

Вечнозеленый полупроводник

Доктор
физико-математических наук
А.А.Лебедев

О чем эта статья

Промышленный интерес к полупроводникам возник после обнаружения В.Шокли с сотрудниками в 1949 году транзисторного эффекта на кристаллах германия (Ge). В первой половине 50-х годов начались поиски полупроводниковых материалов, способных работать при более высоких температурах, чем Ge. Взоры исследователей обратились к кремнию и карбиду кремния (SiC). В последующие 10–15 лет было выполнено много 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 технологии Si и GaAs по сравнению с SiC были слишком велики. Тогда же родилось прозвище SiC, вынесенное в заголовок данной статьи. Дело в том, что чем грязнее SiC, тем больше в нем примеси азота, тем более зеленым он выглядит. Чистые кристаллы SiC (благодаря ширине запрещенной зоны > 3 эВ) бесцветны.

Немного истории

Вначале карбид кремния носил другое имя. Первые кристаллы SiC обнаружил Генри Муассан (тот самый, который в 1886 году открыл фтор) при исследовании метеоритов в каньоне Дьявола (Diablo Canyon) в Аризонской пустыне. В 1905 году минералу было присвоено имя открывателя — «муассанит». Примерно в это же время Эдвард Ачесон запатентовал промышленный метод получения SiC. Выра-

щенные этим методом кристаллы содержали много примесей (до 10^{21} см $^{-3}$) и имели небольшие размеры — 10 мм на 10 мм на 3 мм.

Тогда же было выяснено, что одного материала под названием «карбид кремния» не существует, а существует целый класс материалов, имеющих одинаковую химическую природу, но отличающихся по электрофизическим параметрам. Оказалось, что образцы SiC могут иметь различную кристаллическую структуру — кубическую (3C-SiC), гексагональную (2H-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC и др. — nH-SiC), ромбоэдрическую (15 R, 21 R и др.) (рис. 1). Карбид кремния относится к наиболее ярким представителям политипных соединений. Собственно, термин «политипизм» был специально введен для карборунда. В настоящее время известно около 200 кристаллических модификаций SiC. Первые выращенные кристаллы SiC часто представляли собой сростки кристаллов различных политипов.

При исследовании образцов SiC Х.Раунд в 1907 году наблюдал свечение, связанное с прохождением электрического тока через кристалл. Более подробно электролюминесценцию карбида кремния исследовал О.В.Лосев в 1923–1940 годах. Он установил, что один из типов свечения связан с наличием особого «активного слоя» на поверхности кристалла, а позднее показал, что этот слой имеет электронную проводимость, а объем образца — дырочную. Лосев также установил существование связи между выпрямлением и электролюминесценцией. Кроме того, Лосев наблюдал изменение

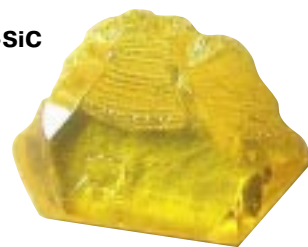
цвета свечения при увеличении плотности тока через кристалл.

Таким образом, два важнейших для полупроводниковой электроники явления — электролюминесценция и выпрямительные свойства рп-структур — были впервые обнаружены на кристаллах SiC. Но в то время электронная промышленность использовала только электровакуумные лампы, и эти открытия остались незамеченными.

