

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 539.232

Мосин  
Дмитрий Александрович

Электронная прозрачность графена

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

---

Научный руководитель  
Комиссаров Иван Владимирович  
канд. ф.-м. наук

---

Минск 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Графен – двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом, находящихся в  $sp^2$ -гибридизации и соединённых посредством  $\sigma$ - и  $\pi$ -связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Его можно представить как одну плоскость графита, отделённую от объёмного кристалла. Графен обладает большой механической жёсткостью и рекордно большой теплопроводностью (1 ТПа и  $5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  соответственно). Высокая подвижность носителей заряда (максимальная подвижность электронов среди всех известных материалов) делает его перспективным материалом для использования в самых различных отраслях, в частности, как будущую основу нанoeлектроники и возможную замену кремния в интегральных микросхемах.

На сегодняшний день существует большое количество методов переноса графена, начиная с механического отслаивания, и заканчивая синтезом графена на целевой подложке без переноса. Хотя каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, все они стремятся решить главные проблемы в процессе переноса графена большой площади: уменьшение механических воздействий и минимизация ухудшения электрических свойств. Пока сложно сказать какой метод переноса графена на целевую подложку наилучший. Для развития промышленного производства графена необходимо дальнейшее совершенствование методов переноса графена на целевую подложку.

Графен, являющийся атомно тонким проводящим материалом, может пропускать низкоэнергетические электроны с энергией в диапазоне от одного до десятков эВ. Электронная прозрачность графена – способность наноматериала пропускать низкоэнергетические электроны.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальность исследования электронной прозрачности графена и особенностей его переноса связана с использованием графена в качестве фильтра ионов в газоразрядных детекторах, а так же с необходимостью получения качественных плёнок графена на кремниевой подложке, с дальнейшим изготовлением структур на основе графена, с всевозможным эффективным применением этих структур в различных отраслях промышленности. Уникальные электрофизические и механические свойства, а так же нанометровые размеры графена привлекают к нему большой интерес.

**Цели и задачи исследования.** Целью работы является исследование коэффициента пропускания графена на электроны с энергией в диапазоне от одного до десятков эВ.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

–Исследование особенностей переноса графена с поверхности катализатора на целевую подложку.

–Разработка методов исследования и проведение измерений коэффициента прозрачности графена на электроны.

**Объектом** исследования является подвешенная плёнка графена.

**Предметом** исследования является коэффициент прозрачности графена на электроны.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй степени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

**Теоретическая и методологическая основа исследования.** Теоретическая и методологическая части исследований основаны на изучении и анализе публикаций, а так же на обработке результатов экспериментальных данных по исследованию и измерению электронной прозрачности графена. Выполнен сравнительный анализ методов и особенностей переноса графена с поверхности катализатора на целевую подложку. Был разработан метод исследования и проведения измерений коэффициента прозрачности графена на электроны. Обработка результатов проводилась в программном комплексе *Origin*. Экспериментальные исследования электронной прозрачности графена были проведены с помощью установки «Ортус БГУИР» компании Изовак.

**Информационная база** исследования заключается в измерении электронной прозрачности графена.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в получении значения электронной прозрачности графена типа «twisted».

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Освоенная методика переноса графена, полученного методом химического парофазного осаждения, с поверхности медного катализатора на целевую подложку с использования слоя фоторезиста показала, что с использованием слоя фоторезиста в качестве каркаса уменьшается дефектность графена на 50%.

2. Электронная прозрачность исследуемого графена для энергий электронов 90 эВ составляет 10%, что позволяет использовать его в качестве фильтра ионов в газоразрядных детекторах.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Анализ методики и особенностей переноса графена с поверхности катализатора на целевую подложку проводился соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были разработаны методы исследования и проведены измерения коэффициента прозрачности графена на электроны. Проведение экспериментов, а так же анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук Комиссаровым И.В.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложен метод измерения электронной прозрачности перенесённого графена.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что была измерена электронная прозрачность графена, а так же показаны перспективы его использования для создания прототипов газоразрядного детектора.

