

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)

В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru



ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001

О Т З Ы В

зарубежного научного консультанта на диссертационную работу Бакрановой Дины Игоревны «Структура и физические свойства тонких пленок карбида кремния на кремнии, синтезированных методом замещения атомов», представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D074000 – Наноматериалы и нанотехнологии (физика)

Диссертационная работа Бакрановой Дины Игоревны посвящена синтезу тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния методом замещения атомов в низкодислокационном высокоомном монокристаллическом кремнии ориентации (111) и комплексному исследованию влияния условий синтеза на процессы роста, структуру, фазовый состав, стехиометрию, формирование Si-C-связей и физические параметры слоев SiC и переходной области «пленка SiC-подложка Si».

Выявлены различные структурные модификации и полиморфы SiC, выполнен анализ размеров и преимущественной ориентации нано- и микрокристаллитов на границе раздела «пленка SiC-подложка Si». Проведено исследование структуры приповерхностных слоев карбида кремния и выполнен анализ влияния условий синтеза на микроструктуру и шероховатость поверхности пленок карбида кремния. Осуществлено экспериментальное исследование пленок карбида кремния, содержащих углерод в составе дилатационных диполей и в сверхстехиометрическом состоянии, проведен анализ степени кристалличности пленок карбида кремния и переходной области «пленка SiC-подложка Si». Выполнено моделирование основных физических параметров (толщина, стехиометрия, шероховатость, плотность, содержание вакансий Si) многослойной структуры карбида кремния.

Карбид кремния (SiC) является привлекательным материалом для следующего поколения полупроводников и для высокотемпературных электронных устройств. Для SiC характерна широкая запрещенная зона (2,2-3,3 эВ в зависимости от полиморфа), высокая подвижность электронов (1000 см²/В·с), большая величина электрического поля пробоя и термическая стабильность (устойчивая при температурах выше 2000 К). Для разработки обладающих этими свойствами устройств на основе карбида кремния должны быть получены высококачественные тонкие пленки SiC. Для синтеза эпитаксиальных пленок SiC характерна высокая температура кремниевых подложек выше 1000 К. При этом на качество полученных структур оказывает влияние большое несоответствие решетки (19%) и различия в коэффициентах теплового расширения (8%) между SiC и Si. Для выращивания монокристаллического карбида кремния необходимо иметь подложки, у которых параметры решеток отличались бы менее, чем на 4%.

Перспективным методом, позволяющим решать задачи выращивания эпитаксиальных пленок карбида кремния на кремнии, является синтез пленок карбида кремния в потоке газа CO методом замещения атомов подложки кремния на атомы углерода. Синтез карбида кремния на кремнии этим методом позволяет выращивать эпитаксиальные буферные пленки SiC на больших площадях, что

очень важно для микроэлектроники. Другими преимуществами являются возможность контроля толщины и состава пленок, а также высокая чистота процесса синтеза. В силу этого актуальность исследований механизмов формирования этим методом эпитаксиальных слоев SiC, содержащих в переходном слое «пленка SiC-подложка Si» значительное количество пор, нанокристаллов SiC и углеродных нанокластеров, не вызывает сомнений.

Полученные в диссертации результаты имеют большое научное и практическое значение для применения полученных структур в нанoeлектронике, технологии создания качественных подложек, твердых покрытий, и т.д.

В работе синтезированы тонкие эпитаксиальные пленки SiC новым методом замещения атомов при различных температурах и давлениях рабочего газа CO на поверхности высокоомного, низкодислокационного монокристаллического кремния n-типа ориентации (111). Установлено присутствие политипов 3C-SiC, 4H-SiC и 6H-SiC высокого кристаллического совершенства в пленках SiC. В качестве основной кристаллической фазы присутствует монокристаллический кубический политип 3C-SiC, а также присутствует редкая гексагональная фаза 2H-SiC, устойчивая в многослойной структуре.

Выявлено, что пленки 3C-SiC ориентации (111) на подложках Si (111) являются эпитаксиальными и не содержат двойников на поверхности. Верхние слои имеют монокристаллическую структуру, содержат усадочные поры вдоль поверхности пленки, способствующие процессам зародышеобразования карбида кремния. Нижние слои содержат кристаллы SiC размером 60-260 мкм и нанокристаллы SiC размером 3-7 нм с высокой степенью совершенства структуры. Нанокристаллы SiC лежат на границе раздела «пленка SiC-подложка Si» и в глубине подложки, покрывают внутреннюю поверхность пор и имеют преимущественную ориентацию (311).

Установлено, что наибольшее содержание кристаллических фаз SiC и наиболее совершенная структура характерны для пленок, имеющих состав наиболее близкий к стехиометрическому составу $\text{Si}_{0,50}\text{C}_{0,50}$. Доля кристаллической фазы карбида кремния, отражающая степень кристалличности пленки, составила величины в пределах 55 – 72 %.

Экспериментально доказано, что во всех образцах присутствует в сверхстехиометрическом состоянии углерод, структура которого зависит от температуры синтеза. При температуре 1250°C поверхность пленок насыщена кремниевыми вакансиями и углеродом, находящимся в структурно “рыхлой” форме, напоминающей углерод в состоянии HOPG. Экспериментально обнаружен эффект образования плотных, приближающейся по плотности к алмазу, углеродных наноструктур в пленках SiC, выращенных при температуре 1330°C, препятствующих формированию кристаллов с четкой фрагментацией граней на поверхности.

