

нируется создание лидарной сети СНГ, призванной к тому же объединить сети Европы и Юго-Восточной Азии, включая Японию.

Большое внимание белорусские ученые и специалисты всегда уделяли и уделяют вопросам различных применений лазерного излучения. Это, прежде всего, разработка и создание методов, приборов и установок по использованию лазеров в научных исследованиях, в промышленности и строительстве, в военном деле и других областях.

Сотрудниками Института физики и ряда медицинских учреждений республики выполнен большой комплекс исследований по выяснению особенностей терапевтического и биостимулирующего действия лазерного излучения различных длин волн и интенсивностей. На этой основе разработана и выпущена ОКБ "Аксикон" и фирмой "Люзар" целая серия терапевтических лазерных установок, используемых для лечения желтухи у новорожденных, кожных, внутриполостных и других заболеваний практически во всех клиниках и больницах республики.

Белорусскими физиками и медиками совместно с российскими и украинскими коллегами выполнены глубокие исследования механизмов и характеристик действия лазерного излучения на ткани глаз. Полученные результаты легли в основу разработки ряда аппаратов для лечения глазных заболеваний и использованы при создании норм безопасности при работе с лазерами, принятых в СССР незадолго до его распада. В настоящее время ГП ЛЭМТ с участием Института физики созданы и аттестованы для клинических применений промышленные образцы лазерных транссклерального и других офтальмокоагуляторов.

В ЛЭМТ также выполнены разработки и организован выпуск ряда других лазерных приборов и установок различного медицинского назначения, а также лазерные дальномеры, уровни, триангуляционные измерители перемещений, прицелы и т.п.

В КБТМ-ОМО концерна "Планар" и ОАО "Пеленг" успешно применяются лазеры в продукции, которая пользуется значительным спросом за рубежом. На "Планаре" лазеры широко применяются в разрабатываемых и выпускаемых комплексах по изготовлению интегральных схем, на "Пеленге" успешно решаются проблемы использования лазеров в военной технике (лазерные целеуказатели и прицелы, приборы наведения и т.п.).

В целом ряде организаций республики разрабатываются и используются лазерные технологии обработки различных материалов. В ФТИ, ИМАФ, ОКБ "Аксикон" совместно с ИФ созданы автоматизированные лазерные установки для программной резки различных материалов, прошивки отверстий и упрочнения деталей; в ИФ, ОКБ "Аксикон" и ГГУ разрабатываются технологии и аппаратура для сварки разнородных материалов и зубного протезирования; в ИПО — для металлизации ферритовых изделий; в ИПФП и концерне "Планар" — для обработки сверхтвердых материалов, включая алмазы. В ЛОТИС-ТИИ созданы образцы установок лазерной объемной гравировки и лазерной маркировки проводов в тефлоновой изоляции.

В Институте физики развиты технологии и создана установка для лазерной очистки поверхностей художественных произведений из металлов, камня, дерева,

пергамента. В рамках проекта МНТЦ установка поставлена в Грецию для очистки античных скульптур и других памятников античной культуры.

Разработаны и выпускаются по заявкам различных организаций Белоруссии, России, Японии, Германии и других стран целая гамма YAG: Nd-лазеров, генерирующих излучение на различных частотах, включая пятую гармонику; плавно перестраиваемые лазеры на сапфире с титаном и форстерите; эрбиевые и гольмиевые лазеры, различные нелинейно-оптические преобразователи частоты; двухимпульсные лазеры с регулируемым временем между импульсами, а также различные элементы лазерной техники. Важными особенностями большинства выпускаемых лазерных источников являются возможность их питания от однофазной сети переменного тока, наличие блока автономного охлаждения рабочего элемента, сравнительно малые габариты, простота управления с помощью выносного пульта и (или) компьютера, высокая стабильность параметра генерируемого излучения. При этом они способны обеспечить сравнительно высокие энергии в импульсах излучения (сотни и десятки миллиджоулей) в широких областях значений других параметров (ЛОТИС-ТИИ, СОЛАР-ТИИ, СОЛАР-ЛС, ЛЭМТ, ОКБ "Аксикон").

