

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Галиева Рамзиля Раушнановича

### **«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»

В диссертационной работе Галиева Р.Р. рассматриваются применения микрорезонаторов с модами шепчущей галереи в когерентной оптике.

Главная тема работы – исследование известного в физике колебаний и радиофизике эффекта затягивания в новых оптических системах. Применявшееся для стабилизации радиочастотных генераторов, в оптике это явление успешно используется для стабилизации и управления шириной линии излучения одночастотных лазеров при помощи таких оптических элементов, как зеркало, высокодобротный резонатор, например, Фабри-Перо или резонатор с модами шепчущей галереи (МШГ). Лазерные источники с узкой линией являются ключевым элементом современной науки и техники, при этом потребность в них постоянно возрастает. Эффект затягивания исследуется и применяется на протяжении более двух десятилетий в качестве эффективного способа сужения линии и стабилизации частоты лазера, что подтверждает актуальность работы.

Результаты исследований, проведенных Галиевым Р.Р., показали, что в традиционных подходах к созданию узкополосных лазеров на связи лазера и МШГ-микрорезонатора, не всегда можно достичь уровня обратной связи, необходимого для оптимального режима работы такой системы. Автором предложена и изучена новая оптическая схема, позволяющая эффективно управлять свойствами обратной связи для повышения эффективности частотной стабилизации лазерных источников в режиме затягивания. Галиев Р.Р. показал, что эффективность стабилизации лазера в классической схеме затягивания зависит от уровня резонансного Рэлеевского рассеяния на неоднородностях микрорезонатора. Максимальная эффективность стабилизации лазера достигается, когда уровень Рэлеевского рассеяния сравним с потерями в резонаторе. Однако добиться этого оказывается чрезвычайно затруднительно, поскольку в высокодобротных МШГ-резонаторах внутренние и поверхностные неоднородности технологически минимизируются при их изготовлении. Галиев Р.Р. предложил метод управления эффективностью затягивания и улучшения шумовых характеристик затянутого лазера с помощью дополнительного зеркала, связанного с микрорезонатором с помощью дополнительного призмного элемента связи. В данной работе показано, что в такой системе уровень оптической обратной связи эффективно регулируется настройкой связи между дополнительной призмой и зеркалом. Теоретическое исследование такой системы проведено на основе разработанной Галиевым Р.Р. оригинальной теоретической модели. Анализ данной

модели показал, что максимальный коэффициент стабилизации предложенной схемы близок максимальному коэффициенту стабилизации традиционной схемы, где оптическая обратная связь с микрорезонатором возникает за счет Рэлеевского рассеяния на внутренних и поверхностных неоднородностях. Стоит обратить внимание на то, что в традиционном подходе максимальный уровень стабилизации лазера требует точной настройки коэффициента Рэлеевского рассеяния относительно внутренних потерь резонатора. Однако это ведет к падению эффективности стабилизации лазера. В то же время, в предложенной Р.Р. Галиевым схеме с зеркалом максимальный уровень стабилизации лазера легко достигается за счёт настройки оптической связи между дополнительной призмой и зеркалом. Важно отметить, что в классической схеме затягивания при высоком уровне Рэлеевского рассеяния резонанс расщепляется из-за связи прямой и обратной волн микрорезонатора. В предложенной схеме затягивания отсутствует взаимная связь между прямой и обратной волной, так как обратная волна создается прямой волной за счет отражения от зеркала, поэтому расщепление резонанса в обратной волне отсутствует. Отсутствие расщепления упрощает процесс настройки параметров системы для достижения оптимального режима.

Практически значимым научным результатом работы является продемонстрированная Галиевым Р.Р. принципиальная возможность использования эффекта затягивания с помощью высокодобротного резонатора МШГ для генерации одночастотного лазерного излучения с узкой линией при использовании мощного многочастотного лазерного диода. Это также позволило использовать сравнительно дешевые многочастотные лазерные диоды для генерации оптических частотных гребенок в режиме затягивания. Результаты этих исследований особенно актуальны для коротковолновой области спектра. В диапазоне  $\sim 400 \div 500$  нм развито производство мощных полупроводниковых многочастотных лазеров, но почти нет одночастотных достаточной мощности, равно как нет и усилителей мощности. Существенным результатом диссертационной работы является разработанная оригинальная схема эксперимента, позволившая автору детально изучить процесс затягивания многочастотного лазера при различных режимах его работы. Методика основана на использовании высокодобротного микрорезонатора из фторида магния ( $MgF_2$ ), который стабилизирует многочастотный диодный лазер, работающий при длине волны 1535 нм с выходной мощностью 100 мВт. В результате спектр излучения, состоящий из 50 линий (ширина в оптическом диапазоне 10 нм) с шириной линий порядка нескольких МГц, сужался в одну узкую линию мощностью 50 мВт. Помимо сужения спектра генерации, впервые в явном виде наблюдался эффект Богатова, предсказанный более 30 лет назад. Кроме того, наблюдался и эффект одновременного затягивания многочастотного излучения лазерного диода, когда одновременно несколько разных мод излучения лазерного диода стабилизируются несколькими модами микрорезонатора. Затягивание происходит на нескольких модах, отстоящих друг от друга на частотный интервал, кратный межмодовому интервалу резонатора. При этом конкуренция мод вблизи каждой затянутой частоты действует, как и в одночастотном затягивании: весь спектр в окрестности резонансной частоты

подавляется, и энергия перераспределяется в пользу одной или несколько узких спектральных линий.

Достоверность полученных результатов и защищаемых положений обеспечена корректностью постановки задач, использованием обоснованных экспериментальных методик, хорошим соответствием теории с результатами, полученными в эксперименте, а также сравнением с результатами полученными другими авторами. Работа выполнена на высоком научном уровне. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, из которых 4 — статьи, индексируемые в базах SCOPUS, Web of Science. Результаты диссертационной работы докладывались на ряде российских и международных конференций. Публикации соответствуют положениям диссертации.

Тем не менее, следует сделать несколько замечаний к тесту диссертационной работы автора. В главе 3 демонстрируется возможность генерации оптических гребенок многочастотным лазером, затянутым на высокочастотный микрорезонатор. Наиболее важным параметром оптической гребенки является ее ширина. Однако, в данной работе не описывается чем определяется ширина полученной гребенки в режиме затягивания. К недостаткам работы также стоит отнести отсутствие исследования стабильности линий гребенки в режиме затягивания.

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

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

кандидат технических наук, доцент, начальник научно-технического центра «Оптические измерения» Главного метрологического центра

Государственной службы времени и частоты, ФГУП "ВНИИФТРИ",  
141570, Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево

e-mail: nk@vniiftri.ru

телефон: +7 (495) 660-57-26

Хатырев Николай Петрович

Подпись Хатырева Николая Петровича удостоверяю

Начальник отдела кадров ФГУП ВНИИФТРИ

Лобова О.А.