



## ХII Конгресс российской технологической платформы «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника»\*

(Москва, павильон «Форум» ЦВК «Экспоцентр», 26 – 28 марта 2024г.)

### РГ10. «Фотоника в сельском хозяйстве и природопользовании»

27 марта, зал «Южный»

Конференция собрала представителей ведущих российских институтов и организаций от С.Петербурга до Владивостока, занимающихся вопросами агробифотоники и проводящих исследования в этом направлении. В заседании приняли участие более 60 ведущих ученых, практиков, представителей бизнеса, которые занимаются исследованиями и внедрением средств фотоники в системы управления развитием растений в открытых и защищенных условиях.

Возглавил работу конференции академик, вице-президент РАН Ю.Н.Кульчин, один из ведущих российских специалистов в области оптики, лазерной физики, воздействия лазерного излучения на объекты живой материи и оптических измерений. В своем вступительном слове он отметил: «Сегодня мы хотели бы обсудить ряд вопросов, которые очень важны для нас, поскольку Президент России обращает наше внимание на то, что мы должны обеспечить импортонезависимость и продовольственную безопасность в сельском хозяйстве, а фотоника предоставляет принципиально новые технологии, кото-

рые открывают широкие возможности для управления развитием растений».

После вводного слова Ю.Н.Кульчин открыл программу из 9 докладов своим выступлением, в котором выделил основные направления развития для повышения эффективности сельского хозяйства с помощью технологий агро-



#### В номере:

- «Фотоника. Мир лазеров и оптики-2024»  
► XII Конгресс технологической платформы «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника»  
⇒ научно-практические конференции

\*Окончание. Начало в предыдущем выпуске «Л-И». Тексты предоставлены организаторами конференций.

биофотоники. Он отметил, что многие исследования направлены на изучение того, как свет может быть использован для повышения эффективности сельскохозяйственного производства. В них изучается влияние спектрального состава света, его интенсивности и периодичности на рост растений, а также содержание в них питательных веществ. В новейших исследованиях отмечается также и влияние поляризации света на рост и развитие растений.

Отдельно был выделен огромный потенциал технологий выращивания растений с помощью искусственного освещения не только в теплицах, но и в открытых агроэкосистемах. Также докладчик отметил, что фотоника помогает контролировать сельское хозяйство за счет различных технологий оптического мониторинга, бороться с вредителями и болезнями с помощью лазерного излучения. Агробиофотоника включает глубокое изучение фотосинтеза растений, контроль здоровья растений, взаимодействие микроорганизмов с растениями и новейшее направление исследований: биоманипуляцию растений.

*Т.Матвеева*, представлявшая Центр биофотоники ИОФ РАН, в своем выступлении рассказала об оптических методах оценки состояния растений и урожая, особое внимание уделив высокочувствительному и специфическому методу флуоресцентной спектроскопии. Особое внимание докладчик уделила характерным особенностям спектров флуоресценции и длинам волн, которые можно использовать при создании диагностических устройств. Особо было отмечено, что такую технологию можно использовать для раннего обнаружения и разделения зараженных и здоровых образцов семян, плодов и корнеклубней.

*И.Е.Кузнецова* из Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН выступила с докладом о перспективах применения акустоэлектрических датчиков для регистрации возбудителей различных заболеваний растений. Напомнив аудитории о свойствах акустических волн, она представила новый способ определения изменений физических свойств жидкостей, растворов и суспензий с помощью акустоэлектрических сенсоров, а также сообщила о возможности создания акустоэлектронных методов анализа конкретных жидкостей с помощью использования анизотропии акустических волн.

Представитель ФИЦ картофеля имени А.Г.Лорха *В.И.Старовойтов* познакомил с технологией получения пищевого картофеля в условиях Крайнего Севера с использованием искусственного освещения в закрытых помещениях. Для того, чтобы добиться высокой продуктивности и круглогодичного выращивания пищевого картофеля в три севооборота за один год, необходимо организовать неразрывную цепь от выращи-

вания безвирусного семенного материала до уборки конечного продукта. Для выращивания миниклубней картофеля в эксперименте использовались аэропонные установки и естественное либо искусственное освещение. При этом была отмечена важность накопления баз данных с информацией об оптимальных для различных сортов растений параметрах света.

В докладе *С.О.Кожанова* из Института автоматки и процессов управления ДВО РАН было показано, что поляризация света может сильно влиять на эффективность поглощения света листьями растений и ускорять их рост. Для оптимизации условий выращивания растений при помощи искусственного освещения важно понять, как параметр поляризации света используют сами растения. Это знание способствует разработке идеальных параметров освещения, что в свою очередь способствует развитию более эффективных технологий выращивания растений в замкнутых условиях.

*О.Ю.Миронова* из МГУ имени М.В.Ломоносова в своем выступлении проанализировала разнообразные аспекты влияния параметров освещения на физиологию растений. Аудитория услышала о явлении пестролистности, роли пигментов в листьях, взаимосвязи между хлоропластами и иммунитетом растений, влиянии света на синтез фитогормонов. Были рассмотрены также вопросы влияния температуры и спектрального состава светового излучения на растения, затронуты темы биотехнологий в растениеводстве, концепции вертикальных ферм и их перспективы. Завершая выступление, докладчица выделила как интересные, так и проблемные аспекты взаимосвязи между фитосветильниками и здоровьем человека.

*Д.В.Русаков* (ФГБНУ «АФИ») в своем докладе «Неинвазивные оптические методы определения физиологического состояния сельскохозяйственных растений в полевых условиях и светокультуре» показал применение различных методов оценки физиологического состояния растений и рассказал о гиперспектральной визуализации, контактной спектроскопии, методах флуоресценции, измерениях с помощью термальной камеры.



О разработках экологически безопасных и энергоэффективных спектральных технологий для увеличения продуктивности сельскохозяйственных растений рассказала в своем содержательном выступлении представитель Федерального научного агроинженерного центра ВИМ *И.В.Князева*. Среди этих разработок – цифровые датчики для мониторинга и исследования лазерно-оптическим методом состояния растений, идентификации наличия заражения семян, системы идентификации микро- и макроповреждений тканей растений, системы адаптивного управления фитооблучением с обратной связью от состояния растений. Были доложены результаты исследования влияния спектра и интенсивности света на сельскохозяйственные и лекарственные растения. Также были представлены результаты изучения влияния режимов сканирующего и импульсного освещения на растения, один из таких режимов показал очень хорошие результаты. В завершение выступления она коротко описала функционал климатических камер, используемых для адаптации растений.

Тема доклада *В.О.Васильевой* (АО «ЛЛС») – «Спектральные оптические приборы для реше-

ния задач в сельском хозяйстве и продовольствии». Они помогают выявлять заболевания, классифицировать растения, контролировать качество пищевых продуктов и многое другое. Различные доступные решения позволяют подобрать наиболее подходящий оптический прибор для решения конкретных задач.

Таким образом, в очередной раз собравшись для обсуждения проблем и новых идей в агробioфотонике, участники конференции отметили новые способы анализа состояния растений и диагностирования у них заболеваний, особо отметили успехи выращивания растений в условиях Крайнего Севера, показали результаты экспериментов по влиянию на растения спектра, интенсивности, поляризации света, режимов освещения, а также поделились информацией о новых разработках современного оборудования, предназначенного для использования в сельском хозяйстве.

В заключение *Ю.Н.Кульчин* поблагодарил всех докладчиков за содержательные и интересные сообщения и отметил, что участники конференции признательны ЛАС за организацию подобных мероприятий в рамках выставки «Фотоника».



## РГ11. «Лазерные информационные системы»

(28 марта, зал «Фотон»)

В заседании научно-практической конференции XII конгресса ТП «Фотоника» «Лазерные информационные системы» под председательством координатора РГ11 техплатформы «Фотоника» д.т.н. *А.А.Мармалюка* (АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Степеляха») приняли участие порядка 30 человек.

Всего в программной части конференции были заслушаны и обсуждены 6 докладов.

**1.** Первым прозвучал доклад *А.В.Фомина* (РФЯЦ-ВНИИТФ) «Развитие элементной базы полупроводниковой накачки оптоволоконных и твердотельных лазеров», посвященный достижениям РФЯЦ-ВНИИТФ в области создания мощных лазерных диодов, линеек и решеток лазерных диодов, а также оптических модулей на их основе. Обсуждены применяемые технические решения и представлены основные выходные характеристики указанных приборов.