В заключение хочется пожелать, чтобы сотрудничество между белорусскими и российскими организациями в области лазерной физики в дальнейшем развивалось и крепло более интенсивно, чем в настоящее время. Уверен, что это было бы взаимно полезным.

Список литературы

1. Степанов Б И, Самсон А М *Изв. АН БССР* (4) 45 (1961)
2. Степанов Б И *Докл. АН БССР* 5 (12) 514 (1961)
3. Степанов Б И, Хапалюк А П *Изв. АН БССР* (4) 132 (1961)
4. Степанов Б И, Грибковский В П *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 24 (5) 534 (1960)
5. Грибковский В П, Степанов Б И *Опт. и спектроск.* 8 (2) 224 (1960)
6. Грибковский В П "Нелинейные оптические явления и границы применимости модели гармонического осциллятора", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Минск: Институт физики АН БССР, 1960)
7. Иванов А П *Опт. и спектроск.* 8 352 (1960) (поступила в редакцию 04.12.1958 г.)
8. *Методы расчета оптических квантовых генераторов* (Под ред Б И Степанова) (Минск: Наука и техника, Т. 1 — 1966, Т. 2 — 1968)
9. Степанов Б И, Рубинов А Н, Мостовников В А *Письма в ЖЭТФ* 5 144 (1967)
10. Борисевич Н А, Калоша И И, Толкачев В А *ЖПС* 19 1108 (1973)
11. Бокуть Б В и др. *Бюлл. изобрет.* (168) (1967)
12. Степанов Б И, Рубанов А С, Ивакин Е В *ДАН СССР* 196 567 (1971) (поступило в редакцию 14.07.1970 г.)

PACS numbers: 01.65. + g, 42.55. - f, 42.65. - k

Квантовая электроника и школа Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова по когерентной и нелинейной оптике в Московском университете

В.А. Макаров

Формирование научной школы Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова по когерентной и нелинейной оптике неразрывно связано с началом и развитием исследова-



Рис. 1. С.А. Ахманов и Р.В. Хохлов в начале 60-х годов.

ний по квантовой электронике в России. Более того, общепризнанно, что Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов входят в немногочисленный круг основоположников современной нелинейной оптики.

Под нелинейной оптикой в настоящее время понимают область физики, изучающую оптические явления, в которых отклик вещества нелинейно зависит от амплитуд полей падающих на него электромагнитных волн. В этих условиях такие параметры, как диэлектрическая проницаемость, проводимость, намагниченность, перестают быть константами вещества, а зависят от напряженности полей. В свою очередь это сказывается на особенностях распространения электромагнитных (световых) волн в среде. К наиболее простым и известным нелинейным эффектам относятся генерация гармоник и смещение частот, когда при распространении в среде световых волн возникают новые волны, частоты которых равны удвоенной или утроенной частоте падающего излучения или представляют собой сумму или разность исходных частот. Всегда присутствуют эффекты самовоздействия световых волн, когда световой пучок за счет нелинейности отклика изменяет показатель преломления среды (увеличивает или уменьшает его) и тем самым создает для себя новые условия распространения. Это проявляется в самофокусировке или самодефокусировке световых пучков, в самомодуляции и самосжатии световых импульсов. Протекание всех этих эффектов зависит от свойств когерентности падающего излучения и, в свою очередь, может существенно изменять их.

Более чем сорокалетняя история развития нелинейной оптики показала, что генерация гармоник и смещение частот, эффекты самовоздействия световых волн далеко не исчерпывают перечень возможных нелинейных эффектов. Мир нелинейных явлений намного богаче, многообразнее и гораздо интереснее, чем "линейный" мир.

К настоящему времени нелинейные оптические явления стали методической и приборной базой для исследования и диагностики в самых разных областях физической науки и техники, в биологии, химии и даже в минералогии. Принципиально новые возможности нелинейная оптика предоставила для спектроскопических исследований вещества.

