ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 23.12.2024 №68

О присуждении Клюшнику Дмитрию Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степеникандидата технических наук.

Диссертация «Исследование и разработка комплексного подхода улучшения ключевых параметров поверхностного полупроводникового лазерного излучателя с помощью оптической инжекционной синхронизации»в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет».

Принята к защите 21 октября 2024 года, протокол № 58 диссертационным советом 24.2.326.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек 26.01.2023 (Приказ № 86/нк).

Соискатель Клюшник Дмитрий Андреевич, 1994 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2019 году Клюшник Д.А. окончил с отличием факультет наноэлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА) ему была присвоена квалификация «магистр» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» (диплом № 107704 0200893).

В том же году поступил в очную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА) по специальности 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии» которую окончил в 2023 году, и ему была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь» (диплом №107732 0048239)

Научно-исследовательской деятельностью начал заниматься в 2014 году в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» в должности лаборанта исследователя в дизайн центре интегральной радиофотоники научно – научно технологического центра интегральной радиофотоники до 2019 г., с 2019 г. и по настоящее время работает в научно производственном объединении дальней радиолокации им. Минца (НПО ДАР), с 2023 г. и по настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА- Российский технологический университет» в научно – технологической лаборатории радиофотонная СВЧ- электроника.

Научный руководитель – Белкин Михаил Евсеевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-технической лаборатории «Радиофотонная СВЧ-электроника» (НТЛ РСЭ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Официальные оппоненты:

1. Чернега Николай Владимирович доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Когерентная Оптика» Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

2. Коган Семен Самуилович кандидат технических наук, старший научный сотрудник, советник генерального директора по формированию технической стратегии Компания ООО «Т8».

Дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) в своем положительном заключении, составленным Ячменевым Александром Эдуардовичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником ИСВЧПЭ РАН, и утвержденным доктором технических наук, профессором Гамкрелидзе Сергеем Анатольевичем, директор ИСВЧПЭ РАН. Указали что диссертационная работа была рассмотрена и получила положительную оценку на заседании ученого совета ИСВЧПЭ РАН от 31 октября 2024 г. (протокол заседания ученого совета №11).

В заключении ведущей организации отмечено, что результаты являются новыми, а сама работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу; основные результаты диссертационной работы содержатся в опубликованных работах; достоверность экспериментальных результатов не вызывает сомнения; автореферат диссертации соответствует её содержанию; диссертационная работа полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК, утвержденным постановлением правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, и соответствует паспорту специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств». Автор диссертации, Клюшник Дмитрий Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Основные положения и выводы диссертационной работы прошли апробацию на 5 международных и российских научных конференциях и опубликованы в 14 научных изданиях, включая 3 статьи, входящих в перечень научных журналов ВАК при Минобрнауки России, индексируемых WoS и/или Scopus.

Научные работы по теме диссертации:

1. Белкин М., Васильев М., Клюшник Д., Кузнецов Е. Создание радиофотонной аппаратуры на базе технологий оптической и сверхвысокочастотной электроники // Электроника: наука, технология, бизнес. 2024. № 5 (236) С. 106-120 (ВАК).

2. Белкин М.Е., Клюшник Д.А., Фофанов Д.А. Характеристики электрооптического преобразования современных лазерных излучателей при распределении по оптическому волокну опорных радиосигналов дециметрового диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 9. С. 556-568. (ВАК).

3. O. Egorova, M. Belkin, D. A. Klushnik, S. Zhuravlev, M. Astapovich, S. L. Semojnov Microwave signal delay line based on multicore optical fiber // Physics of Wave Phenomena, 2017, Vol. 25, No. 4, pp. 289–292. (Web of Science, Scopus).

4. Клюшник Д.А., Гладышев И.В. Широкополосное пассивное согласование импеданса vcsel лазера с прямой аналоговой модуляцией // Оптические технологии, материалы и системы ("Оптотех 2022"). Москва, 2022. С. 455-459.

5. Алёшин А.В., Клюшник Д.А., Смирнов Е.Е., Фофанов Д.А. Перестраиваемая радиофотонная линия передачи с умножением частоты для аппаратуры радиосвязи и радиолокации // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 3. С. 531-534.

