

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 влияния тепловых и термодинамических эффектов в системах с высокодобротными микрорезонаторами, поиску способов точного учета и минимизации влияния рассматриваемых эффектов. Оптические микрорезонаторы получили распространение в самых разных научных и технических сферах, став ключевым компонентом для создания передовых фотонных и радиофотонных систем, таких как лазеры с узкой шириной спектральной линии, компактные источники оптических частотных гребенок, высокочувствительные сенсоры и фильтры. Такие системы активно применяются в портативных стандартах частоты, когерентных телекоммуникационных системах, спектроскопии высокого разрешения, рефрактометрии и дальнометрии. Кроме того, оптические микрорезонаторы используются для исследования фундаментальных свойств света и наблюдения квантовых эффектов.

Применение микрорезонаторов неизбежно сопровождается проявлением термодинамических эффектов, которые могут существенно менять их характеристики. В работе Павлова В.И. рассмотрены термодинамические флуктуации в элементах связи с микрорезонатором; впервые проведен сравнительный анализ роли термо-рефрактивного, термоупругого, броуновского и фотоупругого шумов в элементах связи с микрорезонатором на ширину спектральной линии лазера в режиме затягивания на оптический микрорезонатор, определены условия, при которых эти факторы становятся значимыми. Разработанная модель позволяет проектировать устройства на основе микрорезонаторов с минимально возможным уровнем шумов, определяемым фундаментальными термодинамическими флуктуациями.

Взаимодействие микрорезонаторов с оптическим излучением приводит к термооптическим сдвигам резонансных частот, тепловым дрейфам и неустойчивостям, которые значительно влияют на динамику линейных и нелинейных процессов, например, на генерацию оптических частотных гребенок и на эффективность лазерной стабилизации. Поэтому актуальным является разработка методов точного учета влияния данных тепловых эффектов и поиск способов их компенсации. В работе показано, что общепринятый метод учета тепловых эффектов со скоростным уравнением с эффективными тепловыми параметрами при определенных условиях может давать ошибку при расчете тепловых сдвигов частот более 70%, например, при сложной

временной зависимости мощности накачки. В.И. Павлов предложил более точный метод вычисления эффективных тепловых параметров с помощью разложения по тепловым модам микрорезонатора для расчета тепловых сдвиги частоты для различных типов микрорезонаторов и внешних воздействий. Разработанный метод применим как для точной компенсации влияние тепловых эффектов, так и использования тепловых эффектов для прецизионной подстройки резонансных частот. Вышесказанное указывает на актуальность темы диссертационной работы и значимость полученных результатов как с научной, так и с прикладной точек зрения.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем работы составляет 128 страниц с 42 рисунками и 7 таблицами, список литературы насчитывает 133 наименования. Каждая глава работы предваряется введением и обзором литературы по соответствующей теме. Коротко содержание работы В.И. Павлова по главам таково:

В первой главе представлены результаты моделирования методом конечных элементов термодинамических флуктуаций оптического пути между лазером и микрорезонатором в режиме затягивания на микрорезонатор. Сделан вывод об ограничении эффективности оптической обратной связи и произведена оценка вклада этого эффекта в ширину линии генерации лазера в режиме затягивания. Автором установлено, что для интегрального микрорезонатора из нитрида кремния с межмодовым интервалом 100 МГц, добротностью 10^7 и планарным волноводом связи критическая длина волновода составляет 80 мм. Для дискового микрорезонатора из фторида магния были определены условия (температура, параметры структур), при которых вклад терморефрактивных флуктуаций в микрорезонаторе в нестабильность его собственной частоты становится минимальным.