Здесь делается попытка кратко изложить более чем сорокалетнюю историю формирования и развития научной школы Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова по когерент-

ной и нелинейной оптике в Московском университете. За прошедшие годы древо этой школы сильно разрослось, ее научные "дети" и "внуки" плодотворно трудятся в учебных и научных учреждениях России и всего мира. Небольшой объем статьи позволяет остановиться только на достижениях тех связавших свою жизнь с кафедрой общей физики и волновых процессов и Международным лазерным центром (МЛЦ) МГУ ученых, чьи работы, по общему признанию, во многом определили облик современной нелинейной оптики в целом и отражают суть и характер научной деятельности школы. По этой причине автор не вступает в полемику по вопросам, связанным с приоритетом тех или иных открытий в области нелинейной оптики, которая активизировалась в связи с празднованием пятидесятилетия квантовой электроники в России¹. В конце доклада приведены некоторые, наиболее яркие результаты, полученные в последнее время в МГУ учеными, ассоциирующими себя с этой научной школой. Речь идет о более чем 70 кандидатах и докторов наук, независимо от должности преподающих как общие, так и специальные курсы, руководящих научной работой приблизительно ста студентов и сорока аспирантов и ежегодно публикующих около 100 статей в престижных реферируемых журналах. Из-за ограниченности объема, к сожалению, нет возможности рассказать обо всех этих чудесных людях, хранящих и поддерживающих творческую атмосферу научных исследований, созданную Р.В. Хохловым и С.А. Ахмановым.

Надо сказать, что истоки нелинейной оптики относятся к "долазерным" временам. Так, еще в 1926 г. С.И. Вавилов и В.Л. Левшин, работая на физическом факультете МГУ, обнаружили насыщение поглощения света в урановых стеклах. Несколько позже была зарегистрирована небольшая нелинейность деполяризации люминесценции и индуцированный излучением дихроизм поглощения. Эти работы носили пионерский характер и были начаты в те годы, когда физика располагала очень скромными экспериментальными возможностями. Тем более ценными представляются результаты, полученные в те далекие годы.

Важную роль С.И. Вавилова в появлении и последующем становлении нелинейной оптики неоднократно подчеркивал Р.В. Хохлов: "Хорошо известно, что С.И. Вавилов — родоначальник нелинейной оптики. Его работа в этой области началась задолго до создания лазеров. Первый нелинейный эффект обнаружен С.И. Вавиловым и В.Л. Левшиным в 1926 г. и заключался в насыщении поглощения света в урановых стеклах" [1]. С.И. Вавилову принадлежит и термин *нелинейная оптика*.

Многие соображения и идеи об ограниченности линейной оптики и необходимости исследования нелинейных эффектов содержатся в монографии С.И. Вавилова *Микроструктура света*, отмеченной Сталинской премией первой степени. С.И. Вавилов писал: "Нелинейность в поглощающей среде должна наблюдаться не только в отношении абсорбции. Последняя связана с

¹ Интересующимся историей открытий и исследований основных нелинейных оптических эффектов, несомненно, будет интересно прочитать соответствующий раздел в недавно вышедшей книге В.Г. Дмитриева, Л.В. Тарасова *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004).



Рис. 2. Лауреат Нобелевской премии Н. Бломберген (справа) в гостях у Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова (сидят за столом). Слева у стены — Э.С. Воронин.

дисперсией, поэтому скорость распространения света в среде, вообще говоря, также должна зависеть от световой мощности. По той же причине должна наблюдаться в общем случае зависимость от световой мощности, т.е. нарушение суперпозиции, и в других оптических свойствах среды — в двойном лучепреломлении, дихроизме, вращательной способности и т.д." [2].

Однако в то время эти идеи и предсказания имели лишь теоретическое значение, поскольку для наблюдения эффектов требовались источники мощного светового излучения, которые тогда отсутствовали. Сразу же после создания лазеров буквально хлынула лавина новых нелинейно-оптических результатов. Здесь особо следует отметить работы Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР, Института физики АН БССР, Государственного оптического института им. С.И. Вавилова.

Теоретические и экспериментальные исследования по нелинейной оптике в МГУ начались в 1961 г. Руководили этими исследованиями тогда еще молодые сотрудники физического факультета, а впоследствии выдающиеся профессора Московского университета — Рем Викторович Хохлов (1926–1977 гг.) и Сергей Александрович Ахманов (1929–1991 гг.). Их фундаментальный вклад в развитие этой области физики признан во всем мире, отмечен Ломоносовской и Ленинской премиями. Ими написана первая в мире монография *Проблемы нелинейной оптики*, вышедшая в 1964 г. и во многом не утратившая своего значения и в наши дни.

