

## ПРИОРИТЕТ 2030: НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАФЕДРЫ РАДИОФОТОНИКИ И МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, Р.Ш. Мисбахов, А.А. Кузнецов*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ  
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10  
E-mail: microoil@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены новые направления научных исследований кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, которые легли в основу ее участия в программе развития КНИТУ-КАИ «Приоритет-2030» по двум стратегическим проектам: «Интегральные цифровые, микроволновые и оптические квантовые технологии нового поколения» и «Технологии регионального мониторинга и управления экологической безопасностью для устойчивого развития территорий». Дается целевая характеристика выполнения каждого из стратегических проектов и поставлены задачи на проектирование радиофотонных систем в области квантовых коммуникаций и сенсорики парниковых газов, реализующих прорывные взаимосвязанные информационные технологии и технологии снижения углеродного следа в атмосфере. Новые технологии требуют освоения новых компетенций студентами и сотрудниками кафедры, направленных на проектирование и производство интегральных микроволновых и фотонных схем, варианты которых обсуждаются для каждой из предлагаемых систем и без которых говорить об их новизне и прорывном характере просто нецелесообразно.

**Ключевые слова:** Приоритет-2030, микроволновая фотоника, квантовые технологии коммуникаций, системная сенсорики парниковых газов, микроволновые и фотонные интегральные схемы.

### **Введение. Фундамент развития новых прорывных технологий**

Цель стратегического проекта «Интегральные цифровые, микроволновые и оптические квантовые технологии нового поколения» – достижение мирового уровня в области комплексной разработки интегральных цифровых, микроволновых и оптических квантовых технологий, создаваемых на единой технологической платформе полного цикла, и решение на этой основе системных задач телекоммуникаций, сенсорики, киберфизических и интеллектуальных радиоэлектронных систем.

По данным ведущих международных программ развития науки и технологий [1, 2] ключевые тренды определяются интеграцией технологий сенсорики, коммуникаций, управления, вычислений (IC4) с использованием потенциала микроволновых и оптических квантовых технологий (MWQT). На пути разработки MWQT приняты масштабные программы разработки в ведущих странах мира (США, Евросоюз, Франция, Германия, Китай). Необходимость развития технологий IC4-MWQT в России нашла отражение в принятых Правительством РФ «Дорожной карте развития СЦТ «Квантовые технологии»», «Дорожной карте развития СЦТ «Технологии беспроводной связи», «Дорожной карте развития СЦТ «Компоненты робототехники и сенсорики», «Стратегии развития электронной промышленности РФ», «Стратегии научно-технологического развития РФ» (п.20. пп. а, д, е, ж, и), НТИ (все приоритетные группы технологий), «Стратегии РТ 2030» (СЦ-5).

Создание цифровых и передовых MWQT основано на использовании квантовых систем, реализуемых и управляемых на платформе классических технологий. Решение возни-

кающих при этом научных и технологических задач делает необходимым совместную разработку и использование интегральных (компактных) классических и квантовых технологий, что определяет основные задачи проекта:

1. Разработка научно-технологических основ реализации интегральных микроволновых и оптических квантовых технологий и создание для решения этих задач экспериментальной лаборатории современных методов литографии для получения элементной базы сверхдлинных и разветвленных квантовых коммуникаций;

2. Разработка уникальной интегральной технологии на единой платформе (кремния, ниобата лития и/или их аналогов) и создание на ее основе устройств оптической квантовой сенсорики и голографии для решения задач радиофотоники, радиоэлектроники, радиотехники и радиофизики, включая разработку для них специального аппарата квантового мониторинга и метрологии.

Научные подходы и методы для решения указанных задач и высокая вероятность достижения их решения основываются на созданной на кафедре РФМТ теории маломодовой (двухчастотной) радиофотоники, реализующей оптическое зондирование сенсоров двухчастотным излучением, полученным по методу Ильина-Морозова – преобразования одночастотного когерентного излучения в симметричное двухчастотное [3, 4]. Данное излучение характеризуется наличием двухчастотных компонент, жестко связанных по фазе (альтернативно) и равных по амплитуде с подавленным исходным одночастотным излучением. Любое изменение амплитуды и фазы двухчастотных составляющих при взаимодействии с различными зондируемыми средами находит отражение в изменении мгновенной амплитуды, фазы и частоты огибающей их биений, по параметрам которой и судят о внешних измеряемых параметрах. При этом указанная частота биений лежит в микроволновом диапазоне ЭМВ, что позволяет использовать их потенциал точностей и разрешающих способностей для измерения различных физических величин, недостижимых при прямых измерительных преобразованиях в оптическом диапазоне. Дополнительным преимуществом является тот факт, что обработка информации на частоте биений ведется в области минимальных шумов фотоприемника, где она и лежит. Это позволяет избавиться от влияния фликкер и дробовых шумов.

Созданная научная школа маломодовой радиофотоники (проф. Морозов О.Г.) в настоящее время развивает теорию широкополосных полигармонических (проф. Нуреев И.И.) и сверхузкополосных пакетов дискретных частот, как нового типа зондирующих излучений в радиофотонных сенсорных системах (доц. Кузнецов А.А.). Сами радиофотонные системы за последние пять лет кардинально сменили свой облик, став полностью адресными, не требующими использования сверхдорогостоящих оптикоэлектронных интеррогаторов, и основанными на двух- (проф. Сахабутдинов А.Ж.) и трехкомпонентных (проф. Мисбахов Р.Ш.)  $\lambda$ - и  $\pi$ -адресных волоконных брэгговских структурах. В перспективе развитие четырехкомпонентных АВБС, перенос адресного аппарата в сенсорное поле волоконных интерферометров Фабри-Перо и Фано, применение аппарата измерения мгновенных микроволновых частот в оптическом диапазоне (доц. Иванов А.А.) при их реализации на основе микроволновых фотонных интегральных схем.

В ряде исследований мы называемым две частоты, полученные по методу Ильина-Морозова, «спутанными», что поставило перед нами задачу трансферта указанной технологии для генерации пары спутанных фотонов, разнесенных по частоте с использованием амплитудно-фазовой модуляции, и дальнейшего исследования их свойств в квантовых коммуникациях. Несомненно, это предположение требует строго доказательства.