**2.** В докладе *В.Ф.Матюхина* и *А.С.Сигова* (РТУ МИРЭА) «Ключевые проблемы создания солнечного аэрокосмического энерготехнологического комплекса с дистанционной передачей энергии» были рассмотрены концептуальные подходы и технические решения по построению пространственно-распределенной лазерной и солнечной аэрокосмической энергосистем. Проведен анализ состояния дел в данной области в

России и за рубежом, определены возможные принципиальные подходы, технические и технологические решения к построению таких перспективных энергетических систем.

**3.** Доклад *В.П.Лукина*, *П.А.Коняева*, *Л.А.Большасовой*, *А.Г.Борзилова* (Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН) и *Д.Ю.Колобова*, *П.Г.Ковадло*, *А.Ю.Шиховцева* (Институт солнечно-земной физики СО РАН) «Переход от многоконтурных систем адаптивной оптики для солнечных телескопов к мультисопряженным» был посвящен развитию систем адаптивной оптики с целью минимизации искажающего воздействия турбулентности на работу сложных оптических систем. Показана перспективность перехода от многоконтурной системы адаптивной оптики к мультисопряженной. Отмечено, что такие системы способны обеспечить широкое поле зрения для скорректированного изображения и могут найти применение в различных областях.

**4.** В докладе *А.Н.Ермолина* и *Л.Ю.Маслова* (АО «Лазерные системы») «Трехдиапазонный метеорологический комплекс «ЛИРА»: достигнутые результаты и перспективы развития» были обсуждены вопросы повышения эффективности метеолидаров. Показано, что комплексирование различных диапазонов позволяет улучшить работу метеокомплексов и пре-

одолевать погодные ограничения.

5. *Д.В.Саченко* (АО «ЛЛС») в докладе «NordLase – российская разработка и производство лазеров (гибридные, твердотельные, волоконные) и лазерных систем. Достижения и новинки» рассмотрел подходы к созданию лазеров различных типов и систем на их основе и продемонстрировал новые разработки.

6. В докладе *В.А.Трофимова* (Южно-китайский технологический университет, Гуанчжоу, КНР) и *С.А.Варенцовой* (Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова) «Восстановление спектра широкополосного ТГц-импульса на основе измерений во времени отклика вещества на некоторых ГГц-частотах»

предложен метод восстановления спектра широкополосного ТГц-импульса, прошедшего через вещество или отраженного от него. Для этого используется эволюция спектральных амплитуд, вычисленная на одной или нескольких ГГц-частотах, расположенных в окнах прозрачности атмосферы. Продемонстрированы результаты экспериментов и обсуждены перспективы развития предложенного подхода.

По итогам прошедшей научно-практической конференции можно отметить устойчивый интерес к лазерной технике и лазерным информационным системам, которые рассматриваются в качестве эффективных инструментов решения многих практических задач.

★ ★ ★

## РГ12. «Оптико-электронные системы и компоненты»

(28 марта, зал «Фотон»)

Во вступительном слове председательствующий – *В.В.Старцев*, генеральный директор АО «НПО «Орион», координатор РГ12, сделал краткий обзор деятельности рабочей группы в 2022-2023гг. Он рассказал о новой задаче, стоящей перед Рабочей группой №12 «Оптико-электронные системы и компоненты» техплатформы «Фотоника» – это участие в составлении плана Дорожной карты развития фотоники в России. Предлагается для написания дорожной карты оптоэлектроники использовать существующий в ФПИ механизм создания Целевой поисковой лаборатории (ЦПЛ) для комплексного решения вопросов, связанных с предупреждением или устранением угрозы, критически значимой для обороны страны и (или) безопасности государства. Основные направления будущих работ:

- 1) определение критически важных проблем в области технологий оптоэлектроники и фотоники, формирование предложений по созданию научно-технических основ и концепций их решения;
- 2) аудит существующих в Российской Федерации компетенций в области технологий оптоэлектроники и фотоники, состояния исследований, разработок и полученных результатов;
- 3) разработка предложений по направлениям, целям и способам парирования угрозы технологического отставания в области оптоэлектроники и фотоники;
- 4) разработка «дорожных карт» поэтапного парирования угрозы технологического отставания (перечень мероприятий: НИР, ОКР, организация серийного производства).

При этом необходимо постараться избежать ошибок, допущенных при составлении подобных документов в прошлом, например, отсутствия объективной единой картины как в области индустрии/рынка, так и в области научных



разработок и др. Докладчик подчеркнул, что в качестве первоочередной задачи предлагается признать создание объективной картины в области фотоники в РФ на основе системного анализа имеющихся данных, в том числе сформулированных в рамках ранее проведенных инициатив, а также данных, имеющихся у профессиональных организаций (например, Лазерной ассоциации и др.) и аналитических обзоров. *В.В.Старцев* пригласил всех присутствовавших к активному участию в работе ЦПЛ.

*В.С.Попов* (ГНЦ «НПО Орион») посвятил свой доклад «Квантовые точки и новое поколение ИК-фотосенсоры на их основе» разработке способов формирования фоточувствительных элементов на квантово-размерных объектах. Прежде всего это коллоидные квантовые точки, способные детектировать излучение в диапазоне 3-5 микрон. Планируется, что эта работа должна завершиться созданием прототипа малоэлементной матрицы на основе размерно-квантованных структур такого рода.

С актуальным докладом «Российские OLED микродисплеи и их применение в оптико-электронных системах» выступил *С.А. Стахарный* из АО «ЦНИИ Циклон». Он рассказал об исследованиях особенностей настройки качества изображения для вывода на экране OLED микродисплеев с кремниевой СБИС управления. Исследования были проведены с учетом физических свойств электролюминесцентных OLED структур и управляющих пиксельных ячеек кремниевой СБИС управления. Представлены закономерности и алгоритмы преобразования входного цифрового видеосигнала для получения наиболее информативного визуального отображения на экране OLED микродисплеев без потери качества исходного изображения.

С интересом участники конференции выслушали доклад «Перестраиваемые квантово-каскадные лазеры для решения задач лазерной ИК-спектроскопии», с которым выступил *П.Л. Демкин* из ЦФФ МГТУ им. Н.Э.Баумана.

В докладе *О.А. Вохмяниной* из ПАО ПНППК «Производство специальных оптических волокон в РФ» были представлены основные отличия специальных оптических волокон (СОВ) от телекоммуникационных, такие как расширенный температурный диапазон, радиационная стойкость, стойкость к водородосодержащим средам, анизотропия свойств. СОВ применяются в навигации, системах мониторинга, специальных волоконно-оптических линиях связи, станкостроении и медицине. Были перечислены научные и производственные центры создания СОВ в РФ, представлена номенклатура СОВ собственной разработки и производства ПАО ПНППК.

С интересным докладом «ФПУ на основе матричного микроболометрического детектора со спектральным диапазоном чувствительности 2-16 мкм» выступил *Н.А. Шилейко* из АО «ОКБ Астрон». Были представлены результаты разработки фотоприёмного устройства (ФПУ) на

основе матричного микроболометрического детектора с равномерным спектром поглощения ИК излучения в диапазоне 2-16 мкм и приведены результаты экспериментальных исследований параметров ФПУ, демонстрирующие возможности расширения тактико-технических характеристик оптико-электронных систем при его использовании.

Доклад *А.В. Чугунова* (ООО ВТЦ «Баспик») «Микроканальные детекторы. Возможности для задач масс-спектрометрии и фундаментальной физики» был посвящён новейшим разработкам в области многоканальных электронных усилителей (МЭУ) и детекторов на их основе. Было отмечено, что в настоящий момент детекторы на основе МЭУ нашли самое широкое применение в различных сферах науки и техники, таких как исследования в области ядерной физики, масс-спектрометрии, в технике для космических исследований, медицине, электронной микроскопии и т.д. За последнее время разработаны и освоены детекторы для времяпролетной масс-спектрометрии, квадрупольной масс-спектрометрии, рентгеновской спектрометрии, детекторы ультрафиолетового и видимого излучения, детекторы для диагностики профиля пучка заряженных частиц в ускорителях и т.д.

Конференция стала хорошей площадкой для консолидации научного потенциала в сфере разработки оптико-электронных систем и компонентов и обсуждения широкого спектра научных и технологических задач. Мероприятие проходило в доброжелательной атмосфере, доклады почти всегда вызвали оживленную дискуссию, которая демонстрировала заинтересованность слушателей. В заключение участники поблагодарили организаторов из Лазерной ассоциации за предоставленную возможность провести важное и полезное мероприятие и пожелали всем успехов в дальнейшем решении проблем разработки оптико-электронных систем.

