

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Замедление терагерцовых плазменных волн в клиновидном волноводе с  
диффузионно накачиваемым графеном**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4041 группы

направления (специальности)

09.03.02 «Информационные системы и технологии»

института физики

Банниковой Алёны Сергеевны

Научный руководитель

доцент кафедры физики

открытых систем СГУ, к.ф.-м.н.

А.В. Садовников

подпись, дата

## ВВЕДЕНИЕ

Освоение терагерцового (ТГц, лежащего в интервале 0,1-10 1 терагерц равен, где 1 ТГц равен  $10^{12}$  герц ТГц, что соответствует длинам волн от 3 мм до 30 мкм) диапазона в нанофотонике и наноплазмонике представляет собой важную задачу современной науки. Терагерцовое излучение находится между инфракрасным и микроволновым диапазонами и востребовано для неразрушающей визуализации, медицинской диагностики и беспроводной связи.

Основными сложностями являются необходимость создания устройств с элементами размером в десятки-сотни микрометров и увеличение рекомбинации носителей заряда в лазерных системах. Современные исследования метаматериалов и нанофокусировки открывают новые возможности управления ТГц излучением. Метаматериалы с отрицательным показателем преломления позволяют замедлять и останавливать свет, что перспективно для создания замедлителей света и оптических запоминающих устройств.

Плазменная волна (плазмон) — волна плотности свободных носителей заряда в проводниках (металлах или полупроводниках) под воздействием внешнего электромагнитного поля. Плазмоны являются важным объектом изучения в области нанофотоники и метаматериалов.

Важной характеристикой плазмонов является тот факт, что их скорость распространения значительно (более чем на порядок величины) меньше скорости электромагнитных волн на той же частоте. Это объясняется тем, что плазмоны, являясь связанными состояниями электромагнитных волн и заряженных частиц, несут часть своей энергии в форме кинетической энергии электронов. Замедление плазмонов (изначально более медленных волн по сравнению с электромагнитными волнами) актуально для разработки систем обработки и хранения оптической информации.

В данной дипломной работе рассматриваются механизмы замедления плазмонов в клиновидной структуре с изменяющейся шириной диэлектрического слоя. Это обеспечивает возможность управления скоростью распространения плазмонов, что актуально для разработки систем обработки и хранения оптической информации.

**Целью выпускной квалификационной работы** является теоретическое изучение замедления ТГц плазменных волн в клиновидном волноводе с диффузионно накачиваемым графеном.

**Актуальность темы выпускной работы** обусловлена востребованностью замедления электромагнитных и плазменных волн в системах обработки и передачи информации. Так, например, важным применением устройств, замедляющих плазменные волны, могут стать элементы для беспотерного преобразования неэкранированного плазмона в экранированный или для синхронизации связанных волноводов.

**Научная новизна темы выпускной работы** обусловлена получением в рамках выполнения дипломной работе новых теоретических результатов, по которым подготовлена статья в высокорейтинговый научный журнал. В работе показано, что замедление терагерцовых плазменных волн в клиновидной структуре с диффузионно накачиваемым графеном обусловлено двумя физическими причинами: увеличением экранирования поля плазмона металлическим экраном и созданием градиента концентрации носителей заряда в графене вследствие диффузионной накачки.

## Глава 1. Двумерный материал графен

В первой главе бакалаврской дипломной работы представлен обзор развития исследований графена, начиная с теоретических предпосылок 30-40-х годов прошлого века. Показано, что первоначально считалось, что свободная двумерная пленка должна быть термодинамически нестабильной, что ограничивало исследования монослойных структур.

Подробно рассмотрены различные методы получения графена, в том числе такие как:

- Микромеханическое отщепление - метод, позволяющий получать высококачественный графен. Описан технологический процесс, включающий использование адгезионной ленты и перенос материала на подложку из окисленного кремния. Рассмотрены преимущества метода (высокое качество материала, минимальные примеси) и ограничения (низкая производительность, сложность масштабирования).
- Химическое расслоение - метод, основанный на использовании химических окислителей для увеличения межслоевого расстояния в графите. Детально описан процесс окисления, изменения кристаллической структуры и формирования отдельных слоев оксида графена.
- Жидкофазное расслоение - метод, использующий ультразвуковую обработку и поверхностно-активные вещества для получения графеновых суспензий. Описаны этапы процесса, характеристики получаемых частиц и их применение.

