

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

УДК 535.34

Нигериш
Кирилл Анатольевич

Визуализация тепловых полей в двумерных системах методом спектроскопии
комбинационного рассеяния света

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
кандидат физ.-мат. наук

Минск 2018

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение топологических размеров в микро- и наноэлектронике неизбежно приводит к увеличению плотности энергии и рассеиваемой мощности в силовых СВЧ транзисторах. Поэтому одной из основных проблем, требующей решения при разработке мощных СВЧ приборов, является задача создания теплоотводящей пленки от рабочей зоны устройства. Одним из материалов, используемых в качестве распределителя тепла, является графен, поскольку он обладает высоким коэффициентом теплопроводности.

Теплопроводность графена зависит от многих факторов: дефектность, количество слоев, размер образца, наличие легирующих примесей, связь с подложкой и т. д. Наиболее распространенной методикой измерения теплопроводности графена является рамановская оптометрия, реализованная для конфигурации с радиальной симметрией. Одним из недостатков такого метода является тот факт, что при расчете коэффициента теплопроводности из экспериментальных данных, теплопроводность принимается независимой от температуры, что может приводить к некорректным результатам. В свою очередь, диапазон рабочих температур приборов, где может быть использован графен, довольно широк, поэтому вопрос корректной оценки теплопроводности графена является актуальным.

В данной работе предложен метод лазерно-ассистированной рамановской оптометрии, который может быть использован при расчете коэффициента теплопроводности двумерных материалов, визуализации тепловых полей, а также при изучении процессов теплопереноса. Продемонстрирована методика расчета коэффициента теплопроводности подвешенного графена с использованием экспериментальных данных, полученных методом лазерно-ассистированной рамановской оптометрии. Решена обратная задача теплопроводности для подвешенного графена.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. Методика расчета коэффициента теплопроводности подвешенного графена путем решения обратной задачи теплопроводности с использованием экспериментальных данных, полученных методом лазерно-ассистированной рамановской оптометрии, позволяет получить значения коэффициента теплопроводности графена наиболее близкие к реальным в сочетании с высоким пространственным разрешением.

Визуализация тепловых полей позволяет изучить процесс распределения тепла в исследуемых структурах до и после введения теплоотводящих пленок. Полученные результаты важны для расчетов тепловых характеристик мощных СВЧ-транзисторов с теплоотводом на основе графена и других материалов, обладающих высоким коэффициентом теплопроводности.

Цели и задачи исследования. Целью работы является использование метода лазерно-ассистированной рамановской оптометрии для визуализации тепловых полей в двумерных материалах, получение зависимости коэффициента теплопроводности подвешенного графена от температуры из решения обратной задачи теплопроводности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- синтезировать графен и перенести его на медную сетку, содержащую сквозные отверстия.
- разработать и сконструировать установку для лазерного ассистирования рамановского микроскопа.
- адаптировать математическую модель расчёта коэффициента теплопроводности графена.
- визуализировать тепловое поле в графене и провести расчет коэффициента теплопроводности.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования выбран подвешенный графен.

Предметом исследования является зависимость коэффициента теплопроводности графена от температуры.

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики. Работа выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники и в НИЧ 4.6 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за время обучения в магистратуре. Основные результаты получены в рамках выполнения заданий республиканских программ научных исследований (ГПНИ):

- задание 3.3.01 ГПНИ «Исследование процессов формирования, электромагнитных и транспортных свойств наноструктур углерода и

графеновых слоев, создание на их основе интегральных элементов для электронной обработки информации» (ГБЦ № 16-3043).

Основное положение диссертации, выносимое на защиту:

Разработан и реализован метод лазерно-ассистированной рамановской оптометрии. Визуализировано тепловое поле в подвешенном графене, и получена зависимость коэффициента теплопроводности графена от температуры из решения обратной задачи теплопроводности по экспериментальным данным, полученным методом лазерно-ассистированной рамановской оптометрии.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Во время работы над диссертацией соискателем был проведен синтез и перенос графена на медную подложку, содержащую сквозные отверстия. Разработана конструкция установки для лазерного ассистирования рамановского микроскопа. Оптимизирована математическая модель расчета коэффициента теплопроводности подвешенного графена путем решения обратной задачи теплопроводности. Совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук Комиссаровым И. В., получена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: *17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations*, 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 9-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения», а также опубликованы в виде соответствующих тезисов и материалов конференций.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 4 опубликованных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из титульного листа, общей характеристики работы, введения, десяти глав, заключения, списка использованных источников из 65 наименований. Полный объем диссертации составляет 75 страниц, в том числе 55 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** описаны особенности исследования тепловых полей в двумерных материалах различными методами.

Во **второй главе** рассмотрена перспективность использования графена в качестве теплоотвода в мощных СВЧ приборах.

В **третьей главе** подробно рассмотрена физика процессов переноса тепла в графене.

В **четвертой главе** подробно рассмотрена рамановская оптометрия: ее особенности и недостатки.

В **пятой главе** описаны процессы синтеза и переноса на целевую подложку используемого в экспериментах графена.

В **шестой главе** рассмотрена температурная зависимость положений линий спектров КРС подвешенного графена в диапазоне низких температур.

В **седьмой главе** рассмотрена суть обратной задачи теплопроводности.

В **восьмой главе** представлен метод лазерно-ассистированной рамановской оптометрии (оптическая схема, конструкция).

В **девятой главе** произведен расчет коэффициента теплопроводности из решения обратной задачи теплопроводности по полученным экспериментальным данным.

В **десятой главе** описана визуализация теплового поля с помощью лазерно-ассистированной рамановской оптометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания магистерской диссертации был проведен анализ различных методик по визуализации тепловых полей в двумерных материалах, используемых в микро- и нанoeлектронике. Подробно рассмотрен метод рамановской оптометрии для визуализации тепловых полей, выявлены преимущества и недостатки данного метода. На основе проведенного анализа была разработана и реализована установка для визуализации тепловых полей в двумерных материалах методом лазерно-ассистированной рамановской оптометрии.

В качестве двумерного материала для исследования был выбран графен.

Произведен синтез двухслойного графена с турбостратической структурой методом химического осаждения из газовой фазы (ХПО) при атмосферном давлении.

Освоена методика, и осуществлен перенос полученного графена на медную подложку, содержащую сквозные отверстия диаметром 100 мкм.

Была получена экспериментальная зависимость положений линий спектра комбинационного рассеяния графена от температуры в диапазоне от 25 до 300 °С.

Визуализировано тепловое поле при нагреве подвешенного графена внешним лазером.

Получена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры из решения обратной задачи теплопроводности по известному температурному профилю, полученному методом лазерно-ассистированной рамановской оптометрии.

Произведен расчет коэффициента теплопроводности графена. Теплопроводность графена в диапазоне от 100 до 600 °С находится в пределах от 50 до 255 Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Полученные результаты важны для расчетов тепловых характеристик мощных СВЧ-транзисторов с теплоотводом на основе графена. А также для визуализации тепловых полей в двумерных материалах в целом.

Цель работы достигнута в полном объеме в указанный срок.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

[1-А] Оптимизация методов переноса графена, синтезированного методом ХПО, на целевую подложку / К. А. Нигериш [и др.] // Международная науч.-практ. конференция «Мокеровские чтения»: сб. науч. труд. – М.: НИЯУ МИФИ – 2017. – С.58–59.

[2-А] Зависимость положений линий спектров КРС подвешенного графена от температуры и от мощности возбуждающего лазера / К. А. Нигериш [и др.] // Международная науч.-практ. конференция «Мокеровские чтения»: сб. науч. труд. – М.: НИЯУ МИФИ – 2018. – С.104–105.

[3-А] The excitation power dependence of the Raman G and 2D peaks of suspended graphene grown by chemical vapor deposition / K. Nigerish at al. // Proceedings of 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations – 2017 – С. 55–58.

[4-А] Визуализация тепловых полей в двумерных системах методом спектроскопии комбинационного рассеяния света / К. А. Нигериш [и др.] // 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР: материалы конференции. – Минск: БГУИР, 2018.