Выявлено, что при определении стехиометрии пленок $\text{Si}_y\text{C} = \text{Si}_{y/(1+y)}\text{C}_{1/(1+y)}$, где $y = N_{\text{Si}}/N_{\text{C}} = (\rho_y - \rho_{\text{C}})/(\rho_{\text{SiC}} - \rho_{\text{C}})$ с плотностью ниже либо выше табличного значения ($\rho_{\text{SiC}} = 3,21 \text{ г/см}^3$), выращенных при различных условиях, включения углерода присутствуют в пленке в виде графита ($\rho_{\text{C}} = 2,23 \text{ г/см}^3$) либо в виде нанокластеров с плотностью близкой к алмазу ($\rho_{\text{C}} = 3,51 \text{ г/см}^3$), соответственно.

Моделированием основных параметров установлено, что пленки SiC состоят из пяти параллельных подложке слоев, отличающихся плотностью, стехиометрией состава и толщиной. Экспериментально определенная толщина пленок сравнима с суммой толщин слоев многослойной системы.

Диссертация Бакрановой Д.И. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на достаточно высоком методическом и научном уровне. Полученные результаты достоверны, апробированы и опубликованы, содержат решение актуальных задач по синтезу пленок карбида кремния методом замещения атомов. Особый интерес представляют данные по присутствию редкой гексагональной фазы 2H-SiC, устойчивой в многослойной структуре, по параметрам структуры, размерам кристаллитов и их преимущественной ориентации в переходном слое «пленка-подложка», по присутствию избыточного углерода в структурной форме типа HOPG либо в виде нанокластеров с высокой плотностью, данные моделирования о формировании многослойной структуры. Полученные результаты могут иметь не только фундаментальный научный интерес, но и могут быть использованы при разработке полупроводниковых приборов на основе GaN, AlN, BN, ZnO, в которых могут быть применены эпитаксиальные буферные пленки SiC.

Бакранова Д.И. окончила в 2008 году программу бакалавриата по специальности «Техническая физика» Казахского Национального Технического университета имени К.И. Сатпаева и продолжила обучение в этом университете по программе магистратуры по специальности «Техническая физика» с 2010 по 2012 годы. В 2013 году поступила в докторантуру Казахстанско-

Британского технического университета по специальности 6D074000 – Наноматериалы и нанотехнологии (физика). В 2014 году Бакранова Д.И. была принята на должность младшего научного сотрудника в Лабораторию нанотехнологий при КБТУ. Во время обучения Бакрановой Д.И. проведена подготовка образцов высокоомного монокристаллического низкодислокационного кремния с механической шлифовкой, полировкой и химическим травлением в смеси кислот с целью удаления нарушенного слоя, принято участие при высокотемпературном синтезе пленок, проведены измерения методом ИК-спектроскопии с разложением спектров на компоненты и осуществлен анализ изменений параметров SiC-пика ИК-поглощения при изучении влияния условий синтеза на формирование кристаллической структуры слоев SiC. Также Бакранова Д.И. участвовала в измерениях и анализе результатов, полученных методами комбинационного рассеяния, профилометрии, рентгеновской дифракции и микроденситометрии, рентгеновской рефлектометрии, а также в математическом моделировании результатов с применением программы Release. Статьи и доклады по теме диссертации Бакрановой Д.И. написаны совместно с коллегами на основании коллективного анализа, обсуждения и обработки результатов. Бакранова Д.И. лично выступала с устными докладами на международных конференциях в г.Нью-Йорк (США) и г.Барселона (Испания). Обобщение представленного материала выполнено Бакрановой Д.И. Таким образом, в настоящее время Бакранова Д.И. является специалистом в области структурных свойств тонких пленок карбида кремния.

Научные результаты Бакрановой Д.И. опубликованы в 12 научных публикациях, включая международные и рейтинговые казахстанские научные журналы (8) и материалы международных конференций (4), включая 2 в дальнем зарубежье. Бакранова Д.И. является соавтором статьи в журнале Physics of the Solid State, входящем в базы данных Scopus и Thomson Reuters (ISI Web of Knowledge) и имеющем импакт-фактор 0,831, а также 5 журнальных статей, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (ККСОН РК) и 2 журнальные статьи, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Бакранова Д.И. очень целеустремленная и настойчивая, стремится повышать квалификацию и формировать хорошие деловые и межличностные отношения с коллегами.

Я полагаю, что диссертационная работа Бакрановой Д.И. удовлетворяет всем требованиям ККСОН РК, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора философии (PhD), а ее автор – Бакранова Д.И. – заслуживает присуждения искомой степени.

Д.ф.-м.н., профессор ИПМаш РАН,
заведующий лабораторией
«Структурных и фазовых превращений
в конденсированных средах»
Заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат премии Президиума РАН им.
П.А. Ребиндера, Лауреат премии Правительства
Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургского
Научного центра РАН по физики им. А.Ф.
Иоффе.
г. Санкт-Петербург, РФ

 Кушкин С.А.

