

На правах рукописи



Семенов Вячеслав Леонович

Моделирование наноэлектромеханических детекторов  
терагерцевого излучения

Специальность 01.04.03 — радиопизика

## АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный — 2015

**Работа выполнена** в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Московский физико-технический институт (государственный университет)”, в лаборатории нанооптики и плазмоники, г Долгопрудный

**Научный руководитель:**

Лейман Владимир Георгиевич,  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

- Рухадзе Анри Амвросиевич,  
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник теоретического отдела ФБГУН Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН
- Журавлев Максим Николаевич,  
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт Российской академии наук (ФТИАН)

Защита состоится «29» мая 2015 г., в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физ-мат.наук



Потапов Александр Алексеевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Успехи в области микро- и нанотехнологий открывают новые возможности для создания устройств малого размера, которые могли бы использоваться для сбора данных, выполнения манипуляций и коллективных задач в трудно доступных местах с высокой позиционной точностью [1–3]. Для полной реализации прикладного потенциала подобных устройств (роботов) необходимо, чтобы в объеме, ограниченном их небольшими размерами, содержались следующие функциональные элементы: компактные источники питания, двигатели и приводы, датчики контроля положения, а также системы приема и передачи информации. На данный момент, самые маленькие устройства, обладающие подобным набором функций, имеют размеры порядка сантиметра [4, 5]. Создание устройств существенно меньших размеров (порядка сотен микрометров) встречает ряд принципиальных трудностей, одной из которых является реализация систем связи устройств между ними и их внешним управляющим модулем.

На текущий момент, наиболее разработанным и внедренным в практическое использование способом двухсторонней коммуникации с малыми электрическими системами (размером до нескольких миллиметров) является технология радиочастотной идентификации (RFID) [6]. При этом, несмотря на то, что размер микроэлектронных чипов, использующихся в RFID-метках может быть меньше 1 мм, минимальный полный размер метки ограничивается размером антенны, который определяется используемым диапазоном излучения [7]. Можно отметить, что в настоящее время являются коммерчески доступными RFID системы СВЧ диапазона с рабочей частотой около 1 ГГц и активно разрабатываются системы, работающие на более высоких частотах [8]. Также, появляются отдельные публикации о RFID системах, работающих в терагерцевом диапазоне частот [9].

Терагерцевый диапазон электромагнитного излучения расположен между ИК и СВЧ диапазонами. Несмотря на то, что терагерцевые технологии в последние годы переживают бурное развитие [10, 11], создание компактных высокочувствительных перестраиваемых по частоте и работающих при комнатной температуре детекторов и генераторов терагерцевого излучения по-прежнему представляет собой сложную научную задачу. Это прежде всего обусловлено тем, что при приближении к терагерцевой области спектра методы генерации и детектирования, используемые в радио- и СВЧ-диапазоне, а также в оптическом и ИК-диапазоне, становятся мало эффективными. Так, вакуумные электронные приборы, при приближении к терагерцевой области, при своем изначально большом размере, требуют наличия сильных магнитных полей, а реализация терагерцевых квантовых генераторов и детекторов сталкивается с тем, что энергия терагерцевого фотона сравнима с тепловой энергией при комнатной температуре. Использование материалов, в которых реализуются низкоразмерные электронные системы, таких как полупровод-

никовые гетероструктуры GaAs/AlGaAs, углеродные нанотрубки с металлической проводимостью и графен, дает определенные возможности для преодоления этих трудностей. С одной стороны, данные структуры являются микроразмерными квантовыми системами, в которых волны зарядовой плотности (плазмоны) оказываются сильно замедленными (в сотни раз по сравнению со светом), что позволяет удовлетворить требованию компактности, с другой — параметром затухания таких плазмонов является не отношение тепловой энергии к энергии фотона (как в случае лазеров), а отношение частоты электронных столкновений к частоте плазменных колебаний. Это, наряду с тем фактом, что время релаксации импульса электрона в данных системах может быть меньше пикосекунды, позволяет создавать на их основе микроразмерные терагерцевые резонаторы с приемлемой добротностью.

В последние годы был предложен ряд микроэлектромеханических детекторов терагерцевого излучения, принцип работы которых основывается на одновременном возбуждении модулированным сигналом высокочастотных плазменных и низкочастотных механических колебаний в системе нелинейно связанных резонаторов [12–15]. Ввиду простоты схемы детектирования, реализованной в данных устройствах, на ее основе может быть предложено большое количество новых устройств, работающих по такому же принципу. Данный конкретный детектор такого типа можно модифицировать, изменяя, например, форму кантилевера, рабочую моду плазменных и/или механических колебаний, материал для плазменного резонатора, или используя другой метод преобразования механических колебаний в выходной сигнал. Моделирование и расчет характеристик таких устройств в общем случае представляет собой сложную вычислительную задачу, в рамках которой необходимо решать совместно уравнения электромагнетизма, гидродинамики и теории упругости. Кроме того, что такой подход очень громоздкий и требует большого вычислительного времени, он имеет другие существенные недостатки, например такие, как фактическая невозможность произвести анализ системы на предмет возникновения параметрической неустойчивости, которая может иметь место в рассматриваемых системах. В данной диссертации представлен общий подход к моделированию и расчету характеристик детекторов рассматриваемого типа, использование которого призвано облегчить разработку для конкретных приложений таких устройств, обладающих оптимальными параметрами.

### **Цели и задачи диссертационной работы.**

- Разработка общих принципов моделирования микро-/наномеханических детекторов терагерцевого излучения на основе систем со связанными механическими и плазменными резонансами.
- Поиск схем детектирования терагерцевого излучения, работающих при комнатной температуре, пригодных для использования в системах коммуникации с автономными устройствами субмиллиметрового размера.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется полученными впервые в ней **результатами**:

- Сформулированы общие принципы моделирования и расчета характеристик микро-/наноэлектромеханических детекторов модулированного терагерцевого излучения.
- Исследованы условия возникновения параметрической неустойчивости в ряде микро-/наноэлектромеханических систем, включающих в себя связанные друг с другом механический и плазменный резонаторы.
- Решена задача о возбуждении плазменных колебаний в двумерном электронном газе полевого транзистора с высокой подвижностью электронов с цилиндрическим затворным электродом.
- Решено уравнение Поклингтона с точным ядром, описывающее антенну из отрезка одностенной углеродной нанотрубки, методом Галеркина с использованием тригонометрических базисных функций.
- Представлена схема наноэлектромеханического детектора модулированного терагерцевого излучения, работающего при комнатной температуре и характеризующегося исключительно высокой чувствительностью, низким уровнем шума и достаточно низким временем релаксации.

**Научная и практическая ценность.** Впервые рассмотрены микро-/наноэлектромеханические (МЭМ/НЭМ) детекторы модулированного терагерцевого излучения как отдельный класс терагерцевых детекторов, работающих при комнатной температуре. Найдены характеристики ряда таких детекторов и впервые исследованы условия возникновения параметрической неустойчивости в МЭМ/НЭМ системах со связанными друг с другом механическим и плазменным резонаторами. Представлена схема нового НЭМ детектора, имеющего параметры чувствительности и мощности, эквивалентной шуму по крайней мере не хуже, чем у самых чувствительных и малошумящих высокотемпературных детекторов, представленных в публикациях последних лет — микроболометров. При этом, по параметру времени релаксации данный МЭМ детектор выигрывает у самых быстрых микроболометров 2-3 порядка, что открывает перспективы для его использования в системах коммуникации с автономными устройствами размером в сотни микрометров, предоставляя информационный канал с шириной порядка 0.1 Мбит/с.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Пороги возникновения параметрической неустойчивости в МЭМ/НЭМ детекторах достаточно велики, однако ее возникновение возможно при использовании совместно с детектором систем, усиливающих входящее излучение – антенн и/или линз.