Уже в 1962 г. Р.В. Хохловым и С.А. Ахмановым впервые в мире была выдвинута идея и предложены конкретные схемы параметрических генераторов и усилителей света. Яркие результаты по теории нелинейных взаимодействий электромагнитных волн и постановка ряда пионерских экспериментов по нелинейному преобразованию частоты лазерного излучения во 2-ю, 3-ю, 4-ю и даже 5-ю гармоники (с рекордной для того времени эффективностью) принесли лаборатории нелинейной оптики МГУ широкое признание во всем мире.

Тематика теоретических и экспериментальных работ лаборатории быстро расширялась. Расширялся и круг



Рис. 3. Обсуждение научных результатов в кабинете Р.В. Хохлова. На заднем плане — К.Н. Дравович, А.И. Ковригин и С.А. Ахманов.

вовлеченных в эти исследования сотрудников, аспирантов и студентов физического факультета МГУ. Логическим следствием этого развития явилась организация в 1965 г. кафедры волновых процессов. Ее возглавил Р.В. Хохлов. Без преувеличения можно сказать, что под его руководством кафедра стала одним из ведущих мировых центров исследований по нелинейной оптике, нелинейной акустике, по лазерной физике и нелинейной спектроскопии, центром подготовки специалистов высокой квалификации в этих новых направлениях науки. Невозможно переоценить и ту роль, которую сыграли Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов для развития исследований по нелинейной оптике и лазерной физике в нашей стране. Как правило, все новые значительные идеи проходили в те годы апробацию на знаменитом семинаре кафедры волновых процессов, которым неизменно руководил Р.В. Хохлов.

В 1974 г. С.А. Ахманов стал заведующим кафедрой общей физики механико-математического факультета, перейдя туда с кафедры волновых процессов вместе с группой научных сотрудников и преподавателей. С этого времени началось обновление и расширение тематики научных исследований, проводимых на этой кафедре. Большое место заняли исследования по нелинейной оптике, лазерной физике, по использованию лазеров в биофизике и т.д. Обе кафедры — волновых процессов и общей физики для мехмата — были тесно связаны близостью профессиональных научных интересов сотрудников, общими производственно-техническими мощностями и даже "родственными связями", поскольку значительная часть сотрудников обеих кафедр была воспитанниками уже сформировавшейся научной школы Р.В. Хохлова–С.А. Ахманова.

В 1977 г. возникла необходимость реорганизации этих двух кафедр. Она была вызвана трагической смертью (в результате альпинистской катастрофы) в августе 1977 г. ректора МГУ Р.В. Хохлова. В 1978 г. С.А. Ахманов возглавил объединенную кафедру общей физики и волновых процессов и заведовал ею до своей кончины в 1991 г. Кафедра стала одной из самых больших на физическом факультете МГУ. Небольшая группа ученых бывшей кафедры волновых процессов образовала новую кафедру радиофизического отделения — кафедру квантовой радиофизики (ныне кафедра квантовой электроники) во главе с Л.В. Келдышем,

который по приглашению Р.В. Хохлова преподавал на кафедре волновых процессов еще с конца 60-х годов. С 2002 г. кафедрой квантовой электроники возглавляет В.И. Панов.

Сейчас обе эти кафедры размещаются в Корпусе нелинейной оптики Московского университета, построенном в 1980 г. по замыслу Р.В. Хохлова. Отметим, что строительство этого Корпуса в большой мере — дело рук (в прямом смысле) учеников Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова. Корпус стал бы ярким примером долголетия конца восьмидесятых, если бы не доктора и кандидаты наук, студенты и аспиранты, более чем на два года фактически оставившие занятие наукой, ставшие профессиональными строителями и достроившие корпус. В нем они продолжили свои научные исследования. Старшее поколение хорошо помнит это время и относится к Корпусу нелинейной оптики как к своему второму дому.

