

Московский Государственный Технический Университет

им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Волкова Яна Борисовна

УДК: 004.4'242

Транзисторные структуры на основе графена

А в т о р е ф е р а т

квалификационной работы бакалавра по направлению 211000

Конструирование и технология электронных средств

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете
им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и
технология производства ЭА
МГТУ им.Н.Э.Баумана
Власов Андрей Игоревич

Ведущее предприятие: ИТМ ВТ (г. Черноголовка)

Защита квалификационной работы бакалавра состоится ____ июня 2012 года на заседании
Государственной аттестационной комиссии по направлению 211000: «Конструирование и
технология электронных средств» в Московском Государственном Техническом Университете
им. Н.Э.Баумана (ауд.278).

Ваши отзывы в двух экземплярах просьба высылать по адресу:
105005, г.Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, ИУ-4.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь Государственной квалификационной комиссии по направлению 211000:
«Конструирование и технология электронных средств»,
доцент, кандидат технических наук

Лавров А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Закон Мура, открытый еще в 1965 году, гласит, что каждые несколько лет количество транзисторов на кристалле ИМС удваивается, для расширения возможностей ИМС. Учитывая то, что закон был открыт более полу века тому назад, в скором времени будет достигнут предел возможности интеграции транзисторов на КМОП технологии. Их количество может увеличиваться благодаря уменьшению их размеров, но разумно предполагать, что процесс не бесконечен. В настоящее время имеет место улучшение характеристик транзистора за счёт увеличения их количества и уменьшение размера, но когда предел будет достигнут, то как одно из возможных направлений развитие микро- и нано- электроники будет осуществляться посредством внедрения новых материалов.

Одним из самых перспективных материалов является графен, путем замещения кремниевого канала на канал из графена, можно найти одно из возможных решений проблемы микроминиатюризации и расширения возможностей микро- и нано- электронных устройств.

Уже сейчас ведущим мировым производителям твердотельной электроники удалось разработать технологию изготовления графеновых транзисторов, которые по своим характеристикам намного превосходят кремниевые транзисторы. Такие транзисторы могут переключаться со скоростью 100 миллиардов раз в секунду, т.е. работать на тактовой частоте 100 ГГц, что в десять раз превосходит подобную характеристику лучших экземпляров кремниевых транзисторов.

Но и по сей день, графеновые транзисторы представлены лишь в виде опытных образцов, технология их изготовления естественно базируется на инструментах прошлого, кремниевой технологии, а новые ветки уже углеродных технологий находятся в стадии разработки. Поэтому, одной из основных задач, при создании графенового транзистора, является отладка технологии производства, которую еще предстоит решить. Технология напрямую зависит от структуры (топологии), так и как следствие от модели транзистора, которая включает в себя целы комплекс условий и законов характерных для физики углеродных материалов.

Для анализа технологии производства графеновых структур их отладки, сравнения результатов моделирования и экспериментальных исследований необходима комплексная методика позволяющая с совершенно разных сторон изучить сформированную графеновую структуру.

Комплексное исследование позволяет качественно оценить современные микро- и нано-элементы твердотельной наноэлектроники, состоящие из комплексного показателя качества, зависящего от общего научного уровня развития разработок, совершенства технологии и метрологического обеспечения.

Проблемы качества микро- и нано- структур твердотельной наноэлектроники, графеновых структур должны решаться на самых ранних стадиях и этапах проектирования и разработок технологических процессов. Наличие у микро- и нано- структур твердотельной наноэлектроники совокупности технологических свойств еще не характеризует их качество и работоспособность. Важно количественно оценить их свойства, составляющих это качество.

Таким образом, современные разработки в области твердотельной наноэлектроники в решающей степени зависит от правильной постановки, организации, методики и технологии контроля, измерений и испытаний, выполняемых на всех этапах комплексного процесса проектирования и производства графеновых структур.

В производстве микро- и нано- структур твердотельной наноэлектроники применяются новейшие, особо чистые материалы и высокие наукоемкие технологии с применением прецизионного технологического оборудования и аппаратуры и анализ таких технологических процессов выливается в сложнейшую инженерную задачу.

Цели и задачи работы: Целью настоящей работы является разработка методики анализа графеновых транзисторных структур с целью оценки технологической операции CVD роста

графенового канала полевого транзистора, методом спектроскопии комбинационного рассеяния света, методами АСМ, и четырех зондовым методом ван дер Пау с целью охарактеризовать количество слоев и качество графена, и количественно оценить электронное взаимодействие фононов, необходимое для понимания производительности графеновых устройств, и технологии формирования полевого графенового транзистора

Для достижения данной цели в работе **решены следующие задачи**: Проанализированы особенности исследуемой технологии, CVD роста углеродных sp^2 наноструктур, изготовлены тестовые графеновые структуры и полевой транзистор на основе плёнок графена с использованием электронной литографии, проведен анализ характеристик плёнок графена методом спектроскопии КРС и методами АСМ, а так же четырех зондовым методом ван дер Пау.

Разработаны алгоритмы анализа графенового канала полевого транзистора, основанные на результатах анализа тестовых графеновых структур.

Методы исследования

При решении поставленных задач использована физика твёрдого тела, электротехника, микроэлектроника, микросхемотехника, теория информационных систем, методы обработки данных в реальном времени, методики системного анализа.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Создана методика исследования микро- и нано- структур, интегрирующая методы измерения электрических параметров полупроводниковых структур, топологии, вещественно-молекулярного анализа кристаллической структуры образца.
- Изготовлены тестовые образцы графена под четырех зондовую методику измерений по методу ван дер Пау, опытные образцы полевого графенового транзистора со встроенным графеновым каналом на базе института проблем микроэлектроники и сверхчистых материалов ИПТМ г. Черноголовка.
- Получены экспериментальные результаты применения комплексной методики анализа выбранной графеновой структуры.

