

**ОТЗЫВ** официального оппонента  
о диссертации 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

Диссертационная работа А.И. Назмиева посвящена развитию методов подавления квантового шума ниже стандартного квантового предела, а также разработке схем оптомеханических и электрооптических детекторов резонансных сигналов, которые обладают пониженным уровнем как классических, так и квантовых шумов и могут быть реализованы на практике.

Одним из важных направлений современной квантовой оптики и оптомеханики являются измерения с пониженным уровнем шумов. Лучшие современные оптомеханические сенсоры достигли уровня чувствительности, ограниченного квантовыми эффектами, и, в частности, стандартным квантовым пределом (СКП), который связан с возмущением пробного объекта при измерении, обусловленным соотношением неопределенностей Гейзенберга. С другой стороны, регистрация слабых сигналов, например в детекторах гравитационных волн, требует прецизионной точности, существенно превышающей СКП. Поэтому разработка методов по преодолению СКП и исключению обратного флуктуационного влияния в квантовых измерениях представляется очень важной и нетривиальной для решения задач. Таким образом, тема диссертационной работы А.И. Назмиева крайне актуальна, а проведенные исследования, несомненно, обладают теоретической и практической значимостью.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений с подробным теоретическим обоснованием разработанных методов. Полный объем диссертации составляет 123 страницы с 17 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 98 наименований.

**Первая глава** содержит подробный обзор современного состояния

исследований по теме диссертации.

Вторая и третья главы посвящены разработке и анализу экспериментальных схем, в которых регистрация резонансного возбуждения механической системы реализована с исключением обратного флуктуационного влияния в широкой полосе частот, что достигается использованием накачки в нескольких оптических модах.

**Во второй главе** разработан метод измерения резонансной силы, действующей на механическую систему, позволяющий исключить обратное флуктуационное влияние и преодолеть стандартный квантовый предел в широкой полосе частот. Метод основан на взаимодействии механического осциллятора с двумя оптическими модами, разность частот которых совпадает с частотой осциллятора. Измерение суммы и разности амплитудных или фазовых квадратур оптических мод на выходе позволяет исключить обратное флуктуационное влияние и добиться прецизионной точности измерения. Для реализации данного метода предложено 2 экспериментальные схемы, исследована устойчивость возникающих режимов и описаны способы повышения стабилизации системы. Также исследовано влияние дополнительных спектральных составляющих на чувствительность измерительной схемы и найдено решение по частичному подавлению возникающих шумов.

**В третьей главе** разработан метод измерения исключения обратного флуктуационного влияния и преодоления СКП при измерении резонансного сигнала в оптомеханической системе, основанный на использовании трехмодовой накачки. Показано, что преодоление СКП в такой системе связано с возникновением интегралов движения и возможностью квантовых неразрушающих измерений. Предложена экспериментальная реализация такой измерительной схемы и продемонстрировано, что одним из ее преимуществ по сравнению со случаем двумодовой накачки является отсутствие неустойчивости и паразитных спектральных составляющих. Также проанализировано влияние расстройки частот оптических мод на

возможность высокоточного измерения и выявлены различные режимы работы измерительной схемы, возникающие в этом случае.

**В четвертой главе** анализируется возможность высокоточного измерения резонансного высокочастотного сигнала в электрооптической системе с трехмодовым оптическим резонатором в условиях накачки только центральной моды. Продемонстрировано, что принцип измерения оптимальной квадратуры, аналогичный схеме с оптомеханической системой, позволяет исключить обратное флуктуационное влияние в широкой полосе частот. Однако было обнаружено, что в отличие от оптомеханической системы, в данном случае чувствительность измерительной схемы ограничена тепловыми шумами. Предложены методы повышения чувствительности. Также исследовано влияние внутренних потерь.

**Глава 5** посвящена расчету и анализу расщепления мод высших порядков в астигматических резонаторах с использованием силы давления света, что позволило корректно описать частотные сдвиги мод. Показано, что регулярная часть силы давления света, не зависящая от поляризации, ведет к сдвигу частот и расщеплению мод высших порядков, связанному с фазой Гюи. Для мод Эрмита-Гаусса было получено выражение для частотного расщепления смежных мод, которое хорошо совпадает с результатом точного решения уравнения Гельмгольца в параксиальном приближении для астигматических резонаторов, что подтверждает корректность используемого метода. Также показано, что асимметричная часть силы давления света, вызванная продольной составляющей электромагнитной волны, ведет к расщеплению ортогонально поляризованных мод.