★ ★ ★

### **РГ13. «Фотоника в навигации, геодезии и открытых линиях связи» (28 марта, зал «Западный»)**

Научно-практическая конференция, модератором которой выступил главный научный сотрудник АО «НПК «СПП» д.т.н. *А.Л. Соколов*, собрала около ста очных участников. Представленные на ней доклады были посвящены в основном разработкам АО «НПК «СПП» в области навигации и лазерной связи – традиционным направлениям Корпорации по созданию прецизионных систем для космической техники.

В соответствии с мировым трендом по развитию лазерной связи между созвездиями малых космических аппаратов в Корпорации продолжены работы по разработке соответствующи-

щих систем. В пленарном докладе главного конструктора к.т.н. *В.В. Мурашкина* была подробно рассмотрена конструкция и специфика применения терминала лазерной связи в бортовом и наземном исполнении. Накопленный опыт по разработке систем лазерной связи, который позволил в свое время осуществить передачу визуальной картинки с борта МКС на расположенный в районе г.Архыз лазерный наземный терминал, обеспечивает успешное изготовление нового лазерного терминала для создаваемой группировки низкоорбитальных космических аппаратов.

В АО «НПК «СПП» также ведется разработка оптико-лазерной системы для передачи квантовых ключей по атмосферной линии связи. Системы наведения лазерного луча с точностью до угловых секунд традиционно являются визитной карточкой Корпорации. В данном случае кроме точного наведения необходимо обеспечить требуемое пропускание оптической системы, что является непростой задачей, учитывая малый диаметр передающего и приемного каналов в виде одномодового оптического волокна. В докладе д.т.н. *А.Л.Соколова* была предложена модификация известного протокола BB84 для линии связи «наземный терминал-борт-Земля», некритичного к разворотам системы координат относительно продольной оси. Модификация осуществляется на базе оптических вихрей с симметричной пространственной поляризационной структурой.

Одним из достижений АО «НПК «СПП» является создание отечественного лазерного передатчика для квантово-оптических станций измерения дальности с параметрами, которые соответствуют мировому уровню: длительность импульсов 50 пикосекунд, энергия в импульсе 2,5 мДж и частота повторения импульсов – 500 Гц; при этом температурные условия эксплуатации передатчика существенно расширены: от -40°C до +40°C, а комплектующие – преимущественно отечественного производства. Существенно, что лазер выполнен в модульном исполнении, что значительно облегчает его ремонт на пунктах эксплуатации. В докладе начальника отдела *В.Д.Ненадовича* было указано, что развитие кооперации с ГОИ им. С.И.Вавилова и РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И.Забабахина позво-

лило, с одной стороны, получить уникальные изделия, входящие в состав лазера, а с другой придало импульс дальнейшим разработкам в этих организациях.

Как известно, НПК «СПП» является одним из мировых лидеров по разработке и производству лазерных уголковых отражателей в интересах космической техники. На конференции был представлен доклад, посвященный разработке ретрорефлекторной системы для автоматической стыковки космического корабля и проектируемой новой орбитальной космической станции. Решение этой проблемы в сочетании с естественным ограничением по массе изделия является амбициозной задачей, которая была успешно решена путем применения уголковых отражателей различного размера и пространственного расположения. Малогабаритная ретрорефлекторная система «Пирамида» массой 40 г для низкоорбитальных космических аппаратов, в частности, типа «CubeSat» МГТУ им. Н.Э.Баумана, была представлена в докладе, подготовленном в содружестве с коллегами из РП-2.

Коллеги из НИУ «МЭИ» представили доклад, посвященный трехмерной диагностике потоков методом мультицветной анемометрии. Последняя является развитием тематики, традиционной для кафедры физики МЭИ в рамках научной школы проф. Б.С.Ринкевичюса.

В целом состоялся полезный обмен мнениями, докладчики ответили на многочисленные вопросы, что подтверждает интерес к обсуждаемым проблемам создания высокоточных оптико-лазерных систем в интересах навигации, геодезии и лазерной связи.

★ ★ ★

## РГ14. «Оптическая сенсорика»

(27 марта, зал «Западный»)

Научно-практическая конференция Рабочей Группы №14 в рамках XII Конгресса техплатформы «Фотоника» собрала около 40 очных участников и существенно большее число участвовавших дистанционно.

В работе приняли участие представители как производственных компаний, так и научных организаций. Модератором заседания выступил зам. директора ИРЭ РАН д.ф.м.н. *О.В.Бутов*. На конференции было представлено 11 докладов, которые вызвали живой интерес аудитории. Основной обсуждавшейся темой были распределенные волоконно-оптические датчики на основе когерентного рефлектометра и их применение для решения различных задач – от охраны периметров до обнаружения утечек в трубопроводах и детектирования сейсмической активности. Компания «Т8» представила четыре



доклада по данному направлению. Новосибирский государственный университет обнародовал новую разработку – метрологические стенды для характеристики и поверки распределенных оптоволоконных датчиков температуры, деформации и акустики. Завершающим

по этому направлению стал доклад из ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по высокоточной записи брэгговских решеток излучением фемтосекундного лазера. Именно данная технология в настоящее время активно развивается, позволяя создавать высокоточные квазиточечные рассеивающие центры в волоконном световоде для нового поколения когерентных рефлектометрических датчиков.

Важным направлением развития отечественной сенсорики является создание российских приборов опроса брэгговских датчиков (интеррогаторов). По данному направлению на конференции также было представлено два интересных доклада. АО «ЗНТЦ» продемонстрировал оригинальную разработку на основе планарных фотонных схем, представляющую собой портативный спектрометр. Были представлены результаты его тестирования совместно с брэгговскими датчиками. Несмотря на то, что по разрешению такой спектрометр пока уступает лучшим аналогам, он может занять свою нишу среди волоконных сенсорных систем. В этой же сфере компания ООО «Пролог» познакомила со своей собственной разработкой, которая не только составляет конкуренцию лучшим мировым аналогам, но и по ряду характеристик превышает их. Интеррогатор ИКС-49.90 был призван заменить собой аналогичную зарубежную систему опроса MicronOptics и уже успешно поставляется вместе с измерительными системами на объекты атомной промышленности. И теперь данный прибор можно отдельно заказать

для создания собственных измерительных систем на основе брэгговских датчиков.

Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э.Баумана представил доклад, посвященный инфракрасным оптико-электронным приборам для задач экологической и промышленной безопасности. Были продемонстрированы прототипы приборов и приведены результаты их тестирования на примере анализа уровня загрязнения атмосферы. Также живой интерес вызвал обзор современных фоточувствительных приборов. Несмотря на активное развитие полупроводниковой техники для целого ряда применений фотоэлектронные умножители остаются незаменимыми приборами высокочувствительного детектирования.

Интересный доклад сотрудника ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН был посвящен волоконно-оптическим рефрактометрам для контроля параметров агрессивных жидкостей и газов. Следует отметить, что данное направление в настоящее время активно обсуждается в научной среде и, вероятно, вскоре появятся уже промышленные прототипы новых волоконных сенсоров для медицинских применений, химической промышленности, экологического мониторинга.

В целом можно отметить, что конференция по направлению «оптическая сенсорика» вызвала у слушателей живой интерес, а направление в целом переживает бурное развитие, что было убедительно подтверждено представленными на конференции докладами.

★ ★ ★

## РГ15. «Голографические технологии»

(27 марта, зал «Мраморный»)

Конференция состоялась под председательством д.ф.-м.н. профессора *В.Ю.Венедиктова* (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») в своем привычном формате. Количество участников составило более 30 человек. После вступительного слова председательствующего были заслушаны 7 докладов. Кроме этого, в ходе конференции были обсуждены перспективы развития голографии в текущих условиях и вопросы деятельности соответствующей рабочей группы ТП «Фотоника». Было объявлено о предстоящей в сентябре 2024г. 20-й ежегодной конференции «Голоэкспо-2024».

Первые два доклада – «Голографическая томография фазовых микрообъектов», *Г.Н.Вишняков*, (ФГБУ ВНИИОФИ, Москва) и «Высокочувствительные голографические интерферометры для технологических и медицинских применений», *В.М.Петров* (СПбГУ), *В.Ю.Венедиктов* (СПбГЭТУ) – были посвящены весьма актуальной и быстроразвивающейся области. Идея голографической томографии фазовых микрообъектов (микроорганизмы,

клетки и т.п.) основана на регистрации большого количества цифровых голограмм объекта, на основе которых затем производится компьютерный синтез 3D-образа объекта.

