

ИАиЭ в XXI веке - УСПЕХИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ (опыт развития новой тематики)

С. А. БАБИН



На рубеже веков и тысячелетий, когда во многих комнатах Института за чаем не утихали споры о том, когда же на самом деле начинается XXI век (в 2000 или 2001 г.?), в группе перестраиваемых лазеров и спектроскопии плазмы (01-4) лаборатории С.Г. Раутиана разгорелись бурные обсуждения направлений будущих исследований. Уж очень хотелось в новом тысячелетии начать новое дело!

Не секрет, что основой тематики нашей группы, исторически вышедшей «из недр» группы мощных ионных лазеров В. И. Доница, был «неисчерпаемый» аргоновый лазер. Он использовался и как объект исследований по спектроскопии плазмы, квинтэссенцией которых стало открытие кулоновского уширения нелинейных резонансов и создание ионного комбинационного (или ВКР-) лазера, и как источник синего-зеленого и УФ-излучения для научных исследований (накачка перестраиваемых лазеров на красителях и титан-сапфире), а также для практического применения (фотодинамическая терапия, радужная голография, лазерный дисплей, стереолитография).

В 2000 г. наши научные и прикладные работы по аргоновому лазеру достигли своего пика в прямом и в переносном смысле: был обнаружен и объяснен резкий пик мощности генерации комбинационного ионного лазера в центре линии вместо провала, наблюдавшегося ранее в ВКР-лазерах на незаряженных частицах. Кроме того, был успешно выполнен прикладной контракт с Институтом Макса Планка космической физики (Гархинг, Германия), в рамках которого нам удалось создать самый мощный в мире (больше 12 Вт!) одночастотный лазер на красителе с накачкой аргоновым лазером, ставший прототипом лазерной системы PARSEC для возбуждения искусственной лазерной звезды по проекту VLT (Very Large Telescope) в Чили.

Как учат нас чемпионы спорта, уходить (или менять род занятий) надо на пике успеха... Без сомнения, наша деятельность по нелинейной спектроскопии плазмы и применениям аргонового лазера могла бы еще долго приносить свои плоды в виде публикаций и контрактов (или хозяйственных договоров, как тогда говорили) и как минимум обеспечивать нам относительно безбедное существование и высокий рейтинг в Институте (в том же 2000 г. мы впервые заняли топ-позицию в рейтинге подразделений института и за все последующие годы только дважды уступали «пальму первенства» лаборатории О.И.Потатуркина). И такая точка зрения в группе, несомненно, была, а временами даже доминировала. Однако людям активным очень хотелось заняться более современным направлением. В результате долгих обсуждений решение сменить тематику все же взяло верх. Но какую выбрать?

Смена тематики всегда сложное дело, а для экспериментальной группы - вдвойне, поскольку без создания адекватной экспериментальной базы отставание всегда неизбежно. Большую роль при выборе играло стремление «пристроить к делу» имеющееся оборудование. Так, одним из обсуждавшихся в качестве новых направлений было охлаждение атомов и «атомный лазер», и в этом случае почти вся наработанная база нелинейной спектроскопии вполне бы пригодилась. В условиях трудных 1990-х гг. мы привыкли надеяться только на собственные силы, т. е. самостоятельно зарабатывать и тратить деньги на «удовольствия», самым приятным (и дорогим!) из которых была наука. Новые эксперименты всегда требуют затрат, и хорошо, когда научные изыскания хотя бы частично приводят в обозримом будущем к созданию нового «ликвидного» продукта или технологии. По этому параметру проект по охлаждению атомов не проходил, несмотря на очень высокий научный потенциал: слишком уж далекой была перспектива зарабатывания денег на его результатах. (Как показала жизнь, «свято место пусто не бывает», и аналогичной деятельностью в ИАиЭ позже занялся П. Л. Чаповский, которому удалось создать магнито-оптическую ловушку и успешно развивать это направление без значительных внешних финансовых вложений и организационной поддержки. Его энтузиазму и изобретательности можно только позавидовать!)