Начаты работы по трансферту технологий маломодовой микроволновой фотоники в область технологии квантовых коммуникаций, что нашло отражение в ряде работ, опубликованных в трудах международных конференций SPIE и IEEE [5], вошедших в базы цитирования Scopus и Web of Science. Кроме того, в настоящее время ведется работа по двум

грантам РФФИ по программе «Аспиранты» в рамках научного проекта № 19-37-90057 и по программе BRICS совместно с DST, NSFC и NRF (проект 19-57-80006 BRICS\_t). Данные результаты в области квантовых коммуникаций могут быть использованы при синтезе сетевых решений и в задачах квантовой сенсорики.

Одна из главных целей стратегического проекта «Технологии регионального мониторинга и управления экологической безопасностью для устойчивого развития территорий» – разработка и производство инструментальных средств измерения концентраций компонентов газовых выбросов и парниковых газов на базе точечных, квази-распределенных и комбинированных распределенных волоконно-оптических датчиков (ВОД), в том числе нового типа (АВБС), а также сенсорных сетей, использующих уникальные методы радифотонной обработки информации для сбора мониторинговых данных в системах точечного и распределенного экологического мониторинга.

История развития Казанской школы контроля загрязнения атмосферы (Польский Ю.Е., Ильин Г.И., Филлипов В.Л.) в КНИТУ-КАИ берет начало в 80-х годах прошлого века и опирается на финансовую поддержку Гособоронзаказа АО НПО ГИПО. Были разработаны лидары различного назначения и функционального исполнения, завоевавшие множество медалей ВДНХ СССР. В 1986 году создатели школы стали номинантами на Государственную премию СССР. В период перестройки (до 1995) разработки были функционально дополнены функциями локации и слежения за объектами в турбулентной атмосфере. Работы велись с ЛИИ (г. Жуковский) и НИИ АУС (г. Феодосия). В 2000 году был восстановлен и введен в эксплуатацию лазерный локатор слежения «КАФА» на мобильном шасси для НИИ АУС, а также проработан проект лидарного комплекса контроля чистоты атмосферы для установки на вершине Лысой горы, г. Феодосия (авторы проф. Морозов О.Г., м.н.с. Дорогов Н.В., Зубарев О.В., Сарварова Л.М., доц. Самигуллин Р.Р., инженер Урываев В.Е и др.). До 2015 года работы по данной тематике были приостановлены. В 2013 г. начаты работы с ПАО «КАМАЗ» по созданию волоконно-оптических анализаторов выхлопных газов по стандарту Евро-5 и Евро-6 на содержание в них CO<sub>2</sub>, NO<sub>X</sub>, O<sub>X</sub>, CH<sub>4</sub>, которые завершились в 2015 году на стадии верификации специализированных оптико-абсорбционных газоанализаторов для контроля содержания вредных и загрязняющих веществ в условиях испытательного стенда (проф. Нуреев И.И., проф. Сахабутдинов А.Ж., доц. Кузнецов А.А. и др.). Таким образом, на сегодняшний день кафедра владеет кадровым потенциалом разработчиков как лидарных, так и волоконно-оптических технологий, и систем для контроля выбросов и измерения концентрации парниковых газов.

Выбросы парниковых газов считаются одной из причин глобального потепления и других проблемных факторов, влияющих на качество окружающей среды. На примере технологии улавливания и хранения углекислого газа (CCS) нами проведена классификация лидарных и волоконно-оптических средств контроля выбросов и измерения концентраций. В проектах CCS важно точно контролировать утечку CO<sub>2</sub> в зоне хранения для оценки потенциальных рисков и опасности для здоровья человека и окружающей среды. В настоящее время оптические датчики CO<sub>2</sub> в основном включают спектрометрические инфракрасные (NDIR) датчики и датчики флуоресценции.

На первый план сегодня выходят:

1. Волоконно-оптические датчики точечного или квазираспределенного типа для удаленного контроля и измерения концентрации в зоне выбросов, объединенные в сеть произвольной конфигурации на основе пассивных оптических технологий телекоммуникаций.

2. Волоконно-оптические датчики распределенного и квазираспределенного типа для удаленного контроля и измерения концентрации выбросов в зоне хранения, объединенные, как правило, в звездообразную или древовидную сеть на основе пассивных оптических технологий.

3. Лидарные системы для контроля и измерения концентрации выбросов по открытым атмосферным каналам в оговоренной заказчиком зоне.

Конкурентные преимущества кафедры в сравнении с референтными подразделениями других научных организаций заключаются как в высоком уровне развития отдельных прорывных микроволновых и оптических квантовых технологий, так и в строгой направленности на их интегрирование с получением синергетического эффекта. По всем признакам предлагаемые нами в стратегических проектах и вне их задачи создания технологий IC4-QT относятся в мировой классификации к новым и прорывным технологиям (EDT). Структура Стратегических проектов программы развития «Приоритет-2030» и их единая направленность соответствуют указанным выше целям и решаемым для их достижения задачам.

В результате выполнения стратегических проектов в КНИТУ-КАИ будет создана инфраструктура Центра научно-технологических, экспертных и образовательных компетенций в области интегральных цифровых, микроволновых и оптических квантовых технологий мирового уровня. Рассмотрим некоторые технологии, предлагаемые кафедрой РФМТ, как первые шаги в становление единого Центра.

### **1. Технологии квантового распределения ключей на основе двойного поляризационно-частотного кодирования**

Шифрование данных обеспечивает, как правило, закрытую для третьих лиц связь между отправителем и назначенным получателем. Процесс шифрования подразумевает наличие закрытого канала связи и мощного алгоритма кодирования. Гарантией того, что зашифрованная информация может быть получена только назначенным получателем, является недоступное для третьих лиц распространение криптографического ключа. В то время как классическая криптография обладает высокой вычислительной безопасностью, даже при высочайших вычислительных мощностях третьей стороны, квантовая механика обеспечивает теоретически безусловное безопасное решение для передачи ключа [6]. Преимущество квантовой криптографии заключается в том, что она позволяет решать различные криптографические задачи, которые предположительно невозможны для классической (т.е. неквантовой) связи. Например, невозможно скопировать данные, закодированные в квантовом ключе. Если попытаться прочитать закодированные квантовые данные, состояние кванта будет изменено (теорема о запрете клонирования). Это может использоваться для обнаружения подключения к каналу передачи ключей третьей стороны. Тем самым квантовая криптография не мешает третьей стороне, но предупреждает о ее наличии связывающихся сторон с помощью тестов безопасности, основанных на фундаментальных законах квантовой механики, включая дополнительно принцип неопределенности Гейзенберга. Среди различных алгоритмов квантовой криптографии, квантовое распределение ключей (КРК) – самый известный и наиболее развитый.

