

**Отзыв официального оппонента
на диссертацию на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук Назмиева Альберта Ирековича
на тему: «Оптомеханическое и электрооптическое детектирование
резонансных сигналов с исключением обратного флуктуационного
влияния в широкой полосе частот»
по специальности: 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной
физики»**

Актуальность диссертации

Диссертационная работа Назмиева Альберта Ирековича посвящена вопросам, связанным с оптимизацией детектирования сигналов (состояний) в оптомеханических системах с квантовыми шумами разной природы. Интерес к взаимодействию микрообъектов с оптическими (световыми) полями насчитывает уже больше века. Первые успешные опыты по наблюдению светового давления были поставлены П. Лебедевым в 1901 году. Современный этап исследований в этой области начался с появления надежных источников когерентного излучения (лазеров). В 1967 году предложение использовать световое давление в системе «механический осциллятор + электромагнитное поле» в качестве источника нелинейного взаимодействия между подсистемами было высказано коллективом Московского Государственного Университета во главе с В. Брагинским. Основной целью этих работ было изучение возможности применения данного эффекта для создания сверхвысокочувствительных детекторов смещения, в частности, гравиметров. Экспериментальная демонстрация проявления нелинейности механической системы в световом поле стала реальной с развитием квантовой оптики в начале 1990-х годов. Благодаря совершенствованию технологии и качества материалов, в середине 2000-х годов были созданы первые квантовые оптоэлектромеханические системы (ОЭМС), которые позволили добиться охлаждения механической подсистемы

до сверхнизких температур за счет взаимодействия с фотонами оптического резонатора. В данных условиях становится возможным наблюдать эффекты, связанные с квантовой природой как излучения, так и механического движения. В течение последних нескольких лет осуществляется разработка и тестирование разнообразных гибридных ОЭМС с целью применения их для когерентного контроля квантовых состояний, в частности, для получения неклассических состояний механической подсистемы. При этом борьба с техническими шумами позволила достичь и преодолеть стандартный квантовый предел измерения силы в узкой полосе частот. Установлено, что методы преодоления стандартного квантового предела в широкой полосе частот дают возможность подавления не только собственно квантового, но и теплового шума. К методам широкополосного преодоления стандартного квантового предела относятся измерение с пульсирующей накачкой и когерентное вычитание квантового шума. Таким образом, поиск методов для широкополосного исключения обратного флуктуационного влияния представляет собой практически важную задачу, решение которой позволит улучшить рабочие характеристики существующих оптомеханических устройств.

В диссертационной работе Назмиева А. И. исследуется чувствительность опто- и электромеханических систем, состоящих из оптического резонатора, поддерживающего две или три оптические моды, взаимодействующие с механическим или электромагнитным высокочастотным осцилляторами, на которые действует резонансная сигнальная сила. Автором изучены особенности данных систем, позволяющие преодолеть стандартный квантовый предел при измерении их отклика на внешнее воздействие. Предложены схемы для экспериментальной реализации резонаторов с необходимой структурой мод и рассчитано расщепление вырожденных мод в астигматических резонаторах Фабри-Перо, которое может быть использовано в этой связи. Поэтому тема и цель данной работы — теоретическое исследование предельной квантовой

чувствительности оптомеханических и электрооптических детекторов резонансных сигналов, изучение влияния паразитных эффектов на чувствительность и возможности их подавления и анализ физических моделей для экспериментальной реализации данных систем – представляются чрезвычайно актуальными как в научном, так и в практическом плане.

Анализ и оценка содержания диссертации

Диссертация Назмиева А.И. изложена на 123 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, восьми приложений, 17 рисунков, 2 таблиц и списка цитируемой литературы из 98 наименований. Такой формат был выбран автором для удобства работы с изложенным материалом.

Введение содержит краткое ознакомление с темой исследования и проблемами, возникающими при работе с оптомеханическими устройствами. Далее автор формулирует цель исследования и задачи, подлежащие решению для ее достижения, а также научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию исследования, степень достоверности и апробации результатов, личный вклад и положения, выносимые на защиту. Раздел завершается кратким описанием структуры диссертационной работы.

В Главе 1 подробно проанализировано состояние теории и эксперимента, представлен подробный обзор работ, посвященных методам измерения с частичным или полным исключением обратного флуктуационного влияния, и особенностям астигматических резонаторов и поляризованного излучения. Данный обзор обосновывает направление исследований по теме диссертации. Описаны квантовые шумы с указанием оценок вносимых ими среднеквадратических отклонений (смещений координаты) и условий перехода в квантовый режим, приведен пример квантово-неразрушающего измерения в системе из двух взаимодействующих осцилляторов.