- В случае небольших добротностей высокочастотного резонатора параметрическая неустойчивость в системах, описываемых уравнениями типа емкостного датчика, может возникать при обоих знаках расстройки возбуждающего сигнала.
- МЭМ/НЭМ детекторы терагерцевого излучения могут иметь чувствительность порядка  $10^6$  В/Вт при мощности, эквивалентной шуму порядка  $10^{-12}$  Вт/Гц, что соответствует наилучшим характеристикам используемых в настоящее время неохлаждаемых терагерцевых микродетекторов.

**Достоверность защищаемых положений и других результатов работы** обеспечивается использованием в ней общепринятых математических моделей рассматриваемых физических объектов, а также аналитических и численных методов для их анализа. Все характеристики устройств, полученные в результате громоздких численных методов, проверялись путем сравнения с вычислениями тех же характеристик на основе принципиально отличающихся подходов. Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией Семененко В.Л., были отмечены следующими международными наградами:

- **2010** – IBM PhD Fellowship Award,
- **2010** – Young Scientist Prize (на конференции MSMW'10),
- **2011** – K. Alex Muller Award.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Результаты работы были использованы при выполнении следующих проектов:

1) “Физические принципы создания устройств обработки сигналов в терагерцевой области частот на основе низкоразмерных электронных систем и механически подвижных элементов микро- и наноразмеров” (в рамках проекта № 14.740.11.0469 от 01.10.2010 г); 2) “Наноразмерные высокоскоростные межсоединения для терагерцевого и оптического диапазонов частот” (в рамках проекта № 14.740.11.1437 от 03.11.2011 г); 3) “Устройства обработки сигналов в терагерцевой области частот на основе низкоразмерных электронных систем и механически подвижных элементов микро- и наноразмеров” (в рамках проекта № 16.513.11.3129 от 13.10.2011 г).

**Патенты.** В рамках работы над диссертацией было создано программное обеспечение, которое было опубликовано в Реестре программ для ЭВМ:

- «Программа для расчета параметров модели металлов Друде по их табулированным экспериментально полученным диэлектрическим функциям (DrudeApp)» (свидетельство № 2012616595, зарегистрировано в Реестре программ 23.07.2012 г.) автора Семененко В.Л.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях и симпозиумах:

1. The 7th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, millimeter and SubMillimeterWaves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology (TERATECH'10) (Ukraine, Kharkov, 2010),
2. The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2010) (Italy, Rome, 2010),
3. The 7th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2012) (Japan, Kyoto, 2012),
4. Japan – Russia – USA Workshop (Modeling of Graphene Terahertz, Nano-Mechanical and Acousto-Optical Devices) (Japan, Aizu-Wakamatsu, 2012),
5. Fundamental and Applied NanoElectroMagnetics (FANEM) (Belarus, Minsk, 2012),
6. Nanomeeting–2013 (Belarus, Minsk, 2013),
7. The 2nd Russia – Japan – USA Symposium (The Fundamental & Applied problems of Terahertz Devices & Technologies) (Russia, Moscow, 2013).

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Работа содержит 113 страниц, 21 рисунок, 4 таблицы, 5 приложений, и 90 наименований в списке литературы.

**Благодарности.** Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Российского фонда фундаментальных исследований.

## Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель исследования, а также приводятся положения, выносимые автором на защиту.

Обзорная составляющая диссертации изложена в ее первой, а также частично во второй и в третьей главах. В первой главе рассмотрены основные известные и внедренные в практическое использование схемы детектирования терагерцевого излучения, работающие при комнатной температуре и имеющие микрометровые размеры. Было рассмотрено три класса таких детекторов: микроболометры, диоды Шоттки (ДШ), а также детекторы на основе полевых транзисторов. Предполагается, что данные устройства могут быть основными конкурентами МЭМ/НЭМ детекторов модулированного терагерцевого излучения при использовании последних в качестве средств коммуникации с малыми электронными автономными устройствами, имеющими размер до 1 мм. По результатам анализа характеристик трех данных типов детекторов, приведенных в публикациях последних лет, можно отметить следующие их преимущества:

- Чувствительность детекторов на основе микроболометров может достигать рекордной чувствительности, порядка  $10^5$  В/Вт, при уровне шума порядка  $1 \div 10$  пВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ .
- Ширина информационного канала систем коммуникации на основе диода Шоттки ограничивается только частотой отсечки, которая у наиболее высокочастотных ДШ имеет порядок  $10^{12}$  Гц.
- Детекторы на основе полевых транзисторов помимо высокой рабочей частоты (до нескольких ТГц) и высокой ширины информационного канала, соответствующей частотам порядка десятых долей ТГц, также могут быть легко интегрированы в уже существующие технологические процессы массового производства электронных микросхем.

К недостаткам данных типов детекторов можно отнести следующее:

- Очень большое время релаксации микроболометров (порядка  $10^{-2}$  секунды).
- Большие шумы и низкая чувствительность детекторов на основе полевых транзисторов (порядка сотен нВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и единиц В/Вт, соответственно).

Также, общим недостатком всех приведенных типов детекторов является необходимость в усилении даваемого ими выходного сигнала, в результате чего конечные шумовые характеристики будут заметно ухудшены из-за шума усилителя, который должен быть также реализован в исходно малом размере устройства, с которым осуществляется коммуникация.

В последующих главах диссертации показывается, что НЭМ детекторы модулированного терагерцевого излучения могут иметь показатели чувствительности и шума не хуже, чем у микроболометров при меньшем на 3–4 порядка времени релаксации. Также, вычисление величины выходного сигнала



детектора при его облучении электромагнитным излучением с рабочими значениями интенсивности показывает, что выходной сигнал достаточно велик для его последующего преобразования в рассматриваемом субмиллиметровом устройстве.

**Во второй** главе представляется концепция МЭМ детектора терагерцевого излучения, рассматривается ряд схем детекторов на ее основе, которые были предложены другими авторами, приводятся некоторые их параметры и характеристики.

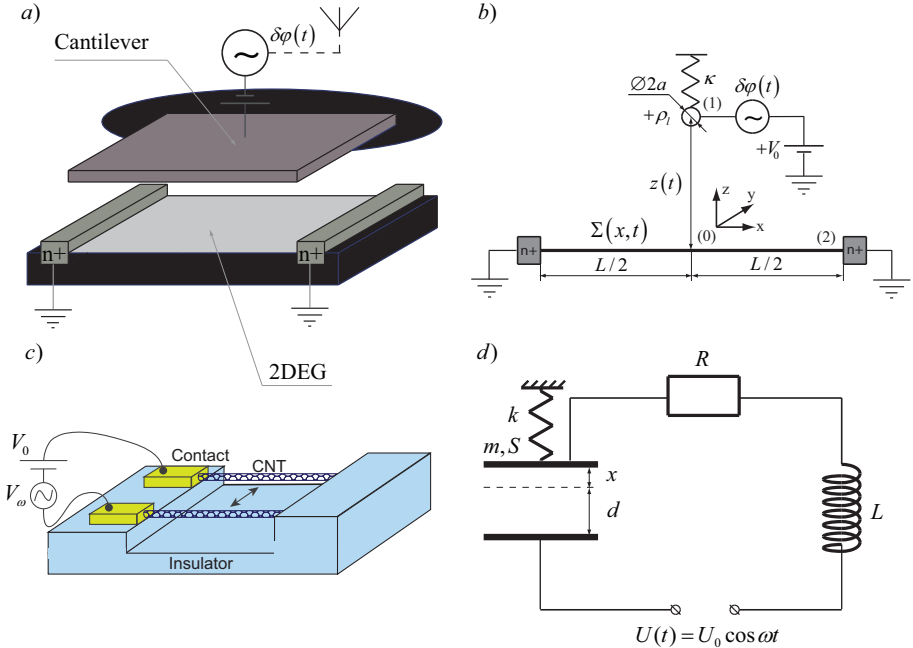


Рис. 1: a), b), c) — схемы некоторых МЭМ детекторов модулированного терагерцевого излучения, d) — схема электромеханического детектора малых сил и смещений.