Квантовая коммуникация предполагает кодирование информации в квантовых состояниях, называемых кубитами, которые, как известно, более информативны, чем их классические аналоги – биты. Фотоны используются в качестве несущих для кубитов, используя информацию, закодированную как определенная степень свободы фотонов, например, такую как поляризация. Возможно, самая известная схема КРК – это BB84, протокол, предложенный Беннеттом и Brassардом в 1984 г. и продемонстрированный в 1989 г. Протокол BB84 использует пары ортогональных состояний фотонов, принадлежащих двум базам, которые не являются взаимно ортогональными. В этом протоколе криптографии измерение состояния фотона приводит к так называемой квантовой неопределенности, что в точности является предварительным условием теоремы о запрете клонирования; никакое отдельное измерение не может полностью определить квантовое состояние, если основа кодирования неизвестна. С момента создания BB84 протокол стал основой для других протоколов КРК.

В настоящее время одномерное кодирование поляризация-временной интервал стало основными для протоколов КРК при практической реализации. Однако, в последнее время было предпринято много попыток повысить производительность протоколов КРК по информационной емкости и дальности передачи. Двумерные и многомерные протоколы КРК (КРК-ВР) с размерностью  $D > 2$  в последнее время привлекают к себе все большее внимание: от дополнительного кодирования энергии фотонов и временных интервалов их передачи в одномодовых волокнах до использования пространственной степени свободы за счет применения мультиплексирования с волновым уплотнением и с пространственным разделением в многожильных световодах; использования не четырех, а 16 позиций состояния поляризации, или, в частности, пространственных мод света, например, орбитального углового момента. Увеличение размерности определяет увеличение информационной емкости на фотон и порога ошибки, повышенной устойчивости к шуму.

Для того чтобы реализовать высокоскоростные, надежные, масштабируемые и миниатюрные системы КРК «земля-авиационный борт» нами предложена система с двойным ортогональным спектрально-поляризационным и частотным кодированием на базисе ТАФМ и  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП [7]. Подход с передачей спектрально-поляризационных сигналов хорошо зарекомендовал себя, как очень устойчивый к эффектам турбулентности в FSO и позволит увеличить максимальную дальность распространения ключа с малым QBER. При использовании масштабирования системы с применением генератора частотной гребенки ключ может передаваться со скоростью  $M \times \log_2 N$  битов за интервал периода работы оптического переключателя (ОП), где  $M$  – число частот в гребенке.

В предложенной системе КРК мы используем модулятор ТАФМ для кодирования фазы  $\phi$  боковых составляющих в базовом протоколе  $0; \pi$  и  $\pi/2; 3\pi/2$  и пять  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП для их спектрального и ортогонального разделения по поляризации, как показано на рис. 1.

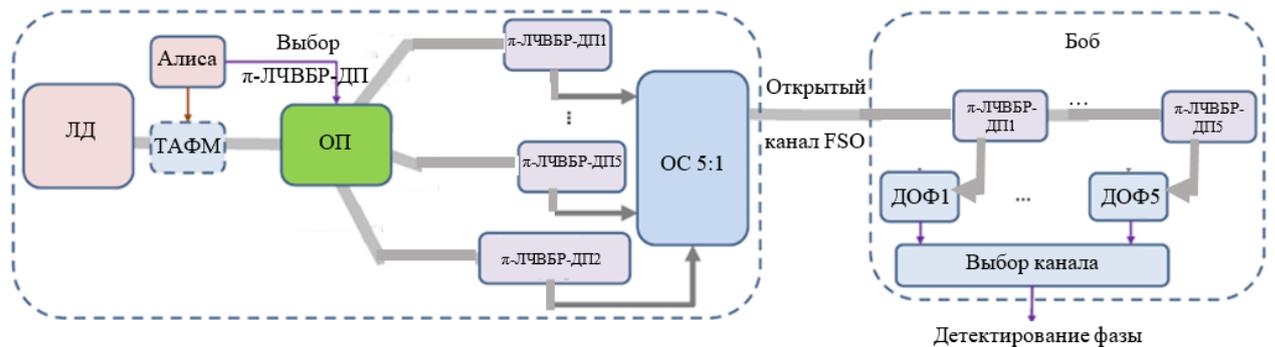


Рис. 1. Структурная схема системы КРК

Кодер Алисы состоит из оптического переключателя, пяти  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП и оптического сумматора (ОС) мощности 5 на 1. Для кодирования Алиса изменяет фазу радиочастотного сигнала, используемого для модуляции оптической несущей, среди четырех значений  $0; \pi$  и  $\pi/2; 3\pi/2$ , которые образуют пару сопряженных базисов для кодирования состояния фотона в ТАФМ. Далее с помощью ПД (рис. 1) сигнал делится на два с ортогональными состояниями поляризации. Для дополнительного поляризационного кодирования Алиса случайным образом выбирает выход ОП и выбирает нужную  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП, который передается на ОС. С  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП с взаимно ортогональными и частотно-разделенными спектрами Алиса может передавать  $\log_2 N$  битов за интервал периода работы ОП.

При этом  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП используется в обоих каналах с двумя составляющими поляризации  $\omega_{\parallel}$  и  $\omega_{\perp}$  постоянно. Таким образом формируются однополосные сигналы из несущей и боковых составляющих  $\omega_{\parallel} \pm \Omega_m$  и  $\omega_{\perp} \pm \Omega_m/2$ . Уровень сигнала на боковых частотах

ослабляется до вероятностного однофотонного на аттенуаторах  $A_{\parallel}$  и  $A_{\perp}$  (рис. 1), а сам сигнал поступает в волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) или в открытый оптический канал Бобу.

Боб, получив несущую и боковые частоты, использует серию решеток, аналогичных  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП Алисы. При совпадении поляризаций и спектров в одной из решеток, соответствующий детектор одиночных фотонов (ДОФ) обнаруживает наличие информации, и Боб может идентифицировать переданный фазовый символ, используя логику выбора наибольшего по амплитуде выхода. Наличие Евы определяется периодически, когда Алиса одновременно передает информацию по всем каналам. Это дает Бобу возможность определить QBER, и, дополнительно, если информация пропала на нескольких ДОФ, идентифицировать наличие Евы.

