

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

УДК 535.34

Фельшерук  
Андрей Викторович

Плазмонные эффекты в двумерных кристаллах

**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  
Данилюк Александр Леонидович  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

---

Минск 2018

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Плазмоника является быстро развивающейся областью фотоники. Это связано с практически важными перспективами, которые она открывает. Несмотря на то, что свойства поверхностных плазмонов и двумерных кристаллов исследуются уже несколько десятилетий, практический потенциал плазмоники все еще не раскрыт до конца.

За последнее десятилетие исследователи пришли к выводу, что на границе между металлом (проводником) и диэлектриком возможно получить поверхностные плазмоны с той же частотой, что и внешние электромагнитные волны, но с намного меньшей длиной волны. Это позволит использовать плазмоны в наноструктурах для переноса информации внутри чипа. Плазмонные межсоединения стали бы для микросхем настоящим прорывом в области повышения рабочих частот интегральных микросхем. В этом плане перспективным направлением для решения подобной задачи является использование эффекта плазмонных колебаний в терагерцевом диапазоне частот и, в частности, с использованием графена на диэлектрической подложке. Однако на этом пути еще предстоит решить ряд не только технологических, но и физических задач по возбуждению, распространению и детектированию плазмонных колебаний с контролируруемыми параметрами.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Исследования плазмонных эффектов в двумерных кристаллах в настоящее время является весьма актуальным в связи с достижениями современной технологии и перспективами применения таких кристаллов для создания транзисторов с повышенной эффективностью и быстродействием, а также перспективами создания на их основе новых межсоединений в интегральных микросхемах для повышения рабочих частот приборов, так как использование традиционных медных межсоединений в терагерцевой области сталкивается с проблемами ухудшения тепловых свойств и роста потерь из-за влияния паразитных параметров.

**Цели и задачи исследования.** Целью является оценка воздействия терагерцового излучения на возбуждение плазмонной системы графена, находящегося в составе наноструктуры металл/диэлектрик/графен.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать электростатику графеновых транзисторных структур и физику плазмонных эффектов в наноструктурах.

- разработать математическую модель расчёта электрофизических параметров наноструктуры металл/диэлектрик/графен и параметров поверхностных плазмонов в графеновом слое.

- провести моделирование электрофизических параметров наноструктуры металл/диэлектрик/графен и параметров поверхностных плазмонов в графеновом слое.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования выбрана наноструктура металл/диэлектрик/графен

Предметом исследования является закономерности электрофизических параметров и плазмонных эффектов.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.** Работа выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники и в Центре 4.11 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.** В рассмотренном диапазоне частот (от 0,1 до 10 ТГц) электромагнитное

излучение (ЭМИ) может не только распространяться за счет плазмонных колебаний, но и усиливаться за счет них, а с ростом показателя преломления на границе среды и наноструктуры поглощение ЭМИ усиливается.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Во время работы над диссертацией соискателем были изучены математические модели расчета электрофизических параметров графеновых транзисторных структур. Разработка подходов к экстракции параметров плазмонных эффектов в графене проводилась совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук, доцентом Данилюком А. Л.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: 26-й международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния», 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 16-й Белорусско-российской научно технической конференции «Технические средства защиты информации», а также опубликованы в виде соответствующих тезисов и материалов конференций.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из титульного листа, общей характеристики работы, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 70 наименований, графического материала. Полный объем диссертации составляет 63 страницы, в том числе 31 рисунок.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** описаны особенности поверхностных плазмонов в графене, свойства носителей заряда в графене, методы получения графена, графеновые транзисторные структуры .

Во **второй главе** рассмотрена математическая модель электрофизических параметров наноструктуры металл/диэлектрик/графен, которая позволяет получить в аналитическом виде зависимость химического потенциала в графене от напряжения на затворе, а также модель расчета плазмонных эффектов в наноструктуре.

В **третьей главе** представлены результаты моделирования различных электрофизических параметров наноструктуры металл/диэлектрик/графен, а также различных параметров поверхностных плазмонов в графеновом слое.

В **четвертой главе** представлены возможные области применения плазмонных колебаний в графеновых наноструктурах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Развита математическая модель для расчета электрофизических параметров наноструктуры металл/диэлектрик/графен на основе интегрального выражения для концентрации носителей заряда и уравнения электронейтральности наноструктуры.

2 Полученная зависимость химического потенциала в графене от напряжения на затворе позволяет адаптировать разработанную математическую модель для расчёта плазмонных эффектов наноструктуры металл/диэлектрик/графен.

3 Рассмотрены вопросы взаимодействия терагерцового (от 0,1 до 12 ТГц) излучения с наноструктурой металл/диэлектрик/графен.

4 Адаптирована модель высокочастотной проводимости графена для наноструктуры металл/диэлектрик/графен с учетом наличия полевого электрода и его влияния на динамическую проводимость. Проведены расчеты динамической проводимости и коэффициентов прохождения и поглощения.

5 Полученные частотные зависимости коэффициентов распространения и поглощения ЭМИ показали, что в рассмотренном диапазоне частот ЭМИ может не только распространяться за счет плазмонных колебаний, но и усиливаться за счет них, а с ростом показателя преломления на границе среды и наноструктуры поглощение ЭМИ усиливается.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

[1-А] Фельшерук А. В. Плазмонные эффекты в графеновой наноструктуре / А. В. Фельшерук // ФКС XXVI: материалы конференции. – Гродно : ГрГУ, 2018 – С. 142–144.

[2-А] Felsheruk, A. V. Surface plasmons in graphene heterostructure / A. Felsheruk, A. Danilyuk // Proceedings of 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations – 2017 – С. 166–168.

[3-А] Фельшерук, А. В. Плазмонные эффекты в графеновой полевой наноструктуре / А. В. Фельшерук // Тезисы докладов XVI Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации». – Минск : БГУИР, 2018 – С. 94