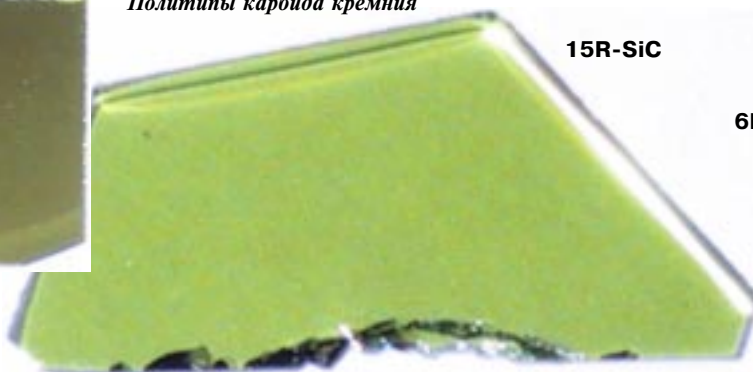
Тогда (да и по сей день) механические свойства SiC нашли применение в абразивной промышленности. Карбид кремния — одно из самых твердых веществ. Его твердость составляет 9,2–9,3 по шкале Мосса, он уступает лишь алмазу и нитриду бора (BN). Всем известная наждачная бумага покрыта именно кристаллами SiC. Да и Лосев исследовал кристаллы SiC, выращенные на абразивном заводе «Ильич» в Ленинграде для изготовления шлифовального порошка.

Как уже отмечалось выше, интерес к карбиду кремния усилился в начале 50-х годов. Примерно в это же время Дж.Лели предложил новый метод выращивания кристаллов SiC. Рост монокристаллов происходил сублимационным путем — в результате перегонки SiC через паровую фазу из более горячих в более холодные области реактора. Этим методом удавалось

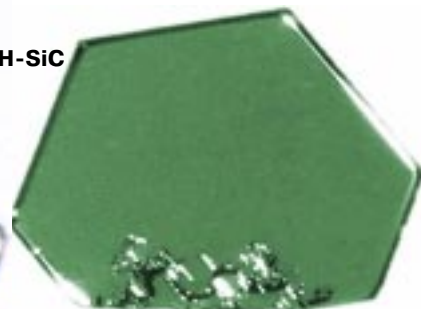
3C-SiC



15R-SiC



6H-SiC



4H-SiC



1
Политипы карбида кремния

получать политипно-однородные кристаллы очень хорошего структурного совершенства размером до нескольких сантиметров, имеющие неправильную шестиугольную форму.

Было установлено, что карбид кремния представляет собой полупроводник с непрямой зонной структурой. Это означает, что вероятность излучательной рекомбинации в нем невелика. Эффективность (квантовый выход) SiC-светодиодов будет на три-четыре порядка меньше, чем в прямозонных полупроводниках. При этом ширина запрещенной зоны зависит от политипа и изменяется от 2,39 эВ для 3C-SiC до 3,3 эВ для 2H-SiC. Были определены многие оптические и электрические параметры данного материала.

Работавшие тогда с карбидом кремния технологи, наверное, не раз помнили того, чьим именем был назван каньон, в котором Г.Муссан нашел первые кристаллы SiC. Известно, что недостатки часто бывают оборотной стороной достоинств. Это оказалось справедливым и для SiC. Большая энергия связи атомов в SiC приводила к высоким температурам роста (> 2000°C), химическая инертность и механическая стойкость — к сложностям в обработке выращенных кристаллов. Из химических травителей SiC поддается только расплаву KOH, и то очень плохо. В результате параметры получаемых приборов были далеки от теоретических ожиданий, и полупроводниковая промышленность потеряла к SiC интерес. В 70-е — начале 80-х годов изучением свойств SiC занималось всего несколько исследовательских групп, и большая их часть находилась в СССР.

В 1970 году Ю.А.Водаков и Е.И.Мохов для выращивания эпитаксиальных слоев SiC предложили сублимационный сэндвич-метод — слои на подложке росли при ее сближении с источником паров. Этим методом удавалось

управляемо получать эпитаксиальные слои SiC как n-, так и p-типа проводимости, то есть SiC pn-структуры.

В конце 70-х годов Ю.М.Таиров и В.Ф.Цветков также предложили метод выращивания объемных кристаллов SiC — модифицированный метод Лели. Пары конденсировались на монокристаллической подложке при температурах около 2000°C. Диаметр выращиваемого слитка и его политипная структура определялись параметрами исходной заправки, а его длина — временем процесса.

