



HOLOEXPO 2021

20–23 сентября 2021 в Геленджике Краснодарского края прошла XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2021. Конференция охватывала следующие тематики: современные тенденции развития голографии и прикладных оптических технологий; защитная голография и прикладные защитные оптические технологии; голограммная оптика и дисплеи дополненной и виртуальной реальности; компьютерная голография, голограммные и дифракционные оптические элементы, метаматериалы и нанотехнологии; объемная голография и голографические фотоматериалы; цифровая голография, оптико-голографическая обработка информации, голографическая интерферометрия, голографическая память.

Конференция HOLOEXPO, охватывающая столь уникальную область фундаментальных исследований и практических разработок как голография, привлекает внимание специалистов возможностями панорамного взгляда на современное состояние и направления развития голографии.

Большой интерес слушателей вызвал доклад международной группы исследователей (Н.В. Петров, Ж.-Б. Перро, А. Чопард, Ж.-П. Гийе, Е.Г. Циплакова, О.А. Смолянская, П. Моне, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия; Университет Бордо, Бордо, Франция, Lytid, Париж, Франция) «Алгоритмы восстановления фазы в терагерцевом диапазоне частот по разноудаленным распределениям интенсивности». В последние годы голографическая визуализация в ТГц-диапазоне частот интенсивно развивается, благодаря высокой проникающей способности ТГц-волн, а также тому, что спектры многих органических молекул и сложных полимеров взрывчатых веществ, подлежащих идентификации, лежат в этом диапазоне.

Однако низкая энергия ТГц-квантов осложняет путь к созданию эффективных голографических методов записи и восстановления изображений в терагерцевом диапазоне спектра. Авторы при практической реализации измерений используют однолучевую схему и ограниченное число элементов ТГц-оптики, поэтому при измерении в коллимированном пучке схема устойчива к вибрациям, и качество элементов не влияет на разрешающую способность изображения. В докладе были рассмотрены современные алгоритмы восстановления фазы из набора распределений интенсивности, записанных при облучении пропускающих и отражающих объектов.

На прошедшей двумя годами ранее конференции С.Г. Каленков, профессор Московского политехнического университета, докладывал о разработке метода регистрации гиперспектральных и объемных цифровых голограмм. Он показал принципы и технику регистрации цифровых гиперспектральных голограмм, когда в оптическую схему включено подвижное зер-

кало для создания серии фазово-модулированных опорных пучков. Тогда докладчик показал аналогию между объемными (толстослойными) голограммами Денисюка и цифровыми голограммами, которые регистрируются для каждого положения сканирующего зеркала. Каждую цифровую голограмму, записанную при некотором определенном смещении зеркала, можно считать зеркальным фотослоем в толстой голограмме Денисюка.

В продолжение этих работ вместе со своим соавтором (Г.С. Каленковым) С.Г. Каленков исследовал влияние шумов различной природы на качество восстановления цифровых голографических изображений. Это составило содержание их доклада «Регистрация цифровых объемных голограмм с фазово-модулированным опорным пучком». Возникновению шума при регистрации голограммы способствуют две причины: турбулентность среды, сквозь которую распространяется объектное поле по трассе объект – матрица, и вариации частоты модуляции, связанные с движением зеркала при записи голограммы. Авторы построили теоретическую модель влияния шумов на качество реконструированного изображения и создали алгоритм реконструкции изображения. Слушателям были представлены результаты цифровой реконструкции голографического изображения объекта, находящегося в слаботурбулентной воздушной среде, которые убедительно показали, что метод обладает значительной устойчивостью к таким шумам.

Знакомясь с докладами, видно, как развиваются направления использования голографических методов в промышленных технологиях. О средствах защиты цифровой маркировки товаров (двухмерных штрих-кодов и QR-кодов) с помощью кристаллограммы сообщалось в докладе группы авторов под руководством Л.В. Танина из Республики Беларусь. Предлагался алгоритм маркировки товара для его прослеживаемости в течение всего жизненного цикла. Однако, учитывая, что двухмерные штрих- и QR-коды могут быть легко скопированы и размножены, предлага-



ется матричный штрих-код помещать на защищенный от подделки и копирования материальный носитель, выпуск которого регламентирован и находится под строгим учетом. Таким образом, кристаллограммой можно защитить товар от подделки и копирования. Авторы предлагают создать в странах ЕАЭС свои национальные системы маркировки на основе единой цифровой платформы.

