

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 разработке новых, более точных методов для учета влияния тепловых и термодинамических эффектов в системах с высокодобротными оптическими микрорезонаторами.

Вопрос учета тепловых эффектов является критически важным аспектом для современных компактных интегральных фотонных микросхем с высокодобротными микрорезонаторами. Это обусловлено тем, что интегральные микрорезонаторы сочетают в себе высокую добротность и большую плотность оптической мощности в микрорезонаторе, что приводит к нагреву за счет поглощения мощности накачки и проявлению тепловых эффектов. Существующие теоретические модели для учета влияния тепловых и термодинамических эффектов, полученные для приближения сферического микрорезонатора, плохо применимы для современных интегральных микрорезонаторов. В частности, на данный момент активно исследуются и разрабатываются сложные интегральные микросхемы, содержащие множество связанных между собой микрорезонаторов, так называемых “фотонных молекул”. Очевидно, что учет тепловых эффектов в таких структурах является нетривиальным и необходимо разрабатывать новые подходы, которые позволят повысить точность учета тепловых и термодинамических эффектов.

Также, стоит отметить, что процесс создания и характеристики интегральных фотонных микросхем может быть довольно времязатратным. Ошибки на этапе проектирования могут приводить к непригодности микросхемы для планируемого применения. Для избежания подобных рисков необходимо предварительно производить расчет характеристик интегрального микрорезонатора, в том числе просчитывать влияние тепловых и термодинамических эффектов в подобных системах. В данной работе впервые предложена и разработана модель для учета флуктуаций в элементе связи с микрорезонатором и найдены условия, при которых данный вклад может быть существенным. Также в работе предложен и применен оригинальный метод более точного расчета эффективных тепловых параметров микрорезонаторов с помощью разложения по тепловым модам. Полученные результаты позволяют создавать интегральные фотонные микросхемы с заведомо известными тепловыми характеристиками с высокой точностью. Поэтому тема работы является весьма актуальной и значимой.

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

Введение раскрывает актуальность, новизну и практическую ценность исследования. Помимо этого, оно содержит обзор литературы и включает определения ключевых понятий и эффектов, необходимых для восприятия последующего материала.

В первой главе Павлов В. И. выполнил моделирование методом конечных элементов флуктуаций в микрорезонаторах и элементах связи с ними, рассчитал влияние рассматриваемых флуктуаций на флуктуации частоты генерации лазера в режиме затягивания на оптический микрорезонатор. Автором были получены ограничения на длину планарного волновода связи и произведена оценка ширины линии генерации лазера в режиме затягивания различными способами. В частности, в работе было получено, что для интегрального микрорезонатора из нитрида кремния с межмодовым интервалом 100 МГц, добротностью 10^7 и планарным волноводом связи длина волновода не должна превышать 80 мм. Также автором исследовалась зависимость термооптического коэффициента для фторида магния от температуры. Было получено что температуре 75 °С является оптимальной, так как вклад терморефрактивных флуктуаций становится минимальным.

Во второй главе Павловым В. И. исследуются система для моделирования динамики электромагнитного поля внутри микрорезонатора в режиме затягивания с учетом тепловых эффектов. В частности, было показано, что в диапазоне стандартных параметров интегрального микрорезонатора точность обычного одноэкспоненциального приближения, полученного из одного скоростного уравнения с эффективными тепловыми параметрами, описывающего нагрев микрорезонатора, может быть относительно низкой. Для более точного учета тепловых сдвигов резонансных частот автором разработан оригинальный подход, основанный на добавление для описания процесса нагрева нескольких экспонент, соответствующих различным тепловым модам микрорезонатора. Для рассматриваемого интегрального микрорезонатора сходимость по числу экспонент была достигнута при использовании девяти экспонент, соответствующих девяти скоростным уравнениям с эффективными тепловыми параметрами. В главе проводилось сравнение результатов расчета эффективных тепловых параметров с экспериментальными данными других научных групп, получено хорошее согласование. Автором выявлена взаимосвязь эффективных тепловых параметров с кривой терморефрактивного шума резонансных частот, показано, что эффективные тепловые параметры могут быть получены из измеренного терморефрактивного шума. Также проводилась верификация исследуемой модели с помощью сравнения экспериментально измеренных тепловых сдвигов частоты, вызванных нагревом интегральным нагревателем с численным моделированием. Таким образом, автором была подтверждена корректность разработанной модели интегрального микрорезонатора.

В третьей главе Павловым В. И. была собрана экспериментальная установка с микрорезонатором из фторида магния и измерена временная зависимость тепловых сдвигов частоты, вызванных поглощением оптической мощности накачки, проведено сравнение с численным моделированием. В результате получено хорошее согласование между моделированием и измерениями, что свидетельствует о правильности созданной численной модели и метода определения эффективных тепловых параметров с помощью разложения по тепловым модам микрорезонатора, предложенного во второй главе. Получено, что оптическая мощность порядка 100 мВт сдвигает спектр микрорезонатора на ~ 3.5 ГГц и повышает среднюю температуру исследуемого микрорезонатора примерно на 1.5 °C. При этом время тепловой релаксации составляет порядка двух секунд.

Работа является законченным научным произведением. В работе представлены результаты оригинальных исследований, которые являются новыми, защищаемые положения и выводы подкреплены изложенным в работе материалом и логично вытекают из представленного материала, представляются разумными и обоснованными. Достоверность полученных результатов и защищаемых положений обеспечена корректностью постановки задач, использованием обоснованных экспериментальных методик, хорошим соответствием теории с результатами, полученными в эксперименте, а также публикациями в высокорейтинговых журналах.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

- 1) В первой главе автор рассчитывает вклад шумов в элементе связи для волновода с поперечными размерами 0.8 мкм на 0.8 мкм. При этом не проведено моделирование шумов в элементе связи для различных размеров волноводов. В частности, для случая очень узких волноводов, когда большая часть излучения распространяется в SiO_2 покрытие.
- 2) Во второй главе автором для моделирования используются материальные параметры интегрального микрорезонатора, при этом не учитывается, как меняются с изменением температуры сами параметры. Не приведен диапазон температур, для которых полученные результаты будут корректны.

Вышеприведенные недостатки не снижают общего положительного впечатление от работы и не снижают ее научной значимости.

Результаты работы были опубликованы в ведущих научных изданиях, включая MDPI Photonics, Известия Вузов.Радиофизика, Optics Continuum, Physical Review A, а также представлены на нескольких престижных международных научных конференциях, включая SPIE, ICLO, EFTF, ICQT.

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

к.ф.-м.н., начальник научно-исследовательской лаборатории квантовых технологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, научно-исследовательская лаборатория квантовых технологий,
115487, г. Москва, а/я 50
e-mail: tmafuz@mail.ru
телефон: +79067196578

Тархов Михаил Александрович

С Уважением,

28.11.2024г.

Подпись М.А. Тархова заверяю.

Магалиев О.К. ИКМЭРАН

Э.Б.Земенико