соединениями A³B⁵ почти прекратились разработки SiC оптоэлектронных устройств, не ясны и перспективы развития некоторых SiC СВЧ-приборов. Однако разработка технологии гетерополитипных структур должна изменить эти тенденции и, возможно, возродить работы по созданию оптоэлектронных SiC-приборов. В статье рассмотрены физические возможности карбида кремния и современное производство приборов на его основе, т.е. начало и конец пути. Не упомянуты значительное число самых разнообразных полупроводниковых изделий на основе карбида кремния, таких как:

- туннельные диоды;
- высоковольтные оптические переключатели;
- светодиоды с яркостью до 10000 Кд/м², работающие при температуре от 77 до 600К;
- разнообразные датчики (газов, органических веществ, радиации; температуры, давления и т. п.), работающие в самых неблагоприятных условиях;
- маломощные транзисторы и стабилитроны для работы в неблагоприятных условиях;
- ячейки оперативной памяти и логические микросхемы;

- микроэлектромеханические устройства (МЭМС) и переключатели для СВЧ-антенн и многое, многое другое.

Не рассмотрены теоретические исследования и математическое моделирование. Не обсуждались особенности оборудования, необходимого для производства SiC-структур, различные конструкции и технологии производства приборов на основе SiC. В статье не упомянуты проблемы, стоящие перед разработчиками устройств на основе карбида кремния, и возможные пути их решения. Не освещены громадные преимущества SiC-приборов по массогабаритным характеристикам, радиационной и термостойкости, вопросы создания устройств, способных длительно работать при очень высоких температурах (400–600°C). Сделать все это в одной статье невозможно. Авторы хотели лишь привлечь внимание к этой проблеме. Переговоры на промышленных выставках с разработчиками аппаратуры и полупроводниковых приборов показали, как это ни удивительно, практически полное отсутствие объективной информации по этой теме. Доходило до того, что, даже увидев образцы, специалисты отказывались верить в то, что это приборы на основе карбида кремния. А ведь при наличии высококачественных подложек и при желании предприятий-изготовителей полупроводниковых приборов, частично располагающих необходимым оборудованием, уже сегодня отечественная промышленность могла бы выпускать пусть не такие совершенные, как рассмотренные здесь, но вполне приемлемые приборы. Например, SIT с напряжением на стоке 60 В и током 300–500 мА, MESFET с током стока 100–150 мА, маломощные JFET транзисторы с током стока 30–50 мА, работоспособные при температурах до 400–500°C. Возможно, применение нанотехнологий для покрытия автодорог, как предлагалось кем-то из властей держащих, и хорошее дело, дорог-то много, но отставание в области электроники в наше время совершенно недопустимо. Если затронутые проблемы вызывают интерес читательской аудитории, авторы с удовольствием вернутся к продолжению, а если интерес проявят отечественные производители и потребители электроники – милости просим к сотрудничеству.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.G.Acheson. – Chemical.News, 1893, N68, p.179.
2. N.J.Round. – Electrical World, 1907, N30, p.309.
3. О.В.Лосев. – ЖТФ, 1931, N1, с.718.
4. Остроумов А.Г., Рогачев А.А. О.В.Лосев – пионер полупроводниковой электроники. – Сб. ФИЗИКА. Проблемы, история, люди. – Ленинград: Наука, 1986, с. 183–215.
5. J.A.Lely. Ber.Dt.Keram. – Ges, 1955, v.32, p.229.
6. Yu.A.Vodakov, E.N.Mokhov, M.G.Ramm, A.O.Raenkov. – Krist and Technic, 1979, N14, p.729.
7. Yu.M.Tairov, V.F.Tsvetkov. – J.Cryst.Growth, 1978, v.43, p.209.

