

В диссертационный совет 34.01.02 при
ФГБУН «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии
наук»

ОТЗЫВ

официального оппонента,

к. ф.-м. н., доцента, Образцовой Елены Дмитриевны

на диссертацию Лебедева Сергея Павловича

«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 темы исследования

Актуальность темы диссертационной работы Лебедева С.П. обусловлена повышенным интересом современного научного сообщества к графену, его электрофизическим свойствам и возможности использования данного материала в качестве основы нанoeлектроники. Несмотря на то, что активные исследования графена ведутся последние 15 лет, до сих пор имеется ряд трудностей и препятствий, не позволяющих в полной мере реализовать огромный потенциал данного материала. Одной из таких трудностей является разработка воспроизводимой технологии получения графена большой площади и одновременно высокого структурного совершенства. Уровень существующих в настоящее время технологий получения графена пока не позволяет сделать качественный «скачок» от штучного производства приборов в лабораторных условиях к масштабному промышленному производству. Для преодоления этого барьера требуется проведение тщательных исследований, направленных на определение всех факторов, влияющих на качество выращиваемого материала и поиск оптимальных комбинаций всех контролируемых параметров роста. Это и определяет актуальность выбранной темы диссертации, которая посвящена разработке способа получения графеновых структур методом диссоциативного испарения (сублимации) поверхности SiC и исследованию полученных данным методом структур графен/SiC.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Научные положения и выводы, представленные в диссертации Лебедева С.П., научно обоснованы и аргументированы. Научные положения сформулированы на основе

результатов и выводов диссертации и не противоречат результатам исследований, опубликованных другими научными коллективами в рецензируемых отечественных и международных научных изданиях. Представленные в работе выводы основаны на результатах всесторонних исследований, полученных с использованием ряда современных методов диагностики нанообъектов. Результаты исследований получены с соблюдением научной преемственности с данными, представленными научными коллективами в предшествующих работах по рассматриваемой теме, что подтверждается списком цитируемых работ из 126 наименований.

Достоверность и новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов, полученных Лебедевым С.П., не вызывает сомнений, поскольку при проведении исследований использовался ряд современных методик, таких как атомно-силовая микроскопия, Кельвин-зондовая силовая микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, дифракция быстрых электронов, просвечивающая электронная микроскопия, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Использование современных методов диагностики наноструктур позволило получить ряд результатов, обладающих научной новизной. В частности была установлена взаимосвязь между структурными особенностями выращиваемых пленок графена и конкретными технологическими параметрами, а также параметрами подложки. В целом, достоверность и научная новизна результатов, полученных Лебедевым С.П., подтверждается списком публикаций автора диссертации в реферируемых отечественных и международных научных изданиях.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Полученные в диссертации Лебедева С.П. научные результаты имеют практическую значимость как для развития технологий получения высококачественного графена, так и для разработки различных электронных приборов на основе графеновых структур.

Представленные в диссертации рекомендации по технологии получения монослойных графеновых покрытий на подложке из SiC позволяют использовать эти данные для разработки промышленных технологических установок роста графена методом сублимации поверхности SiC.

Результаты исследований отклика сенсорных элементов на основе структур графен/SiC могут иметь практическую значимость при разработке различных элементов для современной сенсорики.

Еще одним интересным практическим применением результатов, представленных в диссертации, является использование структур SiC с террасами в качестве калибровочных эталонов высоты для сканирующих зондовых микроскопов.

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертация Лебедева С.П. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка основных публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 164 страницы. Работа содержит 62 рисунка и 11 таблиц. Список цитируемой литературы составляет 126 наименований. Около 100 страниц текста диссертации приходится на описание оригинальных исследований и разработок автора, что составляет большую часть объема диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, перечислены цели и задачи работы, показана новизна и практическая значимость проведенных исследований, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен подробный обзор свойств графена и методов его получения, а также представлено описание физико-химических основ процесса диссоциативного испарения (сублимации) поверхности SiC. Также в разделе 1 представлено обоснование возможности получения графеноподобных углеродных пленок на поверхности SiC методом сублимации и сформулирован ряд задач, позволяющих разработать контролируемую технологию роста графена на поверхности SiC.

Во второй главе приводится подробное описание технологической установки для роста графена методом сублимации поверхности SiC и методология исследования поверхности SiC после роста графена, а также методов исследования параметров графеновых пленок.

Третья глава посвящена разработке методов подготовки поверхности SiC к росту графена. Представлено описание технологии химической очистки поверхности SiC от различных загрязнений и способов отжига подложки, позволяющих изменять исходную морфологию, образованную в результате полировки подложки.

В четвертой главе представлены подробные теоретические и экспериментальные исследования процесса графитизации подложки SiC в результате сублимации поверхности и изучено влияние технологических параметров и параметров подложки на данный процесс. Также в данной главе сформулированы рекомендации по получению монослойных графеновых покрытий поверхности SiC.

Пятая глава содержит результаты исследований транспортных свойств графеновых пленок, выращенных на SiC, а также примеры использования структур графен/SiC в качестве основы для газовых и биологических сенсоров.

В заключении сформулированы основные выводы по полученным результатам, содержащие рекомендации по оптимальным параметрам получения качественных монослойных графеновых слоев методом сублимации поверхности SiC.

Подробное рассмотрение диссертационной работы Лебедева С.П. позволяет утверждать, что работа является оригинальным завершённым научным исследованием, которое полностью раскрывает тему диссертации, а также цели и задачи, поставленные диссертантом. Содержание автореферата полностью соответствует основному содержанию диссертации.

Замечания по работе

Данная работа представляет собой блестящий пример сочетания мастерства в синтезе материалов, дополненного теоретическим моделированием происходящих процессов и всесторонней диагностикой свойств этих материалов. Также продемонстрированы примеры устройств, эффективно работающих на графене, сформированном на SiC.

Замечания касаются характеристики полученных материалов.

1. В данной работе используется метод комбинационного рассеяния света для подтверждения образования графеновой пленки. Этот метод действительно способен предоставить спектроскопический “портрет” графена. В отличие от графита, в спектре графена интенсивность узкой 2D полосы (с частотным положением около 2680 см^{-1}) в несколько раз превышает интенсивность G полосы. Однако, на всех спектрах, приведенных в диссертации, интенсивность достаточно узкой 2D полосы меньше, чем интенсивность G полосы. Это может иметь место в случае, если в пленке содержится несколько графеновых слоев. При этом положение 2D полосы должно сдвигаться к 2700 см^{-1} и далее, что и наблюдается. Имеется ли подтверждение другими методами, что синтезирован действительно однослойный графен?

2. При нанесении металлических контактов на графен часто наблюдается его растрескивание и отслоение. Каким образом данная проблема была решена в данном исследовании и были сформированы стабильно работающие устройства?

Приведенные замечания ни в коей мере не умаляют высокого научного уровня диссертационной работы Лебедева С.П.

Общее заключение

Диссертация Лебедева С.П. «Получение графена методом диссоциативного испарения (сублимации) поверхности SiC и исследование свойств структур графен/SiC» удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Она является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития важных разделов физической электроники. Считаю, что Лебедев Сергей Павлович, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук,

доцент, заведующая лабораторией спектроскопии наноматериалов,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

телефон: +7 499 503 8206

эл. почта: elobr@kapella.gpi.ru

_____/Образцова Елена Дмитриевна/

Дата «19» мая 2021 г.