На рисунке 1 схематично показаны эти МЭМ детекторы на основе: а) полевого транзистора с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) с плоским затворным электродом [12], б) — НЕМТ с цилиндрическим затворным электродом [13], в) — четверть-волнового отрезка двухпроводной линии из одностенных углеродных нанотрубок [14]. Выходным сигналом в этих устройствах является наведенный переменный ток в цепи источника постоянного напряжения, возникающий в результате механических колебаний и соответствующего изменения электрической емкости в системе. Чувствительность данных детекторов, равная максимальному отношению величины амплитуды выход-

ного низкочастотного сигнала к поглощаемой ими мощности, для всех трех приведенных схем по теоретическим оценкам составляет порядка 100 мА/Вт. Это значение сравнимо с чувствительностью других известных высокотемпературных терагерцевых фотодетекторов, реализованных на практике в последнее время [16, 17]. При добротности механического резонатора, равной 1000, время релаксации МЭМ детектора составляет около 10 микросекунд, что может обеспечить ширину информационного канала до 0.1 Мбит/с при работе детектора в качестве средства коммуникации. Такой скорости передачи данных может оказаться вполне достаточно при коммуникации с малым автономным устройством, субмиллиметрового размера.

В каждом конкретном случае можно показать, что при рассмотрении системы в терминах сосредоточенных параметров, когда входящие в нее распределенные резонаторы приближенно представляются эквивалентными *элементарными осцилляторами*<sup>1</sup> исходная система описывается уравнениями такого же вида, как и представленная на рисунке 1d) схема электромеханического детектора малых сил и смещений (ёмкостного датчика [18]):

$$\begin{cases} M\ddot{x} + \alpha\dot{x} + kx = -\frac{2\pi q^2}{S} \\ L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C_0} \left(1 + \frac{x}{d}\right) = U(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания колебаний пластины (механического резонатора),  $M$  — ее масса,  $S$  — площадь,  $k$  — коэффициент упругости пружины, на которой закреплена пластина,  $x$  — отклонение подвижной пластины от основного положения, в котором расстояние между ней и неподвижной пластиной равно  $d$ ,  $L$  — индуктивность контура,  $R$  — омическое сопротивление,  $C_0 = S/4\pi d$  — ёмкость конденсатора, образуемого пластинами при  $x = 0$ ,  $q$  — заряд на пластинах,  $U(t) = U_0 \cos \omega t \times [1 + m \cos \Omega t]$  — входной сигнал, подаваемый на датчик,  $U_0$  — его амплитуда,  $\omega$  — частота,  $m$  и  $\Omega$  — глубина и частота модуляции, соответственно. Для приведенных схем терагерцевых МЭМ/НЭМ детекторов могут быть получены аналогичные системы уравнений (с другими коэффициентами), в которых первое уравнение будет описывать колебания низкочастотного механического резонатора, а второе — колебания электронной плотности в высокочастотном плазменном резонаторе. Характерные собственные частоты механического и плазменного резонатора

<sup>1</sup> под элементарным осциллятором в диссертации понимается резонансная система, имеющая одну степень свободы (как это понимается в теоретической механике) и линейный отклик которой вблизи выбранного рабочего частотного диапазона описывается комплексной функцией Лоренцевого вида:

$$K(\omega) = \frac{A \times \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega},$$

где  $A$  — некоторая действительная константа,  $\omega_0$  и  $\gamma$  — частота и параметр затухания резонанса.

в МЭМ/НЭМ детекторах равны сотням МГц и единицам ТГц, соответственно.

Общий принцип получения системы уравнений в терминах сосредоточенных параметров для произвольной схемы МЭМ детектора подразумевает выполнение следующих действий:

- Выбор величин  $q$  и  $x$ , описывающих колебания эффективных элементарных осцилляторов, соответствующих плазменному и механическому резонаторам. Например, в случае колебаний электронной плазмы в канале транзистора, изображенного на рисунках 1а) и 1б), удобно использовать полную амплитуду колебаний заряда, протекающего между концами канала и затворным электродом. При колебаниях консольно закрепленного с обоих концов кантилевера удобно использовать специальным образом вычисляемую величину, пропорциональную его среднему прогибу.
- Вычисление линейного отклика эффективной величины  $q_\omega$ , описывающей колебания плазменного резонатора в ответ на возбуждающее воздействие  $\delta\varphi_\omega$ , которым часто в рассматриваемых в диссертации устройствах был сигнал переменного напряжения, генерируемый антенной, используемой в детекторе. Для одного случая удобно было в качестве воздействующей на детектор величины взять непосредственно электрическое поле падающей на детектор волны.
- Приближение передаточной функции  $K(\omega)$ , связывающей  $q_\omega$  и  $\delta\varphi_\omega$  зависимостью Лоренцевого вида вблизи выбранного резонанса. Такое приближение можно найти для любого резонатора, поскольку функция  $K(\omega)$  обладает тем свойством, что комплексные резонансные частоты системы являются ее полюсами первого порядка. Если подобрать Лоренцевую функцию

$$\mathcal{L}(\omega, \omega_0, \gamma) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (2)$$

имеющую полюс при той же частоте, умноженную на некоторую константу, можно добиться того, чтобы первые члены разложения в ряд Лорана функции  $K(\omega)$  и ее приближения совпадали. Таким образом, найденное приближение будет хорошо описывать точную частотную зависимость по крайней мере в пределах полосы резонанса, при условии, что его добротность  $Q = \omega_0/\gamma$  достаточно большая.

- Вычисление распределенной силы, действующей со стороны зарядов системы на кантилевер. Затем на основе ее формы и типа закрепления кантилевера можно получить эффективное уравнение, определяющее колебания его основной моды. Более старшие моды механических колебаний в рассматриваемых нами системах не возбуждаются.

- Вычисление зависимости собственной частоты плазменного резонатора от степени деформации механического резонатора, определяемой эффективной скалярной величиной  $x$ .