8. S.Nishino, J.Powel, N.A. Will. – Appl.Phys.Lett, v.42, 1983, p.460.
9. M. Willander, M. Friesel, Qamar-UL Wahab, B. Straumal. Silicon carbide and diamond for high temperature device applications. – J. of Materials Science: Materials in Electronics, 2006, v.17, p.1– 25.
10. Daisuke Nakamura, Itaru Gunjishima, Satoshi Yamaguchi et al. Ultrahigh-quality Silicon Carbide Single Crystals. – R&D Review of Toyota, CRDL, v.41, N2.
11. Wicht Technologie Consulting – PRESS RELEASE. Silicon Carbide Electronics Markets 2004–2009: New Horizons for Power Electronics. – PRESS RELEASE – Wicht Technologie Consulting.
12. Leo Casey. High Power Silicon Carbide Inverter Design – 100kW Grid Connect Building Blocks. – Boston, Massachusetts, Bogdan Borowy (SatCon Technology Corp.) – Boston, Massachusetts Gregg Davis – Marlboro, Massachusetts Electrical Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT), 2005.
13. Herbert Zirath. Design and fabrication of SiC microwave diodes and field-effect transistors, with applications. European Space Research and Technology Centre (ESTEC). – In: Wide Bandgap Technology Meeting 2001.
14. N.Rorsman, P. A. Nilsson, J. Eriksson, K. Andersson, H. Zirath. Investigation of the Scalability of 4H-SiC MESFETs for High-Frequency Applications. – Chalmers University of Technology, Microwave Electronics Laboratory SE-412 96 Goteborg.
15. Ho-Young, Thomas, Christopher I et. al. Channel Recessed 4H-SiC MESFETs with F_t of 14.5GHz and F_{max} of 40 GHz. – In: Conference on High Performance Devices at University of Delaware, Newark, Delaware, August 6–8, 2002.
16. Ho-Young Cha, Christopher I. Thomas et al. The Effect of Channel Recess and Passivation on 4H-SiC MESFETs. – In: Fall MRS Conference, Boston, MA, Dec., 2002.
17. Hoon Joo Na, Sang Yong Jung, Myung Yoon Um et al. 4H-SiC Planar MESFETs with F_{max} of 40 GHz without Trapping Effect. – School of Materials Science and Engineering, Seoul National University. Electrochem. Soc. Proc., PV2004–6.
18. Hoon Joo Na, Jeong Hyun Moon, Jeong Hyuk Yim et al. Fabrication and characterization of 4H-SiC planar MESFETs. – Microelectronic Engineering, 2006, v.83, p.160–164.
19. Zhang, A.P., Rowland, L.B., Kaminsky et al. Microwave Power SiC MESFETs and GaN HEMTs. – In: Conference on High Performance Devices at University of Delaware, Newark, Delaware, Aug. 6–8, 2002.
20. SiC Activities in France. Wide Bandgap seminar. Thales. October 2001. European Space Research and Technology



Centre (ESTEC).– Wide Bandgap Technology Meeting, 2001.

21. **C. Clarke, A.K. Agarwal, R.R. Siergiej** et al. The Mixed Mode 4H-SiC SIT as an S-Band Microwave Power Transistor.-In: Device Research Conference Digest, p.62–63, Santa Barbara, CA, June, 1996.

22. **J.P. Henning, A. Prasadka, M.R. Melloch** and **J.A. Cooper, Jr.** Design and Demonstration of C-Band Static Induction Transistors in 4H Silicon Carbide.– School of Electr. & Comput. Eng., Purdue Univ. –In: IEEE Device Research Conference, Santa Barbara, CA, June 28–30, 1999.

23. **Asano, K., Sugawara, Y., Hayashi, T** et al. 5 kV 4H-SiC SEJFET with Low RonS of 69m/spl Omega/cm/sup 2.-In: Power Semiconductor Devices and ICs, 2002.

24. **Clarke, R.C., Palmour, J.W.** SiC microwave power technologies.– IEEE, 2002, v. 90, Issue 6, p. 987–992.

25. **Feng Zhao, Ivan Perez-Wurfl, Chih-Fang Huang** et al. First Demonstration of 4H-SiC RF Bipolar Junction Transistors on a Semi-insulating Substrate with Ft/Fmax of 7/5.2 GHz.– In: IEEE MTT-S 2005 International Microwave Symposium (IMS).

26. **Agarwal, A. Haley, J. Bartlowet** et al. 2100 W at 425 MHz with SiC RF power BJTs.– In: Device Research Conference Digest, 2005. DRC 2005. 63rd.

27. **F. Zhao, I. Perez-Wurfl, J. Torvik, B. Van Zeghbroeck.** UHF and L-band 4H-SiC RF Bipolar Transistors.– In: 2006 National Radio Science Meeting.

28. **J. Nishizawa** et al. Field-effect Transistor versus Analog Transistor (Static Induction Transistor).– IEEE Trans. on Electron Devices, 1975, v.ED-22, pp. 185–197,.

29. **Jian H. Zhao.** Development of SiC Power Switches.– In: 1st Annual Ground-Automotive Power and Energy Symposium. 2005, July 22.

30. **Anant Agarwal.** Progress in SiC Materials and Devices.– In: 1st Annual Ground -Automotive Power & Energy Symposium Hilton, Detroit/Troy, 2005, July 20–22.

31. **D. Miller, M. Drinkwine.** High Voltage Microwave Devices: An Overview.– In: International Conference on Compound Semiconductor Mtg., 2003.

32. **A.A. Lebedev.** Semicond.Sci.Technol, 2006, v.21, R17–R34.

33. **K. Vassilevski, K. Zekentes, A. Zorenko, L. Romanov.**– IEEE EDL, 2000, v.21, p.485.

34. **К.В.Василювский, П.Б.Гамулецкая, А.В.Кириллов** и др.– ФТП, 2004, т.38, вып.2, с.242.

35. **A.A.Lebedev, A.M.Strelchuk, D.V.Davydov** et al. – Appl.Surface Science, 20016 v.184 (1–4) p.419.

36. **А.А.Лебедев, А.М.Иванов, Н.Б.Строкан.**– ФТП, 2004, т.34, вып.2., с.29.