6. Белкин М. Е., Клюшник Д.А. Применение фотонного подхода для построения соединительных линий передачи сверширокополосных радиосигналов. // VI Международная Конференция по Фотонике и Информационной Оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. с. 96-97.
7. Бахвалова Т.Н., Клюшник Д.А. Компьютерное моделирование компонентной базы и аппаратуры радиофотоники в САПР VPI TransmissionMaker. // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский технологический университет". – М., 2017. - 72 с.
8. Белкин М. Е., Клюшник Д.А., Топорков Н. В. Разработка сверхширокополосного устройства долговременной задержки радиосигналов. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2016. Т. I. № 2, с. 218-237.

9. Белкин М. Е., Клюшник Д.А. Принципы построения радиофотонного диаграммообразующего устройства сверхширокополосной радиоэлектронной системы СВЧ диапазона // 25-я Международная НТК «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо 2015 г. Севастополь, 6-12 сентября 2015 г., с. 1023-1024.
10. M.E. Belkin, K. Voropaev, D. Klyushnik, M.G. Vasiliev Devising the ways to expand throughput of a directly modulated long-wavelength VCSEL // International Conference Laser Optics (ICLO) July 2024 *pp. 345-350*

11. Mikhail E. Belkin, Dmitry A. Klyushnik, and Alexander S. Sigov Predesigning RoF-Based Millimeter-Wave Access Sub-Network in Megapolis 5G Communication System // International Conference IEEE Compas 2024 *pp. 145-146 .* ( Web of Science Scopus)
12. M. Belkin, D. Klyushnik, D. Fofanov Characteristics of the Electric-to-Optical Converter for Modern Laser Emitters During Transmission of UHF-Band Reference Radio Signals the Optical Fiber // Published Engineering, Physics 22 September 2017 *pp. 112-115*

13. M. Belkin, D. Klyushnik, N.V. Toporkov Design of ultra-wideband long-term RF-signal delay devices // Infocommunications and Radio Technologies June 2018 1(2):218-237

14. М. Е. Белкин, Д.А. Клюшник, Н.В. Смирнов, К.О. Воропаев Оптическая инжекционная синхронизация: эффективный путь улучшения характеристик полупроводникового лазера. // 2-ая Международная конференция лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе 20 – 24 мая 2024 г., Минск, Беларусь. Сборник трудов С. 115-116.

В представленных работах Клюшником Д. А. проводилось исследование пассивного сверхширокополосного согласования согласование импедансов лазера с прямой модуляцией. Отметим, что важным результатом работы стало определение схемы согласования, при которой было получено значительное улучшение амплитудно-частотных характеристик поверхностно излучающего лазера отечественного производства.

Также была экспериментально продемонстрирована сверхширокополосная инжекционная синхронизация поверхностно излучающего лазера, что привело к значительному улучшению его характеристик, включая расширение полосы пропускания, сужение спектральной линии. Было показано, что данный метод применим в новых перспективных радиофотонных и телерадио-коммуникационных системах, а также современных перспективных системах мобильной связи 5G и 6G.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. От Фофанова Д. А., кандидата технических наук, главного конструктора ООО «Арли спецтехника»— отзыв положительный, в качестве замечаний отмечено:

(а) Отсутствие ряда графических зависимостей, наглядно подтверждающих результаты внедрения радиочастотного согласования и оптической инжекционной синхронизации.

(б) Отсутствие четко сформулированных требований к характеристикам ПИЛ отечественного производства и сопутствующих компонентов.

(в) Недостаточный охват областей, в которых внедрение результатов работы могло бы быть полезным.

2. От Бутова О. В., доктора физико-математических наук, заместителя директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова Российской академии наук»— отзыв положительный, в качестве замечаний отмечено:

(а) Формулировать защищаемые положения лучше в виде утверждений, требующих доказательств. Этим они отличаются от выводов и научной новизны.

(б) Текст автореферата содержит несогласованные предложения что затрудняет восприятия текста.

3. От Масного В. А., кандидата технических наук, заместителя руководителя направления АО «КРЭТ» — отзыв положительный, в качестве замечаний отмечено:

(а) Области применения результатов работы недостаточно точно и полно просматриваются из материалов автореферата.