Подводя итог, можно описать предлагаемый протокол на основе двойного ортогонального спектрально-поляризационного и частотного кодирования на базе ТАФМ и  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП следующим образом [7]:

1) Алиса случайным образом выбирает базовое состояние из набора фаз  $0; \pi$  и  $\pi/2; 3\pi/2$  и  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП.

2) С вероятностью  $p < 0,5$  Алиса отправляет полный набор каналов.

3) В процедуре просеивания Алиса объявляет интервалы времени, в которых она передавала полный набор каналов. Если QBER выше, чем заданный, они прерывают протокол, в противном случае, они продолжают протокол. Все остальные временные интервалы вносят вклад в просеянный ключ.

4) Для согласования информации, которое основано на фазе модуляции боковой составляющей, Алиса кодирует свои информационные символы и отправляет их в заданном числе временных интервалов.

5) Боб запускает алгоритм декодирования для исправления ошибок, внесенных каналом и Евой. Для декодирования используется процедура определения фазы сигнала боковой составляющей, сравниваемой с опорной базой несущей.

Макетирование осуществлялось в лаборатории НИИ Прикладной электродинамики, фотоники и живых систем (ПРЭФЖС), а исследования макета системы КРК в Казанском квантовом центре КНИТУ-КАИ. В основе макета лежат дискретные элементы: лазерный излучающий модуль Teraxion PS-LM-1550, электрооптические модуляторы АО «ПНППК» (Пермь) и фотодетекторы производства КНР. Решетки  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП записывались на установке для записи ВБР, изготовленной на базе аргонового лазера НГУ (Новосибирск), установленной в НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ. Общий вид ТАФМ Алисы представлен на рис. 2, блок  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП решеток Боба на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид ТАФМ Алисы (земля)



Рис. 3. Общий вид решеток блока  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП Боба (борт)

Информация передавалась на расстояние 64 м в спокойной атмосфере внутри здания. За один период опроса ОП передавалось 4 бит/импульс.

Масштабирование системы КРК легко достижимо при использовании системы генерации лазерного излучения на основе частотной гребенки, получаемой также с использованием принципов ТАФМ [8]. Блок решеток  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП и фотоприемные устройства могут быть выполнены на суперструктурированных решетках таким образом, что каждой длине волны частотной гребенки будет соответствовать одна такая решетка, и миниатюрных бортовых спектрометров [9, 10].

В случае реализации системы на фотонных интегрированных схемах (ФИС) (производство которых является целью стратегических проектов КНИТУ-КАИ по программе «Приоритет-2030») необходимы лишь незначительная модернизация уже существующих технологий интегральной микроволновой фотоники и, например, замена ВБР на интегральные волноводные и/или круговые.

В частности, в работе наших коллег из Перми [11], описана разработка топологии низко-контрастной (с  $\Delta n \sim 10^{-4}$ ) интегрально-оптической брэгговской решетки (ИОБР) на основе волноводов из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на подложке из  $\text{SiO}_2$  на  $\text{Si}$  с шириной пика на полувысоте не более 1 нм. Выбор нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обусловлен низкими потерями на распространение излучения, термооптическими свойствами, высоким контрастом волноводов и широким окном прозрачности (от 0,4 до 2,0 мкм). Задача построения спектров решетки на пропускание и отражение решалась методом матрицы передачи с помощью пакета Optiwave Grating. Использовалось число периодов  $\Lambda$ , равное 20 000 элементов в моделируемой брэгговской решетке (длина решетки 9,64 мм).

Для наглядности на рис. 4 представлена топология низкоконтрастной аподизированной ИОБР с малым числом периодов. Спектральные характеристики аподизированной ИОБР на отражение и пропускание представлены на рис. 5. Ширина спектрального пика отражения на полувысоте составила 0,2 нм. Разница интенсивностей основного и побочных пиков отражения составила около 20 дБ.

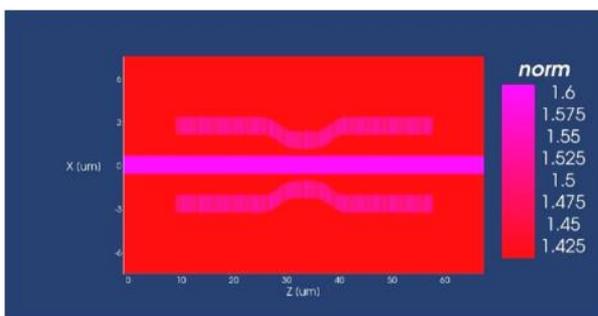


Рис. 4. Пример топологии низкоконтрастной аподизированной ИОБР с малым числом периодов [11]

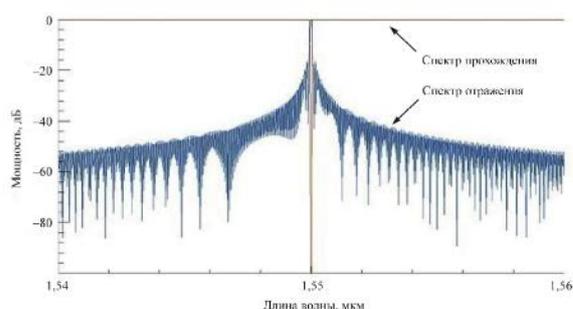


Рис. 5. Спектры прохождения и отражения аподизированной ИОБР [11]

В работе наших коллег из Университета Бари [12] представлен чувствительный элемент датчика на базе ИОБР кольцевого типа с дефектной областью, как показано на желтой вставке рис. 6. Это решение было предложено со ссылкой на классическую волоконную структуру ВБР, где с помощью химического удаления (т. е. травления) оболочки (см. вставку на рис. 6 стандартного SMF волокна достигают увеличения затухающего взаимодействия поля с окружающей средой.