На основе данных технологий и их модификаций во ФТИ им. А.Ф.Иоффе в лабораториях Ю.А.Водакова и В.Е.Челнокова к середине 80-х годов было разработано несколько SiC полупроводниковых устройств и проведен широкий круг исследований электрофизических свойств карбида кремния (рис. 2). Выяснилось, что добавление некоторых примесей либо изменение соотношения Si/C в зоне роста может привести к тому, что политип растущего эпитаксиального слоя будет иным, чем у подложки.

Окончательно интерес к карбиду кремния как к перспективному материалу для полупроводниковой электроники вернулся после того, как С.Нишино разработал метод газотранспортной (CVD) эпитаксии пленок 3C-SiC на кремниевых подложках. Сочетание стандартного технологического оборудования и подложки большой площади открывало возможности для коммерческого использования полученных результатов. Вскоре на основе подобных пленок были созданы несколько типов полевых транзисторов. Однако параметры этих приборов, как и качество самих пленок, оставались невысокими. До сих пор не удалось получить на основе Si эпитаксиальные пленки SiC полупроводникового качества. Обычно такие пленки используют для мембран или тензодатчиков. Кроме того, 3C-SiC — самый узкозонный из политипов карбида кремния, и с точки зрения максимальных рабочих температур он незначительно превосходит GaP. Поэтому вскоре были отработаны режимы CVD роста пленок 6H-SiC на основе подложек 6H-SiC.

Использование технологической комбинации: «модифицированный ме-

2
Установка сублимационной эпитаксии в вакууме эпитаксиальных пленок SiC (вариант сэндвич — метода). Слева — установка подготовлена к процессу. Справа — в процессе эпитаксии. Видно, как светится ростовой графитовый тигль под действием нагрева высокочастотного генератора



ВЕЩИ И ВЕЩЕСТВА

тод Лели (подложка) — CVD-эпитаксия (эпитаксиальные слои) — плазмохимическое травление (формирование меза-структур)» — позволило получить светодиоды синей области спектра, фотоприемники ультрафиолетового диапазона, выпрямительные диоды, полевые транзисторы, биполярные транзисторы, тиристоры. В 1993 году в США была создана первая интегральная схема на SiC.

К сожалению, в 90-е годы работы российских ученых и созданный ими в области физики SiC научный потенциал оказались востребованными главным образом в западных фирмах и университетах. Уехавшие из СССР ученые стали «центрами кристаллизации», вокруг которых росли фирмы и исследовательские группы в западноевропейских странах и США. В компании «CREE Inc.» (США) — это мировой лидер в производстве и разработке приборов на основе карбида кремния — в начале девяностых годов почти половина научных сотрудников были выходцы из СССР.

SiC — чем он хорош?

Что же привлекало интерес исследователей к этому материалу на протяжении почти 100 лет, задолго до того, как удалось сделать на его основе приборы с более-менее приемлемыми характеристиками?

Во-первых, это большая по сравнению с Si и GaAs ширина запрещенной зоны. Иными словами — увеличение области рабочих температур, теоретически до -1000°C и возможность создания светоизлучающих приборов для всего диапазона видимого света.

Во-вторых, на порядок большее значение поля пробоя в SiC по сравнению с кремнием означает, что при том же напряжении пробоя диод из SiC может иметь на два порядка сильнее легированную базу, чем диод на основе Si. Это приводит к меньшим последовательным сопротивлениям и в итоге к большей удельной мощности карбидкремниевых приборов. Это же служит причиной большой радиационной стойкости SiC.

В-третьих, теплопроводность, почти такая же высокая, как у меди, упрощает проблему теплоотвода, что в сочетании с высокими рабочими температурами и большими скоростями насыщения носителей (большие токи насыщения полевых транзисторов) очень важно для силовой электроники.

В-четвертых, высокая температура Дебая, которая характеризует термическую стабильность вещества. При превышении этой температуры колебания могут стать неупругими, что приводит к разрушению данного материала.

В-пятых, это наличие собственной подложки большого размера. Так же как и возможность получения SiC n- и p-типа проводимости и наличие собственного окисла (SiO_2), это удобно для технологии и позволяет произво-

дить на основе SiC любые типы полупроводниковых приборов.