Положения, выносимые на защиту:

- Архитектура и функциональный состав измерительного комплекса, предназначенного для анализа графеновых структур.
- Алгоритмы анализа полученных результатов, их оценка.
- Маршрут изготовления полевого транзистора по технологическому методу «lift-off»
- Программно-аппаратная реализация измерительного комплекса. Особенности выбранного подхода к реализации и его достоинства.
- Представления результатов экспериментальных исследований

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе исследования тестовых структур и определения быстродействия элементов, их работоспособности, можно определить как будет работать данный элемент или совокупность элементов непосредственно в микросхеме. Использование разработанной комплексной методики анализа позволит отладить технологию производства графеновых структур, полевого графенового транзистора, что позволит сделать шаг к развитию наноэлектроники.

Апробация работы

Результаты работы представлялись на международной молодежной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии и интеллектуальные системы» в 2012 году.

Публикации

Я.Б. Волкова «Классификация спектров комбинационного рассеяние света» Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» ВАК: # 12, декабрь 2011

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Общий объем работы 131 страницы, 171 рисунок, список использованных источников из 25 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Работа посвящена разработке полевого транзистора на основе графена, а так же разработки методики комплексного исследования тестовых графеновых структур, характеризующие топологию, количества слоев графена, внедрение химических примесей, дефектов структуры графена, а так же его удельное сопротивление.

Объектом исследования является технологический процесс изготовления плёнок графена методом CVD, синтезированных способом однократного напуска ацетилена на экспериментальной высоковакуумной установке CVD роста графена.

Изготовленные тестовые образцы графена под четырех зондовую методику измерений по методу ван дер Пау, опытные образцы полевого графенового транзистора со встроенным графеновым каналом на базе института проблем микроэлектроники и сверхчистых материалов ИПТМ г. Черноголовка.

Тестовая структура — рассматривается как гетероструктура, формируемая на полупроводниковой пластине, используемая в процессе исследования разрабатываемой технологии. Тестовые структуры имеют определённое сходство с рабочими компонентами разрабатываемого графенового транзистора, чтобы объективно отражать их свойства.

В работе описаны базовые логические функции логических элементов, освещены общие понятия МДП транзистора, с целью описания свойств возлагаемых на разрабатываемых полевой транзистор.

Приведены свойства графена, как аллотропной модификации углерода.

Углерод «Materia Prima» для жизни на планете, лежит в основе всей органической химии. Благодаря гибкости связей, углеродные системы показывают неограниченное количество различных структур со столь же большим разнообразием физических свойств. Эти физические свойства, по большей части, связаны с размерностью этих структур. Среди систем только с атомами углерода, графен - двумерная (2D) аллотропная модификация углерода - играет важную роль, поскольку является основой для понимания электронных свойств в других аллотропных модификациях. Графен состоит из атомов углерода, расположенных как сотовая структура, состоящая из шестиугольников (см. рисунок 1), и может рассматриваться как состоящие из бензольных колец лишен из своих атомов водорода. Фуллерены, молекулы у которых атомы углерода расположены сферически, и, следовательно, с физической точки зрения, нульмерных объектов дискретных состояний энергии. Фуллерены могут быть получены из графена с введением пятиугольников (которые создают положительные дефекты кривизны), и, следовательно, фуллерены могут рассматриваться как завернутый графен. Углеродные нанотрубки получают путем прокатки графена по данному направлению и образовании новых углеродных связей. Таким образом, углеродные нанотрубки, фуллерены являются частной модификацией графена, в зависимости от наличия в структуре графена, определенных дефектов.

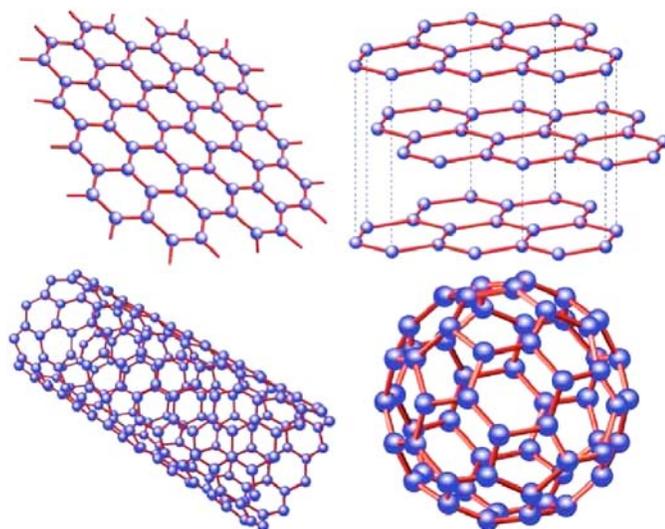


Рисунок 1 – Аллотропные sp^2 модификации углерода, графен, графит, УНТ, фуллерен C60