(б) Недостаточно детально представлены требования к поверхностно излучающему лазеру.

(в) В автореферате не приведены изображения измеренных характеристик фазовых шумов и интермодуляционных искажений без применения оптической инжекционной синхронизации.

4. От Ладугина М. А., доктора физико-математических наук, начальника научно-производственного комплекса АО «НИИ Полюс им. М. Ф. Стельмаха» — отзыв положительный, в качестве замечаний отмечено:

(а) Почему на рисунке 3 амплитудно-частотная характеристика ПИЛ начинается на уровне минус 34 дБ, а амплитудно-частотная характеристика ПИЛ с ведущим РОС лазером на уровне минус 52 дБ? И означает ли это, что не обходимо использовать усилители сигнала?

(б) Не может ли так быть, что на рисунке 10(в) представлен спектр ведущего РОС-лазера, а не оптически синхронизированного ПИЛ?

(в) В автореферате не представлены данные о применении подхода оптической инжекционной синхронизации в зарубежной практике и к другим типам лазеров?

(с) В работе имеются несколько опечаток и неудачных формулировок.

5. От Мороза А. В., кандидата физико-математических наук, начальника отдела разработки составных частей РЛС на основе интегральной фотоники. «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А. Л. Минца» (АО НПОДАР) — отзыв положительный, в качестве замечаний отмечено:

(а) У ряда рисунков подписи к осям трудно различить (рисунки 6, 9 и 14).

(б) В тексте автореферата не приведены описания расшифровки аббревиатур, используемых на рисунке 1. Например, что такое ЗТП, РБО или КЯ?

В каждом из отзывов отмечается, что сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался тем, что официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации широко известны своими достижениями в соответствующей области науки, обладают глубоким пониманием изучаемых физических процессов и способны критически оценить научную и практическую значимость результатов, полученных и представленных
Клюшником Д. А. в его диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что в результате выполнения соискателем исследований:**

**Разработана** инновационная методология применения оптической инжекционной синхронизации (ОИС) для оптимизации работы полупроводниковых поверхностно излучающих лазеров (ПИЛ). **Разработана** схема согласования входного импеданса для отечественных ПИЛ на 50 Ом, обеспечивающая сверхширокополосное пропускание в полосе частот до 40 ГГц. Также **продемонстрирован** экспериментальный макет лазерного передающего устройства с использованием ОИС.

**Показано** значительное расширение полосы прямой модуляции ПИЛ на 1.5 мкм с 8 ГГц до 40 ГГц и увеличение степени когерентности излучения до 116 кГц. **Продемонстрировано**, что использование ОИС позволяет увеличить полосу прямой модуляции ПИЛ более чем в два раза с 20 ГГц до 40 ГГц по сравнению с современными аналогами, что открывает новые перспективы для их применения в телекоммуникационных системах пятого (5G) и шестого (6G) поколений. Теоретически и экспериментально **показано** улучшение когерентности излучения с 5.64 МГц до 116 кГц и снижение фазовых шумов при отстройках в полосе 10 Гц-10 МГц, на - 30 дБ/Гц меньше, чем без применения ОИС, -130 дБн/Гц на отстройке от несущей 10 кГц, что существенно улучшает качество передачи оптического сигнала.

**Получены** ключевые параметры исследуемых лазерных систем, включая зависимость выходной мощности, ширины линии генерации, шумовых характеристик полосы модуляции от условий оптической инжекции. **Представлено** экспериментальное подтверждение того, что применение ОИС позволяет значительно повысить линейность электрооптического преобразования до 40 ГГц и снизить нелинейные искажения на 4 дБ. **Продемонстрировано**, что применение ОИС позволяет значительно увеличить динамический диапазон работы лазерных систем до 40 ГГц, что является ключевым для их использования в системах передачи данных следующего поколения. **Получены** экспериментальные данные, подтверждающие снижение нелинейных искажений на 4 дБ и улучшение когерентности лазерного излучения до 116 кГц, что имеет важное значение для повышения точности передачи сигналов. **Найдены** оптимальные параметры настройки схемы импедансов согласования для достижения максимальной эффективности работы ПИЛ в условиях сверхширокополосной передачи данных. Экспериментально **продемонстрировано** повышение линейности электрооптического преобразования в полосе 40 ГГц по 3 дБ, что способствует минимизации нелинейных искажений в каналах связи. **Получены** экспериментальные данные, которые могут быть использованы при разработке лазерных передающих устройств, ориентированных на минимизацию энергопотребления и увеличение пропускной способности каналов связи. **Представлены** рекомендации по применению ОИС для оптимизации работы отечественных ПИЛ, что делает их конкурентоспособными на мировом рынке лазерных технологий. **Найдены** оптимальные параметры настройки лазеров, которые обеспечивают их стабильную работу и максимальную эффективность.

