

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Галиева Рамзиля Раушановича

### **«Оптимизация режима затягивания частоты полупроводникового лазера высокодобротным микрорезонатором»**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.2 – «приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертационная работа Галиева Р.Р. посвящена микрорезонаторам с модами шепчущей галереи (МШГ) и их применениям в области когерентной оптики. Когерентная оптика – бурно развивающаяся область знаний, востребованная в практических приложениях, при этом полна новыми нерешенными научными задачами. Микрорезонаторы МШГ – физические объекты, позволяющие достигать сверхмалых оптических потерь и, как следствие, высочайшей плотности электромагнитного поля, позволяющей наблюдать нелинейные эффекты при величинах оптической накачки в несколько милливатт и менее, что открывает широкие возможности как для изучения динамики нелинейных процессов, так и для создания компактных устройств с уникальными характеристиками. Таким образом, тема работы представляется чрезвычайно актуальной и значимой.

В данной работе продемонстрирована возможность применения высокодобротных оптических резонаторов на модах шепчущей галереи для пассивной стабилизации полупроводниковых лазеров до субкилогерцовой ширины линии. Размер МШГ резонаторов может достигать 100 мкм, поэтому представленная схема стабилизации лазера обладает высокой компактностью. В схеме лазер стабилизируется за счет резонансного рэлеевского рассеяния на внутренних и поверхностных неоднородностях, когда часть входящего излучения отражается обратно в лазер, что приводит к известному в радиофизике эффекту затягивания. Известно, что если к одноконтурному радиочастотному генератору подключается резонансная нагрузка с добротностью выше, чем у генератора, то стабильность результирующей частоты генерации будет выше. Коэффициент стабилизации при этом может составлять много порядков и связан с отношением добротности высокодобротного резонатора к добротности генератора. При связи лазера с микрорезонатором этот эффект обеспечивает быструю частотно-селективную оптическую обратную связь и может привести к значительному уменьшению ширины линии лазера. Впервые продемонстрированный с использованием микросфер из плавленого кварца этот метод теперь активно применяется для стабилизации частоты различных лазерных источников.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении приведена исчерпывающая характеристика текущих научных исследований в области когерентной оптики. Галиев Р.Р. показывает отличное владение тематикой и ясное представление положения его собственных исследований в научной картине мира. Научные задачи логически следуют из задач, стоящих перед современной наукой.

В основной части работы Галиев Р.Р. описывает связанную систему лазера и высокодобротного микрорезонатора, в которой реализуется эффект затягивания частоты. Данный эффект активно применяется для стабилизации лазеров и сужения их линии генерации (в некоторых случаях до субгерцового уровня). Автором данной работы была разработана оригинальная модель и получены наглядные аналитические соотношения, описывающие эффект затягивания на микрорезонатор с модами шепчущей галереи. Полученные теоретические результаты были успешно подтверждены экспериментально. Также Галиевым Р.Р. был исследован эффект затягивания многочастотного лазера высокодобротным микрорезонатором МШГ.

Галиев Р.Р. исследовал ранее не изученную схему затягивания для увеличения эффективности затягивания и улучшения шумовых характеристик лазера. Особое внимание уделено исследованию возможности улучшения стабилизации лазера в режиме затягивания за счет усиления обратной связи с помощью дополнительного зеркала. Для этого создана теоретическая модель затягивания лазера высокодобротным оптическим микрорезонатором с дополнительным элементом обратной связи в виде зеркала. Было проведено аналитическое и численное исследование зависимости характеристик лазерной генерации от величины обратной связи. На основании полученных результатов были определены ранее не известные оптимальные режимы и параметры системы, обеспечивающие наиболее эффективную стабилизацию лазера в режиме затягивания. В ранних исследованиях эффекта затягивания было показано, что некоторые уровни внешней оптической обратной связи могут приводить к мультстабильности затянутого лазера. Также стабильность лазера в режиме затягивания ограничивают паразитные нелинейные эффекты (например, четырехволновое смешение или комбинационное рассеяние), возникновению которых способствует высокая интенсивность поля внутри микрорезонатора. Так как коэффициент стабилизации затянутого лазера зависит от уровня обратной волны, то вышеописанная проблема ставит оптимизационную задачу: максимизации коэффициента стабилизации в условиях ограничения на интенсивность поля внутри микрорезонатора и на уровень обратной волны. Данная задача была успешно решена Галиевым

Р.Р. для режимов слабой и высокой нелинейности. Анализ разработанной модели показал, что для достижения максимально возможного коэффициента стабилизации в случае слабой нелинейности в эксперименте необходимо симметрично нагружать резонатор. Галиев Р.Р. показал, что схема затягивания с дополнительным зеркалом позволяет не только увеличивать коэффициент стабилизации, но и проводить исследования стабильности режимов работы затянутого лазера при разных уровнях оптической обратной связи. В данной работе было также обнаружено, что оптимальный режим предложенной схемы находится далеко от критической связи (в отличие от классической схемы затягивания), что приводит к меньшим потерям в системе. В случае сильной нелинейности выше поставленная компромиссная задача решается асимметричной связью призм с микрорезонатором. Такой режим затягивания позволяет подавить нежелательные нелинейные эффекты и при этом сохранить высокую стабильность затянутого лазера. Галиевым Р.Р. также было показано, что для классической и модифицированной схем затягивания мощность, циркулирующая в микрорезонаторе в оптимальном режиме, примерно одинакова. Таким образом, оптимальные режимы классической и модифицированной схем затягивания одинаково чувствительны к нежелательным нелинейным эффектам, но в случае модифицированной схемы нелинейные эффекты эффективно подавляются асимметричной нагрузкой призм.

Работа хорошо структурирована. Главы связаны между собой, но, при этом, каждая глава представляет собой цельное самостоятельное исследование. Содержание работы демонстрирует глубокое понимание автором объекта исследования и владение принципами ведения научно-исследовательской деятельности. Полученные в работе результаты являются полноценным решением поставленных перед Галиевым Р.Р. научных задач и, без сомнения, обладают научной актуальностью и новизной.

Диссертация написана ясным научным языком, хорошо иллюстрирована и производит общее хорошее впечатление.

К недостаткам работы стоит отнести отсутствие измерений спектральной плотности фазовых шумов затянутого лазера и анализа возможностей подавления амплитудных шумов затянутого лазера. Также, необходимо отметить отсутствие объяснения природы фазовых шумов затянутого лазера.

Указанные недостатки не являются существенными и не снижают общего высокого уровня работы, представляющей несомненный как научный, так и практический интерес.

Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых журналах, среди которых Nature Communications, Physical Review Applied, Optics Express. Результаты докладывались на целом ряде международных научных конференций, среди которых SPIE, CLEO, ФЭКС-2021 (XII международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии памяти профессора Виталия Владимировича Самарцева) и OSA Laser Congress 2021.

Публикации в полном объеме отражают представленные в работе результаты. В работе представлены результаты оригинальных исследований, защищаемые положения подкреплены изложенным в работе материалом и логично вытекают из представленного материала, выводы представляются разумными и обоснованными.

Диссертационная работа «Оптимизация режима затягивания частоты полупроводникового лазера высокочастотным микрорезонатором» полностью соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а её автор Галиев Рамзиль Раушанович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент

д.ф.-м.н., профессор кафедры оптики, спектроскопии  
и физики наносистем физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет  
e-mail: naniy@t8.ru  
телефон: +7(495)939-59-81

Наний О. Е.

Подпись О.Е. Нания заверяю.

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

Караваев В.А.