В рассматриваемой главе диссертации, путем приведения системы уравнений типа (1) к безразмерному виду показывается, что основные режимы работы МЭМ детектора характеризуют три безразмерных параметра — добротности  $Q_m$  и  $Q_e$  механического и плазменного резонаторов, а также отношение  $n$  частоты плазменного резонатора к частоте механического:

$$Q_m = \frac{\omega_m}{\gamma_m}, \quad Q_e = \frac{\omega_e}{\gamma_e}, \quad n = \frac{\omega_e}{\omega_m}, \quad (3)$$

где  $\omega_m$  и  $\omega_e$  — собственные частоты механического и плазменного резонаторов,  $\gamma_m$  и  $\gamma_e$  — их константы затухания. В зависимости от этих безразмерных параметров вычисляются следующие характеристики МЭМ детекторов: чувствительность  $R_I$ , характерная величина амплитуды несущей волны  $E_{0,\max}$ , при которой механический резонатор раскачается настолько сильно, что на его движение будут оказывать сильное влияние нелинейные эффекты, а также пороговое значение амплитуды монохроматического сигнала  $E_{0,\text{th}}$ , подаваемого на детектор, выше которого в системе возникает параметрическая неустойчивость, что выражается в раскачивании низкочастотного механического резонатора при отсутствии модуляции несущей волны. Данные величины следующим образом зависят от  $Q_m$ ,  $Q_e$  и  $n$ :

$$R_I \propto n^2 Q_e Q_m, \quad E_{0,\max}^2 \propto \frac{1}{n^2 Q_e^2 Q_m}, \quad E_{0,\text{th}}^2 \propto \frac{1}{n \cdot Q_e^4 Q_m}. \quad (4)$$

Заметим, что коэффициенты, стоящие в выражениях для  $E_{0,\max}^2$  и  $E_{0,\text{th}}^2$ , имеют одну и ту же размерную составляющую и различаются в зависимости от геометрии конкретного устройства на множитель порядка  $1 \div 100$  (см. главы №2 и №5 данной диссертации). Таким образом, можно установить, что при характерных параметрах МЭМ детектора  $n \sim 10^4$  и  $Q_e \sim 10$ , отношение  $E_{0,\text{th}}^2/E_{0,\max}^2$  составляет примерно  $1 \div 100$ . Поскольку  $E_{0,\max}$  ограничивает рабочий диапазон значений амплитуды несущей волны, принимаемого МЭМ детектором сигнала, можно утверждать, что при его работе в качестве средства коммуникации, возникновение параметрической неустойчивости ожидать не следует из-за высокого порога ее наступления. Заметим, что величина  $E_{0,\max}$  рассчитывается для условного значения глубины модуляции входящего сигнала  $m = 0.1$ , а в случае монохроматического (немодулированного) сигнала она равна бесконечности. Таким образом, если непосредственно задаться целью возбуждения параметрической неустойчивости в МЭМ детекторе, этого можно достичь при относительно невысоких интенсивностях падающего монохроматического излучения. Так, как было показано в работе [19], пороговая величина переменного напряжения в МЭМ детекторе на основе НЭМТ

с цилиндрическим затворным электродом, при которой возникает параметрическая неустойчивость, может составлять порядка 5 мВ. Такая амплитуда высокочастотного сигнала может быть получена при облучении антенны размером в несколько сотен микрометров терагерцевым излучением с интенсивностью порядка одного мВт/см<sup>2</sup>.

Вопрос возникновения параметрической неустойчивости ранее рассматривался применительно к оптомеханическим системам, использующимся для детектирования малых сил, смещений и масс [18, 20, 21]. Одним известным представителем таких систем является интерферометр Фабри-Перо с упруго закрепленным зеркалом, который используется в проекте LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), целью которого является поиск гравитационных волн. Не смотря на то, что работу данной системы можно моделировать уравнениями вида (1), которые описывают емкостной датчик, расчет порогов возникновения параметрической неустойчивости в ней менее трудоемок, чем в случае МЭМ/НЭМ детекторов. Это обусловлено тем, что добротность оптических резонаторов, используемых в упомянутых резонаторах, имеет порядок  $10^7$  и выше, а плазменных резонаторов в МЭМ детекторах добротность достигает не более нескольких десятков. При небольших добротностях высокочастотного резонатора в МЭМ детекторах при расчете порогов возникновения параметрической неустойчивости необходимо учитывать смещение положения равновесия механического резонатора под действием пондеромоторной силы, вызванной колебаниями электрического заряда в плазменном резонаторе. Если в случае оптомеханических детекторов можно было получить конечную формулу для вычисления величины пороговой амплитуды сигнала, то в случае МЭМ детекторов необходимо решать совместно два нелинейных уравнения, имеющих несколько корней и особые точки. В результате численного решения этих уравнений, для любых параметров рассматриваемого детектора  $Q_m$ ,  $Q_e$  и  $n$  можно получить зависимость пороговой амплитуды сигнала от величины расстройки  $d$  между частотой возбуждающего сигнала и собственной частотой плазменного резонатора. В отличие от зависимостей, представленных для оптомеханических детекторов в работах [21, 22], в случае МЭМ детекторов параметрическая неустойчивость может наблюдаться как при положительных, так и при отрицательных величинах расстройки  $d$ .

В конце данной главы делаются следующие выводы:

- Микроэлектромеханические детекторы модулированного терагерцевого излучения по параметру чувствительности сравнимы и даже превосходят детекторы других типов, работающих при комнатной температуре.
- Их малый размер, высокая чувствительность и относительно небольшая пропускная способность информационного канала (от  $10^3$  до  $10^6$  бит/с) делают возможным их использование в качестве средств коммуникации с автономными электрическими устройствами субмиллиметрового

размера.

- Независимо от конкретного вида терагерцевого МЭМ детектора, зависимости его характеристик от трех основных параметров (добротностей механического и плазменного резонаторов, а также отношения собственной частоты плазменного резонатора к собственной частоте механического) являются одними и теми же.
- В некоторых МЭМ детекторах, характеризующихся малой массой механического резонатора и высокой его собственной частотой колебаний возможно параметрическое возбуждение механического резонатора при относительно небольшой интенсивности принимаемого детектором терагерцевого излучения.
- В случае, когда МЭМ детектор работает в режиме демодулятора, параметрическая неустойчивость не может проявиться ввиду малой интенсивности принимаемого детектором излучения.
- Параметрическая неустойчивость в МЭМ детекторах может возникать как при положительных, так и при отрицательных величинах расстройки между частотой возбуждающего монохроматического сигнала и частотой собственных колебаний высокочастотного резонатора.

**В третьей** главе рассматриваются некоторые примеры получения уравнений колебаний эффективных элементарных осцилляторов, которыми можно приближенно описывать колебания распределенных резонаторов, когда такая процедура оказывается относительно несложной. Показывается, что уравнение вынужденных колебаний эффективного осциллятора может быть получено для любой распределенной резонансной системы при известной ее комплексной амплитудно-частотной характеристике линейного отклика [23]. Трудоемкость вычисления функции линейного отклика определяется главным образом видом уравнений, которым подчиняются колебания в распределенном резонаторе. Здесь можно выделить два типа уравнений, которые в диссертации называются в одном случае *локальными*, в другом — *нелокальными*. Уравнения, описывающие некоторую систему, называются локальными, если параметры ее состояния в каждой точке координатного пространства в любой момент времени зависят от своих значений в предыдущие моменты в той же точке пространства и в бесконечно малой окрестности около нее. Если параметры состояния системы в каждой ее точке зависят от значений этих параметров в предыдущие моменты времени, в этой же точке и в других точках системы, отстоящих от нее на *конечное* расстояние, то про такую систему говорится, что она описывается нелокальными уравнениями. В случае локальных уравнений, описывающих систему, функция линейного отклика находится относительно просто, ввиду того, что решение задачи о

вынужденных малых колебаниях строится на основе стандартных базисных функций, вид которых не зависит от размеров системы.

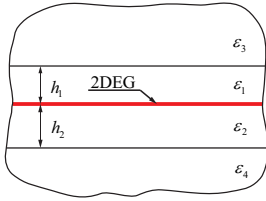
На простом примере интерферометра Фабри-Перо, описывающегося локальными уравнениями показано, как руководствуясь пунктами, сформулированными в описании к главе №2, в случае оптомеханического детектора малых смещений можно получить систему уравнений вида (1). От других, более сложных случаев, рассмотренных далее в диссертации, по части выполнения упомянутых пунктов данная система отличается лишь тем, что ее механический резонатор уже представляет собой элементарный осциллятор, а собственная частота оптического резонатора в зависимости от его смещения вычисляется тривиальным образом.