Представлен подробный анализ уникальных свойств материала:

- Структура и прочность - рассмотрена гексагональная кристаллическая решетка, прочность на разрыв (около 130 ГПа), превосходящая прочность стали.
- Электропроводность - высокая подвижность носителей заряда (до  $350\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  на подложке hBN), эффективная проводимость при комнатной температуре.
- Оптические свойства - высокая прозрачность при поглощении около 2.3% света во всем видимом диапазоне.
- Теплопроводность - исключительно высокие показатели (до  $5000\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ), превосходящие даже алмаз.
- Легкость - низкая плотность ( $0.77\text{ мг}/\text{м}^2$ ).
- Химическая модификация - возможность легирования различными элементами для изменения электронных свойств.
- Плазмонные свойства - эффективное подавление плазмонных потерь и усиление плазмонных полей в терагерцовом диапазоне.
- Энергетический спектр - бесщелевая линейная структура, приводящая к уникальному поведению электронов как безмассовых частиц.

Особое внимание уделено потенциалу графена в создании устройств терагерцового диапазона и его применению в технологиях освещения и отображения.

## **Глава 2. Методы создания инверсии в графене**

Во второй главе бакалаврской дипломной работы рассмотрены теоретические основы создания инверсии населенности в графене. Дано определение инверсии населенности как состояния, при котором количество частиц на верхних энергетических уровнях превышает их количество на нижних уровнях.

Описаны принципы оптической накачки:

- Механизм накачки - использование внешнего электромагнитного излучения с энергией фотонов, превышающей энергию перехода между уровнями активной среды.
- Типы систем - рассмотрены импульсные (рубиновые лазеры, неодимовое стекло) и непрерывные (аргоновые лазеры) системы накачки.
- Источники излучения - описаны лампы-вспышки, диодные лазеры и лазеры на красителях.
- Ограничения метода - отмечены проблемы тепловых потерь (до 60% энергии рассеивается в виде тепла).

Подробно представлен альтернативный метод диффузионной накачки (рис. 1) и дано сравнение методов оптической и диффузионной накачки графена:

- Отмечена более высокая энергоэффективность вследствие меньшей требуемой мощности накачки (примерно в 30 раз) для достижения того же уровня инверсии носителей заряда что при оптической накачке, лучшая совместимость с интегральными схемами.
- Описан механизм диффузии фотовозбужденных носителей заряда из полупроводниковой подложки в графен.
- Указаны и теоретически обоснованы значение величины толщины подложки графена, оптимальных для достижения максимального уровня инверсии в графене.

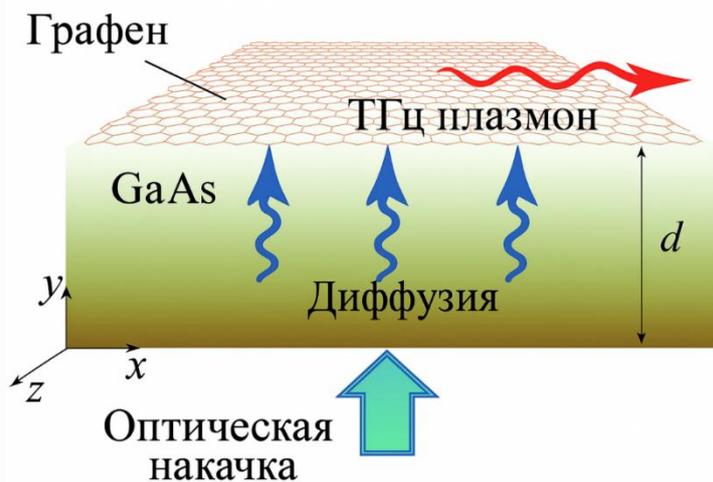


Рисунок 1 – структура, в которой была реализована диффузионная накачка

### Глава 3. Теоретическая модель для исследования замедления терагерцовой плазменной волны в клиновидном волноводе с графеном

#### Описание исследуемой структуры

В третьей главе бакалаврской дипломной работы представлена разработанная в ходе выполнения дипломной работы теоретическая модель для исследования замедления ТГц плазменных волн в клиновидном волноводе с диффузионно накачиваемым графеном.

