

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Павлова Владислава Игоревича
**«Тепловые и термодинамические эффекты в высокодобротных оптических
микрорезонаторах»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности «1.3.2. Приборы и методы
экспериментальной физики».

Диссертационная работа Павлова В. И. посвящена исследованию тепловых и термодинамических эффектов в системах на основе высокодобротных оптических микрорезонаторов. Для многих актуальных научно-практических приложений, в частности, портативных стандартов частоты, необходимы компактные перестраиваемые источники лазерного излучения с низким уровнем частотного шума. Последние исследования показывают, что перспективным способом создания таких источников является использование оптических микрорезонаторов.

Известно, что частотный шум генерации лазера в режиме затягивания частоты на оптический микрорезонатор зачастую определяется терморелаксационным шумом собственных частот микрорезонатора. Тем не менее, предельно достижимая стабилизация лазерного излучения с помощью использования оптических микрорезонаторов, ограниченная фундаментальными шумами, для многих систем до сих пор не достигнута в эксперименте. Поэтому крайне актуальным является поиск новых флуктуационных механизмов, объясняющих экспериментально измеряемый частотный шум. Одним из таких механизмов могут быть флуктуации в элементе связи с микрорезонатором. В данной работе впервые проанализирован вклад флуктуаций в элементе связи с микрорезонатором в общую нестабильность системы и найдены условия, при которых данный вклад может быть существенным. Разработанная модель проясняет фундаментальные ограничения на ширину линии излучения лазеров, стабилизированных высокодобротными оптическими микрорезонаторами.

Также, использование микрорезонаторов ввиду высокой добротности и большой концентрации оптической мощности в малом объеме сопровождается проявлением тепловых эффектов. Поглощение оптической мощности накачки в материале микрорезонатора приводит к локальному нагреву в области распространения оптической моды. Из-за высокой добротности резонансные частоты крайне чувствительны к изменениям температуры, что проявляется в термооптических сдвигах резонансных частот, различного рода нестабильностях и тепловых дрейфах. Точный учет тепловых эффектов позволяет компенсировать

их влияние и использовать их для прецизионной подстройки собственных частот микрорезонатора. Наиболее простым способом учета тепловых эффектов является использование скоростных уравнений с эффективными тепловыми параметрами. Однако сами значения эффективных тепловых параметров для конкретной конструкции микрорезонатора заведомо неизвестны и требуют дополнительных расчетов или измерений. Общепринятый метод с использованием одного скоростного уравнения с эффективными тепловыми параметрами не обеспечивает высокую точность для произвольных параметров микрорезонатора и накачки. В данной работе впервые предложен метод более точного расчета эффективных тепловых параметров микрорезонаторов с помощью разложения по тепловым модам. Разработанный подход может быть применен как для высокоточной подстройки резонансных частот, так и компенсации паразитного влияния тепловых эффектов в устройствах на основе микрорезонаторов. Поэтому тема данной работы представляется чрезвычайно **актуальной и значимой**.

Полный объем работы – 128 страниц с 42 рисунками и 7 таблицами, список литературы содержит 133 наименования.

Во **Введении** формулируется актуальность, новизна, практическая значимость работы. Также во Введении приведен обзор литературных источников и даны определения основным понятиям и эффектам, необходимые для понимания дальнейшего текста.

В **Первой** главе Павловым В. И. проведено моделирование фундаментальных флуктуаций в микрорезонаторах и различных элементах связи, проанализированы условия, при которых вклады в данных подсистемах становятся равными. В частности, было получено, что для интегрального микрорезонатора из нитрида кремния с межмодовым интервалом 0.1 ГГц, добротностью 10^7 и планарным волноводом связи длина волновода не должна превышать 80 мм. Также обнаружено, что при температуре 75°C для определенной комбинации параметров кристаллического микрорезонатора из MgF_2 вклад терморефрактивного шума в микрорезонаторе можно минимизировать.

Во **Второй** главе Павлов В. И. предложил новый метод для расчета эффективных тепловых параметров микрорезонаторов, основанный на разложении динамики температуры по тепловым модам микрорезонатора. Анализировалась ошибка аппроксимации данных моделирования решением скоростного уравнения для различного числа тепловых мод в широком диапазоне параметров микрорезонатора. Было получено, что оптимальное количество тепловых мод, которые необходимо учитывать для рассматриваемого интегрального микрорезонатора из нитрида кремния равно девяти. Автором было показано, что предложенный метод универсален и подходит для любых типов

микрорезонаторов, включая кольцевые интегральные микрорезонаторы, микросферы, микротороиды и дисковые микрорезонаторы.

В **Третьей** главе Павлов В. И. исследовал различные способы управления резонансными частотами микрорезонаторов, в частности, внешним электрическим полем для резонатора из танталата лития, нагревом внешним лазерным излучением и мощностью накачки для резонатора из фторида магния (MgF_2). Было проведено сравнение экспериментально измеренных сдвигов частоты с численным моделированием, определены параметры предложенных способов. Кроме того, было проведено сравнение экспериментально измеренной временной зависимости тепловых сдвигов резонансных частот для микрорезонатора из MgF_2 с численным моделированием. Получено, что высокая мощность внутри микрорезонатора может вызвать достаточно сильный нагрев и, как следствие, сдвиг собственных частот. В частности, получено, что для микрорезонатора из фторида магния с диаметром 3 мм внутрирезонаторная мощность порядка 0.1 Вт смещает собственные частоты микрорезонатора на величину порядка 3.5 ГГц. Полученный результат также подтверждается измерением распределения температуры в микрорезонаторе с помощью тепловизора.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Работа написана ясным языком и отвечает всем требованиям к оформлению диссертаций.

Достоверность полученных результатов обеспечена хорошим соответствием экспериментальных результатов с проведенным численным моделированием, а также сопоставлением представленных результатов с исследованиями других научных групп. В работе представлены результаты оригинальных исследований, защищаемые положения подкреплены изложенным в работе материалом и логично вытекают из него. Выводы и защищаемые положения представляются разумными и обоснованными.

Среди недостатков работы можно выделить отсутствие измерений спектральной плотности частотных шумов в режиме затягивания частоты на микрорезонатор. Также отсутствует анализ влияния общего вклада амплитудных шумов излучения и оценки вкладов в них отдельных элементов лазерной системы (например, шума тока драйвера лазерного диода).

Указанные замечания не являются значительными и не умаляют общего высокого качества работы, которая представляет собой ценное исследование как с научной, так и с практической точки зрения.

Результаты работы представлены в пяти публикациях в рецензируемых научных журналах, включая Известия Вузов. Радиофизика, MDPI Photonics,

Physical Review A. Публикации в полном объеме отражают представленные в работе результаты. Апробация работы проводилась на целом ряде международных и всероссийских научных конференциях, среди которых можно выделить такие престижные, как 2024 International Conference Laser Optics (ICLO), Невская Фотоника, SPIE/COS Photonics Asia, и 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS).

Автореферат достоверно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Тепловые и термодинамические эффекты в высокодобротных оптических микрорезонаторах» полностью соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а её автор - Павлов Владислав Игоревич безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент

д.ф.-м.н., высококвалифицированный главный научный сотрудник,

Лаборатория стандартов частоты,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

108840, г.Москва, г.Троицк, ул. Физическая, 11, ТОП ФИАН.

e-mail: gubinma@lebedev.ru

телефон: +7(495)851-07-90

Губин Михаил Александрович

27.11.2024 г.

«Подпись М.А. Губина заверяю.»

Ученый секретарь ФИАН,

к.ф.м.н.

А.В.Колобов