Интерферометрии был посвящен еще один доклад – «Метод адаптивной голографической интерферометрии и его использование для определения материальных параметров фоторефрактивных кристаллов», *С.М.Шандаров* (ТУСУР, Томск). Фоторефрактивные кристаллы как среда



для записи динамических объемных голограмм остаются важнейшим инструментом современной фотоники. Томские коллеги в последние годы получили ряд прорывных результатов, которые и были обобщены в докладе.

Одним из важнейших приложений голографии сегодня является создание систем виртуальной и дополненной реальности. Практически ежегодно на конференциях с докладом на эту тему выступает ведущий российский специалист в данном вопросе *А.Н.Путилин* (ФИАН им. Лебедева, Москва). В этом году он выступил с программным обзорным докладом «Направления развития технологий дисплеев дополненной и смешанной реальности», который явился центральным событием конференции.

*Р.С.Стариков* (НИЯУ МИФИ, Москва) выступил с докладом «Применение нейросетевых методов при обработке сигналов оптико-цифровых дифракционных систем пространственной фильтрации». Данное направление является синтезом систем голографической корреляции, которые активно исследовались еще в 70-80-е годы XX века, и ультрасовременной тематики нейросетей и искусственного интеллекта. Оказалось, что голографические корреляторы, реализуемые в современных пространственных модуляторах света, позволяют легко и сравнительно дешево реализовывать многослойные и гибкие нейросети.

Последние два доклада были посвящены тематике на стыке голографии и т.н. структурированного света, а именно генерации оптических вихрей и управлению ими. *А.В.Черных* (НИУ ИТМО, Санкт-Петербург) представил доклад большого коллектива «Разработка ТГц вихревого модулятора на основе продвинутых спиральных зонных пластин из пленок одностенных углеродных нанотрубок», в котором описал принципиально новый и специфический для терагерцовой оптики подход к управлению пространственными параметрами такого излучения.

Завершилось заседание докладом «Генерация оптических вихрей средствами интегральной фотоники», *Р.В.Кутлуяров* (УУНиТ, Уфа). Этот коллектив впервые принял участие в работе нашей конференции и представил весьма интересные и оригинальные результаты на стыке интегральной фотоники и вихревых пучков. В докладе были приведены результаты теоретического и экспериментального исследования двух классов оптических систем. В одной из них средствами интегральной фотоники реализовывались вихри, распространяющиеся внутри многомодовых оптических волноводов. В другой интегрально-фотонный чип специальной конструкции является средством для излучения в свободное пространство оптических вихрей с управляемыми параметрами.

★ ★ ★

## **РГ16. «Волоконно-оптические линии связи и их комплектующие»** (28 марта, зал «Западный»)

В работе конференции приняли очное участие более 30 человек, дистанционно – около 50. Модератором выступил профессор *О.Е.Наний* (компания «Т8», физфак МГУ), было заслушано 9 докладов.

1. Открыл конференцию доклад генерального директора Группы компаний «Т8» «Достижения и перспективы отечественных DWDM-систем связи». *«Мы сейчас активно работаем над системой управления, которая позволяет решать задачи апгрейда, добавлять каналы, снижать риски при различных переключениях с изначальным просчетом действий на цифровой модели сети – «цифровом двойнике». В итоге операторы получают более гибкую оптическую архитектуру узлов»,* — отметил докладчик. Оптический транспорт должен своевременно отвечать новым вызовам, поэтому помимо повышения гибкости, стоят задачи увеличения емкости без уменьшения дальности, повышения автономности, ускорения восстановления после аварий и обеспечение «прозрачности» технологий. Основными путями повышения емкости являются увеличение символьной скорости когерентных транспондеров и мукспондеров, а

также переход к гибким адаптивным сеткам спектрального уплотнения каналов (*Flex-grid*) и сопутствующим им CDC-узлам сети (*CDC – colorless, directionless, contentionless*). Отмечена тенденция внедрения новых спектральных диапазонов. Так, компания «Т8» для своих решений внедрила расширение традиционного для DWDM C-диапазона до 4.8 ТГц (C+band) и в настоящий момент ведет разработку линейки оборудования для C+L-диапазона, что должно суммарно обеспечить 9,8 ТГц доступного DWDM спектра.

В обзоре новых разработок компании «Т8» докладчик уделил особое внимание единой связке САПР «Софокл» и NMS Титан, к которой добавятся алгоритмы с использованием машинного обучения. «Софокл» – название нового программного комплекса проектирования и оптимизации ВОЛС, а NMS Титан – система управления сетью связи нового поколения. Еще одной важной темой стало повышение «доверенности» оптического транспорта, а именно, продолжающиеся работы над отечественными алгоритмами цифровой обработки сигнала и их практическая апробация на реальном лабораторном стенде.

2. В докладе «Висмутовые волоконные усилители для широкополосных волоконно-оптических сетей связи», представленном зав. лаб. НЦВО им. Е.М.Дианова РАН *М.А.Мелькумовым*, был приведен обзор результатов по волоконным усилителям и лазерам на основе висмутовых световодов, полученным в мире с момента начала разработки данного оптического материала, обсуждались также возможные сценарии их применения. Висмутовые волоконные световоды — это новый оптический материал, обеспечивающий возможности широкополосного оптического усиления в ближнем ИК-диапазоне, где другие активные волокна, легированные редкоземельными ионами, неэффективны. Варьирование состава стекол позволяет получить люминесценцию и усиление, связанное с висмутовыми активными центрами (ВАЦ), в диапазоне 1,1-1,8 мкм. Таким образом, одним из важных применений таких активных волокон являются сверхширокополосные волоконно-оптические системы связи со спектральным уплотнением каналов, где усилители из волокон, легированных висмутом (BDFa), позволяют в несколько раз увеличить полосу пропускания сигнала или упростить и улучшить характеристики существующих систем. В докладе показано, что висмутовые световоды коммерчески доступны, а несколько компаний, включая такие крупные как OFS-FITEL, уже коммерциализировали висмутовые усилители в области вблизи 1,3 мкм. Отмечено, что за счет широкой полосы усиления висмутовых центров и объединения нескольких активных центров в одном световоде можно добиваться полосы усиления одного усилителя в 100-150 нм и даже более. Был дан прогноз о возможности перекрытия всего окна прозрачности телекоммуникационных волокон. В заключительной части доклада были представлены новые результаты по висмутовым световодам с накачкой по оболочке, разрабатываемым в НЦВО РАН последние два года. Показано, что такая схема накачки имеет не только определенные преимущества над традиционной для висмута накачкой в сердцевину, но и приводит к определенным особенностям.

В процессе обсуждения доложенных результатов было задано несколько вопросов, включая вопрос о возможности сократить длину висмутовых световодов в усилителях и лазерах. Докладчик дал развернутый ответ, в котором указал, что над сокращением длины активных висмутовых волокон ведется работа, и такое сокращение в некоторых случаях возможно путем повышения концентрации висмутовых активных центров, однако, рост концентрации ВАЦ ведет к опережающему росту непросветляемых потерь, что, в свою очередь, влечет сужение полосы усиления и ухудшение шум-фактора и кпд. В ряде случаев удается сократить длину

до 20 метров и менее, что сопоставимо с длиной активных волокон в эрбиевых усилителях на L диапазон.

Другим интересным вопросом по докладу был вопрос о роли гейн-клампинга в представленной схеме висмутового усилителя. Докладчик подробно объяснил, что в обсуждаемой схеме сверхширокополосного усилителя, разработанной в НЦВО РАН, посредством гейн-клампинга фиксировалось усиление на заданной длине волны, что позволяло расширить полосу усиления в ВАЦ, ассоциированных с фосфором, и, кроме того, генерируемое в усилителе излучение дополнительно выступало накачкой для ВАЦ, ассоциированных с кремнием, что еще больше расширяло полосу усиления. В результате удалось достичь ширины полосы усиления в одном усилителе порядка 150 нм.

3. В докладе *С.С.Когана* (ООО «Т8») «Эволюция цифровых сигнальных процессоров для когерентных оптических каналов» было отмечено, что цифровой сигнальный процессор ЦСП (Digital Signaling Processor, DSP) — это электронное сердце систем когерентной передачи. Фундаментальной функцией ЦСП является кодирование электронных цифровых данных по амплитуде, фазе и поляризации нормированного оптического излучения на передающей стороне и декодирование этих данных на приемной стороне канала. В ЦСП выполняется аналого-цифровое преобразование (и наоборот) сигнала, обнаружение и исправление ошибок, шифрование данных и мониторинг (контроль) параметров системы. Требования к когерентным ЦСП отличаются для встроенных в оборудование решений и для сменных модулей-приемопередатчиков:

- сегмент встроенных (embedded) в оборудование решений с высокими характеристиками, нацеленными на достижение максимальной дальности связи без промежуточного ОЕО (Optical-Electrical-Optical) преобразования, то есть ориентированными преимущественно на протяженные наземные и подводные сети (для встроенных решений ЦСП меньше ограничены в физических размерах и энергопотреблении);
- сегмент компактных сменных (pluggables) когерентных модулей-трансиверов, в которых приоритет отдается открытым решениям с низким энергопотреблением и малыми физическими размерами.