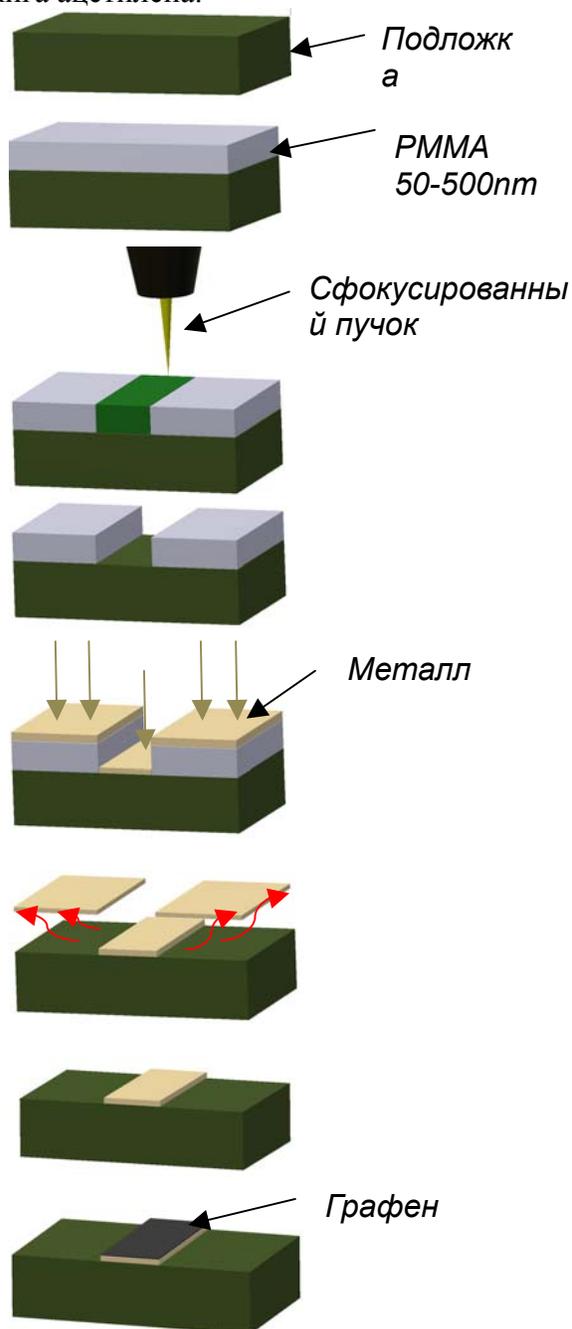
Теоретическое исследование графена началось задолго до получения реальных образцов материала, поскольку из графена можно собрать трёхмерный кристалл графита. Графен является базой для построения теории этого кристалла. Графит является полуметаллом, и, как было показано в 1947 году П. Воллесом, в зонной структуре графена также отсутствует запрещённая зона, причём в точках соприкосновения валентной зоны и зоны проводимости энергетический спектр электронов и дырок линеен как функция волнового вектора. Такого рода спектром обладают безмассовые фотоны и ультрарелятивистские частицы, а также нейтрино. Поэтому говорят, что эффективная масса электронов и дырок в графене вблизи точки соприкосновения зон равна нулю. Но здесь стоит заметить, что, несмотря на сходство фотонов и безмассовых носителей, у графена есть несколько существенных отличий, делающих носители в нём уникальными по своей физической природе, а именно: электроны и дырки являются фермионами, и они заряжены. В настоящее время аналогов для этих безмассовых заряженных фермионов среди известных элементарных частиц нет, так описывают свойства графена Гейм и Новоселов в своем труде «The electronic properties of grapheme»

Существовала теория, что двухмерные кристаллы не могут существовать из-за своей нестабильности. Это мнение было опровергнуто лишь в 2004 году, когда совместными усилиями ученых Манчестерского университета (Великобритания) под руководством профессора Андре Гейма и российского Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых металлов (ИПТМ РАН) в Черноголовке под руководством доктора К. Новоселова удалось получить и воспроизвести структуру графена. За «передовые опыты с двумерным материалом — графеном» А. К. Гейму и К. С. Новосёлову была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год.

По прочности на разрыв графен превосходит сталь в 200 раз, а масса пленки графена толщиной в один атомный слой размером с футбольное поле составляет менее 1 г. В графене при комнатной температуре колебания обеспечивают удельное сопротивление около $1.0 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Также графен хорошо выдерживает высокие и низкие температуры, имеет теплопроводность $5000 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}\right)$ что в 2,5 раза больше, чем у алмаза.

Основные технологические этапы создания графеновой транзисторной структуры, формирование заготовки для последующего роста графена в методологии процесса взрывной «Lift-off» литографии субмикронного разрешения, состоящей из двух основных технологических операций электронно-лучевой литографии, и электронно-лучевого испарения. Эти операции необходимы для формирования контактных площадок, затвора и области с катализатором, для дальнейшего роста графена.

После выполнения формирования заготовки, структура помещается в высоковакуумную установку CVD, где происходит процесс роста графеновой пленки на Ni катализаторе, путем отжига ацетилена.



I. Подготовка подложки

II. Нанесение резиста для электронной литографии в качестве которого выступает PMMA

III. Экспонирование рисунка электронным пучком

IV. Плазмо - химическое травление, или реактивное ионное травление экспонированной области

V. Нанесение металлической пленки методом электронно-лучевого испарения, или методом лазерной абляции, в зависимости от выбранного металла

VI. Удаление PMMA с металлом, жидкостным методом

VII. Полученная структура

VIII. Синтез графена на полученной области катализатора

Рисунок 2 – Маршрут формирования графеновой структуры

Маршрут проведения эксперимента по выращиванию графеновых структур на катализаторе:

- I. Подложки помещаются в кварцевый контейнер диаметром 28 мм,
- II. Достигается давление 10^{-6} Торр
- III. Подается температура синтеза графена ($850 - 1000$ °C)
- IV. В контейнер напускается ацетилен до давления 0,2 Торр.
- V. Производится синтез графена от 5 сек до 5 мин,
- VI. Восстанавливается давление в контейнере 10^{-6} Торр
- VII. Производится охлаждение контейнера.



Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки CVD

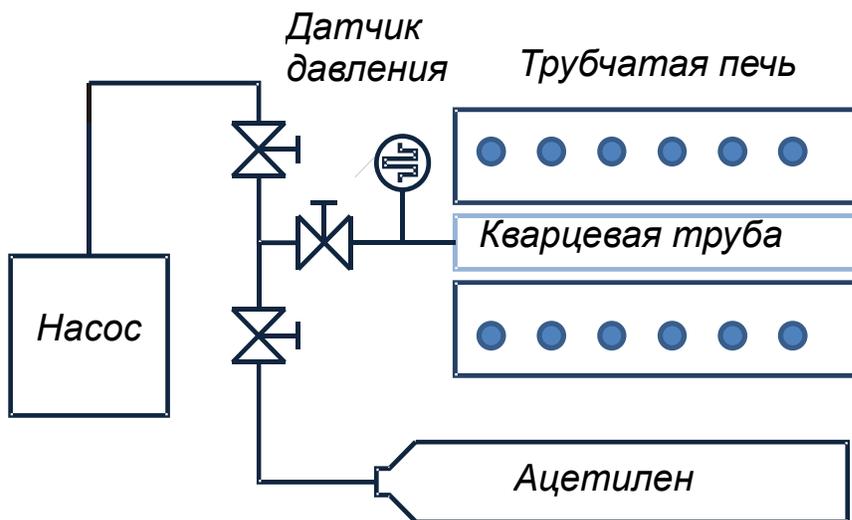


Рисунок 4 – Принципиальная схема установки

Методика анализа тестовых структур графена

Анализ тестовых структур, представлен на схеме на рисунке 5, состоит из трех видов анализа:

1. Для анализа топологических и электро-магнитных характеристик графена, используются методики на СЗМ SmartSPM-1000 AIST-NT в состав которого входит измерительная головка реализующая методики: магнитно силовой микроскопии, метода зонда Кельвина, ёмкостные методы, соответствующий набор кантилевиров, контроллер, ПК со специальным ПО: aist-3.3.50, iarpro-2.4.1, gwiddion-2.19.
2. Для анализа количества слоев графена, внедрение химических примесей, дефектов структуры метод спектрального анализа конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния света используется измерительный комплекс AIST_NTSmartSPM&Raman в состав которого входит измерительная головка реализующая методики корреляции СЗМ с конфокальной микроскопией КРС, позволяющая провести TERS (Tip-Enhanced Raman Spectroscopy) анализ структур образца, тем самым одновременно изучать топологию и спектральные КРС характеристики образца.

