

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

УДК 621.383.4

Шинкевич
Игорь Алексеевич

Моделирование плазмонных эффектов на поверхности полупроводниковых
структур

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 03 "Нанотехнологии и наноматериалы (в
электронике)"

Научный руководитель
Степанов Андрей Анатольевич
кандидат технических наук

Минск 2017

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день весь земной шар опутан оптическими волокнами, по которым передаются колоссальные потоки информации, закодированной в световых сигналах. Устройства, управляющие оптическими сигналами, могли бы прийти на смену электронным цепям в микропроцессорах и других микросхемах. К сожалению, дифракция накладывает серьезные ограничения на размеры и характеристики фотонных приборов: ширина оптического волокна, из-за интерференции световых волн, должна быть не меньше половины их длины. К примеру, предположим, что для передачи оптических сигналов внутри микросхем будет использоваться инфракрасный свет с длиной волны около 1 500 нм. Минимальная ширина волновода в этом случае будет слишком велика: транзисторы современных чипов состоят из элементов размером не более 100 нм.

Одним из вариантов «обхода» данного ограничения является использование плазмонных взаимодействий на границе раздела проводник-диэлектрик. Экспериментально было установлено, что при определенных условиях между световыми волнами, направленными на границу раздела между проводником и диэлектриком, и подвижными электронами на поверхности металла возникает резонансное взаимодействие. Иными словами, электроны начинают колебаться в такт с колебаниями электромагнитного поля над металлом. В результате возникают поверхностные плазмоны - волны плотности электронов, которые распространяются вдоль границы раздела как рябь на поверхности пруда, потревоженной упавшим камнем.

За последнее десятилетие исследователи пришли к выводу, что творческий подход к созданию границы между металлом и диэлектриком позволяет получать поверхностные плазмоны с той же частотой, что и внешние электромагнитные волны, но с намного меньшей длиной волны. Таким образом, плазмоны могут распространяться по наноскопическим межсоединениям, перенося информацию между частями микропроцессора. Плазмонные межсоединения стали бы настоящим подарком для разработчиков микросхем, которые давно научились уменьшать размеры и повышать быстродействие транзисторов, но до сих пор не изобрели электронные цепи, быстро передающие информацию внутри чипа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы состоит в выборе и, при необходимости, доработке оптимальной математической модели для моделирования плазмонных эффектов на поверхности полупроводниковых структур, создании программы для автоматизации расчетов и графического отображения плазмонных спектров.

Предметом исследования являются закономерности взаимодействия электромагнитных волн с коллективными колебаниями свободных носителей заряда в полупроводниковых структурах.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Обзор современных методик и подходов для математического моделирования плазмонных эффектов на поверхности полупроводниковых структур.

2. Выбор оптимально подходящей математической модели для моделирования плазмонных спектров.

3. Написание компьютерной программы позволяющей рассчитывать необходимые параметры взаимодействия (значений действительной и мнимой части комплексной проводимости, значений действительной и мнимой части коэффициента поверхностного распространения плазмонных волн, значения коэффициента абсорбции поверхностных плазмонных волн) между слоем исследуемого материала и поверхностными электромагнитными волнами.

4. Сравнение данных, полученных при помощи математического моделирования, с аналогичными данными, полученными экспериментальным путём.

Тема диссертационной работы соответствует пункту 3 указа президента Республики Беларусь №166 «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016 – 2020 годы», утверждённого 22 апреля 2015 года и пункту 6 постановления совета министров Республики Беларусь №190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы», утверждённого 12 марта 2015 года. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», в НИЛ 4.7 "Устройства обработки и отображения информации".

Соискателем самостоятельно проведен обзор и анализ научной и патентной литературы, выявлены и оценены современные методы и подходы к математическому моделированию плазмонных эффектов на поверхности различных полупроводниковых структур, а также написана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать расчеты и получать графические

отображения плазмонных спектров. Все основные результаты, выводы получены соискателем самостоятельно.

Положения выносимые на защиту:

1. Программный комплекс, позволяющий рассчитывать параметры взаимодействия (значения действительной и мнимой части комплексной проводимости, значения действительной и мнимой части коэффициента поверхностного распространения плазмонных волн, значения коэффициента абсорбции поверхностных плазмонных волн) между слоем исследуемого материала и поверхностными электромагнитными волнами в широком диапазоне частот.
2. Наличие резонансного пика на частотных спектрах поглощения тонких пленок проводящих материалов в терагерцевой области частот (1-1000 ТГц).

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на 52-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы из 40 наименований. Общий объем диссертации 67 страницы, в том числе 27 рисунков и 2 таблицы.

Во введении проведено краткое знакомство с областью, в рамках которой проводилась научно-исследовательская работа. Раскрыта актуальность выбранной темы магистерской диссертации.

Первая глава диссертационной работы содержит краткое описание истории развития плазмоники: начиная от примеров использования плазмонных эффектов древними римлянами и первого математического описания А. Зоммерфельдом и Дж. Зеннеком поверхностных волн на рубеже 19 и 20 века и заканчивая современными исследованиями в данной области. Также в первой главе приводится описание физических принципов возникновения объёмных и поверхностных плазмонных волн.

Во второй главе приводятся примеры устройств и приборов использующих поверхностные плазмонные взаимодействия. В данной главе описывается пять устройств: плазмонный волновод, устройство для фокусировки плазмонов, плазмонный нанорезонатор, плазмонный интерферометр и плазмонный переключатель.

В третьей главе данной диссертационной работы предлагается математическая модель для моделирования ключевых параметров взаимодействия поверхностных электромагнитных волн и коллективных колебаний свободных носителей заряда, таких как: комплексная динамическая проводимость, комплексный коэффициент распространения и коэффициент абсорбции. Также в третьей главе описывается компьютерная программа, разработанная для автоматизации расчетов и графического представления значений параметров, описанных выше, в широком диапазоне частот. Приводится общее описание программы, интерфейсов работы с программой, иллюстрации примеров работы программы, а также предлагаются дальнейшие возможности по её развитию.

В четвертой главе предлагается сравнение значений комплексной динамической проводимости, рассчитанных при помощи разработанной программы, со значениями комплексной динамической проводимости, полученной экспериментальным путём, в широком диапазоне частот.

В заключение диссертации резюмируются результаты проделанной работы, а также приводится список литературы, используемой при её написании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день вычислительная техника развивается стремительными темпами и, в соответствии с законом Мура, размерность вычислительных элементов уменьшается с каждым годом. Однако с уменьшением размерности элементов вычислительной техники связано возникновение новых проблем. Традиционный способ передачи информации между структурными элементами интегральных микросхем, по средствам электрических сигналов, существенно замедляет общее быстродействие микросхемы. Возможным решением этой проблемы является использование оптических каналов передачи информации. Существенной преградой для применения такого подхода является дифракционный предел, который определяет минимальный размер оптического элемента (например ширина оптического волокна) половиной длины волны передаваемых волн. Одним из вариантов «обхода» данного ограничения является использование поверхностных плазмонных волн для передачи информации между элементами интегральной схемы.

На сегодняшний день существенным недостатком при использовании плазмонных технологий для передачи информации между логическими элементами интегральных схем является относительно быстрое затухание плазмонных волн на поверхности проводящих материалов. Одним из вариантов решения данной проблемы является оптимальный выбор частоты электромагнитных волн для передачи информации по поверхности того либо иного материала. Для решения этой задачи в данной работе предложены методы математического моделирования спектров поверхностных плазмонных взаимодействий, а также разработана компьютерная программа позволяющая получать такие спектры.

Предлагаемая компьютерная программа может быть использована для расчета следующих параметров:

- значений действительной и мнимой части комплексной проводимости;
- значений действительной и мнимой части коэффициента поверхностного распространения плазмонных волн;
- значения коэффициента абсорбции поверхностных плазмонных волн.

Все вышеперечисленные значения рассчитываются в зависимости от следующих входных параметров:

- диапазон входных частот;

- количество контрольных расчётных точек (количество шагов);
- количества моноатомных слоёв нанесённых на полупроводниковую подложку;
- энергии Ферми (ϵ_F) каждого из моноатомных слоёв;
- времени свободного пробега (τ) носителей заряда в каждом из моноатомных слоёв;
- температура газа свободных носителей заряда (T) в каждом из моноатомных слоёв;
- параметры аппроксимации некоторых используемых функций.

В последней главе данной работы предлагается сравнение рассчитанных с помощью предложенной программы параметров с аналогичными параметрами, полученными экспериментальным путём.

Если развитие технологии позволит использовать эффекты плазмоники в промышленных масштабах, это позволит создавать вычислительные элементы столь малого размера, как ныне существующие электронные схемы, но с информационной емкостью и производительностью на несколько порядков больше.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Шинкевич И.А. Математическое моделирование плазменных спектров. / И. Шинкевич // Молодой учёный – Казань, 2016.

Библиотека БГУИР