Побывав (и поработав) в 1990-х за границей, мы увидели, как все устроено «там»: выбор направления исследований зачастую определяется практическими задачами, а в процессе достижения желаемого прикладного результата развиваются и фундаментальные науки (гораздо раньше это показал советский опыт создания атомной и водородной бомб, но про

него как-то подзабыли). На международных научных конференциях нормой становится проведение круглых столов с представителями hi-tech бизнеса, анализ рынка и т. д. Помнится, большое впечатление в 1997-1999 гг. при поездках на российские и международные конференции произвели доклады наших соотечественников Е. М. Дианова (ИЦВО при ИОФ РАН) и В. П. Гапонцева (IPG Photonics, США) о научных и практических достижениях в области волоконных лазеров. В то время их параметры были еще далеки от мировых рекордов, и они значительно уступали традиционным лазерам, в частности, твердотельным. Но поражали возможные перспективы, о которых увлеченно говорили докладчики, и в первую очередь, возможность создания лазеров, состоящих только из волоконных элементов, что с практической точки зрения означало революцию в лазерной технике. Решающим этапом на этом пути стало применение волоконных брэгговских решеток в качестве зеркал резонатора волоконных лазеров, которые не надо ни юстировать, ни протирать (и что же теперь делать со спиртом «для протирки оптических осей»?!). И, как предсказывали большевики, «революция свершилась», причем уже в течение первых пяти лет нового тысячелетия (приятно, что не без нашего участия!), и сейчас мало кто сомневается, что в ближайшем будущем волоконные лазеры вытеснят с рынка значительную часть традиционных лазеров.

Помимо «лазерного» интереса, 1999-2000 гг. также поражали бурным развитием волоконных технологий для оптической связи вообще и высокоскоростного Интернета в частности. Это «пахло» «быстрыми» деньгами, что во многом и определило наш выбор. Большую «просветительскую» работу о перспективах волоконно-оптической связи провел тогда и давно работающий на Западе С. К. Турицын (за что ему отдельное спасибо!). Был написан проект и получено стартовое финансирование (seed investment) от западной компании на разработку волоконных компонент для высокоскоростных линий связи. Но в 2001 г. инвестиции в высокоскоростной Интернет на мировых рынках резко упали (лопнул очередной «мыльный пузырь»), и с таким трудом полученное нами первичное финансирование прекратилось, не успев толком начаться. И снова пришлось вернуться к проверенному способу - самофинансированию, т. е., как Мюнхгаузену, вытаскивать себя за волосы из болота... Только теперь речь шла не о выживании, а о развитии, что гораздо сложнее. Но на те самые «первые» деньги нам удалось получить результаты, которые уже можно было продавать. Пошли

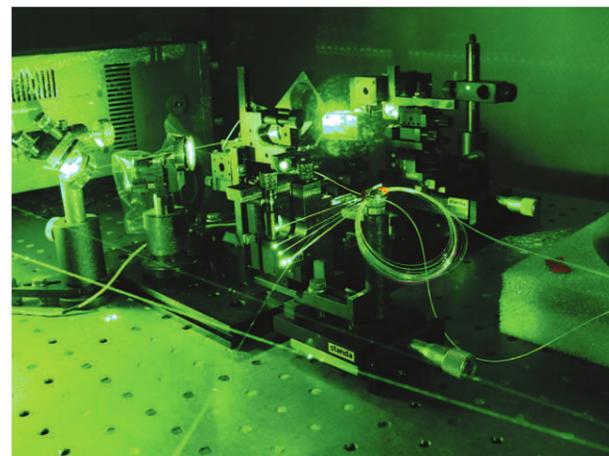
первые контракты на волоконные системы, прибыль от которых вкладывалась в развитие. Фактически «с нуля» была создана современная волоконно-оптическая лаборатория с передовым технологическим и измерительным оборудованием. И здесь немаловажным оказался тот факт, что наш «старина» аргоновый лазер смог послужить и в новом деле: уменьшение длины волны вдвое (до 244 нм) позволило использовать его для фотомодификации волокон, в частности, в технологии записи волоконных брэгговских решеток.