Доклад «Современное состояние методов прецизионного контроля сферических поверхностей. Основные проблемы и пути их решения» (Ю.С. Митрофанова, С.Б. Одинокоев, Б.Н. Сенник Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва 2 ПАО «Красногорский завод имени С.А. Зверева», Красногорск, Моск. обл.) обозначил основные проблемы метрологического обеспечения измерений радиусов кривизны сферических поверхностей в серийном оптическом производстве. Это отсутствие в Государственном реестре СИ измерительных линеек, типа Renishaw; невозможность создать опорный волновой фронт с использованием эталонных объективов в определенном интервале размеров (критическими радиусами являются выпуклые поверхности больших радиусов кривизны); рост доли оптических элементов с минимальными геометрическими параметрами (микрооптика) в общем объеме выпускаемых оптических элементов; ограничение в измерении деталей с диафрагменным числом (отношение радиуса кривизны к диаметру измеряемой детали) меньше 0,5 в промышленных интерферометрах, реализующих оптическую схему Физо.

Использовать синтезированные голограммы для метрологического контроля формы вогнутых составных зеркал телескопов в цеховых условиях в процессе их формообразования предложили авторы из АО «НПО «ГИПО», Казань (А.В. Лукин, А.Н. Мельников, А.Ф. Скочилов). В докладе «Новые возможности лазерно-голографического контроля крупноформатных зеркал ELT-телескопов на основе использования конических синтезированных голограмм» были рассмотрены возможности обсуждаемых голограмм на примере их использования при создании известных проектируемых телескопов: «Миллиметрон» – 10 м (космическая обсерватория миллиметрового и ИК-диапазона Роскосмоса, проект), James Webb Space Telescope – 6,6 м (орбитальная ИК-обсерватория NASA, предположительно заменит космический телескоп «Хаббл» и будет запущена в декабре 2021 года), Extremely Large Telescope (ELT) – 39,3 м (наземный оптический/ближний инфракрасный телескоп ESO, строится).

Высокоэффективные технологичные дифракционные микроstructures видимого диапазона представила в одноименном докладе группа российских авто-

ров (Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, Б.А. Усиевич, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза; Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Москва). Авторы показали, что в зависимости от типа микроstructures и используемых оптических материалов при отношении пространственного периода микроstructures к эффективной глубине рельефа больше 20, достижимые углы, в пределах которых дифракционная эффективность выше 0,95, лежат в широком интервале от 7,5° до 50°. Необходимость переоценки характеристик и потенциальных возможностей дифракционных микроstructures различных типов важна ввиду развития технологий их производства и расширения ассортимента оптических материалов: оптических пластмасс и специальных стекол (glass for molded optics lenses, GMOL), позволяющих тиражировать оптические элементы с микроstructuresированной поверхностью прецизионным литьем или штамповкой.

О реализации компьютерно-синтезированных голографических фильтров для когерентных дифракционных корреляторах изображений было сообщено в докладе «Когерентные дифракционные оптические системы с синтезированным комплексным импульсным откликом» (Е.Ю. Злоказов, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва).

Интересное приложение дифракционных методов в исследовании регулярных доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах показал профессор С.М. Шандаров (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники). В совместном докладе (соавторы: Е.Н. Савченков, Н.И. Буримов, А.В. Дубиков, Д.Е. Кузьмич, Д.А. Губинская, М.А. Федянина, А.Р. Ахматханов, А.А. Есин, В.Я. Шур) «Дифракционные методы исследования регулярных доменных структур (РДС) в сегнетоэлектрических кристаллах семейства ниобата и танталата лития» он показал, что в кристалле 1% MgO:LiTaO₃ можно наблюдать изотропный и анизотропный типы дифракции Брэгга на РДС для порядков с $m=1-9$ и $m=1-7$ соответственно. Были представлены результаты экспериментальных исследований зависимости проводимости, наведенной зондирующим лазерным пучком с длиной волны $\lambda=657$ нм и интенсивностью от 0,6 до 179 мВт/мм² в образце 5% MgO:LiNbO₃ с РДС.