По инициативе С.А. Ахманова в Московском университете в 1989 г. был организован Международный учебно-научный лазерный центр (МЛЦ) МГУ. Директором МЛЦ в 1989–1998 гг. был ученик С.А. Ахманова Н.И. Коротеев (1947–1998 гг.). Являясь организационно и структурно самостоятельным подразделением МГУ, МЛЦ занимается организацией исследований на стыках лазерной физики и других естественных наук, а также переподготовкой и повышением квалификации ученых, врачей, инженеров и других специалистов, применяющих в своей работе лазерные методы и лазерные системы. Он участвует в выполнении крупных междисциплинарных научно-технических программ и проектов в области лазерной физики и нелинейной оптики, а также в организации международных научных конференций и симпозиумов. В своей научной и педагогической работе МЛЦ тесно связан с кафедрой общей физики и волновых процессов. По существу, это объединение является уникальным средоточием исследовательской и педагогической деятельности ученых Московского университета в "лазерных" разделах современной физики, в том числе и в нелинейной оптике.

После смерти С.А. Ахманова в 1992–1998 гг. заведующим кафедрой общей физики и волновых процессов был Н.И. Коротеев, выдающийся специалист по нелинейной спектроскопии и физике воздействия интенсивного светового излучения на вещество, много сделавший для вовлечения кафедры и МЛЦ в эффективное международное научное сотрудничество. В настоящее время заведующим кафедрой и директором МЛЦ является В.А. Макаров, научный "внук" С.А. Ахманова.

Все эти организационные преобразования, в конечном счете, послужили сохранению и укреплению позиций научной школы Р.В. Хохлова–С.А. Ахманова по когерентной и нелинейной оптике. Некоторые научные результаты этой школы уже упоминались выше. На самом деле их неизмеримо больше. Остановимся в первую очередь на достижениях, которые, по общему признанию, во многом определили облик современной нелинейной оптики в целом и отражают суть и характер научной деятельности школы.

Математической базой современной волновой линейной и нелинейной оптики (за исключением оптики предельно коротких импульсов) является метод медленно меняющихся амплитуд, предложенный Р.В. Хохловым в 1959–1961 гг. Рем Викторович четко выделил два предельных случая теории нелинейных волн: нели-

нейные волны в средах с сильной дисперсией и нелинейные волны в недиспергирующей среде. Адекватно этим двум случаям он предложил два метода упрощения уравнений в частных производных, описывающих распространение волн в нелинейных средах. Для сильно диспергирующих сред им был развит метод медленно меняющихся амплитуд. Хохлов впервые развил теорию генерации второй гармоники в волновых системах, указав на возможность полной перекачки энергии в гармонику в условиях фазового синхронизма.

Метод медленно меняющихся амплитуд получил дальнейшее развитие в работах Р.В. Хохлова, С.А. Ахманова и их учеников, среди которых в первую очередь следует упомянуть А.П. Сухорукова. До 1987 г. он работал на кафедре общей физики и волновых процессов, в настоящее время возглавляет кафедру радиофизики физического факультета МГУ. Полученные в этих работах уравнения, учитывающие дифракцию взаимодействующих пучков, нагрев среды, релаксационные процессы и многое другое, составляют основу нелинейной квазиоптики диспергирующих анизотропных сред. Отметим, что метод медленно меняющихся амплитуд теперь широко применяется и в ряде других областей физики, в том числе при анализе волновых процессов в плазме.

Параметрическое усиление и генерация световых волн, идея которых была предложена Р.В. Хохловым и С.А. Ахмановым в 1962 г., послужили основой для многочисленных теоретических и экспериментальных разработок. Первый в нашей стране параметрический генератор света заработал в 1965 г. В его создание определяющий вклад, помимо авторов идеи, внес ученик и друг А.И. Ковригин (1936–1996 гг.). Первый в мире параметрический генератор, излучающий импульсы с пикосекундной длительностью, был создан на кафедре волновых процессов в 1968 г. В реализацию этого проекта существенный вклад внес А. Пискараскас, ученик С.А. Ахманова и А.И. Ковригина, ныне профессор Вильнюсского университета. Подчеркнем, что с созданием параметрических генераторов в распоряжении исследователей появился уникальный прибор, позволяющий получать плавно перестраиваемое по частоте световое излучение с длительностью импульсов от нескольких наносекунд до пикосекунд и даже фемтосекунд.