Также, в данной главе рассматривается два наиболее часто встречающихся на практике случая возбуждения распределенных резонаторов, описываемых локальными уравнениями. В первом примере возбуждение осуществляется за счет переменных граничных условий. Показывается, что в таком случае для получения уравнения вынужденных колебаний эффективного элементарного осциллятора необходимо знать только дисперсионное соотношение для бегущих волн, распространяющихся в резонаторе. Во втором случае возбуждающее воздействие распределено непрерывно по всей длине резонатора. В качестве примера рассмотрено возбуждение механических колебаний кантилевера, на который действует переменная распределенная сила [24]. При таком возбуждении, в отличие от предыдущего случая, в решение задачи о вынужденных колебаниях, в зависимости от распределения возмущающей нагрузки, могут вносить вклад любые пространственные моды собственных колебаний резонатора.

**В четвертой** главе рассматриваются вопросы получения частотных функций линейного отклика распределенных резонаторов, описывающихся нелокальными уравнениями. Одним из элементов МЭМ/НЭМ детекторов является плазменный резонатор на основе низкоразмерных электронных систем, таких как двумерный электронный газ (2d-ЭГ) в полупроводниковых гетероструктурах и графене, а также квазиодномерный электронный газ в одностенных углеродных нанотрубках (ОСУНТ) с металлической проводимостью. Низкоразмерные электронные системы выбраны в данном случае потому, что электроны в них имеют высокую подвижность, а плазменные волны (или волны электронной плотности) достаточно замедлены, в результате чего на их основе возможно создание резонаторов терагерцевой частоты микрометрового размера с приемлемой добротностью. Поскольку взаимодействие между электронами является дальнедействующим, в уравнениях движения заряда появляются интегралы от искомым функций по всей геометрии системы, то сами уравнения, описывающие колебания заряда в плазменных резонаторах являются нелокальными. В отличие от локальных уравнений, в нелокальном случае для резонатора конечных размеров становится невозможным выписать уравнение бегущей волны в стандартном виде линейной комбинации ком-

плексных экспонент с постоянными амплитудой и волновым вектором. Это обстоятельство существенно затрудняет нахождение решений для колеблющихся величин в аналитическом виде. При этом численные методы решения таких задач, предоставляемые известными программными пакетами, оказываются неэффективными ввиду того, что в случае низкоразмерных систем искомые точные пространственные зависимости заряда в них часто имеют сингулярности на границах низкоразмерного резонатора.

В первом разделе данной главы рассчитываются спектры волн в основных



плазменных волноведущих системах, на основе которых могут быть выполнены терагерцевые резонаторы для МЭМ/НЭМ детекторов. В диссертации рассматривается две таких системы. Первая представляет собой двумерный электронный газ, окруженный четырьмя слоями разных диэлектрических материалов (см. рисунок слева). Вторая состоит из двух одинаковых

параллельно расположенных одностенных углеродных нанотрубок. В такой системе, спектр плазменных волн имеет две ветви, одна из которых соответствует симметричному случаю, а другая — антисимметричному. Антисимметричный случай реализуется, в частности, в обыкновенных двухпроводных линиях, и применительно к проводным линиям из ОСУНТ он рассматривался в работах [14, 25]. В пятой главе диссертации будет рассмотрено устройство на основе двух параллельно расположенных ОСУНТ, работа которого принципиально основана на возбуждении симметричных плазменных волн. Таким образом, изложенные в главе №4 материалы по спектрам плазменных волн в ОСУНТ и их возбуждению кроме того что имеют обзорный характер, также используются в дальнейшем при математическом моделировании и расчете характеристик новой, предлагаемой автором диссертации, схемы МЭМ детектора.

Заметим, что из вида дисперсионного соотношения для волн, распространяющихся в волноводе, можно установить локальность или нелокальность уравнений, которые описывают колеблющиеся в нем величины. Так, волноведущая система описывается или ее описание может быть сведено к локальным уравнениям, если можно подобрать такую однородную линейную алгебраическую систему уравнений, дискриминант которой дает дисперсионное соотношение этого волновода, и при этом элементы матрицы данного однородного уравнения являются действительными полиномиальными функциями от величин  $i\omega$  и  $ik_\alpha$ , где  $\alpha \in \{x, y, z\}$  — наименования координатных осей, а  $k_\alpha$  — проекции волнового вектора на них.

Во втором и третьем разделах рассматривается возбуждение колебаний в двух плазменных резонаторах, описываемых нелокальными уравнениями. Первый резонатор выполнен на основе полевого транзистора с высокой подвижностью электронов с цилиндрическим затворным электродом (см. рисунок 1b)). Второй — представляет собой ограниченный отрезок микромет-



рового размера ОСУНТ с металлической проводимостью, находящийся в поле электромагнитной волны терагерцевого диапазона. Для точного решения нелокальных уравнений, описывающих колебания в рассматриваемых плазменных резонаторах, применяется метод Галеркина с использованием тригонометрических базисных функций. Он также успешно использовался в работе автора диссертации для нахождения характеристик графенового пролетного  $p - i - n$  диода [26]. В случаях обоих резонаторов были найдены их точные комплексные амплитудно-частотные характеристики и сравнены с таковыми, полученными при использовании приближенных моделей описания данных систем.

Оказалось, что в резонаторе на основе двумерного электронного газа в транзисторе с цилиндрическим затворным электродом приближенная модель, которая в частности была использована в других публикациях [13], дает значения параметров эффективного элементарного осциллятора отличающиеся от точных на множитель порядка единицы. Это могло бы быть аргументом в пользу использования приближенной модели, которая позволяет получать решения в аналитическом виде и не требует выполнения времязатратных операций на компьютере, однако, она не может быть использована для описания других, более тонких эффектов, наблюдаемых в устройстве. Так, при близком расположении затвора транзистора к слою двумерного электронного газа (2d-ЭГ) (см. рисунок 1b)) и частотах, соответствующих четным по счету резонансам, поперечная сила взаимодействия зарядов затвора и 2d-ЭГ направлена на их расталкивание, в то время как при нечетных резонансах она имеет характер притяжения. Этот эффект пропадает при большом удалении затвора от слоя 2d-ЭГ — в таком случае они притягиваются при всех резонансах. Чтобы проиллюстрировать отличие случая четных резонансов от случая нечетных, на рисунке 2 представлены пространственные зависимости фазы в стоячих волнах плотности заряда в канале транзистора. Они построены для следующих параметров системы: длины канала транзистора  $L = 1$  мкм, расстояния между осью затвора и слоем 2d-ЭГ  $z_0 = 50$  нм, радиусом затвора  $a = 5$  нм (см. рис. 1b)) и добротности основного резонанса  $Q = 10$ .

Из рисунка видно, что в случае нечетных резонансов фаза колебаний при переходе через узел скачкообразно меняется на  $\pi$  как к в обыкновенной стоячей волне. В случае же четных резонансов фаза меняется непрерывно, что особенно выражено для резонанса с  $n = 2$ .

