



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574
Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО СПбПУ
доктор технических наук,
член - корреспондент Российской
академии наук, профессор

В.В.Сергеев

05 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» — на диссертацию Лебедева Сергея Павловича на тему: «Получение графена методом диссоциативного испарения (сублимации) поверхности SiC и исследование свойств структур графен/SiC», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — Физика полупроводников

Актуальность работы

Углерод — один из самых распространенных элементов на Земле, — не перестает удивлять разнообразием форм и соединений. Среди основных свойств графена можно, в частности, отметить оптическую прозрачность в видимом диапазоне, аномально высокую фермиевскую скорость и подвижность носителей заряда при комнатной температуре, высокую прочность и теплопроводность и т.д. Эта совокупность свойств открывает потенциальные перспективами применения графена и структур на его основе для создания приборов и устройств электроники, фотоники, сенсорики, обладающих уникальными, недоступными в настоящее время характеристиками. Ряд таких приборов уже был предложен разными научными группами. Для успешного развития графеновой электроники и перехода к промышленному производству требуется разработка технологии получения однородного материала большой площади с высоким структурным совершенством и заданными электрофизическими характеристиками. Сублимация поверхности карбида кремния является перспективным методом получения графена на подложках большой площади. В случае успешной разработки контролируемой технологии получения однородного графена данным методом можно будет готовить серийное производство графеновых приборов и структур. Все сказанное выше позволяет сделать вывод, что тема диссертационной работы Сергея Павловича Лебедева несомненно является актуальной.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается, в первую очередь, в следующем:

1. Выполнено моделирование и проведена экспериментальная проверка преобразования морфологии поверхности монокристаллов карбида кремния при его высокотемпературном отжиге в различных условиях. Обнаружено формирование атомных ступеней и исследована их морфология в зависимости от параметров процесса. Установлено, что различие в кристаллической структуре политипов 6H-SiC и 4H-SiC не оказывает значительного влияния как на морфологию поверхности подложки.
2. Выявлены теоретически и проверены экспериментально условия формирования слоя графена на поверхности монокристаллов карбида кремния при сублимации атомов кремния, исследовано влияние параметров на свойства образуемого графенового слоя. Определены оптимальные значения температуры, скорости нагрева, времени обработки, состава и давления инертного газа, необходимые для получения сплошных однослойных покрытий.
3. Проведены исследования транспортных свойств структур графен/SiC в различных условиях, в частности в магнитных полях от 0 до 30 Тл в температурном диапазоне 4.2–300 К. Обнаружен эффект отрицательного магнетосопротивления графена и высокая чувствительность формируемых слоев к целому ряду адсорбируемых молекул.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается примененным автором подходом к решению задач исследования, заключающимся в использовании апробированных теоретических методов в качестве основы для проведения модельных расчетов, использованием апробированных методов измерений параметров модифицированных слоёв, а также соответствием выводов современным теоретическим представлениям. Надежность результатов моделирования обеспечивается применением проверенных расчётных методов, выбором параметров моделирования, воспроизводящих реальные свойства материалов. Результаты не противоречат литературным данным в тех случаях, когда сопоставление возможно.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана конструкция экспериментальной установки роста графена на поверхности SiC методом сублимации, которая может быть прототипом для производства промышленных установок роста графена на подложках SiC больших размеров (4 и 6 дюймов). Также создан цифровой двойник данной установки.
2. Разработано два способа изменения морфологии полированной поверхности коммерческих подложек SiC, позволяющих получать на ее поверхности регулярные атомно-гладкие террасы без изменения исходной стехиометрии SiC.
3. Разработана контролируемая технология получения однородных монослойных графеновых пленок методом сублимации поверхности монокристаллического SiC с использованием

коммерчески-доступных подложек. Определены оптимальные параметры роста графена. Данные сведения могут быть использованы при развитии промышленного производства графена на поверхности SiC

4. С использованием полученных структур графен/SiC изготовлены сенсорные элементы, сопротивление которых меняется при адсорбции на поверхности графена различных молекул. Продемонстрирована чувствительность графеновых сенсоров к целому ряду газов и биологических молекул.