В докладе была представлена классификация ЦСП для оптических каналов разной пропускной способности и дальности связи по величине символьной скорости. Новейшие ЦСП, ориентированные на оптические каналы от 400 Гбит/с до 800 Гбит/с и 1.6 Тбит/с выполнены по КМОП 3-7 нм технологии при символьной скорости порядка 140-200 ГБод. Было показано, что для открытых ВОСП стандартизация парамет-

ров сменных когерентных оптических линейных интерфейсов для оптических каналов с пропускной способностью порядка

- 400 Гбит/с – завершена;
- 800 Гбит/с – находится в активной стадии;
- 1.6 Тбит/с – находится в стадии подготовки.

В состоявшейся после доклада активной дискуссии слушатели интересовались реализацией других (кроме ЦСП) функций когерентного оптического интерфейса. Было отмечено, что в модуле PIC (*Photonic Integrated Circuit*), входящем в состав когерентного оптического интерфейса, кроме прочего, реализуется лазер (обычно изготавливается на основе InP), излучение которого на стороне передачи подается на модулятор, который кодирует данные, изменяя фазу и уровень интенсивности оптического излучения. Кроме того, были обсуждены вопросы реализации во встроенных ЦСП таких новых функций цифровой обработки, как PCS (*Probabilistic Constellation Shaping*) и т.п.

4. А.И.Микилев (ОАО «ВНИИКП») в докладе «Характеристики и перспективы применения многомодовых телекоммуникационных ОВ на основе кварцевого стекла» рассмотрел характеристики и вопросы применения многомодовых оптических волокон (ММ ОВ) категорий OM2...OM5, их классификацию, основные стандарты. Был дан обзор мирового рынка, рассмотрены преимущества применения и дан анализ технико-экономической эффективности ММ ОВ в сравнении с одномодовым волокном. Особое внимание было обращено на характеристики широкополосности градиентных ММ ОВ. Отмечено, что при современных подходах к стандартизации их характеристик необходимо четко различать коммерческую и техническую стороны. В частности, подчеркивается, что широко используемый сегодня производителями ММ ОВ так называемый «коэффициент широкополосности» обычно нормируется линейным образом по физической длине, однако в действительности он представляет собой произведение «коэффициента широкополосности» на длину волокна, выражаемое в ГГц x км. Кроме того, ряд исследований показывает, что среднестатистическое уширение оптического импульса, обусловленное межмодовой дисперсией, является функцией расстояния с показателем степени 0,5...1. Поэтому современное «линейное нормирование» коэффициента широкополосности ММ ОВ представляется пока что не совсем корректным.

В заключительной части доклада был сделан вывод, что рынок ММ ОВ в России, по видимому, недостаточно оценен и имеет хорошие перспективы к дальнейшему развитию с учетом постоянно растущей потребности в пропускной способности сетей связи.

5. В докладе М.И.Вексельмана (ООО «Макс-Нави»), А.В.Жеглова, Р.С.Кобякова, Р.Н.Новожилова и С.Ю.Медведева (АО «Время-Ч») «Прецизионная передача частоты и шкалы времени ВОЛС-модемами VCH-608» был описан метод передачи сигнала синхронизации с использованием ВОЛС с очень высокой точностью. Было рассказано о реализации этого метода с помощью оптических модемов VCH-608 производства компании АО «Время-Ч». Показаны результаты испытаний на линии длиной более 4 км и расхождением фазы сигнала синхронизации между источником и приемником, которые составили до 200 пс. Предложена идея организации технологии ОТС (*Optical Time Channel*) с использованием модемов VCH-608. Особый интерес у слушателей вызвало сравнение методов передачи сигналов синхронизации с использованием модемов VCH-608 и с использованием пакетного протокола RTP (IEEE-1588).

6. Доклад А.В.Резникова, Г.Ю.Иванова, Э.А.Фомирякова, С.П.Никитина и В.Н.Трещикова («Т8 Сенсор») «Высококогерентный лазерный источник с суб-килогерцовой мгновенной шириной линии и мощностью более 10 мВт в форм-факторе корпуса Butterfly» был посвящён конструкции и результатам тестирования высокостабильного полупроводникового лазера с внешним резонатором на дискретных оптических элементах, работающего на длине волны 1550 нм. Сравнение с зарубежными аналогами показало, что характеристики разработанного лазера находятся на уровне лучших мировых образцов. Наиболее важные его параметры:

- 1) мгновенная спектральная ширина линии генерации – менее 2 кГц,
- 2) рабочий диапазон температур – от 5 до 70 град С,
- 3) выходная мощность (излучение выводится через PM волокно) – более 10 мВт,
- 4) лазер находится в малогабаритном корпусе Butterfly 14-pin со стандартным расположением контактов.

Была описана методика и установка для измерения спектральной ширины линии генерации. Отмечено, что лазеры такого класса очень востребованы во многих областях применения, среди которых:

- 1) акустические и сейсмодатчики;
- 2) безопасность;
- 3) нефте- и газодобыча, их транспортировка;
- 4) LIDAR и дистанционный контроль;
- 5) интерференционные оптоволоконные датчики;
- 6) метрология;
- 7) RF и микроволновая фотоника.

Востребованность разработанного лазера подтверждается большим интересом слушателей, которых, в частности, интересовала наработка лазера до отказа и его RIN. Лазер плани-

руется запустить в серийное производство в конце 2024 – начале 2025 года.

7. В докладе *Л.А.Самоделькина* и *Д.Д.Старых* («Т8 НТЦ») «Сети с разнородными волокнами. Теория. Моделирование. Эксперимент» было проанализировано накопление нелинейных искажений в многопролётных DWDM ВОЛС. Нелинейные эффекты традиционно рассматриваются как дополнительный нелинейный шум, который генерируется в каждом волоконном пролёте. В лабораторном эксперименте и моделировании с помощью VPIphotonics Design Suite было показано, что в многопролётных ВОЛС нелинейные искажения коррелируют в разных участках волокна, поэтому накопление нелинейных шумов не описывается простым законом суммирования. Учет данных корреляций при проектировании и оптимизации ВОЛС проводится интегрально как некоторая поправка к закону попролётного суммирования шумов. Приведены модель и формулы для сверхлинейного закона. Наибольший интерес вызывает случай разнотипных волокон в ВОЛС, характерный для оптических маршрутов в сетях связи со сложной топологией. Для большинства негативных эффектов – аккумуляции шумов усиленной спонтанной люминесценции, накопления хроматической и поляризационно-модовой дисперсии, фильтрации оптического сигнала – есть удобные аналитические формулы для быстрых расчетов. Теперь они также предложены и обоснованы для накопления нелинейных шумов.

В дискуссии после доклада был затронут воп-

рос о точном учете поляризационной модовой дисперсии в моделировании. Как отметил докладчик, поляризационные эффекты, конечно же, учитывались, однако современные когерентные транспондеры, использующие цифровую обработку сигнала, практически полностью устраняют штраф к производительности от наблюдаемых в телекоммуникационных волокнах величин ПМД.

8. В докладе *Г.А.Андреева* и *И.П.Чебыкина* («Т8 НТЦ») «Оценка качества передачи в когерентных ВОЛС методами машинного обучения» были рассмотрены инновационные методы оперативной оценки качества оптических сигналов, необходимые для обеспечения работы системы управления в условиях решения задач модернизации, реконфигурирования и повышения надежности оптических сетей связи.

9. Эффективный алгоритм ослабления фазовых шумов несущей при цифровой обработке сигналов в приемниках когерентных оптических систем связи был рассмотрен в докладе *И.С.Халько* (ООО «Т8») «Реализация алгоритма восстановления фазы несущей в целочисленной арифметике». Предложена быстрая и малозатратная реализация данного алгоритма в целом числе. Получены оптимальные значения для параметров алгоритма и среднее улучшение алгоритмом SNR.

Следует отметить высокий уровень всех представленных докладов, заинтересованность слушателей и их активное участие в обсуждении докладов.