В случае возбуждения плазменных волн в отрезке ОСУНТ было найдено точное решение для распределения тока вдоль нее путем численного решения уравнения Поклингтона с точным ядром. Также, данная задача была решена приближенным способом, в основе которого лежит замена исходных нелокальных уравнений, описывающих систему, некоторой системой локальных уравнений. Получено, что точный и приближенный методы дают очень близкие результаты, что можно объяснить тем, что входящий в дисперсионное

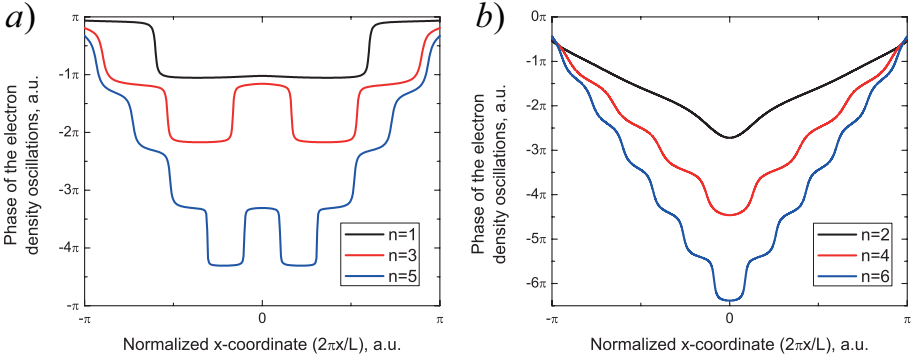


Рис. 2: Пространственные зависимости фазы колебаний электронной плотности в стоячей волне в канале полевого транзистора с цилиндрическим затворным электродом в случае первых трех а) нечетных мод, б) — четных.

соотношение член в виде логарифма от волнового вектора, и указывающий на то, что уравнения, описывающие систему не могут быть приведены к конечной системе локальных уравнений, является достаточно слабой зависимостью, которую в пределах существенного ( $\pm 20\%$ ) изменения аргумента можно считать постоянной. Это обстоятельство позволяет в дальнейшем сильно упростить выкладки при моделировании детектора на основе плазменного резонатора из двух металлических ОСУНТ, в котором волны характеризуются дисперсией похожего вида.

**В пятой главе** приводится пример расчета новой схемы МЭМ детектора, представленной в одной из работ автора диссертации. Одной общей характерной особенностью МЭМ детекторов, о которых ранее говорилось в главе № 2 является то, что выходной сигнал в них снимается в виде наведенного переменного тока, протекающего в основной цепи устройства из-за меняющейся во времени электрической ёмкости, что схематично представлено на рисунке 3 слева.

В данном случае сигнал на выходе устройства пропорционален амплитуде колебаний абсолютного значения ёмкости:

$$\delta I_{\omega} = V_0 \cdot \delta C_{\omega}. \quad (5)$$

Не смотря на то, что ёмкости в рассматриваемых устройствах достаточно малы и имеют порядок фемтофарад, получаемые по оценкам значения чувствительности  $\sim 100 \text{ mA/W}$  сравнимы и даже превосходят чувствительности других детекторов терагерцевого излучения, используемых в настоящее время [16, 17].

Добиться еще больших показателей чувствительности возможно при использовании более эффективной схемы снятия выходного сигнала, изобра-

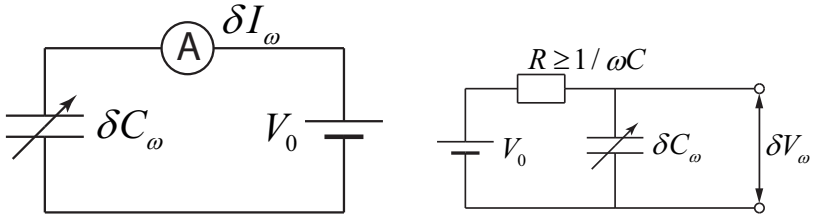


Рис. 3: Две системы детектирования переменной ёмкости: по величине наведенного переменного тока (слева), и по наведенному переменному напряжению (справа).

женной на рисунке 3 справа. В ней благодаря большому значению сопротивления в цепи источника постоянного напряжения по сравнению с реактивным сопротивлением конденсатора, заряд на нем не успевает стекать в цепь питания за время порядка периода колебаний ёмкости  $2\pi/\omega$ . В результате заряд остается запертым на конденсаторе, переменная составляющая разности потенциалов на котором пропорциональна амплитуде колебаний *относительного* изменения ёмкости:

$$\delta V_\omega = -V_0 \times \frac{\delta C_\omega}{C_0}. \quad (6)$$

Как показывает проведенный расчет, терагерцевый детектор, в котором реализуется такой способ снятия выходного сигнала может иметь при комнатной температуре чувствительность, большую, чем самые лучшие микроболметры, которые являются в настоящее время рекорсменами по данной характеристике.

Наиболее адаптируемой для съема выходного сигнала в виде наведенного напряжения является ранее упомянутая схема МЭМ детектора модулированного терагерцевого излучения на основе четвертьволнового отрезка двухпроводной линии из двух одностенных углеродных нанотрубок (см. рисунок 1с, а также работу [14]). Модифицированная схема представлена на рисунке 4.

Плазменные волны в двух параллельных отрезках из нанотрубок в данной схеме возбуждаются непосредственно электрическим полем падающей терагерцевой волны. При этом необходимо, чтобы подложка, над которой натянута нанотрубки, была непроводящей, т.к. в противном случае электрическое поле отраженной от нее волны будет полностью ослаблять результирующее поле, которое возбуждает плазменные волны в нанотрубках. В отличие от исходной схемы детектора на основе четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, в которой возбуждается антисимметричная волна, в модифицированной схеме в нанотрубках возбуждается волна симметричная. Сила отталкивания, действующая между нанотрубками, пропорциональна квадрату

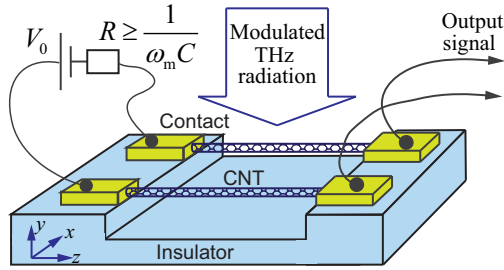


Рис. 4: Модифицированная схема детектора модулированного терагерцевого излучения, в которой выходным сигналом является наведенное в результате колебаний электрической ёмкости напряжение [27].

амплитуды колебаний заряда на них. В результате, модулирующий сигнал может быть выделен в виде механических колебаний нанотрубок, если его спектр попадает в полосу механического резонанса.

Параметры устройства, для которого производится расчет, следующие: длина нанотрубок  $L = 500$  нм, расстояние между их осями в недеформированном состоянии  $d = 50$  нм, их радиус  $a = 1$  нм, погонная масса каждой нанотрубки  $m_l \approx 4.78 \times 10^{-14}$  г/см, опорное напряжение  $V_0 = 250$  мВ; частота и добротность плазменного резонанса в нанотрубках  $\omega_e \approx 6.1$  ТГц и  $Q_e \approx 74$ , механического —  $\omega_m \approx 0.2$  ТГц и  $Q_m \approx 1000$ , соответственно. В результате выкладок и расчетов, выполненных согласно принципам, изложенным в предыдущих главах, получены следующие значения основных характеристик рассматриваемого МЭМ детектора: чувствительность  $R_V \approx 10^6$  В/Вт, мощность, эквивалентная шуму  $NEP \approx 4 \times 10^{-12}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , время релаксации  $\tau \sim 0.5$  мкс, пороговое значение интенсивности падающего монохроматического излучения, при котором возникает параметрическая неустойчивость  $I_{th} \sim 100$  мВт/см<sup>2</sup> (при условии его помещения в узкую область фидера простой терагерцевой антенны типа “бабочка”), характерная величина интенсивности входящего модулированного сигнала, при которой на работу устройства начинают оказывать существенное влияние нелинейные эффекты  $I_{max} \sim 1$  мВт/см<sup>2</sup> (при использовании антенны).