В Главе 2 изучается возможность измерения резонансной силы, действующей на механический осциллятор, с помощью двухмодового оптического

резонатора, связанного с этим осциллятором, с накачкой на обеих модах. Предложен принцип широкополосного вариационного измерения, который позволяет исключить обратное флуктуационное влияние и преодолеть стандартный квантовый предел в широкой полосе частот. Рассмотрено влияние паразитных спектральных составляющих на чувствительность и показано, как при помощи узкополосной фильтрации выходного сигнала, можно частично компенсировать дополнительные шумы, возникающие в данной системе. Предложено две модели физической системы для экспериментальной реализации – первая на основе кольцевого резонатора, а вторая на основе интерферометра Майкельсона-Саньяка. Для получения аналитических выражений для амплитуд вероятностей состояний гибридной оптомеханической системы автор воспользовался хорошо апробированными методами и подходами (уравнение Ланжевена, формализм входа-выхода, разделение полей на классическую и квантовую компоненты, переход к фурье-образам и т.д.) Автор решает поставленную задачу компенсации шумов путем надлежащего выбора комбинаций квадратур полей на выходе. Сформулированы условия, налагаемые на систему для реализации данного режима. Графики зависимостей спектральной плотности мощности шума от падающей мощности, показанные на рис. 2.4, наглядно иллюстрируют различные режимы управления системой с учетом сделанных допущений. В итоге, автором было показано, что корреляция в оптических гармониках позволяет вычесть фазовый шум из измеряемого сигнала. В заключении главы автор критически отмечает, что экспериментальная реализация данной схемы фильтрации не проста, но возможна в принципе.

В Главе 3 автор обобщает принципы измерения, развитые в предыдущей главе для двухмодовой системы, на трехмодовую систему с резонансной накачкой на частоте центральной моды в широкополосном режиме. Рассматриваются как симметричная (эквидистантная), так и несимметричная конфигурации оптических мод, параметрически связанные с механической системой, частота которой близка (или равна) разности частот

соседних оптических мод. Используется формализм, аналогичный тому, который был применен ранее для описания двухмодовой схемы. Решение уравнений Ланжевена для фурье-амплитуд оптических и механических флуктуаций может быть представлено через линейные комбинации амплитудных и фазовых квадратур. Их подстановка в соотношения для входа-выхода внешних полей указывает на возможность полного исключения обратного фазового воздействия путем одновременного измерения и вычитания двух квадратур на боковых оптических частотах. Далее автор подробно анализирует чувствительность измерения сигнальной силы как функцию шумов и параметров ОЭМС, в том числе и расстройки частот (отклонении от их эквидистантности). Дается объяснение эффектов подавления шумов в рамках существования набора коммутирующих друг с другом переменных. Предлагается схема практической реализации рассмотренной модели на основе оптического резонатора с помещенной в него тонкой мембраной, и формулируются условия подавления шума для определенных физических параметров.

В Главе 4 автор применяет подход, развитый в предыдущих главах, для поиска оптимальных критериев измерения внешнего высокочастотного сигнала в трехмодовой электрооптической системе. Прямая адаптация формализма, используемого выше, подразумевает замену механического осциллятора на электромагнитную высокочастотную моду, которую поддерживает электрооптический кристалл. Решая уравнение Ланжевена путем введения фурье-образов амплитуд флуктуаций и выполняя их линейное преобразование, автор получает амплитудные и фазовые квадратуры. Анализируя плотность мощности шума, он определяет условия, при которых возможно подавление ОФВ в ходе независимого измерения квадратур и последующего вычитания сигналов в широкой полосе частот. Отмечается, что высокая чувствительность измерения обеспечивается возможностью генерации большого числа оптических фотонов на один ВЧ фотон. Затем производится обобщение полученных результатов на случай с потерями, для

которого полное исключение ОВФ оказывается невозможным. В качестве конкретного примера данной системы приводится электрооптический кристалл ниобата лития.

В Главе 5 решается задача о вычислении расщепления мод высших порядков в астигматических резонаторах с использованием метода работы силы давления света при адиабатически медленной деформации поверхности зеркала. Для решения этой задачи были построены многомерные моды Эрмита-Гаусса и вычислены компоненты тензора напряжений Максвелла, с помощью которого вычислена сила давления света на зеркало резонатора. Расщепление было вычислено при помощи адиабатической теоремы и закона сохранения энергии. Проведено сравнение рассчитанных величин с полученными ранее теоретическими и экспериментальными результатами. Полученные результаты позволяют добиться выполнения условия фазового синхронизма, необходимого для эффективной работы электрооптических и оптомеханических преобразователей. Это может быть достигнуто за счет использования мод высших порядков в астигматических резонаторах. Показано, что, подбирая радиусы кривизны зеркал резонатора и номер моды, можно подстроить частоты оптических мод для выполнения условий синхронизма.

В приложениях содержатся данные, дополняющие и детализирующие модели, которые были представлены в основной части диссертации.

Автореферат изложен на 23 страницах, включает 7 рисунков, список цитируемой литературы и список основных работ диссертанта. Автореферат полностью соответствует основному содержанию и выводам диссертации.