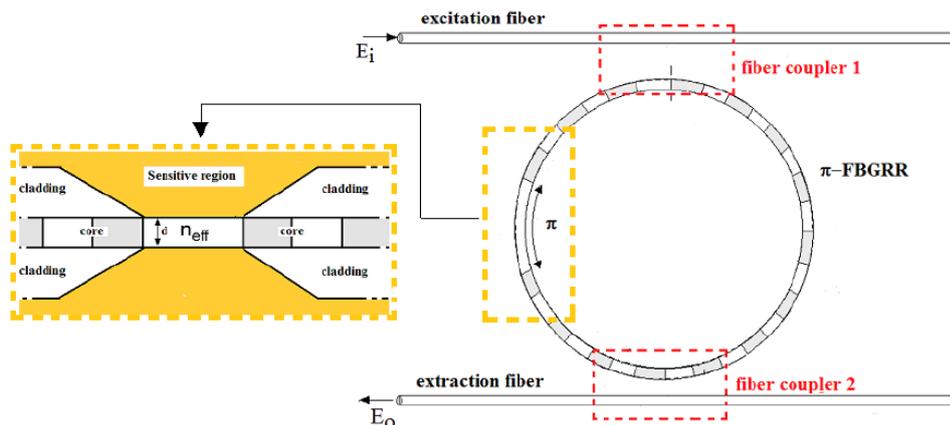


Рис. 6. Кольцевой резонатор с волоконной брэгговской решеткой с фазовым  $\pi$ -сдвигом ( $\pi$ -FBGRR) [12]

Без фазового сдвига интегрально-оптические FBGRR могут использоваться в системах квантового распределения ключей. Системы контроля показателя преломления с  $\pi$ -FBGRR могут использоваться в датчиках экологического контроля, которые будут рассмотрены во втором разделе данной статьи.

Кроме конструктивных преимуществ, предлагаемые недорогие системы и новые протоколы на основе  $\pi$ -ЛЧВБР-ДП могут одновременно повысить спектральную эффективность и помехоустойчивость для приложений КРК «земля-авиационный борт», поскольку выбранная конфигурация решеток практически перекрывает весь используемый спектральный диапазон работой на «отражение» помех, пропуская к объекту передачи только ключевую информацию, а также не использует ремодуляцию классических временных и частотных систем КРК.

## 2. Волоконно-оптические датчики и их мультиплексирование для регионального мониторинга диоксида углерода

Использование ВОД в экологическом мониторинге имеет глобальное значение. Интерес к ВОД по сравнению с обычными электронными сенсорами обусловлен такими их преимуществами, как небольшой размер, малый вес, высокая скорость реакции на изменение измеряемых концентраций, невосприимчивость к внешним электромагнитным помехам, возможность дистанционного зондирования и устойчивость к суровым условиям окружающей среды [13]. Эти атрибуты позволяют применять ВОД в таких областях, как экологический мониторинг, биосенсорика и биомедицинские технологии.

Первоначально ВОД были разработаны для работы в качестве точечных датчиков, когда датчик сообщает об измерении в одном пространственном месте нахождения. Естественно, одноточечная конфигурация ограничена по объему информации по сравнению с тем, который может быть получен при одновременном многоточечном зондировании. По этой причине разные технологии были предложены для реализации многоточечного зондирования, такие как квазираспределенное расположение решеток Брэгга в волокне, волокна с вытравленной оболочкой в зоне решеток, использование пластиковых оптических волокон, интерферометрии Френеля и чувствительных покрытий для этого типа устройств.

В качестве альтернативы многоточечные датчики могут быть реализованы с помощью методов распределенного оптического зондирования. Эти методы функциональны, большинство из них демонстрируют линейный отклик, но, к сожалению, некоторые из них очень нестабильны из-за их интерферометрической природы измерений, а другие требуют

дорогостоящего периферийного оборудования или малую надежность в силу последовательной схемы включения при наличии обрыва.

Перспективным методом построения ВОД является использование многомодовой интерференции (ММИ) [13]. ВОД на ММИ удобны тем, что их архитектура проста, легка в изготовлении, компактна, при этом спектральный отклик таких датчиков представляет собой относительно узкий полосовой фильтр. В своей простейшей форме ВОД на ММИ предполагает наличие отрезка многомодового волокна (ММФ), размещенного между двумя одномодовыми волокнами (SMF), которые обычно называют SMS- или SMF-ММФ-SMF-структурами. Даже при такой простой конструкции с их помощью могут быть комплексированно измерены различные физические и химические параметры, такие как температура, влажность, вибрация, соленость, pH и др. Наиболее интересной для реализации нашего стратегического проекта является конфигурация SMS, в которой ММФ представлено так называемым многомодовым волокном без сердцевины (NC-ММФ), то есть оптоволоконном из диоксида кремния, оболочкой которого является окружающая его среда, и возможность получения с ее помощью прямой реакции на изменение различных газов и жидкостей без применения дополнительных чувствительных покрытий.

Спектральный отклик устройств ВОД на ММИ, имеющий вид узкополосного фильтра, может быть легко перестраиваемым по длине волны путем настройки его оптических и геометрических параметров. В этом случае может быть получена многоточечная сенсорная система с неперекрывающимися откликами. Сообщалось о зондировании многоточечного массива SMS для одновременного обнаружения этанола. Система состояла из четырех SMS-сенсоров, работающих на отражение. Хотя результаты показали высокую чувствительность измерений, массив требует дополнительных устройств фотоники, необходимых для интегрирования датчиков, перестраиваемого лазера, а также реализации концов волокон с высокой отражающей способностью, что достаточно сложно получить для его инфракрасного излучения.

Поэтому выбирая пути развития сенсоров для экологического мониторинга, мы остановились на концевых интерферометрах Фабри-Перо (FPI) [14]. Оптический резонатор FPI является классическим чувствительным элементом датчиков концентрации. Оптоволоконный резонатор FPI с открытым резонатором изготавливают путем сращивания капиллярных трубок или фотонно-кристаллического волокна с одномодовым волокном. Конструкция открытого резонатора позволяет газу свободно войти и выйти из области резонатора, чтобы изменить коэффициент преломления среды. Тем не менее, открытые резонаторы FPI не в состоянии идентифицировать конкретный газ, в том числе CO<sub>2</sub>. Кроме того, изменение концентрации газа слишком мало, чтобы заметно изменить коэффициент преломления, достаточный для того, чтобы его обнаружить. Таким образом, ключевым моментом создания резонатора FPI для обнаружения CO<sub>2</sub> является поиск или создание материала, показатель преломления которого заметно чувствителен к концентрации CO<sub>2</sub> [14].

