

«Утверждаю»

ВРИО директора

Физико-технологического института РАН

Член-корр. РАН **В. В. Лукичев**



### Отзыв ведущей организации

на диссертацию Семененко Вячеслава Леоновича

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

В диссертации В.Л. Семененко теоретически исследуется новый тип высокотемпературных детекторов терагерцевого излучения, представляющих собой микро- и наноэлектромеханические системы со связанными механическими и плазменными резонаторами. Предлагается общий подход для моделирования данных устройств, в частности, рассматривается вопрос возникновения в них параметрической неустойчивости. Выбранная тема исследований безусловно актуальна и относится к таким важным направлениям высокой технологии как: разработка систем обработки сигналов в терагерцевой области частот, расширение области практического использования микро- и наноэлектромеханических систем, а также новых перспективных материалов на основе углерода – графена и углеродных нанотрубок.

Одним из наиболее вероятных применений детекторов рассматриваемого типа является реализация систем коммуникации с автономными электронными устройствами малого размера. Это обусловлено тем фактом, что, несмотря на потенциально высокую емкость информационного канала при несущей частоте терагерцевого диапазона, пропускная способность, обеспечиваемая наноэлектромеханическим детектором, ввиду достаточно большого времени релаксации механического резонатора, оказывается порядка 1 Мбит/с. Тем не менее, данная величина на 3-4 порядка выше, чем та, которую можно было бы

достичь, используя другие, аналогичные по чувствительности и шумовым характеристикам высокотемпературные терагерцевые микродетекторы.

Таким образом, можно констатировать актуальность и практическую значимость темы диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. В первой главе рассмотрены наиболее часто встречающиеся в реальных приложениях типы микродетекторов терагерцевого излучения, работающие при комнатной температуре. Выделяется три класса таких устройств: микроболометры, диоды Шоттки, а также детекторы на основе полевых транзисторов. В результате проведенного обзора делается вывод о том, что ни одна из приведенных схем не обладает одновременно такими параметрами, как высокая чувствительность и низкое время релаксации, которые могли бы обеспечить возможность ее использования в системах коммуникации с электронными устройствами малого размера.

Во второй главе описывается схема микроэлектромеханического детектора для приема модулированного терагерцевого излучения, объясняется принцип его работы, рассчитываются характеристики, а также формулируются общие методы моделирования устройств подобного вида. При сравнении можно установить, что чувствительность рассматриваемого устройства соответствует значениям чувствительности других терагерцевых детекторов, работающих при комнатной температуре. Далее в диссертации показывается, что при определенной модификации схемы устройства, можно достичь существенного увеличения чувствительности детектирования при времени релаксации порядка  $10^{-2}$  мс. Также в данной главе рассматривается вопрос возникновения параметрической неустойчивости в исследуемом типе детекторов на основе микро и нанозлектромеханических систем. Расчет показывает, что величины пороговых амплитуд сигнала во всех рассматриваемых схемах достаточно велики и составляют от сотых долей до одного Вольта, тем не менее, они могут быть достигнуты в отдельных конкретных устройствах при относительно невысокой интенсивности входящего излучения.

В третьей главе описывается способ моделирования распределенных резонаторов путем их представления в виде эквивалентных сосредоточенных осцилляторов. Формально данная процедура производится на основании разложения комплексной функции линейного отклика рассматриваемой резонансной системы в ряд Лорана и последующего поиска функции лоренцевского вида, которая наиболее близко подходит к члену разложения минус-первой степени. Однако, как отмечается в диссертации, сам процесс

нахождения комплексной функции линейного отклика существенным образом зависит от типа уравнений, которыми описываются колебания в конкретном резонаторе. В главе рассматривается простой случай, когда система описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями и возбуждается либо вследствие переменных граничных условий, либо внешним распределенным воздействием. Последний случай демонстрируется на примере возбуждения микроантислевера внешней распределенной силой, с которым регулярно приходится сталкиваться при моделировании микро- и наноэлектромеханических устройств.