Во второй главе для точного описания тепловой динамики и учета тепловых эффектов Павлов В. И. предложил новый подход, основанный на разложении теплового поля на тепловые моды микрорезонатора. Автор продемонстрировал применение предложенного метода на примере кольцевых интегральных микрорезонаторов, микротороидов, микросфер и дисковых микрорезонаторов. Исследовалась зависимость точности аппроксимации от числа экспонент (и соответствующего числа скоростных уравнений) для широкого диапазона реальных параметров рассматриваемых структур и различных режимов внешней накачки. В результате найдено оптимальное количество тепловых мод (и соответственно тепловых процессов), которые необходимо учитывать. Для рассматриваемого интегрального микрорезонатора сходимость числа экспонент достигнута при 9 тепловых мод.

В третьей главе проведен сравнительный анализ экспериментальной реализации различных способов подстройки резонансных частот микрорезонатора с численным моделированием, выполнены оценки параметров реализованных способов. Так, показано, что для дискового микрорезонатора из фторида магния с диаметром 3 мм мощность внутри микрорезонатора порядка 100 мВт вызывает его нагрев на 1.5 градуса

и соответствующий сдвиг резонансной частоты на ~ 3.5 ГГц. Для кристаллических микрорезонаторов время тепловой релаксации может достигать двух секунд, что важно учитывать при разработке практических приложений на базе этих устройств. Автором проведено сравнение эффективных тепловых параметров, полученных из аппроксимации экспериментальных данных и рассчитанных с помощью разработанного во второй главе метода и получено их хорошее согласие, что подтверждает корректность построенной численной модели и разработанного во второй главе метода.

Диссертационная работа отличается четкой структурой, главы логично взаимосвязаны. Содержание работы свидетельствует о глубоком понимании автором исследуемого объекта и владении методологией научного исследования. Защищаемые положения и выводы представляются в высокой степени обоснованными. Результаты работы являются полным решением поставленных перед Павловым В.И. научных задач и характеризуются научной значимостью и новизной. Работа написана доступным научным стилем, содержит качественные иллюстрации и оставляет благоприятное общее впечатление. Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задач, применением обоснованных экспериментальных и численных методов, а также подтверждена публикациями в рецензируемых журналах – по теме работы опубликовано 5 статей в изданиях *Photonics*, *Measurement Technique*, *Phys. Rev. A*, *Optics Communications*, *Radiophysics and Quantum Electronics*.

Результаты работы многократно представлены на всероссийских и международных конференциях: SPIE/COS Photonics Asia, International Conference Laser Optics (ICLO) и International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS).

Тем не менее, следует сделать несколько замечания к тесту диссертации:

- 1) В главах 1, 2 анализируется интегральная микросхема на основе микрорезонатора из нитрида кремния. При этом не рассматриваются другие перспективные интегральные платформы, такие как ниобат лития, Ta_2O_5 , AlGaAs . Можно ли обобщить полученные автором результаты на случай других материалов?
- 2) В тексте диссертации не всегда четко выделена новизна результатов автора. Насколько новым можно считать п. 8 в разделе «Научная новизна»?
- 3) Во главе 2 использовано разложение теплового поля по тепловым модам микрорезонатора и отмечено, что достаточно использовать до девяти мод для точного описания состояния систем. Каким физическим механизмам соответствует такое разложение?
- 4) В третьей главе автор при построении спектрограммы не уточняет, каким образом проводилось “ступенчатое” изменение мощности накачки в эксперименте.
- 5) В тексте работы, а также в формулировках выносимых на защиту положений, научной новизны, приведены параметры (температура, длина) без допусков; какова точность приведенных оценок?
- 6) Некоторые формулировки не представляются удачными: «2.2. Моделирование нагрева микрорезонатора мощностью накачки» (с. 45), «разложение по экспонентам».

Указанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают общий высокий уровень выполненной работы, несомненно имеющую как научную, так и практическую значимость.

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 заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент
д.ф.-м.н., доцент кафедры квантовой электроники
Физического факультета
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
e-mail: mur@shg.ru
телефон: +7(495)939-36-69

Мурзина Татьяна Владимировна
27.11.2024

Подпись Т.В. Мурзиной заверяю.

Ученый секретарь
Ученого Совета
Физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

Сатремагулов С.А.