**Проведенное** моделирование с использованием специализированного программного обеспечения и экспериментальная проверка результатов подтвердили высокую степень достоверности полученных данных

**Научная значимость** исследования заключается в получении новых знаний об особенностях применения ОИС для улучшения характеристик отечественных ПИЛ, что способствует повышению конкурентоспособности российских технологий. Практическая значимость работы заключается в разработке и тестировании экспериментальных макетов лазерных систем, результаты которых могут быть использованы для создания высокоэффективных оптических передающих устройств.

Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в развитии научных представлений о применении оптической инжекционной синхронизации (ОИС) для оптимизации характеристик отечественных полупроводниковых поверхностно излучающих лазеров (ПИЛ) на 1.5 мкм. Полученные теоретические результаты могут быть использованы для дальнейших исследований в области физики полупроводниковых лазеров, а также при разработке новых методов улучшения характеристик лазерных систем. Работа **способствует** углублению знаний об инжекционной синхронизации и её влиянии на динамические и спектральные свойства лазеров.

**Практическая значимость** данной работы заключается в возможности непосредственного применения ее результатов при разработке сверхширокополосных лазерных передающих систем. Полученные данные способствуют созданию новых эффективных методов синхронизации и согласования, что открывает новые перспективы в развитии высокоскоростных телекоммуникационных сетях

Результаты исследования могут быть непосредственно внедрены в отечественные предприятия радиоэлектронной и оптической промышленности, способствуя импортозамещению и созданию высокоэффективных лазерных устройств для телекоммуникационных систем, систем радиолокации и других высокотехнологичных областей.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что экспериментальные результаты получены** с применением современного измерительного оборудования и использованием теоретических моделей, которые были ранее верифицированы экспериментально. Полученные экспериментальные данные демонстрируют высокую степень согласованности с теоретическими предсказаниями, что подтверждает надежность выбранной методологии и обоснованность сделанных выводов. Таким образом, результаты работы не только обладают научной значимостью, но и могут быть использованы для дальнейших исследований в данной области.

Результаты диссертационного исследования также были использованы при выполнении государственного задания № FSFZ-2022-0005.

Результаты диссертационного исследования использованы в научно-производственном процессе на предприятии АО «ОКБ Планета» **имеется акт об использовании результатов диссертационной работы, утвержден 11.10.2024 г.** А.Н. Стукаловым заместителем генерального директора по научно – техническому развитию – главный конструктор АО «ОКБ – Планета»

**Личный вклад соискателя** соискатель принимал активное участие во всех стадиях работы, осуществлял моделирование, макетирование, измерение**,** составления экспериментальных стендов, состоящих из измерительного оборудования, использованного в работе, создании экспериментального макета для согласования ПИЛ, проведении всех экспериментов. Автор принимал активное участие в подготовке текстов публикаций и самостоятельно защищал полученные результаты на научных конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Диссертация соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивостью методологической платформы и взаимосвязанностью выводов. Сама работа выполнена на высоком научном уровне с использованием современного оборудования и аттестованных методик исследования.

В ходе защиты соискатель Клюшник Д. А. дал аргументированные ответы на заданные вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 23.12.2024 диссертационный совет принял решение присудить Клюшнику Дмитрию Андреевичу ученую степенькандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 4 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета,
проголосовали: за присуждение учёной степени - 14, против присуждения учёной степени - 1, недействительных бюллетеней -1.

Председатель

диссертационного совета А.С. Сигов

Ученый секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

23.12.2024