В четвертой главе рассматривается вопрос моделирования плазменных резонаторов. В случае плазменных систем уравнения колебаний плотности заряда содержат составляющую, выраженную интегралом по всей области резонатора. Это обуславливает существенное влияние краевых эффектов на решение задачи для одномерных и двухмерных резонаторов, что, в частности, может выражаться в нетривиальной зависимости резонансных частот системы от ее размеров. В главе рассматриваются примеры возбуждения вынужденных колебаний в двухмерных и одномерных плазменных системах, делаются выводы о применимости к данным системам приближенных моделей, позволяющих проводить их анализ в аналитическом виде, которые в дальнейшем используются при моделировании модифицированной схемы высокочувствительного наноэлектромеханического детектора.

В пятой главе представляется схема наноэлектромеханического детектора модулированного терагерцевого излучения на основе двух параллельных углеродных нанотрубок с металлической проводимостью. В данном устройстве исключено негативное влияние контактных сопротивлений на концах нанотрубок, а также представляется схема формирования выходного сигнала в виде наведенного напряжения. Расчет параметров детектора (при комнатной температуре) дает чувствительность порядка  $10^6$  В/Вт, мощность, эквивалентную шуму,  $\sim 10^{-12}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$  и время релаксации  $\sim 10$  мкс. Автор делает вывод, что такие параметры выдвигают детекторы рассматриваемого типа в качестве наиболее реальных кандидатов для использования в системах коммуникации с будущими автономными электронными устройствами малого размера.

В результате анализа содержания диссертации можно сделать вывод о том, что в ней на основании последовательного подхода получены новые, физически значимые результаты, которые в ряде случаев в пределе и при пересечении областей параметров задачи переходят в известные закономерности и

результаты других авторов, чем подтверждается их достоверность и обоснованность.

Диссертация прошла апробацию на ряде представительных научных конференций, была доложена на научных семинарах, как в России, так и за рубежом.

Вместе с тем, следует отметить некоторые замечания в отношении представленной работы:

1. При расчете добротности электромеханического резонатора на основе металлической одностенной углеродной нанотрубки автор не учитывает контактное сопротивление.

2. Выбор уравнений для описания плазменных колебаний в металлических нанотрубках с линейным законом дисперсии носителей требует, на наш взгляд, более обстоятельного обоснования.

3. Для практического применения предлагаемых устройств целесообразно было бы рассмотреть вопрос неизбежного технологического разброса параметров и возможности настройки.

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на основные ее результаты.

Всего по результатам диссертации опубликовано 14 печатных работ в ведущих научно-технических отечественных и международных изданиях, из них 6 в сборниках трудов международных конференций. Также в рамках работы над диссертацией ее автором было разработано программное обеспечение (свидетельство № 2012616595, зарегистрировано в Реестре программ 23.07.2012 г.).

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Материал диссертации изложен логически выверено, доходчиво, результатам дана адекватная физическая интерпретация, математические методы и подходы обоснованы и верифицированы. Диссертант проявил себя как сложившийся ученый, способный решать и ставить сложные физико-математические проблемы на современном научном уровне.

Результаты диссертации могут быть использованы в институтах Российской академии наук ФТИАН, ФТИ им. Иоффе, ИФП СО РАН, в исследовательских университетах МГУ им. Ломоносова, МФТИ, МИЭТ,

МИФИ, Академический университет, а также в других учреждениях, занимающимися проблемами создания и внедрения источников и приемников терагерцового излучения.

Результаты диссертационной работы были рассмотрены на научном семинаре ФТИАН «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники» 14 апреля 2015г., а настоящий отзыв был одобрен на заседании Ученого совета ФТИАН 28 апреля 2015г., протокол № 5-15.

Представленная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Семенов Вячеслав Леонович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Отзыв составил:



Вьюрков Владимир Владимирович  
Ведущий научный сотрудник  
Физико-технологического института РАН (ФТИАН)  
К.ф.-м.н.

Специальность: 05.27.01 – твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,  
приборы на квантовых эффектах  
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 34

Тел.: +7 (499) 129-55-08

e-mail: vyurkov@ftian.ru