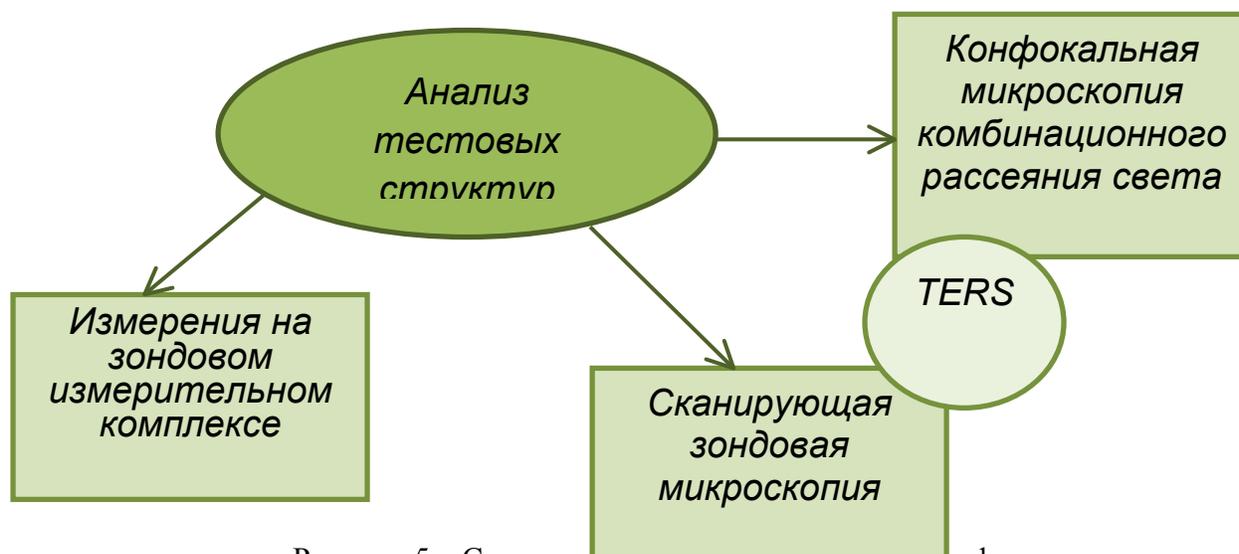


Рисунок 5 – Схема анализа тестовых структур графена

3. Для анализа вольт – амперных характеристик, измерения величины удельного сопротивления и коэффициента Холла проводится измерения на измерительном комплексе состав измерительного комплекса входит зондовая станция Signatone 1160 с помощью которой производятся измерения, монитор на который передается изображение с зондовой станции, источник/измеритель – устройство для измерения электрических параметров, ПК со специальным ПО.

Спектральная характеристика графена

Спектр на рисунке 7, иллюстрирует спектральную характеристику графена, полученного методом CVD.

Отношение пиков $G'/G > 2$ указывает на монослойность графена.

Пик D отвечает за дефекты в графене.

Незначительная интенсивность пика D говорит о хорошем качестве графена.

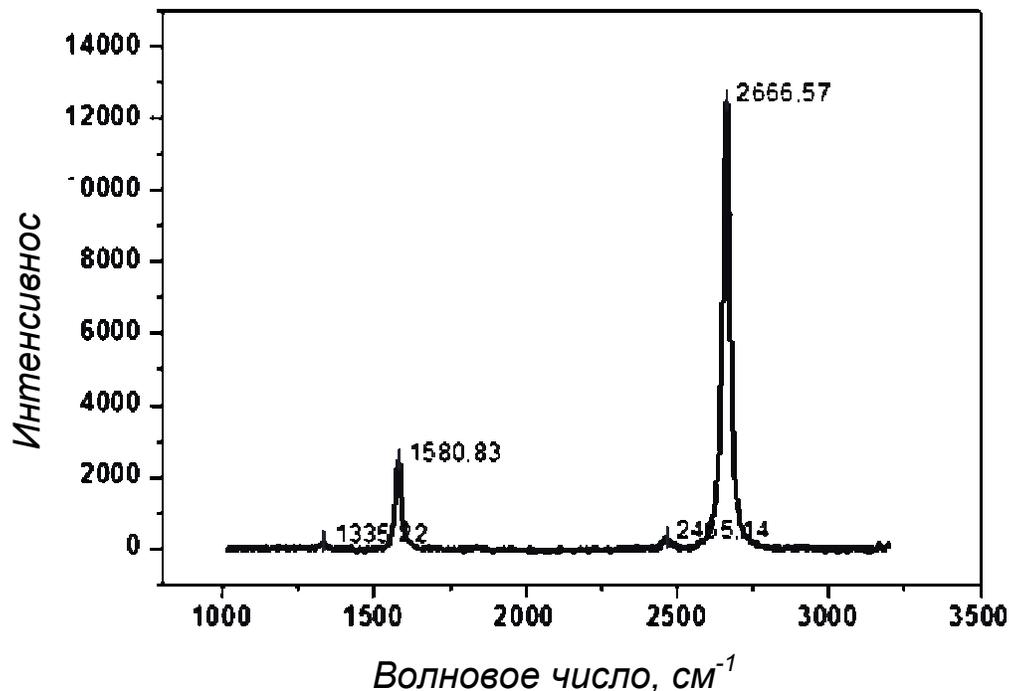


Рисунок 6 – Спектральные характеристики графена.