Сравним SiC с другими широкозонными материалами. По ряду параметров SiC уступает GaN и AlN. Например, у него низка вероятность излучательной рекомбинации (как в непрямоугольном полупроводнике). Однако у GaN и AlN нет собственных подложек, и их выращивают путем гетероэпитаксии — на подложках из других материалов (SiC, сапфир). Это приводит к очень высокой плотности дислокаций в пленках ($> 10^7 \text{ см}^{-2}$). Дислокации в GaN расположены перпендикулярно поверхности растущего слоя и собираются в кластеры. В результате растущий слой имеет ячеистую (зернистую) структуру, а это увеличивает токи утечки p-n-структур и со временем вызывает их деградацию.

В целом SiC — по сравнению с GaN и другими нитридами (III-N) — более перспективный материал для создания мощных приборов. Принципиально недостижимое (из-за высокой вероятности излучательной рекомбинации) большое время жизни носителей заряда в GaN ограничивает применение этого материала в биполярных приборах. В униполярных приборах низкая теплопроводность и меньшая температура Дебая снижают максимальную рассеиваемую мощность. Вдобавок отсутствие собственных подложек приводит к тому, что выращенные эпитаксиальные слои имеют на четыре порядка большую плотность дефектов, чем эпитаксиальные слои SiC. Это затрудняет создание высоковольтных

приборов на основе GaN. По остальным электрофизическим параметрам, таким, как скорость насыщения носителей, поле пробоя, подвижность, объемный GaN не имеет существенных преимуществ перед карбидом кремния.

Однако создание гетеропереходов в системе GaN-AlGaIn позволило получить структуры с двумерным электронным газом, обладающим существенно большей подвижностью носителей. Такие структуры могут быть использованы для создания высокочастотных транзисторов (high electron mobility transistor — HEMT), параметры которых лучше, чем у полевых транзисторов 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-AlGaIn были получены при росте на SiC-подложках.

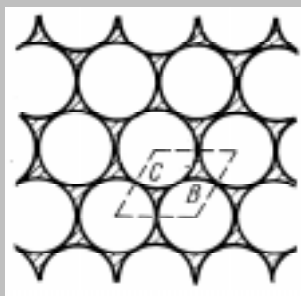
Вне конкуренции, как по своим параметрам, так и по величинам максимальных рабочих температур, находится алмаз. Однако пока не удается получать монокристаллические слои алмаза с использованием гетероэпитаксии, а собственные подложки имеют небольшую площадь и дороги. Кроме того, для алмаза существуют определенные сложности с получением рп-структур.

Что сделано

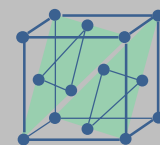
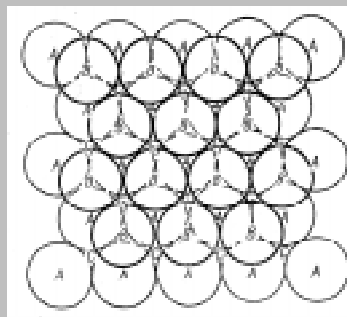
В настоящее время экспериментальный выпуск приборов на основе кар-

Плотные укладки

Политипные структуры можно представить так. Возьмем какую-нибудь кристаллическую решетку и представим ее не в виде элементарных ячеек, плотно заполняющих пространство, где в каждой ячейке атомы располагаются одним и тем же образом, а в виде укладки плотноупакованных плоскостей. Именно такие укладки и дают представление о политипах. Вот что сказано о системах плотноупакованных плоскостей в учебнике «Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия». М.: «Металлургия», 1982.