А теперь кратко об основных направлениях исследований нашей группы, сложившихся за прошедшее время, полученных результатах и перспективах развития волоконной оптики в ИАиЭ. Тематика работ группы в настоящее время включает *волоконные лазеры и усилители, волоконные брэгговские решетки (ВБР) и сенсоры на их основе*, основные приложения которых - наука, биомедицина, оптическая связь и промышленность (нефтегазовая и угольная).

Волоконные лазеры это новый тип лазеров, который имеет принципиальные преимущества перед традиционными. В них активным элементом является само волокно, а размер активной сердцевины (легированной ионами Nd, Yb, Er) составляет всего несколько микрон. Такой «сверхтонкий» активный элемент позволяет генерировать излучение очень *большой мощности* (практически без охлаждения) и очень *высокого качества*, которое может без потерь распространяться по обычному волокну на десятки километров. У такой системы также *уникальные габариты*: даже при очень большой длине лазера его можно намотать на катушку (как леску на катушку для удочки-спиннинга). Кроме того, с помощью волоконных лазеров можно получать практически *любую длину волны* в ближнем ИК-диапазоне. Излучение отдельных линий активных ионов Nd, Er и Yb легко преобразовать в нужный диапазон спектра с помощью нелинейных эффектов: в стеклянном волокне любой, даже слабый, нелинейный процесс может усилиться, поскольку длина волокна может быть сколь угодно большой. Например, многокаскадные волоконные лазеры с накачкой Yb-лазерами, работающие на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в длинном (~1 км) волокне, позволяют перестраивать длину излучения в области 1.11.7 мкм.

На этом пути в нашей группе достигнуты большие успехи: в сотрудничестве с ИЦВО экспериментально исследован ВКР-лазер на фосфосиликатном стекле, построена адекватная модель, описывающая его энергетические

и спектральные характеристики, предложены оптимальные схемы, реализована перестройка частоты генерации. В 2006 г. по этой теме Д. В. Чуркин блестяще защитил кандидатскую диссертацию, кстати, первую по волоконной оптике в ИАиЭ. Хорошим подспорьем при постановке тонких спектроскопических экспериментов послужил наш опыт экспериментальных исследований по ионным ВКР-лазерам и нелинейной спектроскопии плазмы, а также подготовка спектроскопической школы С. Г. Раутиана - А. М. Шалагина. Кроме того, выработанными годами стиль тесного взаимодействия с теоретиками (практически все результаты по нелинейной спектроскопии плазмы были получены совместно с Д. А. Шапиро и его учениками) дал нам несомненные преимущества перед конкурентами. С началом исследований в новой области сложилась и новая коллаборация: к месту пришли опыт и наработки по нелинейной физике Е. В. Подвилова (руководитель тематической группы 11-3). В частности, им было найдено очень красивое решение задачи об уширении спектра ВКР-лазеров из-за четырехволнового взаимодействия лазерных мод, построенное на основе кинетической теории взаимодействия волн. (Последняя развивалась еще в 1980-е годы в



Иттербиевый лазер с удвоением частоты генерации и волоконный ВКР-лазер с диодной накачкой.