С.А. Ахмановым были заложены основы статистической нелинейной оптики, предметом которой является исследование нелинейных взаимодействий с учетом статистических свойств излучения, а также случайных изменений параметров среды. Большой вклад в развитие этого направления внес А.С. Чиркин, ученик С.А. Ахманова, ныне профессор кафедры общей физики и волновых процессов. Результаты первого этапа развития этой науки изложены в книге *Статистические явления в нелинейной оптике*, написанной С.А. Ахмановым и А.С. Чиркиным в 1971 г. Некоторые фундаментальные результаты вошли даже в учебники для студентов. В настоящее время А.С. Чиркин является также признанным в мире специалистом по квантовой оптике. Его работы имеют один из самых высоких индексов цитирования.

Отдельно следует отметить начатое С.А. Ахмановым активное применение идей и методов нелинейной оптики в лазерной спектроскопии и диагностике вещества.

С.А. Ахмановым вместе с учениками детально разработан принципиально новый метод спектроскопии — спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Она основана на исследовании процессов четырехволнового смещения в условиях, когда две волны накачки порождают волну возбуждения в среде на разностной или суммарной частоте, на которой затем рассеивается пробная волна. В результате возникает сигнальное излучение на смешанной частоте. Имеется несколько вариантов этого метода: амплитудный, поляризационный, с временным разрешением. В настоящее время каждый из них широко используется для исследования спектров возбуждения в самых различных средах, для спектрального анализа веществ и диагностики различных процессов, от технологических до обеспечивающих жизнедеятельность живых организмов. Основные принципы этого вида спектроскопии и научные результаты, полученные на первом этапе ее развития, изложены в монографии С.А. Ахманова и Н.И. Коротева *Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света*, изданной в 1981 г.

Большой вклад в разработку различных вариантов спектроскопии многоволнового смещения внесли Д.Н. Клышко, А.Н. Пенин, ученики С.А. Ахманова Н.И. Коротева, В.Г. Тункин, а также ученик Р.В. Хохлова В.В. Фадеев. Именно последним были начаты в 1974 г. исследования по лазерной спектроскопии природных вод и природных органических комплексов.

Следует также отметить достижения школы Р.В. Хохлова–С.А. Ахманова, по сути, открывшие новые крупные направления в нелинейной оптике и лазерной физике. Среди них открытие Д.Н. Клышко, В.В. Фадеевым и др. с приоритетом от ноября 1965 г. явления спонтанного трех- и четырехфотонного параметрического рассеяния света в твердом теле. В дальнейшем авторы открытия использовали это явление для абсолютной калибровки фотоприемников. Теоретические и экспериментальные исследования оптических полей, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света, проводятся на кафедре квантовой электроники МГУ вот уже более 15 лет А.Н. Пениным, Г.Х. Китаевой, С.П. Куликом и др.

Предсказанное С.А. Ахмановым и В.И. Жариковым явление нелинейной оптической активности стимулировало последовательное развитие нелинейной поляризационной оптики у нас в стране и за рубежом. Проведенные в МГУ теоретические и экспериментальные исследования (Н.И. Желудев, В.А. Макаров и их ученики) дают возможность в настоящее время со всей определенностью утверждать, что эффекты поляризационного самовоздействия и взаимодействия волн — тонкие, но широко распространенные эффекты нелинейной оптики, а используемое в теоретических расчетах приближение неизменности поляризации волны в процессе распространения является малооправданным и представляет лишь первый шаг на пути последовательного описания нелинейных оптических явлений.

В конце 60-х годов Р.В. Хохлов инициировал цикл исследований, связанных с резонансным селективным воздействием мощного лазерного излучения на вещество. Эти работы сыграли большую роль в становлении лазерной фотохимии и фотобиологии. Его увлекла идея возможности создания инверсии за счет прямого преобразования энергии, выделяющейся в процессе химиче-

ской реакции, в энергию когерентного излучения, минуя другие формы, т.е. за счет энергопередачи от "горячих" молекул к "холодным". При его активной поддержке эти исследования начали развиваться в Институте механики и на химическом факультете МГУ, где в 1988 г. была организована кафедра лазерной химии.