Прозрачные функциональные материалы, чувствительные к CO<sub>2</sub>, могут быть использованы в качестве материала полости резонатора FPI. Материал чувствительного слоя должен взаимодействовать с CO<sub>2</sub> и изменять показатель преломления. Тем не менее, известны датчики с использованием функционального материала, как правило, только на основе волоконно-оптического рефрактометра на ВБР, который работает на основе затухания света и коэффициент затухания определяется самим материалом чувствительного слоя. Был предложен датчик, основанный на волоконной брэгговской решетке с длинным периодом, покрытой фенолом, который чувствителен к CO<sub>2</sub>. Там же показано, что контроль концентрации CO<sub>2</sub> осуществим в диапазоне от 10 до 90 %. Также сообщается о датчике концентрации CO<sub>2</sub> на основе волоконной брэгговской решетки с длинным периодом, покрытой слоем полистирола 365 нм, и полученной чувствительности 1.23 пм/%. Был предложен кремниевый фотонный рефрактометрический датчик CO<sub>2</sub>, в котором используется микро-

кольцевой резонатор ( $d = 20$  мкм), покрытый гуанидиновым полимером слоем в 240 нм, а чувствительность датчика составляет 0.0354 нм/%. Таким образом, разработка датчиков такого типа отличается простотой, использованием недорогих поглощающих материалов, долговечностью, простотой в обслуживании, что является актуальной задачей в конфигурации концевого FPI.

Модель концевого резонатора FPI, разрабатываемого нами, можно представить в виде слоистой структуры, состоящей из трех различных однородных слоев, сквозь которые распространяется плоская монохроматическая волна. Структурная схема оптоволоконного резонатора Фабри-Перо, приведена на рис. 7. На торец оптического волокна нанесена тонкая пленка прозрачного органического полимерного материала, толщиной  $h$  (на рис. 7 показано зеленым цветом). Показатель преломления пленки зависит от концентрации исследуемого газа.

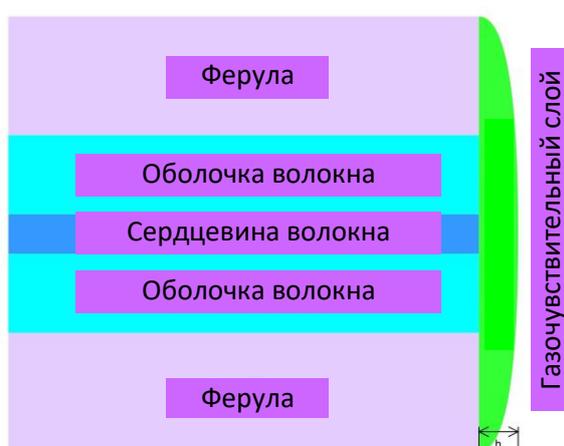


Рис. 7. Структурная схема оптоволоконного резонатора FPI

Учитывая многоволновый отклик датчиков на разные газы может быть построена многоточечная система на основе пассивной оптической сети. При этом в ней существует оптический линейный терминал (ОЛТ), общий для всех датчиков предприятия или муниципального образования, и, соединенные к нему через мультиплексоры на упорядоченных волноводных решетках (УВР) оптические сетевые терминалы (ОСТ), представляющие собой ВОД на концевых FPI для необходимого для контроля газа.

На рис. 8 представлена структурная схема такой ПОС с реализацией измерений на основе методов маломодовой радиофотоники (метод Ильина-Морозова) - излучение формируется на ОЛТ в модулях передатчиков  $T_x$  [15].

Вариант 1. Контроль спектральных характеристик ОСТ (FPI) и УВР ОСТ. Широкополосное излучение от источника ШПИ через циркулятор Ц поступает на ОСТ, а именно, на FPI и ВБР, установленную рядом, и выполняющую функцию контроля температуры ОСТ или одного из каналов фильтра, определяющего полосу пропускания для сбора информации по конкретному газу, измеряемому в данном канале  $\Delta\lambda_i$ , где  $i$  – номер канала. УВР ОСТ распределено по два канала на один ОСТ через Y-разветвитель (условно не показан). Отраженное от FPI и ВБР излучение поступает через циркулятор на УВР ОЛТ, идентичное УВР ОСТ и на систему двух фотодетекторов  $2Rx_i$ . Далее информация обрабатывается на компьютере ОЛТ и позволяет получить информацию о расстройке фильтров ОСТ (концентрации газа) и/или об изменении температуры ОСТ (для компенсации измерений по температуре).

Вариант 2. Контроль спектральных характеристик ОЛТ и УВР ОЛТ (обеспечение метрологического мониторинга и калибровки всей системы в целом). Широкополосное излучение от источника ШПИ через циркулятор Ц поступает на УВР ОЛТ1, а далее на пару

ВБР, установленных на корпусах лазеров канала зондирования  $T_{x_i}$ , и выполняющих функцию контроля температуры УВР ОЛТ1 или расстройки ее каналов. Обе ВБР настроены на один канал УВР ОЛТ1 и развязаны с фотоприемниками  $2R_{x_i}$  (условно не показано).