★ ★ ★

## РГ17. «Радиофотоника» (28 марта, зал «Южный»)

В работе конференции под председательством д.ф.-м.н., начальника научно-производственного комплекса АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стедьмаха» *М.А.Ладугина* приняли участие около 70 специалистов. Прозвучало 8 докладов из 9 заявленных (1 докладчик заболел), по всем выступлениям шли плодотворные дискуссии.

1. Доклад *А.Б.Устинова* (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») «Сверхмалозащумящий оптоэлектронный СВЧ генератор с пассивным оптическим усилением» был посвящен разработке оптоэлектронного генератора (ОЭГ), в конструкции которого отсутствовали какие-либо оптические или СВЧ усилители. Было показано, что при определенном сочетании параметров оптоволоконной линии передачи можно получить положительный коэффициент передачи СВЧ сигнала, распространяющегося в ней в виде модуляции интенсивности оптического излучения. Впервые был исследован фликкер-шум такой линии передачи и приведены результаты экспериментальных из-

мерений и численного анализа вносимого фазового шума. Были приведены экспериментальные результаты и численные оценки, подтверждающие идею о том, что если убрать из схемы ОЭГ один из «шумящих» элементов, а именно СВЧ усилитель, то такой ОЭГ генерирует монохроматический СВЧ сигнал с более низким фазовым шумом. Сообщалось, что впервые был исследован фазовый шум ОЭГ с пассивным оптическим усилением (без транзисторных или оп-



тических усилителей), а также предложена модифицированная модель Яо-Малеки для адекватного описания спектра фазового шума ОЭГ без усилителей. После ответов на вопросы следует отметить, что полученные результаты открывают новые возможности для разработки устройств радиофотоники.

**2. А.В.Иванов** (АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха») в докладе «Мощные фотодиоды СВЧ-диапазона: современное состояние и перспективы развития» рассказал о современном состоянии исследований, а также о рынке зарубежных и отечественных СВЧ-фотодиодов на основе гетероструктур InP/InGaAs для спектрального диапазона 1,3-1,55 мкм с высоким уровнем насыщения принимаемой мощности излучения. Показано, что мотивацией увеличения уровня оптической мощности в волоконно-оптической линии передачи являются увеличение коэффициента передачи (усиления) линии, расширение динамического диапазона (SFDR), снижение коэффициента шума линии передачи и отсутствие электронного постусилителя выходного сигнала, ограничивающего полосу пропускания всей системы. В докладе были приведены основные выражения, связывающие быстродействие СВЧ-фотодиодов с конструктивными параметрами прибора. Были показаны наиболее распространенные типы конструкции СВЧ-фотодиодов, отличающихся типом ввода излучения: с вертикальным вводом излучения поперек слоев гетероструктуры и с торцевым вводом излучения вдоль слоев, получившие название «волноводные». Была продемонстрирована новая конструкция фотодиодной гетероструктуры, впервые созданная в Японии для мощных СВЧ-фотодиодов – UTC («UniTraveling Carrier»), или однозарядный фотодиод. При этом сообщается, что в АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха» завершена ОКР и уже разработан приемный оптический модуль ПрОМ-17 на основе СВЧ-фотодиода с UTC-гетероструктурой собственного производства. Граничная частота диапазона частот по уровню -3 дБ модуля ПрОМ-17 не менее 12 ГГц, выходной фототок 1-дБ компрессии не менее 27 мА, входная мощность без насыщения не менее 40 мВт. Были представлены дальнейшие планы предприятия в части повышения мощности и расширения частоты СВЧ-фотодиодов.

**3. Р.В.Рыжук** из НИЯУ МИФИ в сообщении «Исследование амплитудно-фазового распределения поля с применением радиофотонного приемного канала» поднял вопрос обнаружения и идентификации объектов. Утверждается, что параметры радиоголограммы, образованной в плоскости наблюдения при интерференции отраженной от объекта волны и опорной волны, позволяют определить угловые координаты или получить радиоизображение объекта. Создание

опорной волны может представлять большую проблему, связанную с трудностью получения плоской волны на большой поверхности в плоскости наблюдения, которую можно решить с использованием радиофотонных технологий, организовав сложение двух волн в приемном канале. Были представлены результаты исследований по определению угловой координаты источника сигнала путем измерения мощности на выходе двойного параллельного электрооптического модулятора. Исследование распределения интенсивности поля проводилось на частоте 7,5 ГГц. Авторам удалось определить расположение источника сигнала по интегральному положению пика (примерно 30°).

**4. В докладе М.В.Парфенова** (ФТИ им. А.Ф.Иоффе) «Тонкопленочный ниобат лития как платформа для изготовления интегрально-оптических сверхширокополосных СВЧ-модуляторов» был представлен обзор современного состояния развития материальной платформы тонкопленочного ниобата лития применительно к изготовлению интегрально-оптических сверхширокополосных СВЧ-модуляторов. Были указаны преимущества оптических волноводов, изготавливаемых на подложках тонкопленочного ниобата лития, в сравнении с волноводами на основе объемных подложек ниобата лития, а также существующие проблемы, связанные с оптимизацией внутренних потерь и вводом/выводом оптического излучения из волноводов в оптические волокна. Показана возможность использования волноводов на основе подложек тонкопленочного ниобата лития для изготовления эффективных электрооптических СВЧ-модуляторов с большей полосой модуляции (более 100 ГГц). На настоящий момент имеется изготовленный по результатам исследований фазовый СВЧ-модулятор с эффективностью модуляции  $V_{\pi L} = 4$  В·см и полосой модуляции свыше 30 ГГц.

**5. В докладе В.В.Кулагина** из МГУ им. М.В.Ломоносова «Многоканальный радиофотонный приемник для сверхширокополосных СВЧ сигналов» описаны преимущества радиофотоники и тенденции развития современных радиотехнических систем. Были представлены схемы многоканальных радиофотонных приемников на основе многомодового оптического источника и на основе непрерывного лазера. Приведено численное моделирование работы приемной системы и экспериментальные результаты, показавшие, что возможно создание одиночного канала с отношением сигнал/шум до 50-60 дБ при полосе приема 1-2 ГГц. При реализации многоканальной сверхширокополосной радиофотонной приемной системы может быть получено порядка 8-9 эффективных бит оцифрованного входного сигнала.

**6. А.А.Кузнецов** (КНИТУ-КАИ) в докладе «Ра-

диофотонные технологии в радиолокации: определение угла прихода и доплеровского сдвига частоты» продемонстрировал результаты разработки технических решений для измерения характеристик отраженных радиолокационных сигналов с использованием тандемной амплитудно-фазовой модуляции, что позволяет повысить уровень информационной составляющей протектированного сигнала, исключить использование двухпортовых модуляторов и получить более линейную измерительную характеристику без заметного усложнения радиофотонного тракта. В настоящее время ведется разработка каскадов синхронного формирования управляющих напряжений для амплитудного и фазового модуляторов, что необходимо для дальнейших экспериментальных исследований. Авторы работы видят перспективы внедрения данного решения в малогабаритных бортовых РЛС.

7. Доклад *Р.С.Старикова* (НИЯУ МИФИ) «ФИС для высокопроизводительных систем передачи и обработки сигналов — обзор новейших достижений» был посвящён современному состоянию исследований в области создания ФИС для высокопроизводительных радиотехнических систем. Были кратко представлены современные характеристики аналоговых оптических трактов с цифровым выходом, являющихся базовым элементом систем микроволновой фотоники, отмечены возможности транспорта сигналов диапазонов до 500 ГГц с полосой свыше 100 ГГц и прямого электронного аналого-цифрового преобразования сигналов в рабочей полосе 5 ГГц с эффективным числом бит около 8-ми. Были представлены достижения в создании коммерческих ФИС для телекоммуникаций и

сделаны оценки возможностей развития элементной базы ФИС, необходимой для построения систем транспорта и обработки радиосигналов диапазонов до 100 ГГц, а также некоторые новейшие примеры экспериментальных ФИС для аналого-цифровой обработки радиосигналов, в том числе при построении многодиапазонных систем радиолокации и при решении задач построения систем радиолокаторов с синтезированной апертурой. В ходе дискуссии было отмечено, что в настоящее время создание ФИС для радиотехнических систем находится на этапе совершенствования элементной базы и определения функционала и технического облика практических систем.