По инициативе С.А. Ахманова его коллегами и учениками, среди которых необходимо отметить В.Т. Платоненко, В.Я. Панченко и В.М. Гордиенко, были исследованы нелинейные процессы при колебательно-поступательной релаксации и межмолекулярном колебательном энергообмене в газе сильно возбужденных молекул. В середине 80-х годов в МГУ под руководством С.А. Ахманова и В.М. Гордиенко была впервые осуществлена генерация и усиление субпикосекундных импульсов УФ-диапазона излучения с помощью эксимерных лазеров. Созданная в эти годы лазерная система была нацелена на проблему взаимодействия сверхсильных световых полей с веществом. С.А. Ахманов явился инициатором разработки мощных вычислительных методов для решения задач статистической нелинейной оптики неоднородных сред, а также исследований в области лазерной оптоакустики. Развитие последних профессорами МГУ О.В. Руденко и А.А. Карабутовым и их учениками привело к появлению лазерной оптико-акустической диагностики биологических тканей и лазерной оптико-акустической спектроскопии твердых тел.

Работы Школы не только высоко оценены мировой научной общественностью, но и отмечены целым рядом высоких наград. Ленинские премии получили Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов "За исследование нелинейных когерентных взаимодействий в оптике" и А.П. Сухоруков (с соавторами) "За открытие и исследование эффектов самофокусировки волновых пучков". Следует добавить, что за цикл исследований, направленных на создание нелинейно-оптических преобразователей ИК-сигналов и изображений в видимый диапазон, Государственной премией СССР за работы по прикладной нелинейной оптике были также отмечены соратники Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова Э.С. Воронин (1928–1981 гг.) и В.С. Соломатин (с соавторами). Государственную премию СССР за открытие и исследование явления параметрического рассеяния света и его применение в спектроскопии и метрологии получили Д.Н. Клышко (1929–2000 гг.), А.Н. Пенин, В.В. Фадеев. За цикл работ "Высокоэффективные нелинейные преобразователи частоты в кристаллах и создание перестраиваемых источников когерентного оптического излучения" в числе награжденных Государственную премию СССР получили А.П. Сухоруков и А.И. Ковригин.

Многие ученики Р.В. Хохлова впоследствии отошли от когерентной и нелинейной оптики, поменяв тематику научных исследований. Тематами отдельных интересных статей могут быть разработка физических основ нелинейной акустики и ее приложений, а также исследование динамики интенсивных шумовых волн и нелинейных структур в средах без дисперсии. В эти работы, отмеченные государственными премиями СССР и Российской Федерации, внесли огромный вклад Р.В. Хохлов, А.П. Сухоруков, А.С. Чиркин.

Удостоенный Государственной премии Российской Федерации цикл работ "Электронные и атомные процессы на поверхности твердых тел" (О.А. Акципетров (ученик Р.В. Хохлова), В.И. Панов, П.К. Кашкар и

др.) содержит большой раздел, посвященный нелинейной оптике поверхности металлов и полупроводников. В него вошли результаты проведенных в МГУ экспериментальных исследований процессов генерации оптических гармоник, а также исследования нелинейности и нелокальности электронного отклика полупроводниковых и металлических наночастиц и планарных наноструктур.

В свое время целый ряд воспитанников школы Р.В. Хохлова – С.А. Ахманова был отмечен премиями Ленинского комсомола. Шесть из них в настоящее время работают в МГУ — это А.В. Андреев (ученик Р.В. Хохлова), автор ряда пионерских работ по рентгеновской оптике, специалист по когерентным и кооперативным процессам в оптике и физике сильных световых полей, автор нескольких монографий; А.М. Желтиков и А.Б. Федотов (ученики Н.И. Коротева), специалисты по нелинейной лазерной спектроскопии, оптике пространственно-периодических сред и фотонных кристаллов. В их число также входят: В.Н. Задков (ученик Н.И. Коротева), специалист по взаимодействию лазерного излучения с атомами и молекулами, квантовой оптике и квантовой теории информации; А.А. Карабутов (ученик Р.В. Хохлова и О.В. Руденко), крупный специалист в области нелинейной и лазерной акустики; С.А. Шленов (ученик В.П. Кандидова), специалист по оптике атмосферы.