Плотнупакованный слой сфер и укладка двух слоев



Элементарная ячейка ГКЦ-решетки. Заштрихованы плотные плоскости (111)

Возможностей построить трехмерное периодически повторяющееся пространство из плотноупакованных сеток — бесконечное множество. На рисунке видно, что точки В и С равновозможны как места укладки второго плотноупакованного слоя на первый, но расстояние между серединами треугольной поры типов В и С меньше диаметра сферы, поэтому поры В и С одновременно заполнены быть не могут. Если второй плотноупакованный слой будет лежать в порах В, то для третьего слоя остаются свободными две возможности — быть уложенным в положение, идентичное положению А, или в положение С. В первом

случае возникает гексагональная плотная упаковка с последовательностью укладки АВАВАВАВ, во втором — кубическая с последовательностью АВСАВСАВС, если следующий за слоем С слой уложен в положении А. А если нет, то плотная укладка будет сложнее, например АВССАВА. Плотные упаковки классифицируют по числу структурно различных слоев в них и по симметрии. Существует только одна кубическая укладка АВСА — С3. Гексагональных больше: 2Н — АВА, 4Н — АВАВСА, 5Н — АВСАВА, 6Н — АВССАВА или АВАВАСА. Есть еще и тригональные (или ромбоэдрические) укладки, обозначаемые буквой R.

бида кремния, так же как и интенсивные исследовательские работы, проводят крупнейшие компании, специализирующиеся на производстве полупроводниковой техники: CREE (США), АВВ (Швеция), «Сименс» (Германия), «Хитачи» (Япония). Можно выделить несколько основных направлений.

Подложки

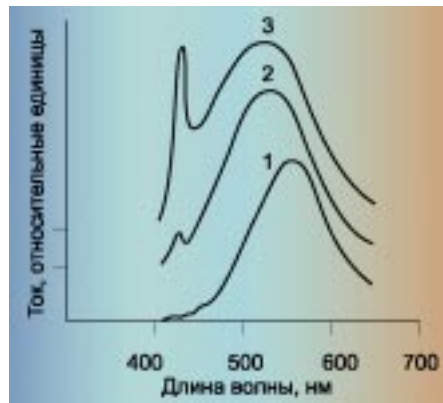
Сегодня самый востребованный на рынке продукт — подложки из карбида кремния. С каждым годом улучшается их качество и увеличивается диаметр — он уже достиг 100 мм. Эти подложки используются как для роста собственно карбида кремния, так и для гетероэпитаксии структур GaN—AlGaN. Хотя SiC дороже сапфира, но имеет меньшее рассогласование решетки с GaN и большую теплопроводность, чем сапфир. Уже разработана технология производства и полуизолирующих подложек, которые необходимы для изготовления высокочастотных полевых транзисторов.

Оптика

Первыми промышленно выпускаемыми приборами на основе SiC были светодиоды. Большая ширина запрещенной зоны SiC позволила получать на его основе светоизлучающие приборы практически на всю спектральную область видимого света. При этом один и тот же механизм излучательной рекомбинации (одна и та же технология изготовления светодиода) соответ-

ствует в различных политипах разным энергиям в максимуме излучения.

Зависимость спектрального положения максимума электролюминесценции от прямого тока, наблюдавшаяся в некоторых SiC рп-структурах, может быть объяснена суперпозицией нескольких независимых полос излучения, насыщенные которых происходит при различных плотностях прямого тока. Эта зависимость, обнаруженная еще О.Лосевым,



3
Спектр электролюминесценции 6H-SiC диода при различных плотностях прямого тока при комнатной температуре — (1) 4 А/см², (2) 40 А/см², (3) 120 А/см²

связана в том числе и с характерными для SiC примесями: донорным азотом — из воздуха, акцепторными бором и алюминием — из элементов оборудования. Если говорить о 6H-SiC, то примесь бора придавала его электролюминесценции желтый цвет, собственный структурный дефект — зеленый, донорно-акцепторные пары Al—N — синий и экситон — фиолетовый (рис. 3).

Когда качество и чистота материала увеличились, остался только синий пик люминесценции, на котором и делали светодиоды в 80-е годы. Конечно, этот синий свет был едва виден, но других материалов тогда не было, и в начале 90-х годов выпуск таких светодиодов в мире достигал миллиона штук. Экспериментальное производство таких светодиодов существовало и в СССР: его организовали совместно ФТИ АН (Ленинград) и ОКБ завода «Старт» (Москва).