8. В заключительном докладе «Особенности подготовки специалистов по радиофотонике в Российской Федерации» *А.А.Кузнецов* (КГУ, Казань) поделился опытом КНИТУ-КАИ и АО «КРЭТ» в реализации программ подготовки специалистов с компетенциями в области радиофотоники. Было отмечено, что помимо реализации программ высшего образования по фотонике и радиофотонике в ВУЗах существенную роль в такой подготовке должно играть дополнительное образование сотрудников предприятий, заинтересованных в скорейшем применении этих знаний на практике при разработке перспективной РЭА. Авторы отмечают, что несмотря на относительно небольшой и рассредоточенный по территории страны рынок таких специалистов, точечная углубленная подготовка позволит сформировать критическую массу, которая в ближайшем будущем обеспечит скачок в развитии этого направления и сформирует массовый спрос на таких специалистов по всей стране.

★ ★ ★

## РГ18. «Квантовые технологии»

(28 марта, зал «Южный»)

Конференция под председательством заместителя научного директора Российского квантового центра *С.С.Страупе*, организатором которой выступил Российский квантовый центр, привлекла большое внимание. В ней приняли участие более 70 человек, было сделано в общей сложности 7 докладов.

1. Первый доклад «Квантовые симуляторы на атомах тулия в оптических решётках» представил *А.В.Акимов*, научный директор Российского квантового центра. Квантовые симуляторы на холодных атомах являются бурно развивающимся направлением в современной физике. Разные атомы обладают теми или иными преимуществами для квантовых симуляторов. В частности, атом тулия является интересным кандидатом для квантовых симуляторов, поскольку обладает  $f$ -электронами и магнитным

дипольным моментом в основном состоянии. Дипольный момент позволяет моделировать взаимодействия на больших расстояниях, а наличие  $f$ -электронов позволяет регулировать длину рассеяния в широких пределах. Реализация квантовых симуляций требует формирования начального состояния, в роли которого в случае бозонов выступает конденсат Бозе-Эйнштейна. В работе группы докладчика с использованием методов машинного обучения был получен такой конденсат в оптических дипольных ловушках, работающих на разных длинах волн, измерена поляризуемость атома тулия. Продемонстрирована дифракция конденсата на оптических решетках и возможность манипулирования внутренним состоянием атома тулия. Таким образом, идет успешная подготовка к реализации квантовых симуляторов на основе атома тулия.

2. Далее речь пошла о «Технологии фемтосекундной лазерной печати для задач квантовой интегральной фотоники», доклад представил *Н.Н.Скрябин* из Центра квантовых технологий МГУ им. М.В.Ломоносова. Технология фемтосекундной лазерной печати (записи) волноводов является одним из наиболее доступных безмасочных методов создания фотонных интегральных схем. Она основана на перманентной модификации оптически прозрачных диэлектриков с помощью воздействия жестко сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов. Были представлены последние результаты в области создания интегральных чипов из кварцевого стекла для задач линейно-оптических квантовых вычислений. Особое внимание уделялось полным вносимым потерям в чипах, т.к. в многофотонных экспериментах эффективность системы имеет зависимость от вносимых потерь в степени числа фотонов. На основе волноводов 2-го типа были продемонстрированы программируемые чипы с полными потерями 7 дБ, среди которых были 6-канальный двухкубитный процессор, универсальный 8-канальный интерферометр и 4-канальный интерферометр для выставления унитарных матриц. Также был представлен 8-канальный чип для приготовления состояний Белла с оповещением с полными потерями 4 дБ на основе разрабатываемых на данный момент многопроходных волноводов 1-го типа. Такой подход позволяет значительно понизить потери на согласование с оптическим волокном до уровня <1 дБ, что в будущем открывает возможности к созданию 10-12 канальных схем с полными потерями 2-3 дБ.

3. Поговорили об «Элементах гибридных фотонных интегральных схем для оптических вычислений, коммуникаций и сенсоров», доклад представил *В.В.Ковалюк* из Лаборатория квантовых детекторов МПГУ. На базе МПГУ и МИСиС имеется все необходимое лабораторное оборудование для производства сверхпроводниковых наноструктур и оптических волноводов, включая технологическое, экспериментальное оборудование, а также установки по корпусированию. В список компетенций лаборатории входит численное моделирование, дизайн, изготовление и измерение фотонных интегральных схем. Ведущее направление работ лабораторий – разработка и создание устройств для квантовых применений, где важным ноу-хау является интеграция сверхпроводникового однофотонного детектора (*англ. Superconducting Nanowire Single Photon Detectors, SNSPDs*) с оптическими волноводами, которая обеспечивает компактный дизайн, высокую эффективность и временное разрешение, а также низкий уровень ложных срабатываний. Основной мотивацией разработки таких схем является создание квантово-оптической микросхемы, включающей в себя три основных блока: блок источников фо-

тонов, блок логических элементов и блок однофотонных детекторов. В докладе рассмотрено несколько уровней интеграции SNSPDs на пути к созданию таких схем на чипе. Первый уровень – интеграция детектора с различными фотонными материалами. После первой демонстрации в 2011г. на сегодняшний день в нескольких научных группах продемонстрированы сверхпроводниковые однофотонные детекторы на волноводах из кремния, нитрида кремния, поликристаллического алмаза, ниобата лития на изоляторе и др. Второй уровень интеграции включает в себя совмещение детекторов с более сложными устройствами – AWG-демультиплексорами, фотонно-кристаллическими волноводами, планарными эшелеттами. На этом уровне устройства могут быть использованы не только в качестве компонентов квантово-оптических схем, но и как отдельные устройства – однофотонные спектрометры, регистрирующие спектральную и временную информацию об исследуемых объектах. Третий уровень интеграции связан с устройствами, сочетающими в себе однофотонные источники, логические элементы и детекторы. На данный момент продемонстрировано несколько схем и подходов на основе использования квантовых точек, нанотрубок или нелинейного четырехволнового смешения, однако, все они страдают либо от низкой системной эффективности, либо от сложной масштабируемости. Работы в этом направлении могут носить прорывной характер, поэтому активно ведутся по всему миру, однако, требуют наличия высокотехнологического нанопроизводства и доступа к чистым зонам. Для коммерциализации разработок лаборатории созданы две спин-офф компании: работающая на мировом рынке квантовых технологий ООО «Сконтел», а также на отечественном рынке фотонных интегральных схем ООО «Тинфотоника».

4. *И.А.Семериков* из лаборатории «Оптика сложных квантовых систем» Физического института им. Лебедева рассказал про «Реализацию алгоритмов на ионных квантовых компьютерах». Демонстрированы квантовые алгоритмы на пятикубитном вычислителе на основе ионов иттербия. Для кодирования квантовой информации был использован квадрупольный оптический переход на длине волны 435 нм. Особенностью системы является возможность использования для кодирования кудитов – систем, с наличием более чем двух уровней в каждом ионе, что является перспективным подходом к масштабированию квантовых вычислителей. Созданный квантовый компьютер интегрирован с облачной платформой, при помощи которой квантовые алгоритмы могут запускать удаленные пользователи.

5. *Е.О.Киктенко* (Лаборатория квантовых информационных технологий, Российский квантовый центр) рассказал об алгоритмах для

квантовых компьютеров. Идея квантовых технологий состоит в использовании микроскопических объектов для решения различных практических задач, например, высокопроизводительных вычислений, защищенной передачи информации и высокоточного измерения параметров окружающей среды. Квантовые вычисления позволяют выполнять сложнейшие процедуры во множестве областей — от обработки информации и развития машинного обучения до моделирования и управления сложными системами. Команда ученых разработала алгоритм непрерывной оценки характеристик (бенчмаркинга) функционирования квантового процессора. Такой подход не требует запуска отдельных процедур и алгоритмов, использует уже доступные данные из реализованных схем и значительно экономит вычислительное время квантового процессора. Важным аспектом является независимость разрабатываемых методов для мониторинга и контроля операций от конкретной физической реализации кубитов данного процессора. Это могут быть как сверхпроводниковые технологии, так и ионы в ловушках, ультрахолодные атомы, фотоны.

6. Про разработки в области компактных фемтосекундных лазеров с диодной накачкой и их коммерческие применения рассказал *С.П.Никутин* (ООО «ФемтоВижн», Российский кванто-

вый центр) в докладе «Фемтосекундные лазерные системы на титан-сапфире с мультидиодной накачкой и их применения».

7. В докладе *В.Михайлова* (АО «ЛЛС») «Использование непрерывных одночастотных лазеров в процессах лазерного охлаждения атомов и манипуляций атомами для прецизионной спектроскопии» были предложены готовые лазерные решения на основе узкополосных полупроводниковых и волоконных лазеров. Выбор лазерного источника является одной из ключевых стадий в процессах лазерного охлаждения атомов и манипуляций атомами для прецизионной спектроскопии. Были представлены методы лазерной спектроскопии, лазерного охлаждения и манипуляции атомами с помощью одночастотного лазерного излучения. Отдельно были показаны схемы стабилизации лазерного излучения. Продемонстрировано влияние параметров лазерных источников для данных применений. Рассмотрены конструктивные особенности волоконных, полупроводниковых и твердотельных лазерных источников, их преимущества и недостатки в применении лазерного охлаждения атомов и манипуляций атомами для прецизионной спектроскопии. На основе данных материалов предложены технические решения таких производителей как Connet Laser, Faraday laser, Presilasers, UniQuanta, Oxxius и CNI.