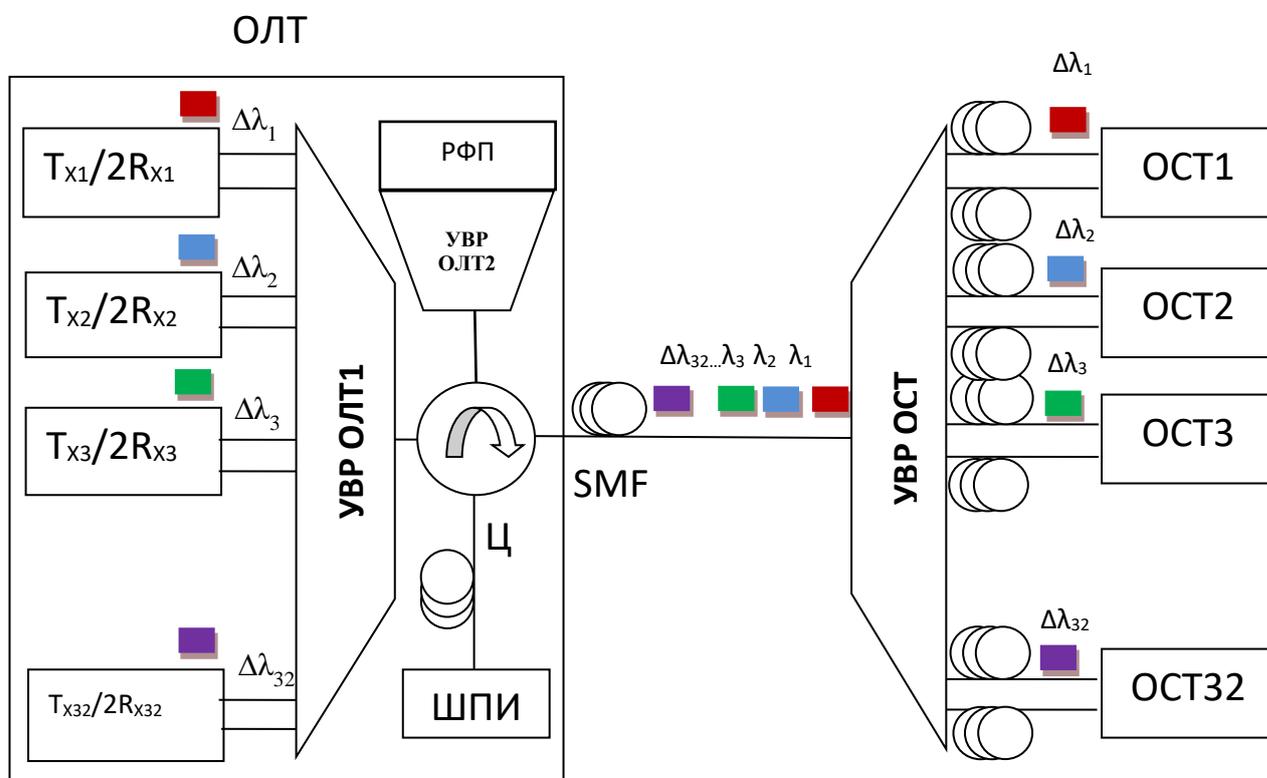


Рис. 8. Структурная схема ПОС, реализующая способ симметричного двухчастотного зондирования на основе метода Ильина-Морозова: ШПИ – широкополосный источник; Ц – циркулятор; SMF – одномодовое волокно; РФП – решетка фотоприемников

Поскольку лазер, как правило, имеет встроенную систему мониторинга, обеспечивающую стабильность его спектральных характеристик, было решено установить обе решетки на нем. Отраженное от ВБР излучение поступает через циркулятор на УВР ОЛТ2, идентичное УВР ОЛТ1 и на интегрированную с ним РФП. Далее информация обрабатывается на компьютере ОЛТ и позволяет получить информацию о расстройке фильтров УВР ОЛТ (настройка зондирующего лазера на длину волны поглощения измеряемого газа), и/или об изменении температуры в различных зонах ОЛТ (для компенсации измерений по температуре).

Построенная система может быть существенно упрощена, если в тело ВОД на FPI будут встроены адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС). Это позволит исключить из структуры ПОС блок лазеров зондирования, оставив для этой цели только ШПИ.

На рис. 9 представлен прототип схемы одного канала ОЛТ, а на рис. 10 прототип структуры УВР ОСТ, выполненные по интегральным технологиям в середине 2010-х годов [16, 17]. При этом в схеме датчиков предусмотрен вариант их выполнения как на MMI структурах, так и на FPI.

Растущая потребность в фотонных технологиях требует создания все более крупных и сложных фотонных интегрированных схем (ФИС) в структуре одного модуля. Сегодня большинство из них предназначены для конкретного применения, но увеличение сложности привело к созданию управляемых ФИС, которые можно программировать с помощью программного обеспечения для самых разных приложений.

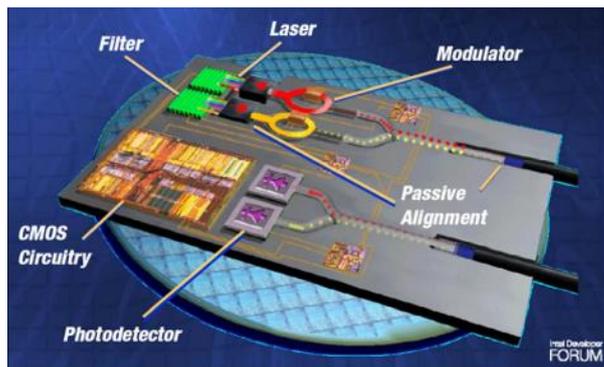


Рис. 9. Прототип ФИС ОЛТ [16]

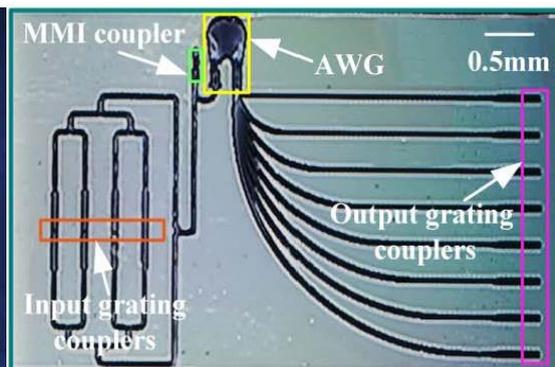


Рис. 10. Прототип ФИС ОСТ [17]

Такая схема функционирует через сетку записанных на кристалле волноводов, настраиваемых ответвителей излучения и устройств сдвига оптической фазы. Для большинства приложений ФИС потребление энергии является одним из ключевых показателей. Ранее продемонстрированные линейные ФИС требуют постоянной мощности для поддержания каждого переключения компонент, а энергопотребление будет расти экспоненциально количеству входов и выходов. Для сравнения, предлагаемая технология программируемых ФИС не требует дополнительной мощности после достижения целевой конфигурации. Таким образом, программирование делает ФИС потенциально ключевой технологией, позволяющей обеспечить низкую стоимость и низкое энергопотребление кремниевых фотонных устройств при минимизации их массогабаритных характеристик и увеличении устойчивости к факторам изменения климатических параметров.

### Заключение

В данной статье представлены новые направления научных исследований кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, которые легли в основу ее участия в программе развития КНИТУ-КАИ «Приоритет-2030» по двум стратегическим проектам: «Интегральные цифровые, микроволновые и оптические квантовые технологии нового поколения» и «Технологии регионального мониторинга и управления экологической безопасностью для устойчивого развития территорий».

Реализация указанных направлений невозможна без создания адекватной материальной и инструментальной базы. В частности, задачи развития квантовой связи тесно связаны с созданием и совершенствованием фотонных технологий и новых фотонных материалов. Использование фотонов, как для передачи, так и при обработке информации, предполагает создание новых принципов и технологий интегрированных фотонных устройств как для распределённых квантовых линий связи, так и для классических оптоэлектронных или полностью оптических интегральных сенсорных устройств. В этой связи требуется разработка новых физических принципов и подходов для создания необходимых материалов и структур, новых экспериментальных методов и метрологического обеспечения.