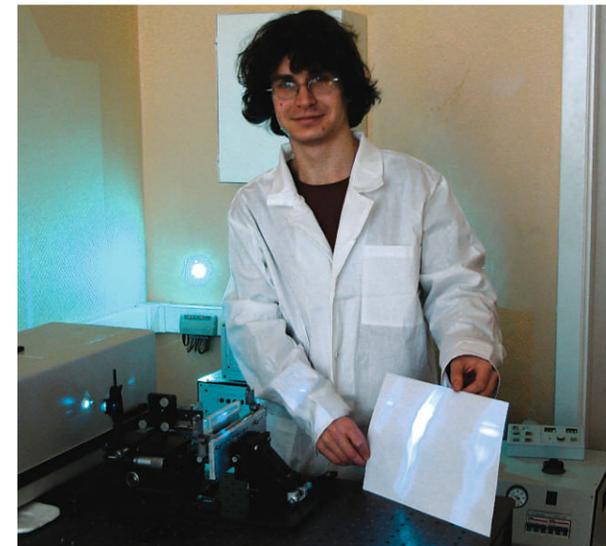
лаборатории В. С. Львова для описания волновой турбулентности.) В результате мы стали мировыми лидерами в изучении физики волоконных ВКР-лазеров, о чем свидетельствуют многочисленные доклады на ведущих волоконно-оптических конференциях (OFC, ECOC, OAA, LPHYS). Полученные научные результаты почти сразу же реализованы в уникальном практическом устройстве перестраиваемом ВКР-лазере, созданном по заказу южно-корейской фирмы EO Technics.

Заняв передовые позиции в физике и технике ВКР-лазеров, мы обратились к лазерам на легированном волокне, в частности, иттербиевым и эрбиевым. Поскольку конкуренция в этой области очень высока, мы нашли свою «нишу» в реализации и исследовании новых режимов генерации, в «тонком» управлении выходными характеристиками и получении уникальных параметров, где опять-таки пригодился весь наш предыдущий «лазерный» опыт. В частности, нами впервые осуществлено эффективное внутривибраторное удвоение частоты генерации волоконного лазера, реализованы волоконные лазеры с большим диапазоном перестройки частоты, узким спектром и высокой стабильностью выходной мощности, получен одночастотный режим, начат проект по генерации мощных фемтосекундных импульсов. Успех в этом направлении во многом достигнут благодаря усилиям С. И. Каблукова и руководимых им студентов. Наша сверхзадача здесь - создать в ближайшие годы мощный волоконный УФ-лазер с генерацией в области 244 нм, который позволит отправить «на заслуженный отдых» УФ-аргоновый лазер. Тогда основной элемент волоконных лазеров - брэгговские решетки в волокне - можно будет записать с помощью волоконного же лазера, т. е. он начнет «производить себе подобных».

Волоконные брэгговские решетки - один из базовых «кирпичиков» волоконной оптики, из которых, как в детском конструкторе, можно строить сложные системы из волоконных компонент. Если в обычных лазерных системах оптические элементы представляют собой объемные стеклянные пластинки, кубики и т.п., которые отражают, поворачивают, делят световые лучи, распространяющиеся по воздуху, то в волоконных лазерах/системах все эти элементы можно разместить (интегрировать) внутри оптоволокна, так что свет «на воздух» (за пределы волокна) не выйдет. Волоконные брэгговские решетки представляют собой отрезок волокна с периодическим изменением показателя преломления («штрихами»), записанным непосредственно в сердцевине оптоволокна с помощью УФ-лазера. Период моду-

