

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА

к. ф.-м. н. Журавлёва Максима Николаевича
на диссертацию Семененко Вячеслава Леоновича

«Моделирование наноэлектромеханических детекторов терагерцевого излучения»,
представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.04.03 – радиофизика

Диссертационная работа Семененко В. Л. посвящена развитию методов математического моделирования работы микроэлектромеханических детекторов терагерцевого диапазона и изучению особенностей колебаний электронной плазмы при воздействии высокочастотного электромагнитного излучения. Переход в область субтерагерцевых и терагерцевых частот открывает новые возможности в информатике, системах связи, радиовидении и интерскопии, молекулярной спектроскопии, астрофизике, медицине, биологии и других областях науки и техники. Многие визуально непрозрачные неметаллические материалы частично пропускают или показывают молекулярный резонанс в терагерцевом диапазоне. В частности, водяной пар и другие мелкие полярные молекулы имеют сильное вращательное поглощение на терагерцевых частотах. Так как терагерцевое излучение не несет в себе такую угрозу здоровью и безопасности, как ионизирующее излучение (что является проблемой рентгеновской визуализации), оно может использоваться в неинвазивной томографии или спектроскопической характеристики биологических материалов. До настоящего времени в России и за рубежом не решена проблема создания надежных и компактных устройств с хорошей чувствительностью и высокой электромагнитной эффективностью для детектирования в ТГц диапазоне в широкой полосе частот. Таким образом, тема диссертационного исследования является актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, пяти приложений и списка использованных источников.

Первая глава диссертации посвящена обзору методов математического моделирования существующих схем детектирования терагерцевого излучения: болометры, диоды Шоттки, полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов. Также обсуждаются реализуемые на текущий момент параметры детекторов терагерцевого излучения

Во второй главе рассмотрены схемы микроэлектромеханического детектора модулированного терагерцевого излучения на основе полевого транзистора с высокой подвижностью электронов. Получено аналитическое выражение для оценки

чувствительности детектора и изучены условия возникновения параметрической неустойчивости.

Третья глава посвящена формулированию общих принципов моделирования микроэлектромеханических детекторов терагерцевого излучения. Показано, что данные устройства можно представить в виде связанных друг с другом механического и плазменного резонаторов. При возбуждении высокочастотного плазменного резонатора модулированным сигналом, возбуждаются колебания низкочастотного механического резонатора, которые в свою очередь преобразуются в выходной сигнал детектора. Рассмотрен способ моделирования детектора посредством сведения обоих распределенных резонаторов к эквивалентным сосредоточенным осцилляторам, установления типов связи между ними, а также характеризующих их констант. Обсуждаются два варианта возбуждения резонатора. Первый – возбуждение за счет переменных граничных условий. Второй – возбуждение внешним зависящем от времени воздействием (распределённой силой).

В четвертой главе на примере НЕМТ с цилиндрическим затворным электродом и (квази)одномерного резонатора на основе одностенной углеродной нанотрубки решена задача сведения плазменных резонаторов, входящих в исследуемые устройства, к сосредоточенным осцилляторам. Для нахождения комплексной функции линейного отклика успешно применяется метод Галеркина с использованием тригонометрических базисных функций. Исследуется возможность использования менее более простых приближенных аналитических моделей для описания колебаний в резонаторах с целью уменьшения трудоемкости и времени расчета на компьютере характеристик устройств на их основе.

В пятой главе представляется схема высокочувствительного детектора модулированного терагерцевого излучения на основе двух параллельных углеродных нанотрубок. Используя развитый в диссертационном исследовании теоретический подход, рассчитываются характеристики детектора. На основе приведённых аналитических оценок сделано заключение, что по чувствительности и мощности, эквивалентной шуму данное устройство соответствует наилучшим микроболометрам, а его время релаксации при этом на 3-4 порядка меньше, чем у микроболометров и составляет ~10 мкс, что может обеспечить приемлемую скорость передачи данных в коммуникационных приложениях.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Наиболее важными новыми результатами, полученными автором, представляются следующие:

1. Сформулированы общие принципы моделирования и расчёта характеристик микроэлектромеханических детекторов модулированного терагерцового излучения
2. Сформулированы условия возникновения параметрической неустойчивости в микроэлектромеханической системе, состоящей из транзистора с высокой подвижностью электронов, снабженного подвижным упругим затвором в виде микронанокантилевера (связанные друг с другом механический и плазменный резонаторы)
3. В рамках линейной гидродинамической модели решена задача о плазменных колебаниях двумерного электронного газа в канале полевого транзистора с цилиндрическим затворным электродом
4. Решена задача о возбуждении плазменных колебаний в системе из двух параллельных электрически связанных и консольно закрепленных однослойных углеродных нанотрубок

По диссертации имеется ряд **замечаний**:

1. Наличие постоянного напряжения в рассматриваемых в диссертации схемах детектирования приводят к изменению концентрации электронов проводимости в плазменных резонаторах. Автором не рассмотрен вопрос влияния величины данного фактора на такие характеристики детектора, как собственная частота колебаний в его плазменном резонаторе, а также на коэффициент, выражающий собой изменение этой частоты в зависимости от деформации механически колеблющихся элементов устройства.
2. В схеме детектора на рис. 21 (стр. 79) показано, что выходной сигнал снимается с концов углеродных нанотрубок. Однако, при решении уравнений (185), описывающих динамику электронной плазмы, автор считает токи на концах нанотрубок равными нулю (граничные условия (186)). В тексте диссертации не приведена оценка влияния на характеристики детектирования наличия высокочастотных токов через контакт между нанотрубками и соединяющимися с ними металлическими электродами.
3. Автор выносит за рамки своего диссертационного исследования вопрос дальнейшего преобразования, усиления и передачи выходного сигнала предлагаемого им детектирующего элемента внутри устройства субмиллиметрового размера, на который делается особый акцент при обосновании актуальности защищаемой темы. Таким образом, ввиду очень малой выходной электрической ёмкости предлагаемого детектора, параметры детектирования (в первую очередь – шум выходного сигнала и чувствительность) сигнала после первого же каскада усиления могут существенным образом отличаться от тех, что заявлены в диссертации.
4. В целом диссертация написана хорошим научным языком и аккуратно оформлена. Однако, в тексте встречаются опечатки, а также английские обозначения единиц измерения.

Сделанные замечания не снижают научной ценности и общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертация Семененко В. Л. является законченным научным трудом, выполненным на высоком научном уровне. Результаты проведенных автором исследований являются новыми и представляют значительный интерес как в научном отношении, так и с практической точки зрения. Основные результаты диссертационного исследования своевременно опубликованы в рецензируемых российских, рекомендованных ВАК, и международных научных журналах, неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Диссертационная работа Семененко В. Л. полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиоп физика.

Официальный оппонент,
Доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники
факультета электроники и компьютерных технологий МИЭТ,
кандидат физ.-мат. наук,



/ М. Н. Журавлев /

12.05.2015

Подпись М.Н. Журавлева удостоверяю.

Начальник ОК МИЭТ



/ С.В. Заболотный /

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Журавлёв Максим Николаевич

Учёная степень: кандидат физико-математических наук

Специальность: 01.04.10 – физика полупроводников

Почтовый адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1

Телефон: (499) 710-86-65

Адрес электронной почты: maxim@org.miet.ru

Наименование организации: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Должность: доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники