



Инженеры-программисты Евгений Голиков и Александр Парыгин настраивают систему управления фемтосекундного лазерного комплекса.

Эффект контролируемого изменения характеристик многомодового излучения можно использовать и в оптической связи, и в волоконных лазерах, и в сенсорах, необходимых для умных композитных материалов или биомедицины.

Фондоотдача

Ольга КОЛЕСОВА

Ускорение света

Новую платформу для фотоники создают в Сибири



Сергей БАБИН, директор ИАиЭ СО РАН член-корреспондент РАН

Знаете ли вы, читатель, что мы видим небо синим за счет слабого рэлеевского рассеяния света, которое всегда присутствует в воздухе? Подобный эффект есть и в волоконных световодах: рассеяние происходит на неоднородностях структуры кварцевого стекла - оксида кремния. Сотрудникам лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН (ИАиЭ СО РАН) удалось доказать, что, несмотря на слабость вышеупомянутого рассеяния, при большой длине и большой мощности накачки оптического световода пассивное волокно само становится лазером, усиливая свет на комбинационных частотах. Так был создан новый тип лазеров - случайные волоконные лазеры. Их главное достоинство - максимальная простота: достаточно завести в катушку обычного пассивного световода излучение накачки, и оно с высокой эффективностью преобразуется в качественное лазерное излучение

непосредственно в волокне, причем с возможностью перестройки его частоты в широких пределах. Неудивительно, что опубликованная в 2010 году в *Natural Photonics* работа стала одной из самых цитируемых в этой области. Среди достижений организованной в 2007 году лаборатории волоконной оптики и самый длинный в мире волоконный лазер (протяженностью в 300 километров), созданный в сотрудничестве с английскими коллегами и весьма перспективный для оптической связи. В целом эти работы заложили основу нового научного направления - на стыке волоконной оптики и лазерной физики. А в 2021 году благодаря поддержанному Российским научным фондом проекту лаборатории мирового уровня «Фундаментальные задачи и новые технологии фотоники многомодовых волоконных световодов с регулярными и случайными трехмерными структурами» зашла речь о разработке новой физической платформы фотоники.

Этот грант РФФ у нас не первый: еще в 2014 году Фонд поддержал нашу лабораторию, и именно тогда мы начали работу с многомодовыми волокнами, - вспоминает руководитель проекта, заведующий лабораторией волоконной оптики, директор ИАиЭ СО РАН член-корреспондент РАН Сергей БАБИН.

Возвращение к пройденному

Впервые передачу лазерного излучения по оптическому волокну продемонстрировали американцы Элиас Снитцер и Уилл Хикс еще в 1961 году. Тогда в экспериментах, как правило, использовались многомодовые волокна (мода - стабильное состояние электромагнитного поля внутри световода, иногда ее условно определяют как траекторию, по которой распространяется свет), но оказалось, что многомодовый состав не позволяет передавать оптический сигнал на большое расстояние.

Многомодовые сигналы подвержены дисперсии и искажениям из-за взаимодействия мод, информация при передаче теряется, - поясняет С.Бабин. - Поэтому для связи стали использовать преимущественно одномодовые волокна, где пучок сохраняет свою форму

при передаче. Но, как известно, у любой медали две стороны: выяснилось, что одномодовые волокна имеют существенные ограничения по объему передаваемой информации. Более того, волоконные лазеры на их основе, которые к настоящему времени уже прочно вошли в нашу жизнь и широко применяются в промышленности, тоже имеют ряд ограничений по предельным характеристикам. И в последнее десятилетие в волоконной оптике вновь появилась тенденция к использованию многомодовых волокон. Но надо было научиться с ними работать: формировать и обрабатывать сложные световые пучки, состоящие из многих мод. Параллельно в оптической связи возникла идея увеличения пропускной способности за счет применения многосердцевидных волокон (специфический тип многомодовых волокон, где моды пространственно распределены по разным сердцевинам). Словом, хорошо забытые многомодовые и новые многосердцевидные волокна привлекли внимание ученых. В этот момент лаборатория и получила свой первый грант РФФ.

В рамках реализации проекта развернулись работы по созданию волоконных ВКР-лазеров (ВКР - вынужденное комбинационное рассеяние) на основе многомодовых волокон. В качестве простых и дешевых источников излучения брались полупроводниковые диоды, позволяющие эффективно преобразовывать электрический сигнал в оптический. Основным недостатком оставалось очень низкое качество пучка. Но в ходе экспериментов удалось понять: если низкокачественный многомодовый пучок передать по волокну достаточной длины, то он преобразуется в качественный пучок ВКР-лазера. Это и был старт нового направления.

За время реализации первого проекта мы существенно продвинулись в создании таких лазеров и начали работать над модификацией многомодовых волокон с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, позволяющих менять показатель преломления, причем в заданной точке световода, тем самым рисуя 3D-структуры, помогающие управлять пучком. Это уже был выход на новую физику, - рассказывает Сергей Алексеевич.

Сигнал под контролем

Собственно говоря, основная фундаментальная идея начатого в этом году проекта - модифицировать многомодовые световоды за счет индуцированных фемтосекундным излучением изменений показателя преломления и формирования внутри волокна объемных структур регулярного и случайного характера.

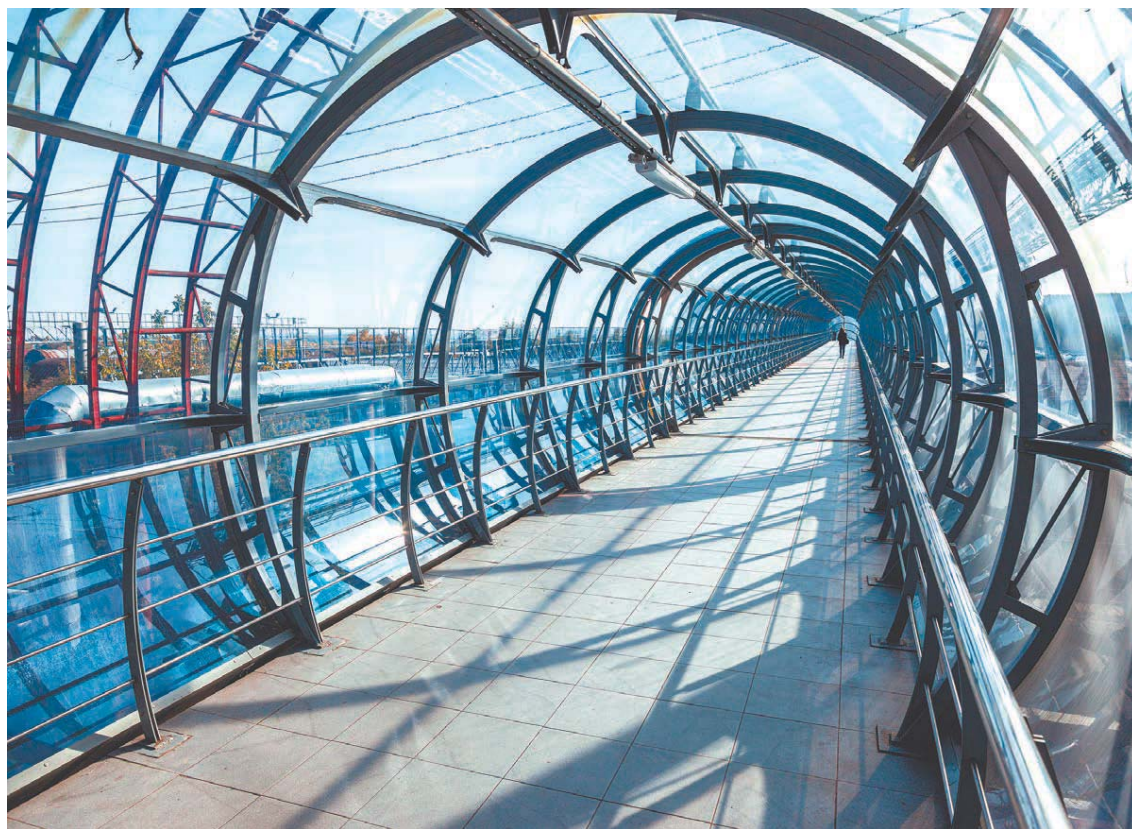
Мы поняли, что это новая возможность не просто менять свойства многомодовых и многосердцевидных световодов, но и эффективно управлять светом. Упомянутые 3D-структуры показателя преломления позволяют формировать световые пучки заданной формы, преобразовывать их при передаче как в новые спектральные диапазоны, так и в различные пространственные конфигурации мод. Словом, весь процесс становится управляемым. Если раньше по многомодовым волокнам можно было передать какую-то сформиро-

ванную пространственно-временную структуру лишь на небольшое расстояние, потому что оптический сигнал очень быстро портился, то сейчас наши исследования дают возможность изначально формировать сигнал требуемым образом, контролировать его по мере распространения и передавать стабильные пространственно-временные структуры по многомодовым волокнам на дальние расстояния. Эти новые фундаментальные знания ведут к новым фотонным технологиям: вышеупомянутый эффект контролируемого изменения характеристик многомодового излучения можно использовать и в оптической связи, и в волоконных лазерах, и в сенсорах, необходимых для умных композитных материалов или биомедицины, - комментирует руководитель проекта.

Волоконные сенсоры основаны на том, что распространяемый ими свет очень чувствителен к физическим параметрам окружающей среды и внешним воздействиям. Сейчас они активно используются во всех областях, где нужно следить, чтобы не произошло деформаций конструкции, сдвигов, вибраций, например, в нефтепроводах, при строительстве мостов и высотных зданий. А с помощью сложных 3D-структур, предлагаемых сибиряками, можно анализировать не только деформацию, растяжение, температуру или давление, но и более широкий спектр внешних воздействий, например, выявить направление деформации или восстановить форму волокна, уложенного вдоль какого-то объекта. Это дает возможность, скажем, поместить волокно в хирургический катетер и восстанавливать его положение и форму в момент операции непосредственно в теле человека. Следовательно, создание новой волоконной платформы для фотоники открывает блестящие перспективы практических применений. Лидерство новосибирской лаборатории в области структурированных волокон признают и зарубежные ученые, с которыми - в частности, с итальянцами, китайцами, индийцами, французами, немцами - активно развивается сотрудничество. Вместе с китайскими коллегами получен международный грант РФФИ на изучение многомодовых и многосердцевинных волокон. Однако основной плюс проекта, о котором идет речь, - быстрый вывод фундаментальных разработок в российскую промышленность.

Короткой дорогой

- Скажу честно, если бы не грант, фундаментальные исследования мы бы, конечно, продолжали, но не сильно думали о внедрении их результатов прямо сейчас, - улыбается Сергей Алексеевич. - А поддержка Российского научного фонда не просто позволяет, но даже предусматривает, чтобы исследования и работы с индустриальными партнерами шли почти параллельно. Так, многосердцевинное волокно со сформированными требуемым образом 3D-структурами можно клеить в композитный материал, а затем восстановить объемную форму одного или нескольких таких волокон, причем в режиме реального времени. С помощью индустриальных партнеров мы уже начали



проекты по встраиванию волокон в элементы авиакосмической техники. Огромное поле приложений открывается и в биомедицине: можно восстановить в конкретный момент движение или форму хирургического инструмента. Здесь у нас пока идут фундаментальные исследования с Университетом Назарбаева (Казахстан) и итальянскими коллегами.