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в работе результаты и развитые подходы могут быть использованы при теоретических и экспериментальных исследованиях направленной высокотемпературной модификации свойств поверхности бинарных и более сложных полупроводниковых материалов, при разработке промышленной технологии получения графеновых слоев, а также для создания чувствительных элементов сенсорики нового поколения в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить такие как ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Институт физики твердого тела РАН, Санкт-Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, Университет ИТМО, Новосибирский государственный технический университет Институт цитологии РАН, ПАО «Светлана», ЗАО «Светлана-Электронприбор», ЗАО «Нитридные кристаллы» и др.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с исследованием высокотемпературной модификации поверхности монокристаллов карбида кремния и получением на ней монослоев графена, представляющую в настоящее время как научный, так и практический интерес. Автором применены надежные методы расчета происходящих процессов, выполнена экспериментальная проверка полученных результатов и найдены способы практического решения поставленной задачи. Проведено комплексное исследование свойств получаемых слоев графена и выявлены основные закономерности обнаруженных явлений. Четко сформулированы и обоснованы научные выводы диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на положительное в целом мнение о диссертации, к ней имеются некоторые вопросы и замечания:

1. При описании результатов моделирования формирования углеродных структур автор приводит одномерные зависимости их толщины от таких параметров, как рабочее давление, температура и скорость нагрева, время проведения процесса. Для наглядности было бы полезно показать трехмерные диаграммы, изобразив толщину слоя углерода цветом.

2. Каковы физические причины, обуславливающие значительную обнаруженную разницу в

процессе диссоциации С-границы и Si-границы карбида кремния? Почему в случае С-границы диссоциация структуры SiC протекает одновременно на всех участках поверхности подложки, а диссоциация поверхности Si-границы начинается на краю сформировавшихся террас? Учитывается ли эта разница в применяемых автором моделях?

3. Насколько протяженными являются получаемые при оптимальных условиях графеновые пленки? Есть ли взаимосвязь между ориентацией SiC подложки и кристаллографической ориентацией графенового слоя. Образуется ли графеновый слой на боковой поверхности террас и каковы его свойства, если да?

4. Какова была ориентация террас относительно изготавливаемых тестовых образцов для исследований проводимости и подвижности, магнетосопротивления, сенсорных свойств? При переходе с террасы на террасу и при прохождении тока вдоль террас возможно проявление анизотропии свойств получаемых покрытий, о чем в работе не говорится.

5. Чувствительность и отклик сенсорных структур сильно зависит от чистоты поверхности. В работе сказано, что такие структуры готовились путем разрезания полученных подложек и нанесения электродов. В то же время, ничего не сказано о применяемых при этом технологиях очистки поверхности. Также не освещен вопрос изменения структурных и электрических свойств получаемых слоев графен/SiC и сенсорных структур на их основе при длительной выдержке в обычных условиях.

Указанные замечания не являются принципиальными, не противоречат результатам и выводам, сформулированным в работе, и не уменьшают, тем самым, научную значимость проведённого С.П.Лебедевым исследования.

Апробация работы

Все основные результаты проведенных автором исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 19 научных статьях, из них 11 в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 2 в рецензируемых международных журналах, 6 в статьях, опубликованных по материалам докладов конференций. Результаты работы представлялись на 11 российских и международных научных конференциях по ее тематике, проведенных в 2011-2019 гг., а также докладывались на ряде научных семинаров. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы и соответствует ее основным положениям.

Заключение

Диссертационная работа Лебедева Сергея Павловича на тему «Поверхностные оптические состояния в слоистых средах», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников, является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая существенное значение для современной физики полупроводников — теоретически и экспериментально

исследованы преобразования морфологии поверхности монокристаллов карбида кремния при его высокотемпературной обработке, формирования графена, исследованы свойства этих слоев. Уровень работы соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» от 19.08.2019 утвержденного директором ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а соискатель, Лебедев Сергей Павлович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Высшей инженерно-физической школы, протокол № 6 от «21» апреля 2021 г.

Отзыв подготовил:

профессор Высшей инженерно-физической школы,
доктор физико-математических наук, профессор
Александр Эпамиондович Фотиади

Председатель заседания:

директор Высшей инженерно-физической школы,
доктор физико-математических наук, доцент
Валентина Владимировна Журихина

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Телефон: +7 (812) 775-05-30

E-mail: office@spbstu.ru