Таблица 1 – Пики спектральной характеристики графена

№	Пик	FWHM	Волновое число	Интенсивность	Отношение
1	D	20,29467	1335,22	I=168,34542	$\frac{G'}{G} = 5,09$
2	G	26,66735	1580,83	I=2451,17734	
3	G'	87,10869	2666,57	I=12465,0334	

Основываясь на выделенных пиках, строятся микрорамановские карты распределения, G и G' пика по поверхности исследуемой области образца, характеризующие монослойность графена. Анализ графена методом КРС, является определяющим, для дальнейшего исследования получаемой структуры полевого транзистора, а так же тестовых структур для исследования удельного сопротивления, холловского напряжения в графене.

Две методики АСМ и конфокальная микроскопия КРС коррелируется вместе, производя одновременно анализ одной и той же области соединяются в так называемую TERS методику.

Суть анализа – оценка получаемой углеродной структуры с точки зрения топологических характеристик структуры, и определяющих свойств углеродного материала графен, для дальнейшей оценки полученной структуры, как уже элемента миро- и нано- электроники.

Проводится спектральный анализ монослойности графенового канала

Микрофотография опытного образца графенового транзистора, сформированного согласно описанной технологии, представлена на рисунке 7.

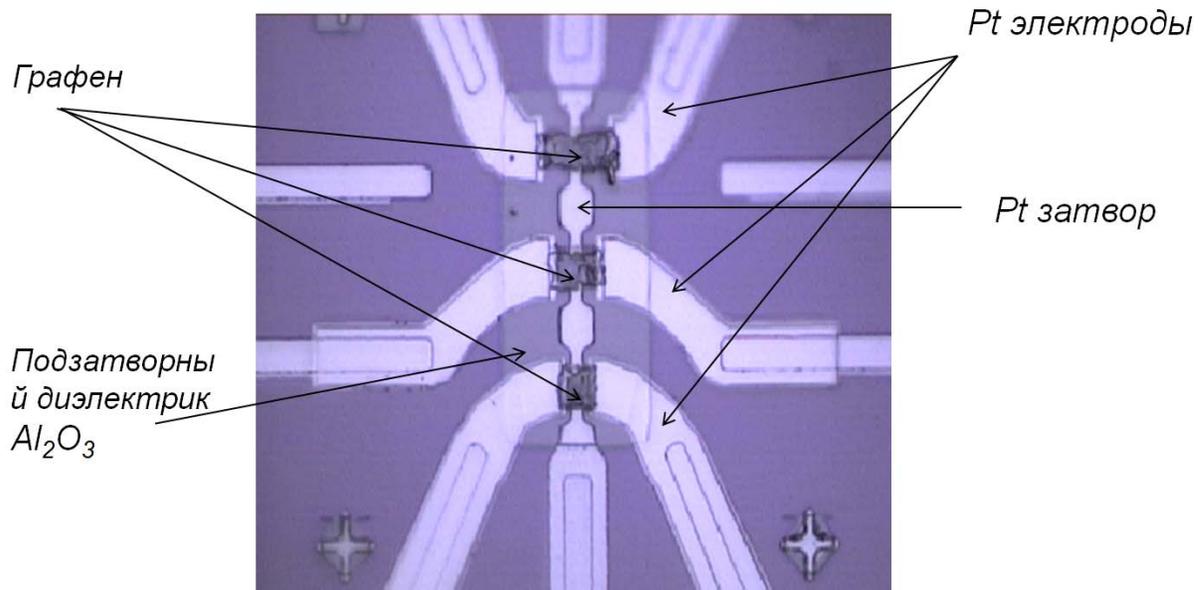


Рисунок 7 – Микрофотография опытного образца графенового транзистора (x100), ИПТМ г. Черноголовка.

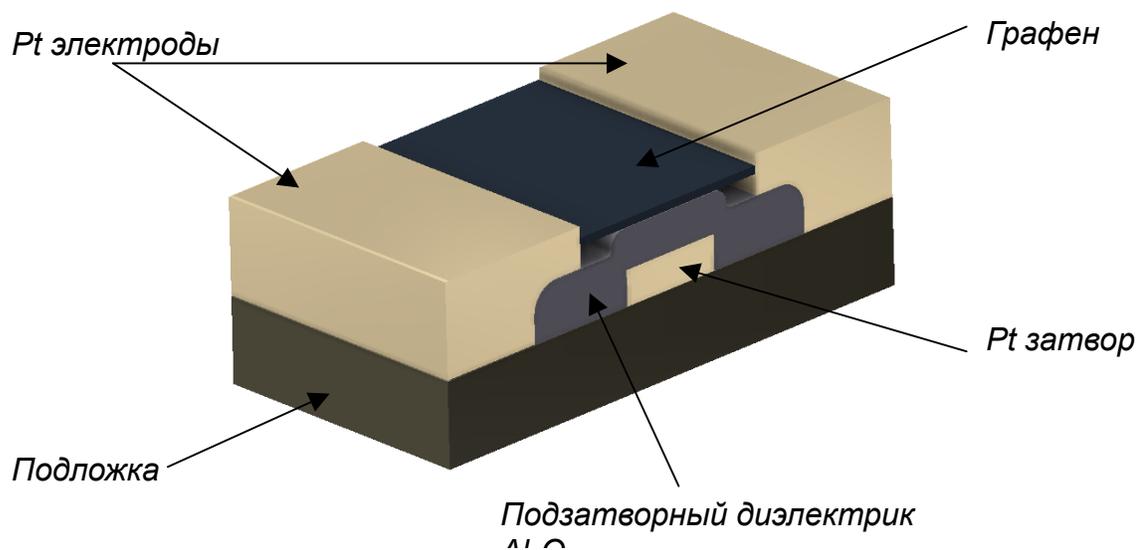


Рисунок 8 – Пространственная модель топологии структуры реализованного графенового транзистора