Дано описание исследуемой структуры (схематически показана на рисунке 2). Плазменная волна распространяется в сторону вершины клиновидного волновода. Легированный графен помещается на клиновидную полупроводниковую подложку (из GaAs в размариваемом в дипломной задаче случае) с изменяющейся толщиной  $d(x)$ . Тонкий диэлектрический слой между подложкой и металлом предотвращает поток носителей заряда из металла в подложку. Металл экранирует поле плазмона приводя к увеличению локализации поля плазмона. Электрон-дырочные пары фотовозбужденные в полупроводниковой подложке диффундируют в графен, создавая в нем градиент концентрации носителей заряда

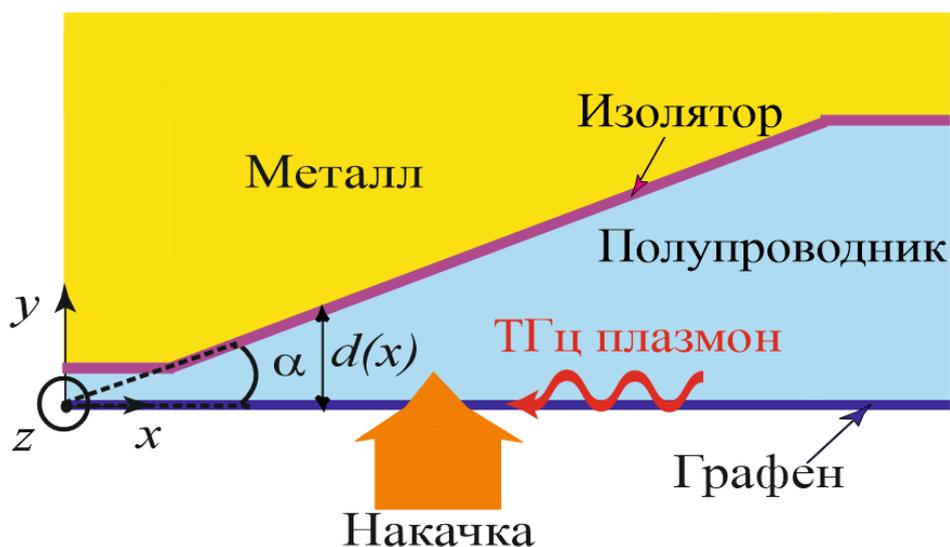


Рисунок 2 - схема клиновидной структуры, в которой осуществляется диффузионная накачка графена

Представлено решение уравнения, описывающего амбиполярную диффузию носителей заряда в клиновидной полупроводниковой подложке с учетом отражения волны накачки от металла и границы подложка-воздух с учетом прямого поглощения падающей накачки в графене.

Изучена прямая и диффузионная накачка графена на клиновидной подложке.

- а) Получены аналитические формулы для концентрации носителей заряда в графене и его подложке.
- б) Показано, что при толщинах подложки, сравнимых с длиной диффузии в подложке, диффузионная накачка графена на порядок величины более эффективна, чем прямая накачка графена. Показано, что при малых толщинах подложки концентрация носителей заряда, создаваемая диффузионной и прямой накачками близки по величине и учет прямой накачки графена необходим.

Описано построение теоретической модели для исследования замедления ТГц плазменной волны:

- Представлено определение фазовой скорости ТГц плазмона из дисперсионного соотношения для плазмонов
- Представлена связь динамической проводимости легированного графена с энергией Ферми в графене.
- Представлена связь энергии Ферми с концентрацией носителей заряда в графене.

#### **Глава 4. Теоретические результаты**

В четвертой главе бакалаврской дипломной работы представлены результаты численных расчетов:

Для задачи о диффузионной накачке графена на клиновидной подложке.