Долго искать индустриальных партнеров Института автоматизации и электротехники не пришлось: работало давно налаженное сотрудничество с предприятиями пермского промыш-

разработка еще одного прибора - специализированного устройства опроса сенсорных систем на основе волоконно-оптических структур. Это устройство будет собирать информацию со всех встроенных в волокно датчиков и анализировать ее. ИАиЭ СО РАН также развивает сотрудничество с другими предприятиями и организациями на Урале, Дальнем Востоке и по России в целом, но и земляков не забывает. Активно идут работы с СибНИА им. С.А. Чаплыгина по использованию волоконных датчиков в авиации. Структурированные волокна планируется встраивать в

Академический spin-off

Конечно, план реализации проекта подробно расписан по годам. Однако в науке чисто поступательного развития не бывает: возникает много новых вопросов, возможностей, дорожек в смежные области. Грант РФФИ ставит и организационные задачи: за годы реализации проекта в институте планируется создать две новые молодежные лаборатории.

- Видно, что область исследований очень интересная, требует притока свежих сил, - убежден директор ИАиЭ СО РАН. - Так, тематика трехмерных сенсоров явно

другая новая лаборатория создана в Новосибирском государственном университете молодым доктором наук Дмитрием Чуркиным. Но на это нам потребовалось 12 лет, а грант дает возможность сократить время организации в три раза, закупив необходимое для новых лабораторий оборудование, например, станцию для обработки многомодовых волокон или современный фемтосекундный лазер для записи структур показателя преломления.

Молодые кадры ИАиЭ СО РАН традиционно набирает на физическом факультете НГУ, где преподают С.Бабин и его коллеги. Погрузить студентов и аспирантов в проблемы современной науки помогает ставший традиционным международный семинар по волоконным лазерам, который институт проводит раз в два года, сопровождая его молодежной школой-конференцией «Оптические и информационные технологии».

- Поддержка РФФИ и здесь дала возможность развернуться, - добавляет С.Бабин. - В этом году мы уже успели провести совместно с НГУ масштабную международную школу по нелинейной фотонике, дополнив «фотонную» тематику, развиваемую в НГУ в рамках мегагрантов Сергея Турицына и Стефана Вабница, структурированием многомодовых волокон и их использованием для лазеров и сенсоров нового типа. Мой основной принцип состоит в том, чтобы сразу давать молодым задач для самостоятельного решения. По мере работы способный человек набирает квалификацию и выходит на следующий уровень. Наша быстро развивающаяся область знаний требует именно такого подхода. ■

Структурированные волокна планируется встраивать в умные материалы для более точного анализа состояния несущих поверхностей, ведь любая деформация может стать причиной катастрофы.

ленного кластера «Фотоника», участником которого является институт, в частности, с Пермской научно-производственной приборостроительной компанией и компанией «Инверсия-Сенсор». Последняя будет производить сенсорные системы на основе как обычных волокон с брэгговскими решетками, так и многосердцевинных волокон со встроенными трехмерными структурами, которые позволяют анализировать форму объектов. Вместе с приборостроительной компанией начата

умные материалы для более точного анализа состояния несущих поверхностей, ведь в этой отрасли любая деформация может стать причиной катастрофы. Словом, запросов на новые фотонные технологии настолько много, что сотрудники института даже не успевают вовремя на них реагировать, - нужно специально заниматься инженерной составляющей всех будущих сенсоров и лазеров. Для решения этих и других похожих задач в институте создается инженерно-технологический центр.

заслуживает создания отдельной лаборатории. Другое направление для молодежных исследований - многомодовые импульсные системы формирования, передачи и анализа сигналов со сжатыми пространственно-временными структурами. Надо сказать, у нас уже был удачный опыт создания, если так можно выразиться, научных spin-off. На базе нашей лаборатории сформирована лаборатория оптических сенсорных систем в ИАиЭ под руководством молодого доктора наук Сергея Кабулова,