**Апробация и внедрение результатов исследования.** Результаты исследования, представленные в диссертации, включены в отчёт о научно-исследовательской работе «Разработка и формирование медных сеток с графеновым покрытием для создания прототипов газоразрядного детектора».

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в опубликованной работе общим объёмом 2 п.л.

**Структура и объём работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Общий объём диссертации – 68 страниц. Работа содержит 2 таблицы, 60 рисунков. Библиографический список включает 47 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описаны основные свойства графена, его широкое применение в различных отраслях, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

**В общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объём диссертации.

**В первой главе** описаны особенности методов переноса графена, а так же его структура, свойства и методы получения.

**Во второй главе** рассмотрена спектроскопия комбинационного рассеяния света как метод исследования полученного графена.

**В третьей главе** описано влияние концентрации и состава травителя на дефектность графена.

**В четвертой главе** рассмотрен перенос графена с использованием слоя фоторезиста.

**В пятой главе** проведено измерение коэффициента прозрачности графена на электроны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была освоена методика переноса графена, полученного методом химического парофазного осаждения, с поверхности медного катализатора на целевую подложку с и без использования слоя фоторезиста. С использованием слоя фоторезиста в качестве каркаса уменьшается дефектность графена, но возникает проблема его полного удаления, что негативно влияет на характеристики графена. Результаты исследований были получены с помощью метода комбинационного рассеяния света.

Максимумы профилей распределения отношения интенсивности  $I_D/I_G$  для образцов, полученных с использованием травителя на основе хлорного железа с концентрациями 1:1 и 1:3, принимают значения 0,23 и 0,14 соответственно. Дефектность графена с концентрацией травителя 1:1 больше по сравнению с концентрацией 1:3. Так же увеличение интенсивности пика  $D$  для травителя на основе хрома связано с большим увеличением количества дефектов.

Наиболее эффективное удаление фоторезиста с поверхности графена было в случае использования *PMMA*. Процесс удаления фоторезиста *LOR* привёл к полному разрушению и потере графена. Это связано с сильной адгезией графена с фоторезистом. Были изучены и рассмотрены различные способы удаления слоя фоторезиста с поверхности графена: химическое травление в растворителях, реактивное ионное травление и термическая обработка. Так же для лучшего снятия фоторезиста предварительно проводилась засветка в ультрафиолете. Более эффективно слой *PMMA* был удалён путём химического травления в растворе изопропиловый спирт/ацетон/метилизобутилкетон, а так же с реактивным ионным травлением в кислородной плазме.

На сегодняшний день существует большое количество методов переноса графена, начиная с механического отслаивания, и заканчивая синтезом графена

на целевой подложке без переноса. Хотя каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, все они стремятся решить главные проблемы в процессе переноса графена большой площади: уменьшение механических воздействий и минимизация ухудшения электрических свойств. Пока сложно сказать какой метод переноса графена на целевую подложку наилучший. Для развития промышленного производства графена необходимо дальнейшее совершенствование методов переноса графена на целевую подложку.

Выполнена характеристика графена перенесенного на медные сетки методами спектроскопии комбинационного рассеивания и оптического пропускания света. Выявлено, что осажденный графен обладает структурой типа “twisted”. Среднее количество слоев в графене оценивается ~ 6-7 слоя. Выполнено исследование прозрачности графена на медных сетках в вакууме для электронов с энергией в диапазоне от одного эВ до десятков эВ. Установлено, что прозрачность исследуемого графена для энергий электронов 90 эВ составляет 10%.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

[1] Мосин, Д. А. Влияние типа и концентрации растворителя меди на дефектность графена при переносе с поверхности катализатора на целевую подложку / Д. А. Мосин и др. – Мокеровские чтения: материалы конференции. – Москва. – 2016. – С. 105–107.