После создания GaN рп-структур, а затем светодиодов и лазеров, нитрид галлия и твердые растворы на его основе оказались вне конкуренции для создания оптоэлектронных устройств из широкозонных материалов.

Единственный прибор в этом классе, для которого используют карбид кремния, — это солнечные-слепые ультрафиолетовые детекторы. Из-за большой ширины запрещенной зоны SiC почти не имеет фоточувствительности в видимой области спектра.



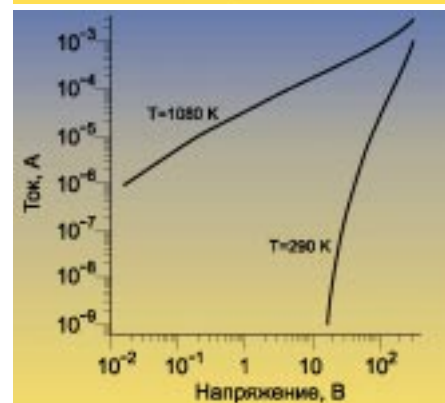
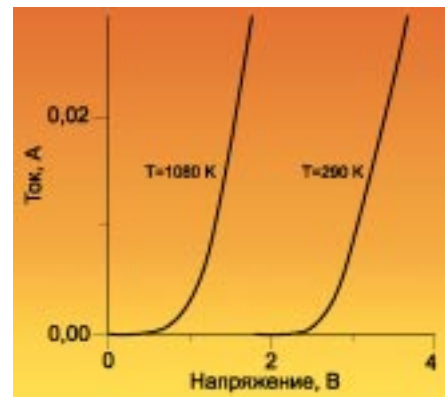
ВЕЩИ И ВЕЩЕСТВА

Кроме того, УФ-фотодетекторы на основе карбида кремния практически не деградируют с течением времени.

Силовые приборы

В середине 90-х годов прошлого века казалось, что следующим, промышленно выпускаемым SiC прибором будет силовой выпрямительный диод (рис. 4). Практически отсутствующие при комнатной температуре (благодаря большой ширине запрещенной

4
Прямые и обратные вольт-амперные характеристики SiC диода при различных температурах

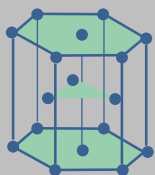


зоны) обратные токи, большое быстрое действие, высокие рабочие температуры — все это обещало существенную экономию при замене кремневых диодов и транзисторов на карбид-кремневые в силовой электронике.

Позже, после создания выпрямительных диодов на основе SiC, было обнаружено, что их характеристики

СПРАВКА

Элементарная ячейка ГПУ-решетки. Заштрихованы плотные плоскости (0001)



Как видно из приведенного фрагмента, поглядев на проблему под разными углами зрения, можно получить качественно различные результаты. Казалось бы, что общего может быть между гексагональной плотноупакованной и гранецентрированной кубической решетками? Их элементарные ячейки совсем друг на друга не похожи. Однако плотные укладки в них оказываются схожими, различаясь лишь порядком следования слоев. Слегка сдвигая их относительно друг друга за счет изменения параметров технологического процесса, можно получать многочисленные политипы.

Кандидат физико-математических наук
С.М. Комаров

ухудшались с увеличением времени работы. Рос ток утечки, снижалось пробивное напряжение при обратном включении, увеличивалось сопротивление диода в прямом направлении. Исследованию этого явления было посвящено множество публикаций, и в конце концов установили, что причина деградации — дефекты упаковки (они же *stacking faults* или *SF*), то есть образование прослоек кубического SiC внутри 4H или 6H диодов при протекании через них прямого тока. Оказалось, что энергия, выделяемая при безызлучательной рекомбинации электрон-дырочной пары в SiC, достаточна для преодоления барьера, отвечающего смещению атома в другое положение. Иначе говоря, происходила перестройка решетки гексагонального поли типа — смещение атома из гексагональных положений в кубические — образование прослойки кубического поли типа. Начальной точкой роста SF служили дислокации, находящиеся в объеме эпитаксиального слоя или на границе эпитаксиального слоя и подложки. Под действием прямого тока линейные размеры SF быстро увеличивались параллельно кристаллической оси «с» кристалла. При достижении SF границы рп-перехода происходила полная деградация прибора.