Заметим, что ранее другими авторами представлялись приемники радиочастотного диапазона на основе одиночных углеродных нанотрубок [28, 29]. В обоих случаях авторы демонстрировали работоспособность своих устройств возможностью достаточно качественного приема ими аудио-сигнала. В работе [28] нанотрубка использовалась лишь как элемент, имеющий нелинейную вольтамперную характеристику. Чувствительность такого детектирования оказалась около 10 В/Вт при мощности, эквивалентной шуму порядка 3 нВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . В работе [29] консольно закрепленная нанотрубка механически раскачивалась под действием непосредственно электрического поля падаю-

щей радиоволны, поскольку из-за приложенного напряжения смещения, на ее свободном конце находился наведенный статический электрический заряд. Детектирование осуществлялось благодаря нелинейной зависимости тока эмиссии электронов со свободного конца нанотрубки от его смещения. В качестве характеристики устройства приводится величина, равная амплитуде электрического поля падающей волны  $10 \text{ мВ/см}/\sqrt{\text{Гц}}$ , при которой величина выходного сигнала равна шуму. Вычисление аналогичной величины для рассмотренного в главе №5 МЭМ детектора дает значение  $10 \text{ мкВ/см}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Мы видим, что схема МЭМ детектора, представленного на рис. 4 существенно превосходит по чувствительности и шумовым характеристикам другие известные и реально работающие схемы демодуляторов на основе углеродных нанотрубок. Следует отметить, что при практической реализации рассматриваемого устройства его конечные характеристики будут несколько хуже, например, вследствие добавления шума усилителя выходного сигнала детектора. Создание такого усилителя представляет собой отдельную научную и практическую задачу, которая выходит за рамки представляемой диссертации.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы. Все громоздкие выкладки и расчеты вынесены в раздел **приложения**.

## Основные результаты диссертационной работы

Сформулированы общие принципы моделирования и расчета характеристик микро-/наноэлектромеханических детекторов модулированного терагерцевого излучения. Согласно предлагаемому подходу, моделирование рассматриваемых устройств сводится к решению системы из двух квазилинейных дифференциальных уравнений, соответствующих колебаниям двух нелинейно связанных элементарных осцилляторов, имеющих по одной степени свободы. Основные характеристики рассматриваемых детекторов вычисляются на основе решения данной системы уравнений, которое может быть выполнено как путем линейного анализа, так и с помощью численного моделирования.

Определены условия возникновения параметрической неустойчивости в ряде микро-/наноэлектромеханических систем, включающих в себя связанные друг с другом механический и плазменный резонаторы. Ввиду малой добротности ( $Q_2 \sim 10$ ) основного плазменного резонанса в рассматриваемых системах, параметрическая неустойчивость в них может возникать как при положительных, так и при отрицательных значениях расстройки между частотой внешнего возбуждающего монохроматического сигнала и собственной частотой плазменного резонатора при недеформированном механическом резонаторе. Данное явление, в отличие от случая оптомеханических систем, в которых  $Q_2 \gtrsim 10^8$ , обусловлено заметным смещением плазменного резонанса вследствие деформации механического осциллятора под действием пonde-

ромоторных сил. Полученные пороги неустойчивости оказались достаточно велики для того, чтобы она возникала при работе таких систем в качестве демодулятора, в силу их большой чувствительности и достаточно малой интенсивности входящего сигнала, при которой в них начинают существенно проявляться нелинейные эффекты. Тем не менее, по проведенным расчетам, возникновение параметрической неустойчивости в рассматриваемых детекторах может наблюдаться при не очень высокой интенсивности входящего монохроматического сигнала — от единиц до тысяч мВт/см<sup>2</sup>, в зависимости от схемы конкретного устройства.

Решена задача о возбуждении плазменных колебаний в плазменном резонаторе на основе полевого транзистора с высокой подвижностью электронов с цилиндрическим затворным электродом. В результате было получено уравнение колебаний эффективного элементарного осциллятора, соответствующего основному резонансу данного резонатора, который, в свою очередь, может быть основой для схемы детектирования модулированного терагерцевого излучения. Если в случае нахождения чувствительности и параметров плазменного резонанса в данном устройстве приближенный анализ дает значения, отличные от рассчитанных в рамках точной модели на величины порядка единицы, то в случае порога параметрической неустойчивости отличие достигает порядка. Поскольку рассчитанные пороговые значения интенсивности входящего сигнала оказались достаточно велики, для большей достоверности установления возможности возникновения неустойчивости в рассматриваемом устройстве, целесообразно использовать точные параметры, получаемые в результате последовательного решения задачи о вынужденных колебаниях в плазменном резонаторе.

Решено уравнение Поклингтона с точным ядром, описывающее антенну из отрезка одностенной углеродной нанотрубки с металлической проводимостью, методом Галеркина с использованием тригонометрических базисных функций. На основе полученного точного решения делается вывод о пригодности использования приближенной математической модели для расчета вынужденных колебаний в резонаторе на основе двух ОСУНТ с бегущей вдоль них симметричной волной электронной плотности. Данная модель впоследствии используется для расчета характеристик предлагаемой в диссертации новой схемы НЭМ детектора модулированного терагерцевого излучения.

Представлена схема нанoeлектромеханического неохлаждаемого детектора модулированного терагерцевого излучения, характеризующегося исключительно высокой чувствительностью (порядка  $10^6$  В/Вт), низким уровнем шума ( $\sim 10^{-12}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ) и имеющего достаточно низкое время релаксации ( $\sim 5$  мкс). Детектор при таких параметрах и своем размере порядка долей миллиметра (включая размер антенны терагерцевого диапазона) наилучшим образом подходит для использования в средствах коммуникации будущих малых автономных электрических устройств субмиллиметрового размера.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Арсенин А. В., Gladun A. D., Leyman V. G., Semenenko V. L., Ryzhii V. I. Параметрическая неустойчивость в наноэлектромеханическом детекторе модулированного терагерцевого излучения на основе транзистора с высокой подвижностью электронов и подвижным упругим затвором // *Радиотехника и электроника*. — 2009. — Т. 54. — №. 11. — С. 1394–1402.
2. Арсенин А. В., Gladun A. D., Leyman V. G., Semenenko V. L., Ryzhii V. I. Плазменные колебания двумерного электронного газа в полевом транзисторе с цилиндрическим затворным электродом. // *Радиотехника и электроника*. — 2010. — Т. 55. — №. 11. — С. 1376–1386.
3. Арсенин А. В., Gladun A. D., Leyman V. G., Semenenko V. L., Ryzhii V. I., Параметрическая неустойчивость в резонансном детекторе модулированного терагерцевого излучения на основе полевого транзистора с цилиндрическим затворным электродом // *Радиотехника и электроника*. — 2011. — Т. 56. — №. 10. — С. 1254–1260.
4. Stebunov Yu., Leiman V., Arsenin A., Gladun A., Semenenko V., Ryzhii V. Detection of Modulated Terahertz Radiation Using Combined Plasma and Mechanical Resonances in Double-Carbon-Nanotube Device // *Applied Physics Express*. — 2011. — V. 4 — No. 7. — P. 075101.
5. Leiman V. G., Arsenin A., Gladun A. D., Ryzhii V., Semenenko V. L. Nanomechanical Systems with Plasmonic Resonances as Detectors of Modulated Terahertz Radiation // *CLEO/Europe and EQEC 2009 Conference Digest, (Optical Society of America, 2009)*. — JSIV\\_P6.
6. Semenenko V. L., Leiman V. G., Arsenin A. V., Gladun A. D., Ryzhii V. I. Parametric instability of mobile elastic gate in tera- and nano- high electron mobility transistor // *IEEE Conference Proceedings (International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology (TERATECH'10)*. — 2010.
7. Semenenko V. L., Leiman V. G., Arsenin A. V., Gladun A. D., Ryzhii V. I., Microresonator for Terahertz and Infrared Technologies // *35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* — 2010. P. We-P.07.
8. Semenenko V., Leiman V., Arsenin A., Stebunov Yu., Ryzhii V. Excitation of mechanical oscillations in double-carbon-nanotube system by terahertz radiation // *7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. — 2012. — P. 631–635.