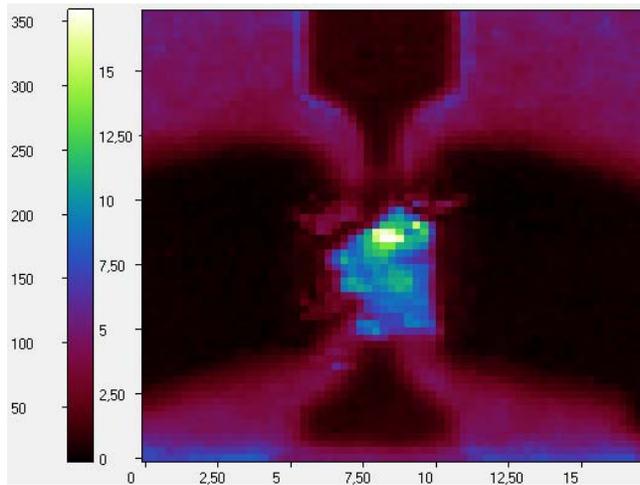


Рисунок 9 – Распределение G пика

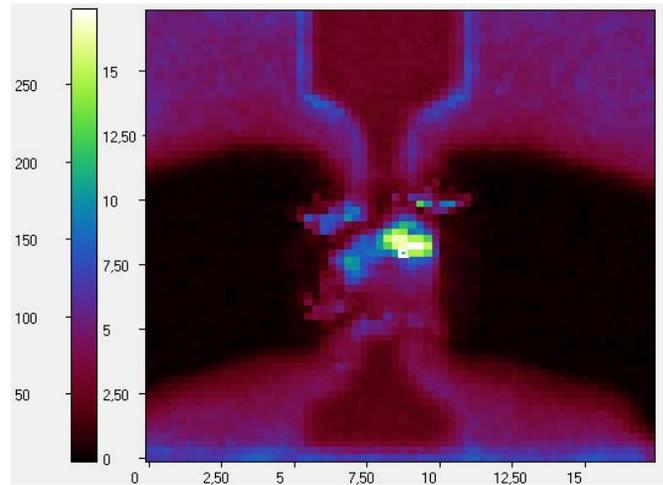


Рисунок 10 – Распределение G' пика

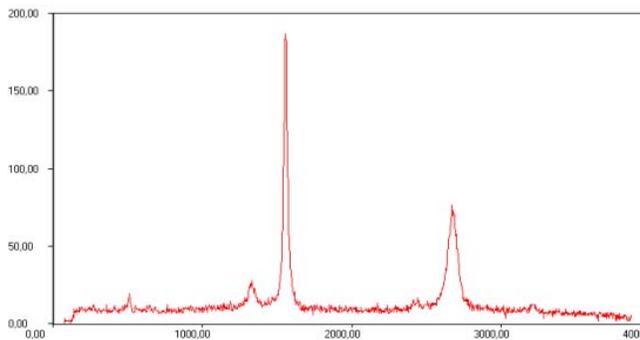


Рисунок 11 – Спектральная характеристика с ярко выраженным G пиком

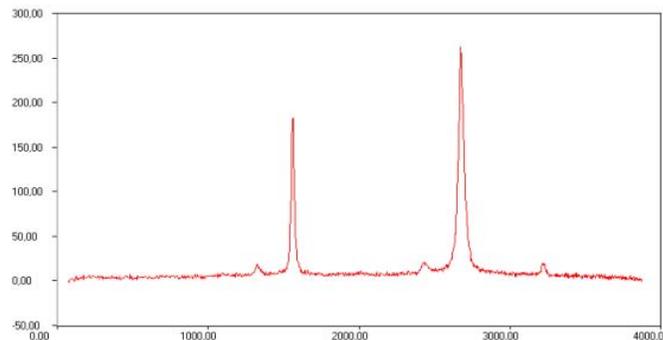


Рисунок 12 – Спектральная характеристика с ярко выраженным G' пиком

Спектральный анализ показал, что канал из графеновой пленки неоднороден, соотношение пиков G'/G говорит о том, что графеновая плёнка состоит из областей с двумя и более слоями, на всех спектрах присутствуют четко выраженные D, D' and D + D'– пики определяющие значительные деформации в кристаллической структуре графенового канала, что можно свидетельствовать, а наличии так же химических примесей связанных с процессами адсорбции в атмосфере.

В связи с этим была разработана иная топология графенового транзистора, сродная с топологией МДП транзистора, представленная на рисунке 13.

Из вида представленной топологии следует, то спектральный анализ графеного канала должен проводиться как одна из технологических операций контроля в процесс производства. Поэтому было принято решения, для начала отработать технологический процесс формирования канала, для этого была сформирована структура характерной геометрии под четырёх зондовый метод ван дер Пау топология которой представлена на рисунке 14.

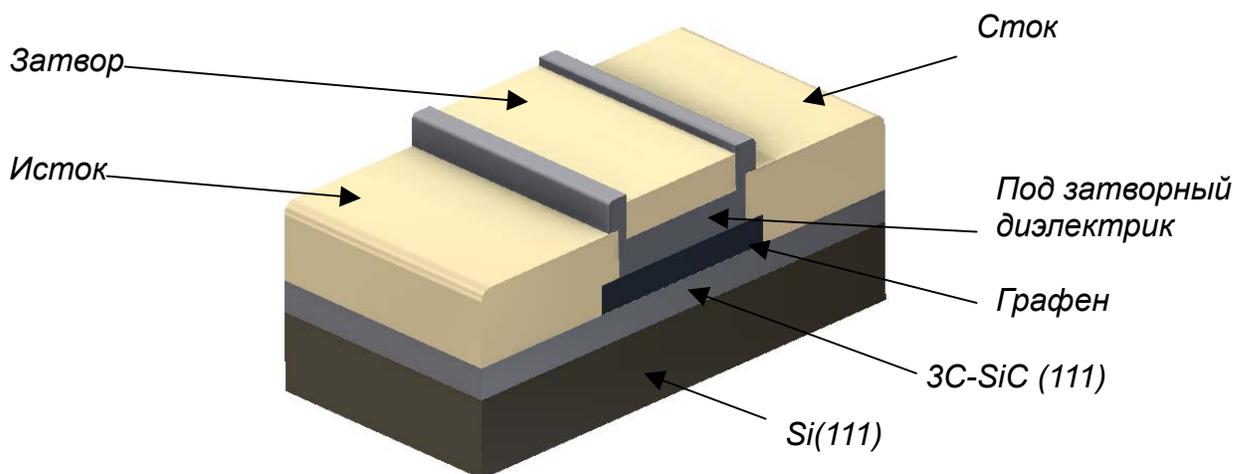


Рисунок 13 – Пространственная модель топологии структуры реализуемого графенового транзистора

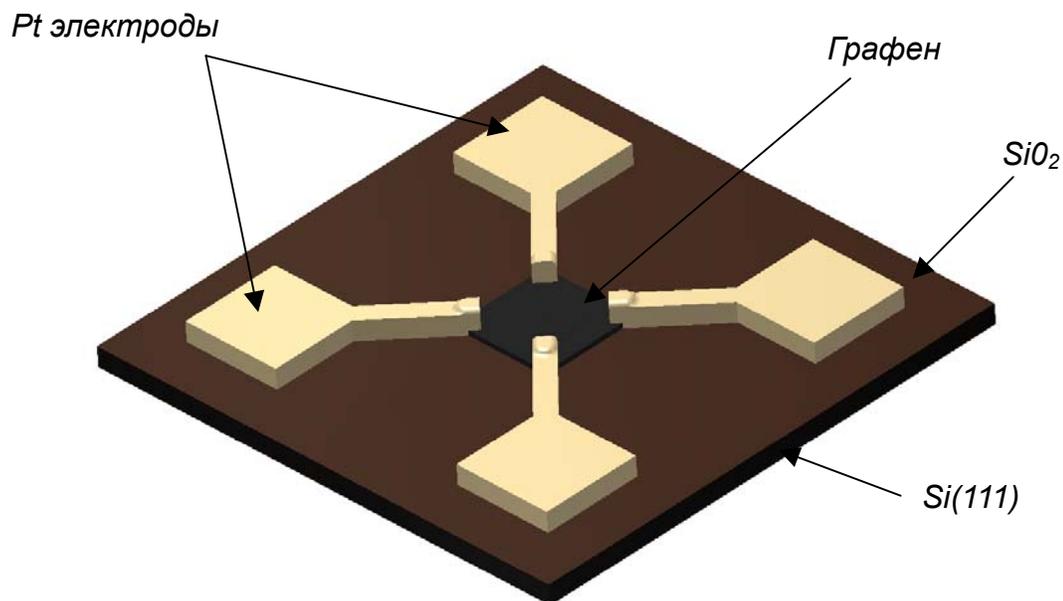


Рисунок 14 – Пространственная модель топологии тестовой структуры графена

Комплексный анализ тестовых графеновых структур с учетом измерений по методу ван дер Пау

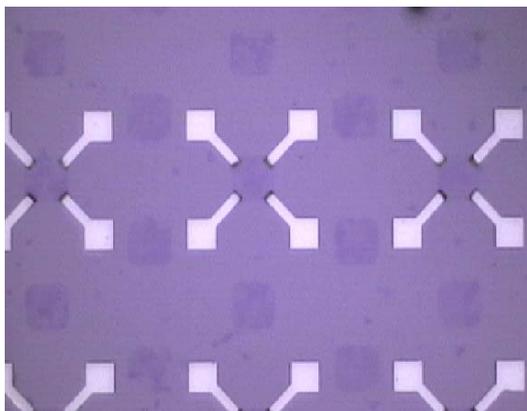


Рисунок 15 - Микрофотография образца тестовых структур x100

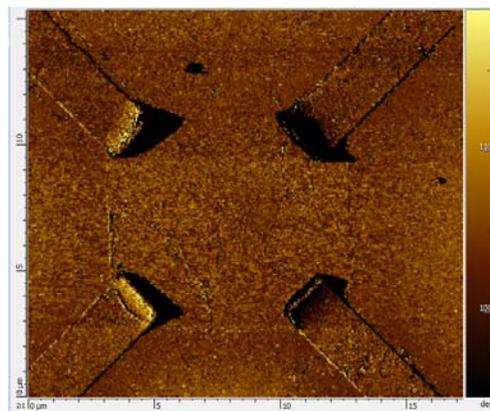


Рисунок 16 –АСМ 17x17мкм

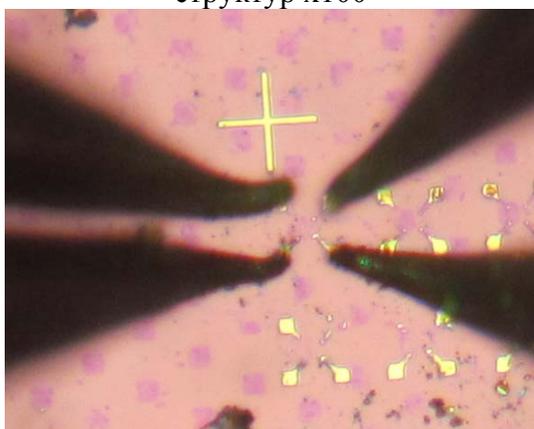


Рисунок 17 – Микрофотография процесса измерения удельного сопротивления на зондовой станции

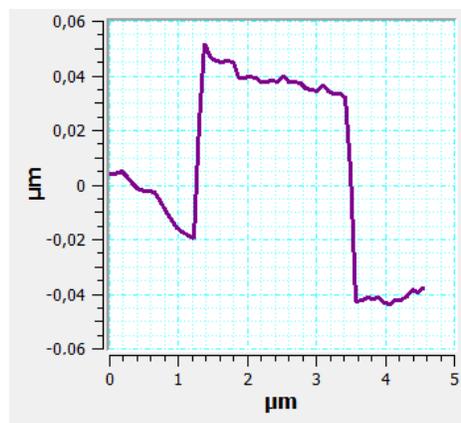


Рисунок 18 – Сечение контакта тестовой структуры, высто контакта 50нм

Исследование тестовой структуры методом конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния света, построение микрограммских карт распределения характерных пиков