- Зависимость концентрации носителей заряда в графене от толщины подложки
- Сравнение концентраций в подложке и в графене для подложек из GaAs и InP
- Описано влияние толщины подложки на эффективность диффузионной накачки

Для задачи о замедлении ТГц плазменных волн в клиновидном волноводе с диффузионно накачиваемым графеном

- Изучена фазовая скорость плазмона в зависимости от расстояния вдоль клина (рис. 3)

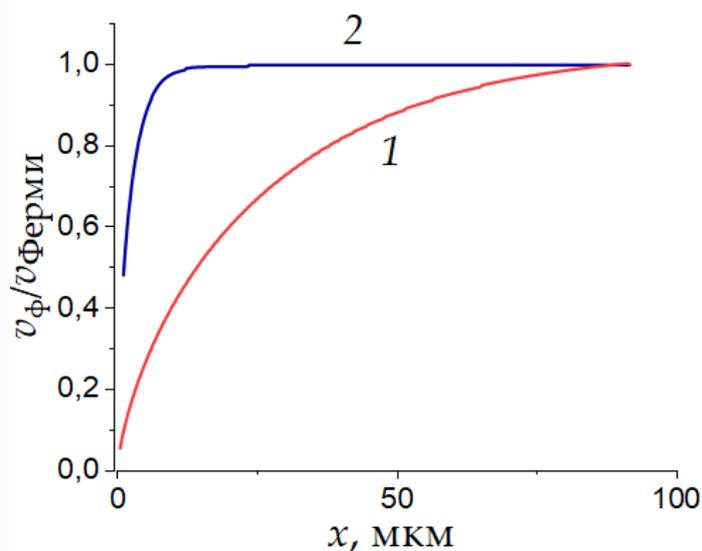


Рисунок 3 – график зависимости фазовой скорости от расстояния вдоль клина в отсутствии (кривая 1) и в присутствии (кривая 2) диффузионной накачки графена

- Исследовано влияние диффузионной накачки графена на скорость плазменной волны
- Построена карта фазовой скорости в зависимости от расстояния и мощности внешней оптической накачки (рис. 4)

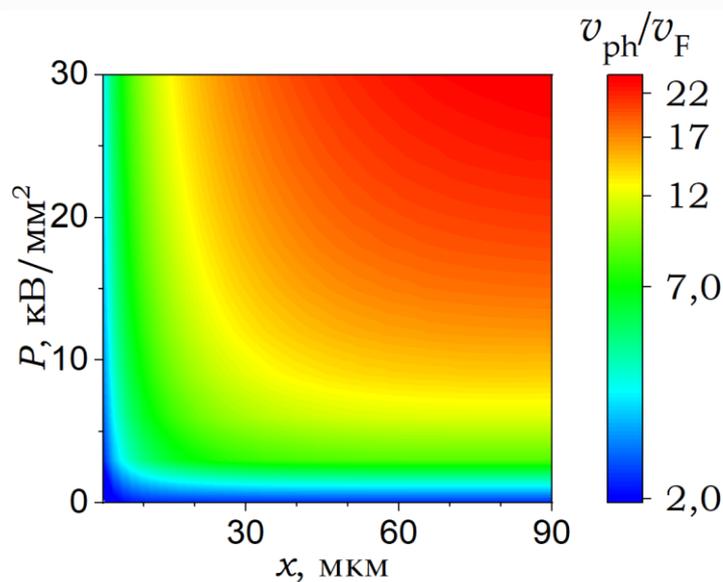


Рисунок 4 – карта фазовой скорости от расстояния вдоль клина и мощности внешней оптической накачки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении дипломной работы решен ряд, поставленных научным руководителем и консультантом задач:

- 1) Освоен программный пакет для вычислений Wolfram Mathematica.
- 2) Модернизирована компьютерная программа для расчета фазовой скорости ТГц плазменных волн в клиновидной структуре с диффузионно накачиваемым графеном.
- 3) Изучена прямая и диффузионная накачка графена на клиновидной подложке.
  - а) Получены аналитические формулы для концентрации носителей заряда в графене и его подложке.
  - б) Показано, что при толщинах подложки, сравнимых с длиной диффузии в подложке, диффузионная накачка графена на порядок величины более эффективна, чем прямая накачка графена. Показано, что при малых толщинах подложки концентрация носителей заряда, создаваемая диффузионной и прямой накачками близки по величине и учет прямой накачки графена необходим.
- 4) Теоретически изучено замедление терагерцовых плазменных волн в клиновидном волноводе с диффузионно накачиваемым графеном.
- 5) Показано, что замедление ТГц плазмонов в клиновидной структуре с диффузионной накачкой графена обусловлено двумя физическими причинами:
  - а) увеличением экранирования поля плазмона металлическим экраном;
  - б) изменением концентрации носителей заряда в графене вследствие диффузионной накачки.