9. Stebunov Yu. V., Leiman V. G., Semenenko V. L., Arsenin A. V., Ryzhii V. I. Graphene Nanoribbon Based AM Demodulator of Terahertz Radiation // *7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. — 2012. — P. 990–994.
10. Семенов В. Л. Параметрическая неустойчивость в наноэлектромеханическом детекторе модулированного терагерцевого излучения на основе двух параллельных углеродных нанотрубок // *Труды МФТИ*. — 2012. — Т. 4. — №. 2(14). — С. 182–186.
11. Semenenko V. L., Leiman V. G., Arsenin A. V., Mitin V., Ryzhii M., Otsuji T., Ryzhii V. Effect of self-consistent electric field on characteristics of graphene p-i-n tunneling transit-time diodes // *J. of Appl. Phys.*, — 2013. — V. 113. — P. 024503.
12. Семенов В. Л., Лейман В. Г., Арсенин А. В., Стебунов Ю. В., Рыжий В. И. Система из двух углеродных нанотрубок как антенна и детектор терагерцевого излучения // *Журнал Радиоэлектроники*. — 2012. — №. 6.
13. Семенов В. Л., Стебунов Ю. В., Лейман В. Г., Арсенин А. В. “Описание плазмонного резонатора со слоем двумерного электронного газа в терминах сосредоточенных параметров // *Журнал Радиоэлектроники*. — 2012. — №. 9.
14. Semenenko V. L., Leiman V. G., Arsenin A. V., et al. Self-consistent surface charges and electric field in pin tunneling transit-time diodes based on single- and multiple-layer graphene structures // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2014. — V. 486. — P. 012011.

## Цитируемая литература

- [1] Cavalcanti A., Shirinzadeh B., Zhang M., Kretly L.C., “Nanorobot Hardware Architecture for Medical Defense,” *Sensors*, **8**, pp. 2932–2958 (2008).
- [2] Freitas R.A., “Current Status of Nanomedicine and Medical Nanorobotics,” *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, **2**(1), pp. 1–25 (2005).
- [3] Seigel M., “Smart Sensors and Small Robots,” *IEEE Instrumentation and Measurement Technology*, pp. 303–308 (2001).
- [4] Corradi P., Scholz O., Knoll T., Menciassi A., Dario P., “An optical system for communication and sensing in millimetre-sized swarming microrobots,” *J. Micromech. Microeng.*, **19**, 015022 (2009).



- [5] Gao B., Guo S., “Development of an Infrared Ray Controlled Fish-like Underwater Microrobot,” *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 150–155 (2010).
- [6] Lahiri S. “RFID Sourcebook,” *IBM Press* (2005)
- [7] Hornyak T., “RFID Powder,” *Scientific American*, **298**(2), pp. 68–71 (2008).
- [8] Zichner R., Baumann R.R., “3-D transponder antennas for future SHF RFID applications,” *Adv. Radio Sci.*, **9**, pp. 401–405 (2011).
- [9] Hartnagel H.L., “Terahertz Sources, their Technology and Applications,” *AIP Conf. Proc.*, **1328**, pp. 12–16 (2011).
- [10] Tonouci M., “Cutting-edge Terahertz Technologies,” *Nature Photonics*, **1**, pp. 97–105 (2007).
- [11] Nagatsuma T., “Terahertz technologies: present and future,” *IEICE Electronics Express*, **8**(14), pp. 1127–1142 (2011).
- [12] Ryzhii V.I. *et al*, “Resonant detection of modulated terahertz radiation in micromachined high-electron-mobility transistor”, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, P. 203503 (2007).
- [13] Leiman V.G., *et al*, “Analysis of resonant detection of terahertz radiation in high-electron mobility transistor with a nanostring/carbon nanotube as the mechanically floating gate”, *J. Appl. Phys.*, **104**, P. 024514 (2008).
- [14] Stebunov Yu., *et al*, “Detection of Modulated Terahertz Radiation Using Combined Plasma and Mechanical Resonances in Double-Carbon-Nanotube Device,” *Appl. Phys. Exp.*, **4**(7), 075101 (2011).
- [15] Stebunov Yu., *et al*, “Graphene nanoribbon based AM demodulator of terahertz radiation,” *7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, pp. 742–746 (2012).
- [16] Choi J.M., Mitin V., Ramaswamy R., Pogrebnyak V.A., *et al*, “THz Hot-Electron Micro-Bolometer Based on Low-Mobility 2-DEG in GaN Heterostructure,” *IEEE Sensors Journal*, **13**(1), pp. 80–88 (2013).
- [17] Mitin V., Ramaswamy R., Wang K., *et al*, “THz detectors based on heating of two-dimensional electron gas in disordered nitride heterostructures,” *Proc. of SPIE*, **8363**, 836307-1 (2012).
- [18] Braginsky V.B., Manukin A.B., “Measurement of Weak Forces in Physics Experiments,” *Chicago: University of Chicago Press* (1977).

- [19] Арсенин А. В., Гладун А. Д., Лейман В. Г., Семененко В. Л. Рыжий В.И., Параметрическая неустойчивость в резонансном детекторе модулированного терагерцевого излучения на основе полевого транзистора с цилиндрическим затворным электродом // *Радиотехника и электроника*. — 2011. — Т. 56. — №. 10. — С. 1254–1260.
- [20] Braginsky V.B., Strigin S.E., Vyatchanin S.P., “Parametric oscillatory instability in Fabry-Perrot (FP) interferometer,” *Physics Letters*, **A287** (5-6), p. 331 (2001).
- [21] Kippenberg T.J., Vahala K.J., “Cavity Opto-Mechanics,” *Optics Express*, **15**(25), 17172 (2007).
- [22] Rokhsari H., Kippenberg T.J., Carmon T., Vahala K.J., “Theoretical and Experimental Study of Radiation Pressure-Induced Mechanical Oscillations (Parametric Instability) in Optical Microcavities,” *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, **12**(1), pp. 96–107 (2006).
- [23] Альтман Дж.Л. “Устройства сверхвысоких частот,” *М.: МИП* (1968).
- [24] Cleland A.N., Roukes M.L., “Noise processes in nanomechanical resonators,” *J. of Appl. Phys.*, **92**(5), pp. 2758–2769 (2002).
- [25] Burke P.J., *et al*, “Quantitative Theory of Nanowire and Nanotube Antenna Performance,” *IEEE Trans. on Nanotech.*, **5**(4), pp. 314–334 (2006).
- [26] Semenenko V.L., *et al*, “Effect of self-consistent electric field on characteristics of graphene p-i-n tunneling transit-time diodes,” *J. of Appl. Phys.*, **113**, 024503 (2013).
- [27] Semenenko V., Leiman V., Arsenin A., Stebunov Yu., Ryzhii V., “Excitation of mechanical oscillations in double-carbon-nanotube system by terahertz radiation,” *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 7th IEEE International Conference on*, pp. 631–635 (2012).
- [28] Rutherglen C., Burke P., “Carbon nanotube radio,” *Nano Letters*, **7**(11), pp. 3296–3299 (2007).
- [29] Jensen K., Weldon J., Garcia H., Zettl A., “Nanotube radio,” *Nano Letters*, **7**(11), pp. 3508–3511 (2007).