В результате выполнения стратегических проектов в КНИТУ-КАИ будет создана инфраструктура Центра научно-технологических, экспертных и образовательных компетенций в области интегральных цифровых, микроволновых и оптических квантовых технологий мирового уровня, в котором одна из ведущих ролей будет отведена кафедре РФМТ. И не только с научной точки зрения, но и с точки зрения образования, поскольку новые технологии потребуют освоения новых компетенций студентами и сотрудниками кафедры, направленных на проектирование и производство интегральных микроволновых и фотонных схем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках программы "Приоритет 2030".*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reding, D.F., Eaton, J. Science & Technology Trends 2020-2040. Exploring the S&T Edge // NATO Science & Technology Organization, 2020.
2. Fedorov, A.K. et al. Quantum technologies in Russia// Quantum Sci. Technol. - 2019. - V.4. - P. 040501.
3. Patent A 1338647 SU IPC4 G02F 1/03. Method of converting single-frequency coherent radiation into two-frequency / Ilyin G.I., Morozov O.G.; applicant KAI n.a. A.N. Tupolev; declared 04.13.83; publ. July 20, 2004 - Bull. No. 20.
4. Morozov, O.G. Synthesis of Two-Frequency Symmetrical Radiation and Its Application in Fiber Optical Structures Monitoring / O.G.Morozov, G.A.Morozov, G.I. Il'in et al. // Fiber Optic Sensors, Rijeka: InTech. – 2012. - Pp. 137-164. Available from: <http://intechopen.com/books/fiber-optic-sensors/synthesis-of-two-frequency-symmetrical-radiation-and-its-application-in-fiber-optical-structures-mon>.
5. Morozov, O.G. Integrated Microwave Quantum Sensing for Radar Type Problems Decisions / O.G. Morozov, I.I. Nureev, A.Z. Sakhabutdinov, et al. // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020. - Pp. 1-6, doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166102.
6. Otte, E. et al. High-dimensional cryptography with spatial modes of light: tutorial // Journal of the Optical Society of America B. - 2020. - V. 37, No. 11. - Pp. A309-A323.
7. Габдулхаков, И.М. Система квантового распределения ключей с двойным ортогональным спектрально-поляризационным и частотным кодированием / И.М. Габдулхаков, О.Г. Морозов, А.А. Кузнецов и др. // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. - 2021. - №3. - С.134-138.
8. Fujiwara, M. Optical Carrier Supply Module Using Flattened Optical Multicarrier Generation Based on Sinusoidal Amplitude and Phase Hybrid Modulation // Journal of Lightwave Technology. - 2003. - V. 21, Iss.11. - Pp. 2705–2714.
9. Гречишников, В.М., Теряева, О.В. Волоконно-оптические преобразователи бортовых датчиков положения механизации летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2016. - №3. - С. 122–128.
10. Муслимов, Э.Р. и др. Оптические системы для малых спутников типа Cubesat: Телескопы без центрального экранирования на базе поверхностей свободной формы и изогнутых фотоприемников // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2018. - № 1. - С. 5–10.
11. Москалев, Д.Н. Разработка интегрально-оптической брэгговской решетки с высокими спектрально-селективными свойствами на основе волноводов  $SI^3N_4$  / Д.Н. Москалев, У.О. Салгаева, Р.С. Пономарев // Прикладная фотоника. - 2018. - Т. 5, №1-2. - С. 121-130.
12. Campanella, C.E. et al. Investigation of refractive index sensing based on Fano resonance in fiber Bragg grating ring resonators // Optic Express. – 2015. - V. 23, Iss. 11. - Pp. 14301–14313.
13. Fuentes-rubio, Y.-A., Domínguez-Cruz, R.-F., Guzmán-Sepúlveda. Multipoint fiber optics refractive index sensor based on multimode interference effects // Applied Optics. - 2021.- V. 60, No. 31. - Pp. 9691-9695.
14. Ma, W. et al. CO<sub>2</sub> Gas Sensing Using Optical Fiber Fabry–Perot Interferometer Based on Polyethyleneimine/Poly(Vinyl Alcohol) Coating. IEEE Photonics Journal. – 2017. – V. 9, No. 3. - P. 6802808.

15. *Алюшина, С.Г.* Полигармонические методы определения температуры на абонентских узлах пассивных оптических сетей / С.Г. Алюшина, О.Г.Морозов, И.И.Нуреев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – №2. – С.134-138.

16. *M.J.R. Heck et al.* Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuit Technology. IEEE journal of selected topics in quantum electronics. - 2013. - V. 19, No. 4, - P. 6100117.

17. *H. Li et al.* Chip-scale demonstration of hybrid III–V/silicon photonic integration for an FBG interrogator // Optica. – 2017. – V.4, No. 7. - Pp. 692-700.

## **PRIORITY-2030: NEW DIRECTIONS OF SCIENTIFIC RESEARCH AT THE DEPARTMENT OF RADIOPHOTONICS AND MICROWAVE TECHNOLOGIES**

*Morozov O. G., Nureyev I. I., Sakhabutdinov A. Zh., Misbakhov R. Sh., Kuznetsov A. A.*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, K. Marx Str., Kazan, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents new areas of research at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, which formed the basis for its participation in the development program of KNRTU-KAI "Priority-2030" under two strategic projects: "Integrated digital, microwave and optical quantum technologies of a new generation" and "Technologies for regional monitoring and environmental safety management for sustainable development of territories". A target characteristic of both strategic projects implementation is given and tasks are set for the design of radiophotonic systems in the field of quantum communications and sensorics of greenhouse gases, implementing breakthrough interconnected information technologies and technologies for reducing the carbon footprint in the atmosphere. New technologies require the development of new competencies by students and employees of the department, aimed at the design and production of integrated microwave and photonic circuits, the variants of which are discussed for each of the proposed systems and without which it is simply inappropriate to talk about their novelty and breakthrough nature.

**Keywords:** Priority-2030, microwave photonics, quantum communication technologies, system sensorics of greenhouse gases, microwave and photonic integrated circuits.

Дата отправки статьи в редакцию: 21.11.2021