Все это затормозило внедрение силовых приборов на основе SiC — их промышленного выпуска нет и до настоящего времени.

СВЧ-приборы

Проблемы технологии силовых приборов почти не коснулись приборов СВЧ-диапазона. Они либо работают на основных носителях тока (диоды Шоттки, полевые транзисторы), либо для снижения паразитных емкостей имеют очень маленькие рабочие площади, диаметр около 100 микрон (рп-диоды, лавинно-пролетные диоды). В диодах Шоттки и полевых транзисторах отсутствует электронно-дырочная рекомбинация, и SF не образуются. В СВЧ-диодах мала вероятность попадания дислокации на рабочую площадь диода. Поэтому вторым промышленно выпускаемым SiC-прибором, оказался диод Шоттки. Фирма «Сименс» сейчас наладила производство таких приборов на прямые токи до 20 А и рабочие напряжения до 600 В. Ожидается, что следующим серийно выпускаемым прибором станет мощный СВЧ полевой транзистор.

Ювелирное применение

В последние годы определилась еще одна область использования SiC, в

противоположном углу потребительского рынка, нежели абразивы. После того как были получены чистые (прозрачные) кристаллы SiC, возникла мысль, что ограненные кристаллы будут очень похожи на алмаз и почти не уступят ему в твердости. Очень кстати оказался существующий в США «варварский» обычай — в день помолвки будущий жених должен подарить невесте кольцо с бриллиантом. По сравнению с алмазом кристаллы карбида кремния «каратных» размеров стоят существенно дешевле. С 1995 года начался выпуск ювелирных изделий на основе SiC, только для благозвучности его опять стали называть муассанитом.

Что будет дальше

За последние 10–15 лет размеры коммерческих подложек SiC выросли более чем в десять раз, а концентрация содержащихся в них дефектов уменьшилась на три порядка. С каждым годом улучшаются параметры SiC-приборов и увеличивается 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.

Наметились и пути решения проблемы SF в силовой электронике. Во-первых, это снижение плотности структурных дефектов в подложках. Во-вторых, разработанная японскими исследователями технология роста эпитаксиальных слоев SiC в плоскости, параллельной оси «с» кристалла. В этом случае образующиеся SF располагаются также параллельно плоскости рп-перехода и не так ухудшают параметры приборов.

Не исключено, что SiC еще раз скажет новое слово в развитии физики полупроводников. Образование SF обычно рассматривается как отрицательное явление. В то же время было показано, что SF, имеющие толщину порядка нескольких постоянных решеток, — это квантовые ямы 3C-SiC внутри более широкозонного nH-SiC. Такая структура зон приводит к размерному квантованию, фактически превращающему прослойку 3C-SiC в прямозонный полупроводник, что приводит к появлению интенсивной фотолюминесценции в синей области спектра.

Значит, на основе карбида кремния возможно создание гетеропереходов нового типа — не между химическими различными материалами, а между различными кристаллическими модификациями одного и того же веще-

ства. 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 (nH-SiC) поли типов карбида кремния. Обе эти гетероструктуры создают методом эпитаксии слоя 3C-SiC на подложке гексагонального поли типа.

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 будет иметь форму шестиугольника. При этом растущая пленка 3C-SiC имеет другую кристаллическую ориентацию, нежели использованная для роста подложка nH-SiC. Если исходная гексагональная подложка имела ориентацию (0001), то выращенный эпитаксиальный слой получит ориентацию (111).

Данные кристаллографические особенности эпитаксии пленок 3C-SiC на основе подложек nH-SiC приводят к так называемому «pseudomorphic growth». Это означает, что в плоскости роста постоянные решетки кубического и гексагональных поли типов практически совпадают (расхождение решеток составляет < 0,1%, меньше, чем для классической гетеропары GaAs—AlGaAs). Это показывает теоретическую возможность получения близких к идеальным гетероструктур между поли типами SiC.