ляции определяет резонансную (брэгговскую) длину волны света, которая отражается от такой решетки. Из ВБР можно изготавливать зеркала, фильтры, делители и т.д., причем непосредственно в волокне. В частности, наиболее простой вариант волоконного лазера состоит из куска активного волокна, на концах которого записаны ВБР. Остается только подключить к волокну многомодовый лазерный диод накачки - и волоконный лазер готов! Другое важное приложение ВБР - это узкополосные фильтры и компенсаторы дисперсии для оптической связи, а также оптоволоконные сенсоры промышленного назначения. Нами освоена технология записи брэгговских решеток с использованием разработанного УФ-аргонового лазера, реализованы новые экспериментальные методы формирования гладких спектров решеток и перестройки их резонансной частоты, разработан метод записи решеток со сдвигом фазы, изготовлены специальные решетки и на их основе собраны волоконные лазеры, в том числе перестраиваемые и одночастотные с распределенной обратной связью, спектральные фильтры и датчики для коммуникационных и сенсорных систем. УФ-лазер и технология записи развиваются усилиями бывших студентов, а ныне молодых сотрудников А. А. Власова и С. Р. Абдуллиной. Неоценимый вклад в виде компьютерных программ решения прямой и обратной задач рассеяния внесли наши смежники по лаборатории фотоники - Д. А. Шапиро и О. В. Белай. В ближайших планах - автоматизация процесса записи и создание (полу)промышленной установки, позволяющей с высокой точностью и производительностью записывать относительно простые решетки с произвольной брэгговской длиной волны. Ну и конечно, на очереди новые научные задачи: изучение физики резонаторов на основе ВБР со сдвигом фазы, получение сверхузких спектральных резонансов и их применение для сужения спектра одночастотных волоконных лазеров. Уже начат совместный проект с ИЛФ СО РАН, в котором предполагается сужение ширины линии генерации с ~10 кГц до сотен герц. Кроме того, в стадии разработки находится методика записи решеток в волокне с увеличенным диаметром сердцевины и многосердцевинном волокне и их применение в качестве зеркал мощных волоконных лазеров, а также синтез так называемых чирпованных решеток для фемтосекундных лазеров и многое-многое другое...

Сенсоры на основе ВБР имеют очень простой принцип работы: при изменении оптической длины решетки из-за деформаций или



Д. В. Чуркин

изменения температуры ее резонансная длина волны меняется. Соответственно, по смещению пика отражения можно с высокой точностью диагностировать внешние воздействия: изменения температуры, давления, деформации. Поскольку носителем информации в этом случае выступает свет, распространяющийся по оптоволокну, то такие датчики имеют принципиальные преимущества перед традиционными: отсутствие электричества позволяет использовать их в пожаро- и взрывоопасных условиях, осуществлять дистанционный контроль по оптоволокну (до ~10 км). Кроме того, они устойчивы к электромагнитным помехам и коррозии. Аналогично линиям оптической связи со спектральным уплотнением, можно на порядок увеличить число датчиков (измерительных каналов) за счет спектрального мультиплексирования. Оптоволоконные системы дистанционного контроля пространственного распределения температуры/деформаций востребованы не только за рубежом, но и в России, в частности, в добывающих отраслях промышленности: для контроля элементов шахтных конвейеров, газо- и нефтепроводов и скважин (а также давления и температуры нефти в скважинах) с шагом дискретизации от нескольких сантиметров до десятков метров. На этом пути мы имеем следующие достижения: разработана схема декодирования спектральной информации на основе относительно простого и дешевого эрбиевого перестраиваемого лазера (вместо дорогого оптического анализатора спектра), которая позволяет увеличить число датчиков в одном волокне до ~100 и более. В порядке разработки системы реализуются совместные проекты с американскими фирмами Kuster Co. и Obalon LLC. Кроме того, совместно с Научным центром

волоконной оптики РАН (Москва) и Институтом автоматизации и процессов управления ДВО РАН (Владивосток) разрабатываются новые элементы волоконных рефлектометров, применяемые в мониторинге строительных конструкций и охранных системах. В ближайшей перспективе - установка волоконных сенсоров на действующих промышленных предприятиях.

Быстрая реализация действующих образцов и законченных приборов стала возможной благодаря высокой квалификации и опыту сотрудников инженерной группы (М. А. Рыбаков, Д. М. Афанасьев, С. Г. Игнатович, А. В. Рязанов) и экономиста О. А. Шамовой. Мы также активно вовлекаем в прикладные проекты и студентов, которые на конкретном деле учатся волоконной оптике, причем фундаментальным и технологическим основам одновременно. К старшим курсам у каждого студента есть свое поле деятельности, за которое он полностью отвечает. К примеру, студенты А. Е. Исмагулов, В. А. Акулов, И. С. Шелемба недавно самостоятельно выполнили законченные разработки, практически готовые к внедрению.