Системы дополненной реальности (AR) и виртуальной реальности (VR) стали мейнстримом. Их востребованность в тренажеростроении направила мысль конструктора на создание голограммных дисплеев волноводного типа. Ввод и вывод излучения в волно-



вод осуществляются с помощью голограммных оптических элементов (ГОЭ). Авторы работы «Оптимизация и экспериментальное исследование коэффициента пропускания голограммного дисплея волноводного типа» (И. А. Гуськов, Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева, КНИТУ-КАИ, Казань, АО «НПО «ГИПО», Казань, ASTRON – Нидерландский Институт Радиоастрономии, Двингело, Нидерланды, Астрофизическая лаборатория Марселя, Марсель, Франция), используя возможность согласования в таких волноводах изображения со зрачком глаза наблюдателя в произвольном положении за счет разделения пучков, сделали попытку (пока расчетным путем) обойти проблему зависимости яркостных характеристик от распределения эффективности ДОЭ по полю зрения во всем рабочем спектральном диапазоне. Предполагается, что вводная и выводная решетка волноводного дисплея являются пропускающими объемно-фазовыми и записываются с помощью Ar лазера на длине волны 488 нм в слое бихромированной желатины (БХЖ).

Авторы рассчитали систему, позволяющую сохранить качество изображения и повысить равномерность дифракционной эффективности по полю зрения и по сравнительно широкому спектральному диапазону (495–595 нм). Ранее авторами была предложена методика расчета и оптимизации оптических схем подобных дисплеев, позволяющая достичь требуемого компромисса между качеством изображения и дифракционной эффективностью голограммных элементов. С помощью моделирования было показано, что коэффициент дифракционной эффективности дисплея по всему полю изменяется от 30,1 до 45,8% для средней длины волны.

Было доложено о первой демонстрации эффекта перестройки излучения лазера на основе кристалла $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}$ и пропускающей решетки Брэгга в диапазоне 100 нм, а также достижении режима одновременной генерации двух, некротных между собой длин волн. В сообщении « $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}$ лазер с решеткой Брэгга: перестройка и генерация двух длин волн» (авторы В. М. Петров, Е. Э. Попов, А. П. Погода, ИТМО, «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург) было показано, что такой лазер обладает рядом преимуществ перед Ti:Sapphire лазером и может стать ему альтернативой в системах дистанционного зондирования атмосферы. Размещение дифракционной решетки Брэгга в лазере позволило достичь диапазона перестройки 795–895 нм.

Доклад «Диагностика функциональных материалов методом динамических решеток» (А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич, Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь) иллюстрировал широкие возможности использования метода динамических решеток для

диагностики разнообразных материалов, выделения различных механизмов нелинейности и измерения нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристик (оптические восприимчивости различных порядков, термооптические коэффициенты, температуропроводность, время жизни возбужденных атомов и молекул, свободных носителей заряда и ловушечных уровней).

О возможности передачи голограмм в реальном времени по обычным каналам связи методом SSB было доложено в сообщении «Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе» (С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, И. К. Цыганов, Е. А. Дроздова, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва). Это было расширенное изложение патента RU 2707 582, где предложено оригинальное решение задачи создания виртуальной 3D-модели голографируемого объекта, передаваемой на приемный конец любого электронного канала связи, например радиоканала. Особенностью является то, что получаемая 3D-модель существенно меньше по объему передаваемой информации, чем реальная голограмма.

Было много докладов группы сотрудников и аспирантов Сергея Борисовича Одинокова, безвременный уход которого стал невосполнимой потерей для его учеников, коллег и соратников. Доклад о технологии скрытых защитных маркировок голограмм с помощью специальных идентификационных меток («Методы скрытой маркировки защитных голограмм») ознакомил с новейшими техническими приемами. Принцип работы меток основан на дифракционных и магнитооптических эффектах, особенностях оптического излучения квантовых точек, эффектах плазмонного резонанса при использовании гигантского комбинационного рассеяния света на молекулярных структурах. Идентификационные возможности таких меток позволяют обеспечить и групповую, и индивидуальную защиту голограмм. Причем возможна визуальная идентификация без привлечения машиночитаемого оборудования.