По сравнению с обычными гетеропереходами гетерополитипные переходы на основе SiC (и, возможно, других политипных полупроводников) будут иметь следующие преимущества: отсутствие взаимной диффузии компонент гетеропар, незначительное расхождение постоянных решеток (квазиаморфный рост), одинаковые химические свойства, возможность создания гетероперехода в уже выращенной структуре с помощью тех же дефектов упаковки.

С учетом вышеуказанных преимуществ можно ожидать, что гетерополитипные структуры будут обладать большим структурным совершенством, чем гетеропереходы между полупроводниками с различной химической природой. Меньшая плотность структурных дефектов должна привести к большей подвижности двумерного электронного газа и большей вероятности излучательной рекомбинации в приборах на основе гетерополитипных структур. Проведенный в литературе анализ показывает возможность создания светоизлучающих структур в синезеленой области спектра на основе гетеропереходов между поли типами

SiC. Теоретические оценки показывают, что параметры HEMT на основе SiC гетерополитипных структур будут лучше, чем у HEMT на основе GaN—AlGaIn.

SiC 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 приборы на основе SiC гетерополитипных структур смогут составить существенную конкуренцию приборам на основе III-N.

Таким образом, можно предполагать, что создание приборов на основе гетеропереходов станет одним из самых актуальных направлений развития SiC-электроники ближайшего будущего.

Заключение

Заключение к статье мы постарались выразить посредством художественных образов, снова обратившись к использованному в начале статьи «ботаническим» аналогиям. После всего, говоря о вечнозеленом полупроводнике, хочется сделать упор на слове «вечно». Действительно, это один из самых старых полупроводников, на котором были сделаны важнейшие для данной области физики открытия, один из тех, который имеет большие перспективы в будущем. По поводу сегодняшнего состояния SiC-электроники можно сказать, что это достаточно могучее дерево, которое уже приносит плоды и принесет их в будущем еще больше. Из-за дружественной конкуренции с материалами III-N почти прекратились работы в области SiC-оптоэлектроники, и нет ясности в перспективах некоторых SiC-СВЧ приборов. Однако разработка технологии гетерополитипных структур должна решить эту проблему и, возможно, возродить работы по SiC-оптоэлектронике.

Над всем этим висит «топор» алмаза — но пока что параметры приборов на основе алмаза остаются на уровне SiC-приборов 60-х годов прошлого века. Существует ряд нерешенных проблем в технологии алмаза, 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.



SiC

ФОТОИНФОРМАЦИЯ

Эти красивые изумрудно-зеленые кристаллы стоят на третьем месте по твердости после алмаза и карбида бора. Тем не менее современные технологии позволяют их обрабатывать: разрезать кристаллы на пластины нужного размера и полировать поверхность.

Кристаллы карбида кремния выращивают методом Лели, при котором зародыши образуются случайно и растут сами по себе. Именно поэтому кристаллы получаются превосходного качества, но выглядят как ягоды на виноградной грозди. Вот почему они не могут достичь больших размеров — соседние выросты начинают срастаться и мешать друг другу. Обычный диаметр такого кристалла — около одного сантиметра. Поскольку у карбида кремния данного политипа (6H) гексагональная кристаллическая решетка, то и кристаллы получаются соответствующим образом ограненными. А разные оттенки зеленого цвета определяются количеством примеси азота.

SiC обладает выдающимися электрическими и механическими свойствами, в то же время его себестоимость относительно невелика, поскольку составляющие его кремний и углерод входят в число самых распространенных веществ на Земле (чего не скажешь о таких широкозонных полупроводниках, как GaN, GaP или ZnSe). Поэтому SiC оказался одним из первых претендентов для изготовления высокотемпературных и сверхмощных полупроводниковых приборов.

Кандидат физико-математических наук
И.Е.Титков