Таким образом, за пять лет только за счет внутренних ресурсов проделан путь от создания экспериментальной базы нового направления - волоконной оптики - до первых практических результатов. К упомянутым выше проектам и контрактам можно добавить текущие интеграционные проекты с ИВТ и ИТПМ СО РАН, совместные работы с зарубежными научными учреждениями, и в первую очередь с Макс Планк Институтом квантовой оптики (Гархинг, Германия), где временно работает наш сотрудник А. А. Аполонский, а также университетами Астон (Великобритания), Монса (Бельгия), Дзилинским университетом и Институтом физики, оптики и точной механики (Китай); совместный проект с канадско-сингапурской фирмой Zecotek Medical Systems Inc.; гранты российских и зарубежных фондов и организаций (Администрация НСО, Фонд содействия российской науке, Фонд содействия развитию малых форм предприятий, Минобрнауки, CRDF, EOARD). Затраченные усилия и достигнутый уровень замечены дирекцией ИАиЭ и руководством СО РАН - при их поддержке закупается единственная в СО РАН (а по некоторым опциям, и в России) станция обработки и тестирования оптоволоконных компонент, которая будет функционировать в рамках Центра коллективного пользования ИАиЭ.

Отработанная на практике инновационная цепочка «идея - научные исследования -

маркетинг - бизнес-план - формирование команды - источники финансирования - создание инновационной бизнес-структуры - производство и реализация на рынке нового продукта (технологии, лицензии, услуги)» положена в основу создаваемого на базе Института при поддержке европейской программы EuropeAid «Наука и коммерциализация технологий» Центра коммерциализации волоконно-оптических и лазерных технологий. Он объединит научные коллективы нашей группы и лаборатории лазерных систем НГУ (руководитель С. М. Кобцев, с которым мы давно и успешно сотрудничаем), а также малые предприятия, специализирующиеся на внедрении конкретных научных разработок: ЗАО «Техноскан», ООО «Инверсия-Файбер», ООО «Инверсия-Лазеры», ООО «Инверсия-Сенсор», ООО «НовоЛазер». (Два последних созданы в 2005 г. в рамках известной программы СТАРТ.) За счет средств, заработанных малыми предприятиями, построено новое здание - пристройка к корпусу-модулю ИАиЭ. Следует отметить, что это последний проект Ю. М. Дмитриева - замечательного организатора и, пожалуй, лучшего главного инженера ИАиЭ за все 50 лет его истории; он в буквальном смысле построил Институт. В этом году здание сдается в эксплуатацию и его уже «обживают» структуры Центра.

На примере нашей группы и других активно работающих лабораторий Института, имеющих тесные связи с малыми предприятиями, можно сказать, что пока «наверху» еще только принимаются решения о развитии инноваций в России, у нас инновационная инфраструктура уже создана и успешно функционирует. И на данном этапе даже важнее, чтобы эти принятые решения не помешали и не разрушили уже созданное... Пожалуй, единственное, что требует определенной настройки (достаточно тонкой!) - это приведение разнородных видов деятельности в Институте и вокруг него к общей «платформе» на основе единых (открытых и легальных) правил, выгодных как для развития науки, так и для малых инновационных компаний. И нет никаких сомнений, что удельный вес волоконной оптики в Институте в будущем будет только возрастать (и это уже заметно в деятельности других лабораторий), гармонично сочетаясь с его информационно-оптическим профилем. А мы всегда открыты для сотрудничества и с лабораториями, и с инновационными компаниями!



Д. В. Чуркин



Д. М. Афанасьев



С. Р. Абдуллина



С. И. Каблуков



На фоне нового здания Центра коммерциализации волоконно-оптических и лазерных технологий (слева направо): В. А. Акулов, С. И. Каблуков, О. А. Шамова, А. В. Рязанов, С. А. Бабин, Д. М. Афанасьев, М. А. Рыбаков, С. Г. Игнатович, Д. В. Чуркин, А. А. Власов.