Диссертационная работа Назмиева А.И. выполнена на высоком научном уровне. В ней получены новые важные и приоритетные результаты. Разработаны новые методы значительного повышения точности оптомеханических и электрооптических детекторов резонансных сигналов, позволяющие исключить обратное флуктуационное влияние в квантовых измерениях и преодолеть СКП. На основе развитых методов предложены

экспериментальные реализации измерительных квантовых схем со сверхвысоким разрешением, изучены режимы их работы, детально проанализированы возможные неустойчивости и паразитные эффекты. Разработанный подход обобщен на случай высокоточных измерений высокочастотных электромагнитных сигналов и продемонстрирована возможность исключения обратного флуктуационного влияния в широкой полосе частот в резонаторе с тремя оптическими модами.

Один из наиболее ярких результатов диссертационной работы, представляющий фундаментальную значимость и открывающий новые возможности для перспективных практических применений, заключается в обнаружении интегралов движения, которые отвечают за возможность исключения обратного флуктуационного влияния в схеме с тремя оптическими модами. Важным преимуществом работы также является разработка схем для экспериментальной реализации прецизионных измерений, основанных на развитых принципах, а также анализ режимов их работы при реальных параметрах.

В качестве основных достоинств работы можно выделить следующие:

- Теоретическое выявление новых физических эффектов, которые лежат в основе высокоточных измерений и возможности преодоления СКП, имеющих высокую фундаментальную и прикладную значимость
- Получение аналитических решений для большинства поставленных задач, что позволяет выявить физические механизмы возникающих физических эффектов
- Детальный анализ частотного расщепления высоких оптических мод в астигматических резонаторах, позволяющий задавать требуемую структуру мод, что крайне важно в физическом эксперименте.

Полученные в работе результаты апробированы публикациями в 3 статьях в высокорейтинговых рецензируемых международных научных журналах, а также докладами на научных семинарах в МГУ и 6 международных научных конференциях.

Таким образом, степень обоснованности положений, выносимых на защиту, а также научных выводов, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна не вызывают сомнений.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время по работе имеется ряд замечаний:

1. В работе при решении уравнений Ланжевена использовался метод линеаризации, в рамках которого корреляции оптических мод друг с другом и с механическим осциллятором пропадают. Представляется важным оценить, как повлияют отмеченные корреляции на возможность исключения обратного флуктуационного влияния и преодоления СКП в реальных системах, когда флуктуации квадратур не слишком малы и не могут быть учтены в рамках использованного приближенного метода.

2. В работе отмечается, что для исключения обратного флуктуационного влияния при детектировании сигнала можно измерить не сумму и разность требуемых квадратур, а сами квадратуры в отдельности и независимо. Казалось бы, что такое измерение должно проводиться не независимо, а, в один и тот же момент времени, например, по схеме совпадений.

3. Используемый в главе 3 термин «подсистемы, свободные от квантовой механики», представляется не совсем корректным. Данный термин используется в работе для обозначения наблюдаемых, допускающих квантовые неразрушающие измерения, то есть в простейшем случае являющихся интегралами движения. Однако, даже для «сохраняющейся» в квантовом смысле наблюдаемой ее дисперсия может быть не мала, что непосредственно указывает на ее квантовые свойства.

Вместе с тем, указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация А.И. Назмиева является целостным научным исследованием, имеющим высокую теоретическую и практическую значимость и содержащим новые решения актуальных задач. 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 (по физ.-мат. наукам), 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 несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники  
физического факультета  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова»

Тихонова Ольга Владимировна

«10» \_сентября\_ 2025 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-13-04

E-mail: ovtikhonova@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена докторская диссертация:  
01.04.21 — «Лазерная физика»

Адрес места работы:

119991, г. Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, физический факультет  
Телефон: +7 (495) 939-13-04  
E-mail: ovtikhonova@physics.msu.ru

Подпись Тихоновой Ольги Владимировны УДОСТОВЕРЯЮ

Учёный секретарь ученого совета  
физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
д.ф.-м.н., доцент

Стремоухов С.Ю.