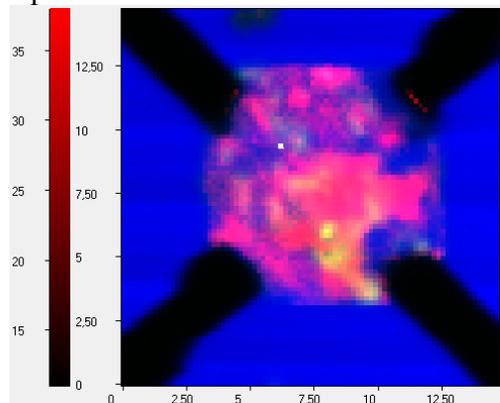


Рисунок 19 – микрограммская карта распределения G , G' и характерного Si пика

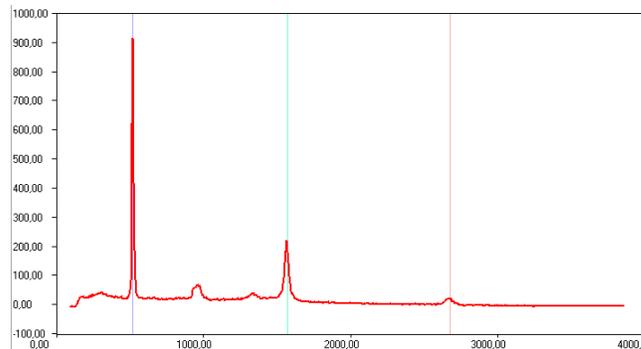


Рисунок 20 - Спектральная характеристика графена на термически окисленной кремневой подложке

Микрорамановское картирование тестовых структур показало:

Спектральный анализ тестовых структур показал, что пленки графена, в процессе модификации технологической операции, преобрели большую однородность по сравнению с результатами анализа спектров КРС канала графенового транзистора, соотношение пиков G'/G говорит о том, что графеновая плёнка состоит из областей с двумя и более слоями, на всех спектрах присутствуют D , D' and $D + D'$ пики определяющие деформации в кристаллической структуре графеновой пленки, что можно свидетельствовать, а наличии так же химических примесей связанных с процессами адсорбции в атмосфере, их интенсивность и распределения свидетельствует о улучшении качества пленки.

В спектре присутствует характерный пик S_i , являющегося материалом подложки, это свидетельствует о прозрачности графеновой пленки, что так же подтверждает приближение технологии к монослойным пленкам графена. Монослойные пленки графена, оптически прозрачны.

Анализ топологии тестовой структуры:

Анализ тестовых структур методом атомно-силовой микроскопии позволил четко охарактеризовать геометрию графеновой пленки, что необходимо для конкретизации вычислений удельного сопротивления по методу ван дер Пау. Так же анализ топологии дал информацию о наличии и распределении «складок», в графеновой пленки, они возникают в процессе переноса графена, измененный технологический процесс включает в себя методики переноса с помощью маски графеновой пленки с подложки где был выращен на другую подложку, для дальнейшего формирования контактных площадок.

Расчет удельного сопротивления:

Измерения проводились с помощью источника/измерителя Keithley SourceMeter 2430 и прецизионных микроманипуляторов установленных на зондовой станции Signatone 1160.



Рисунок 21 – Общий вид источник/измеритель Keithley SourceMeter 2430

Метод предполагает, что четыре равно расположенных датчика входят в контакт с материалом неизвестного сопротивления. Зонды расположены планарно, как показано на рисунке 21 .

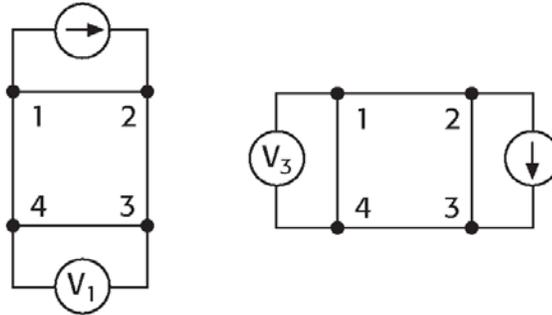


Рисунок 22 - Четырех зондовая схема измерения удельного сопротивления

Через контакты 1 и 2 к образцу подводится ток $I_{12} = 0,5[\text{мкА}]$, а между контактами 3 и 4 будет падение напряжения U_{34} . Отношение этих величин электрического сопротивления будет равно:

$$R_{12,34} = \frac{U_{34}}{I_{12}} = \frac{79,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 159,8 \cdot 10^3 [\text{Ом}]$$

Теперь изменим схему измерений: пропустим ток между контактами 2 и 3 , а напряжение измерим между контактами 1 и 4. В этой ситуации аналогичная величина с величиной сопротивления равна:

$$R_{23,14} = \frac{U_{14}}{I_{23}} = \frac{3,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 7,8 \cdot 10^3 [\text{Ом}]$$

Удельное сопротивление равно:

$$\rho = \left(\frac{\pi \cdot d}{\ln 2} \right) \cdot (R_{12,34} + R_{23,14}) \cdot \frac{f}{2} = \left(\frac{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{\ln 2} \right) \cdot (159,8 + 7,8) \cdot \frac{0,69}{2} = 52 [\text{мкОм} \cdot \text{см}]$$

Сопротивления порядка 52 мкОм·см, говорит о сравнительно малом удельном сопротивлении графена, что коррелируется с теоретическими сведениями о графене. Но все же это значение достаточно велико, следовательно графеновая пленка имеет разброс по слоям и дефектность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе исследованы пленки графена, синтезированные методом химического осаждения CVD, при однократном напуске ацетилена.

Изготовлены тестовые образцы графена под четырех зондовую методику измерений по методу ван дер Пау и опытные образцы полевого графенового транзистора со встроенным графеновым каналом на базе института проблем технологии микроэлектроники и сверхчистых материалов ИПТМ г. Черноголовка.

Разработан план проведения измерений, составлены алгоритмы комплексной методики анализа тестовых образцов графена методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), методом конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), четырех зондовым методом ван дер Пау.

Представлены экспериментальные результаты применения комплексной методики анализа выбранной структуры, охарактеризована топология тестовых графеновых структур, даны спектральные характеристики и микрорамановские карты с оценкой количества слоев графена, внедрение химических примесей, дефектов структуры, экспериментально получено и рассчитано значение величины удельного сопротивления графена.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Я.Б. Волкова Комбинационное рассеяние света как метод анализа углеродных наноструктур// Сборник трудов конференции Научные технологии и интеллектуальные системы – Москва, 2012, с.294-300.