Новизна и достоверность диссертационной работы

Основным компонентом научной новизны работы Назмиева А. И. является подробный теоретический анализ вопросов, касающихся подавления обратного фазового воздействия при широкополосном измерении внешней возмущающей силы в опто- и электромеханических системах. Новым является подход, в котором предлагается использовать две или три

оптические моды, взаимодействующие с измеряемой системой (механической модой), с накачкой на частоте центральной моды и измерением определенных линейных комбинаций квадратур выходных полей. Впервые показано, что обратное фазовое воздействие может быть полностью подавлено благодаря постобработке (вычитанию) выходных сигналов, измеряемых одновременно. Помимо математического формализма, применяемого для решения данных задач, автором предложено несколько простых схем для практической реализации описанного принципа измерения.

Достоверность результатов диссертационной работы Назмиева А. И. обусловлена использованием общепризнанных и апробированных теоретических подходов, широко применяемых многими исследователями в областях, связанных с квантовой механикой и квантовой оптикой. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат ранее известным данным.

Полнота опубликованных работ

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 3 из которых изданы в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 6—в тезисах докладов.

Практическое значение результатов диссертации

Полученные результаты имеют как научное, так и практическое значение. Повышение точности измерений в гибридных ОЭМС, используемых в качестве высокоточных сенсоров и датчиков, является важной прикладной задачей, стоящей на пути широкого внедрения этих приборов в различных отраслях. Разработанная автором схема подавления шумов при измерении внешнего сигнала выглядит вполне реализуемой с использованием уже имеющихся компонент. Идея компенсации обратного фазового воздействия путем вычитания синхронно измеряемых квадратур может быть, вероятно, обобщена и на другие гибридные системы. Отдельно следует отметить привлечение автором особого класса астигматических

резонаторов Фабри-Перо, высшие моды которых удовлетворяют требованиям к измерительной схеме.

Обоснованность научных положений и выводов

Решая поставленные в работе задачи, автор активно и грамотно использовал развитый аппарат решения нестационарных квантоводинамических задач (квантовое уравнение Ланжевена), теорию шума, привел обстоятельные расчеты и анализ чувствительности квантовых измерений, а также выполнил вычисления собственных мод астигматических резонаторов (уравнения Гельмгольца и Максвелла). Для описания формализма рассматриваемых подходов автором привлекаются общепринятые методы, терминология и обозначения.

Научные положения и выводы подтверждаются автором с помощью аналитических выкладок и численного расчёта физических моделей, теоретического анализа результатов с учётом ранее известных результатов.

Замечания по диссертационной работе

1. Работа содержит некоторое количество грамматических ошибок, главным образом, пунктуационных. Встречаются незаконченные предложения. Автор иногда пользуется научным жаргоном, вводя специфические и отчасти курьезные формулировки, например, «масса пробной массы», «время звона», «путешествующая волна». Введенное им понятие «систем, свободных от квантовой механики» для моделей, описываемых, тем не менее, квантовомеханическими уравнениями, требует дополнительной корректировки, а лучше, полной замены. Например, исходное определение – «системы с попарно коммутирующими наблюдаемыми» - выглядело бы более уместным. В уравнении (2.1), в выражении для коэффициента связи используются без определения параметры L_1 и L_2 , смысл которых можно понять только из рис. 2.1.

2. В главах, посвященных анализу чувствительности, автор ограничился графической визуализацией безразмерной спектральной мощности шума. Вместе с тем, при решении уравнений Ланжевена автор

применял различные приближения, начиная с приближения вращающейся волны, формулируя их в виде сильных неравенств. Было бы крайне полезно привести графическое сравнение приближенных аналитических результатов с точным численным решением уравнений Ланжевена (заселенности мод) как функций времени. Кроме того, это бы наглядно проиллюстрировало сам процесс взаимодействия подсистем и влияние измеряемого объекта (механического осциллятора) на заселенность оптических мод на выходе.

3. Результаты работы в основном связаны с измерением параметров вынуждающей силы в установившемся режиме. Однако в Главе 3 автор вводит силу, действующую в течение конечного промежутка времени (резонансный цуг), уравнение (3.8). Возникает естественный вопрос – насколько применима развитая теория измерений к коротким цугам (импульсам), поскольку чем он короче, тем больше вносимая им энергетическая неопределенность.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики», а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Назмиев Альберт Ирекович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
вед. н. с., зав. лабораторией архитектуры
высокопроизводительных вычислительных систем
Отделения физико-технологических исследований
имени К.А. Валиева Центра перспективной микроэлектроники
Федерального государственного бюджетного
учреждения «Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»

Цуканов Александр Викторович

Контактные данные:

тел.: 7(963)6517934, e-mail: a-v-ts@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-
и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах

08.09.2025

Адрес места работы:

117218, Россия, г. Москва,
Нахимовский проспект, д. 36 к.1,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»,
Лаборатория архитектуры
высокопроизводительных вычислительных систем
Отделения физико-технологических
исследований имени К.А. Валиева
Центра перспективной микроэлектроники
Тел.: +7 (499) 129-54-92; e-mail: ftian.director@bk.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного
учреждения «Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт» А.В. Цуканова заверяю:

Заместитель директора — главный
ученый секретарь

Алексеева О.А.