Большой пул докладов был посвящен дифракционным решеткам различного назначения и технологии их создания: от дифракционных оптического элемента для формирования вихревого пучка и бегущей решетки показателя преломления, созданной при помощи электродов бегущей волны, до процессов глубокого травления кварца при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов.

В докладе «Дифракционные решетки для спектральных приборов» (Н. К. Павлычева, КНИТУ-КАИ, Казань) были описаны основные типы дифракционных решеток, используемых в спектральных приборах: класси-

Сергей Борисович Одиноков был одним из крупнейших ученых страны в области голографии и оптоэлектроники. Он был членом научно-технического совета Лазерной ассоциации России, вел деловые программы и семинары, соединял в группы научных сотрудников и производственников. Его энергия и сила обаяния увлекали за ним в научный поиск и единомышленников, и учеников. Он умел быть щедрым и не стеснялся просить помощи за других. Почти десять лет его имя своим авторитетом укрепляло редакционную коллегию журнала ФОТОНИКА. Через его зоркий взгляд проходили

все статьи по методам и принципам построения оптико-голографических систем различного назначения. Жизнь Сергея Борисовича – яркая и насыщенная история сильного и талантливое человека. В своей научной работе Сергей Борисович сделал многое, за что он был любим друзьями и коллегами. Он был прекрасным другом и внимательным собеседником, умел увлекать за собой людей – везде отражалась его творческая кипучая натура. Его уход стал неожиданной потерей для коллектива журнала ФОТОНИКА. Остались его статьи, осталась память о нем.



ческие дифракционные решетки (плоские и вогнутые), голограммные дифракционные решетки, неклассические вогнутые дифракционные решетки с коррекцией аберраций. Доклад стал прекрасным иллюстративным обзором опубликованных в последние годы работ, посвященных усовершенствованию технологии объемно-фазовых решеток, разработке оригинальных оптических схем на их основе, а также новым типам дифракционных решеток.

Согласно официальным данным организационного комитета число участников конференции составило 75 человек. В соответствии с тематическими направлениями было представлено 38 пленарных и секционных докладов и 13 стендовых докладов. Из них:

- 16 пленарных докладов отразили наиболее важные темы в области голографии;
- 4 доклада показали возможности использования технологий защитных голограмм;
- 4 доклада были посвящены формированию изображений и отображению информации с помощью голограммной оптики;
- 5 докладов представляли методы компьютерного синтеза, метаматериалы и нанотехнологии;
- 5 докладов относились к объемной голографии и фоточувствительным материалам;
- 4 доклада касались голографической интерферометрии и оптико-голографической обработки информации.

По итогам слушаний и дискуссий определены наиболее актуальные направления в оптической голографии:

- В области защитной голографии активно исследуются методы работы с фотополимерными материалами: для оптической персонализации

с помощью компьютерно-синтезированных голограмм в условиях тиражной записи, для реализации полноцветных и цветных объемных изображений.

- В области создания дифракционных и голограммных оптических элементов (ГОЭ-ДОЭ) главной остается задача повышения дифракционной эффективности в условиях технологичности их производства. Остается актуальным исследование объемных дифракционных решеток для широкого класса задач: от реализации перестраиваемых лазерных систем до световодов устройств дополненной реальности.
- Методы цифровой голографии активно внедряются для развития оптического кодирования информации, голографического формирования 3D-изображений, создания оптических ловушек и других фотонных устройств.
- В оптической промышленности остро стоит проблема контроля качества сферических оптических поверхностей. Необходимо внесение интерферометров для решения этой задачи в государственный реестр СИ. Требуется технологический прорыв в реализации бесконтактного контроля сферических оптических поверхностей.

Н. Л. Истомина. По материалам тезисов докладов HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям.
<https://holoexpo.ru>

Этот номер журнала ФОТОНИКА готовился уже без участия Сергея Борисовича Одинокова. Отдавая дань уважения его уму, энтузиазму, организаторским способностям, мы с ним прощаемся.