★ ★ ★

## РГ19. «Полупроводниковая фотоника. Нанопотоника»

(26 марта, зал «Западный»)

В программу конференции под председательством главного научного сотрудника ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН д.ф.м.н. *Г.С.Соколовского* были включены следующие доклады:

1. «Терагерцевые квантово-каскадные лазеры: путь от лабораторного образца до коммерческого продукта», *Р.А.Хабибуллин* (ИСВЧПЭ РАН, Москва, МФТИ, Долгопрудный).
2. «Полупроводниковые  $AzB_5$  гетероструктуры для лазерных источников излучения и фотонных интегральных схем», *С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин* (ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С.Петербург)
3. «Квантовые каскадные лазеры с отражающими и просветляющими оптическими покрытиями», *К.А.Подгаецкий, А.В.Лобинцов, А.А.Мармалюк, М.А.Ладугин* (АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Степеляха», Москва)
4. «Мощные квантовые каскадные лазеры среднего ИК диапазона», *Г.С.Соколовский*, ФТИ им. А.Ф.Иоффе (С.Петербург).
5. «Современные полупроводниковые лазеры и их применения», *О.В.Коренченко, Г.Т.Микаелян, В.А.Панарин, С.Н.Соколов* (ООО НПП «Инжект», Саратов)

Кроме того, было запланировано обсуждение деятельности и актуальных задач РГ19 с выступлением координатора РГ19 *Г.С.Соколовского*.

1. Заседание открылось докладом *Р.А.Хабибуллина*, в котором были освещены вопросы развития квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона (ТГц-ККЛ) в России. Впервые были представлены результаты по созданию непрерывного ТГц-ККЛ с максимальной рабочей температурой около 90 К. Также были представлены первые результаты по созданию системы «терагерцовый источник» на базе ТГц-ККЛ, разрабатываемой в МФТИ по Федеральному проекту «Развитие отечественного приборостроения гражданского назначения для научных исследований».

2. Доклад *Н.А.Пихтина* был посвящен обзору основных результатов ФТИ им. А.Ф.Иоффе в разработке и исследовании мощных полупроводниковых лазерных диодов. В частности, были рассмотрены многомерные расчетные модели как для мощных Фабри-Перо лазеров, так и резонаторов на основе трехмерных фотонных кристаллов для поверхностного вывода мощного одномодового лазерного излучения. Были представлены основные результаты, связанные со стабилизацией и перестроением спектра мощного лазерного излучения: продемонстрирован диапазон перестройки 100 нм, получена непрерывная и импульсная (100 нс) мощность

12 и 45 Вт, соответственно, при ширине линии не более 0.2 нм. Рассмотрены разработанные и исследованные новые конструкции компактных импульсных источников на основе тиристорных ключей, обеспечивающие генерацию лазерных импульсов длительностью единицы наносекунд и пиковой мощностью до 30 Вт.

**3.** В докладе *К.А.Подгаецкого* были рассмотрены вопросы повышения выходной мощности квантово-каскадных лазеров путем использования оптических покрытий на гранях резонатора. Проанализированы материалы, пригодные к созданию высокоэффективных зеркал в рассматриваемом спектральном диапазоне. Рассмотрены особенности зеркал различных типов и проведены эксперименты по их формированию. Изучены квантово-каскадные лазеры без покрытий, с одним отражающим покрытием, с двумя покрытиями различных типов и проведено сравнение полученных результатов. Был сделан вывод о целесообразности использования оптических покрытий определенного типа в зависимости от внутренних параметров квантовых каскадных лазеров и особенностей их эксплуатации.

**4.** В докладе *Г.С.Соколовского* было изложено текущее состояние исследований и разработок квантово-каскадных лазеров и детекторов среднего инфракрасного диапазона, все этапы создания которых были выполнены в России. Помимо обзора современного состояния ККЛ, в докладе также были кратко описаны последние достижения ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Были продемонстрированы мощные квантово-каскадные лазеры с длиной волны 4,5 мкм, обеспечивающие мощность свыше 22 Вт, а также лазеры с рекордно высокой выходной мощностью – свыше 21 Вт на длине волны 8 мкм. Кроме того, были представлены генераторы случайных битовых последова-

тельств, основанные на квантово-каскадных лазерах и детекторах, созданные на базе структуры ККЛ. Результаты были получены в рамках проекта РФФ № 21-72-30020.

**5.** В докладе *С.Н.Соколова* сообщалось о выпускаемых ООО «НПП «Инжект» перспективных лазерных и оптоэлектронных компонентах и их применениях. Была приведена информация о новых лазерных диодных (ЛД) модулях, выпускаемых предприятием:

- для биомедицинских и технических применений – ЛД красного диапазона (6 Вт, 638 нм) с волоконным выводом;
- для спин-обменной оптической накачки благородных газов, перспективном для применения в магниторезонансной томографии ЛД на 785 нм,  $\Delta\lambda=0,1$  нм;
- о коллимированном ЛД модуле с выходной импульсной мощностью 50 кВт на 940 нм для систем накачки твердотельных лазеров.

Также были продемонстрированы практические применения технологий лазерной обработки материалов излучением серийно выпускаемого мощного полупроводникового лазера: процессы термоупрочнения, наплавки, пайки, сварки пластмасс, автоматизированной сухой выкладки ленты из термопластичного полимерного композиционного материала (ПКМ) с локальным нагревом поверхности полупроводниковым лазером PLD-6.

В заключительном слове *Г.С.Соколовский* выразил благодарность аудитории за проявленное внимание и искренний интерес к представленным докладам. Он отметил активную атмосферу в зале и живые дискуссии, возникавшие после каждого выступления, которые приходилось временами прерывать в целях соблюдения расписания.

**От имени Совета Лазерной ассоциации и Секретариата Российской технологической платформы «Фотоника» выражаю глубокую благодарность**

*Архиповой Л.Н. (ГОИ), Бабину С.А. (ИАиЭ СО РАН), Бутову О.В. (ИРЭ РАН),  
Венедиктову В.Ю. (ЛЭТИ), Град Я.А. (РКЦ), Жданову В.В. («Лазерный центр»),  
Колпакову Л.В. (МГТУ им. Н.Э.Баумана), Ладугину М.А. (НИИ «Полус» им. М.Ф.Стельмаха),  
Микаеляну Г.Т. («Лассард»), Митюрёву А.К. (ВНИИОФИ), Нанию О.Е. («Т8 НТЦ»),  
Паинову В.И. (НИИ «Полус» им. М.Ф.Стельмаха), Певчих К.Э. (АО «ЗНТЦ»), Пожару В.Э. (НТЦ УП РАН),  
Семёнову С.Л. (НЦВО РАН), Соколову А.Л. (НПК «СПП»), Соколовскому Г.С. (ФТИ РАН),  
Стешенковой Н.Н. («ЦТСС»), Субботину Е.П. (ИАиПУ ДВО РАН), Хорошеву М.В. (МИИГАиК) –*

**организаторам научно-практических конференций и круглых столов,  
проведённых в рамках XII Конгресса ТП «Фотоника» 26-29 марта 2024г.**

*Президент Лазерной ассоциации И.Б.Ковш*

**«Лазер-Информ»**  
Издание зарегистрировано в  
межведомственной комиссии  
МГСНД 26.12.91. Рег. № 281  
© Лазерная ассоциация.  
Перепечатка материалов и их  
использование в любой форме  
возможны только  
с разрешения редакции.

Отпечатано в НТИУЦ ЛАС  
Тираж 500 экз.

**Главный редактор**  
И.Б.Ковш  
**Редактор** Т.А.Микаелян  
**Ред.-издательская группа:**  
Т.Н.Васильева  
Е.Н.Макеева

**Наш адрес:**  
117342, Москва, ул. Введенского, д.3, ЛАС  
Тел: (495)333-0022 Факс: (495)334-4780  
E-mail: info@cislaser.com  
http://www.cislaser.com  
**Банковские реквизиты ЛАС:**  
р/с 40703810538000006886  
В ПАО «Сбербанк» г.Москва  
к/с 3010181040000000225  
БИК 044525225