Многие воспитанники школы Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова были отмечены Ломоносовской премией — высшей наградой МГУ за научную работу. Кроме ранее упомянутых (С.А. Ахманов, А.А. Карабутов, Н.И. Коротева, О.В. Руденко, Р.В. Хохлов, А.С. Чиркин), лауреатами этой премии являются: В.И. Емельянов, крупный специалист по когерентным и кооперативным явлениям и по воздействию лазерного излучения на твердые тела, автор нескольких монографий; В.П. Кандидов, автор ряда мощных вычислительных методов, специалист по распространению электромагнитных волн в нелинейных неоднородных средах; В.А. Алешкевич (ученик А.П. Сухорукова), добившийся значительных результатов в исследовании закономерностей преобразования статистики светового поля в нелинейных процессах.

О безусловном признании научных заслуг и достижений школы Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова свидетельствует и то обстоятельство, что ее участников регулярно приглашают в программные комитеты самых престижных международных конференций. Более того, организация и проведение ряда таких конференций является делом Школы.

Так, с 1965 г. кафедра волновых процессов, затем кафедра общей физики и волновых процессов, а с 1990 г. и МЛЦ МГУ всегда являлись базой для организации и проведения Международных конференций по когерентной и нелинейной оптике (ICONO) — основных профессиональных форумов по фундаментальной лазерной физике и нелинейной оптике на Евроазиатском континенте. Признанными лидерами этих конференций всегда были Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов.

Последняя, 17-я конференция из этого ряда состоялась в 2001 г. в Минске (Беларусь) под руководством С.Н. Багаева. Ее главными организаторами были кафедра общей физики и волновых процессов МГУ, МЛЦ МГУ и Институт физики Национальной академии наук



Рис. 4. В.Н. Задков, Н.И. Коротева и С.Н. Багаев в перерыве между заседаниями XVI Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Москва, 1998 г.).

Беларуси. Отметим, что в этих конференциях принимают участие порядка 700 ученых из ведущих исследовательских центров мира. Следующая, 18-я конференция состоится в мае 2005 г. в Санкт-Петербурге.

В 2002 г. впервые в Москве прошла IQEC-2002 — наиболее значительная Международная конференция по лазерной физике и нелинейной оптике. Это случилось впервые за почти сорокалетнюю историю проведения таких форумов. И снова одними из главных организаторов явились участники школы Р.В. Хохлова – С.А. Ахманова. Чтобы оценить масштаб работы, приведем лишь две цифры: в конференции IQEC-2002, сопутствовавшей ей конференции по применению лазеров и конференции молодых ученых приняло участие свыше 1200 человек из 40 стран мира.

Следует отметить активную роль кафедры и МЛЦ в проведении Международных конференций по применению лазеров в науках о жизни (LALS), возникших по инициативе С.А. Ахманова, международных конференций по лазерной физике (Laser Physics Workshop 2002, 2003, 2004) и целого ряда других международных симпозиумов и семинаров.

С 1997 г. научная школа МГУ по когерентной и нелинейной оптике официально отнесена к числу ведущих научных школ России. Ряд сотрудников кафедры общей физики и волновых процессов и МЛЦ МГУ, ассоциирующихся с этой Школой, удостоены гранта соответствующей Федеральной программы. Они прилагают все усилия к тому, чтобы лучшие выпускники физического факультета пополняли ряды российских ученых. В основе обучения студентов и аспирантов лежит система специальных курсов, принципы которой были заложены более 30 лет назад. Ее отличие состоит в том, что студентам предоставлена возможность изучать спецкурсы по нелинейной оптике и лазерной физике (а их более 40) по выбору, в зависимости от научных интересов и специализации. Кроме того, студенты сразу же включаются в исследовательскую работу. Обучение через исследование — такую форму подготовки специалистов считали самой эффективной Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов.

В последние годы созданы компьютерный учебник *Нелинейные волны и нелинейная оптика* (автор К.Н. Драбович) и мультимедийный конспект лекций "Введение в физику лазеров" (автор В.В. Шувалов),



Рис. 5. Ректор МГУ В.А. Садовничий и Председатель Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации С.М. Миронов в лаборатории сверхсильных световых полей кафедры общей физики и волновых процессов МГУ им. М.В. Ломоносова. На заднем плане — В.А. Макаров, справа — В.М. Гордиенко.

полностью модифицирован "Университетский лазерный практикум". Эффективно развивается сотрудничество в рамках учебно-научного центра "Фундаментальная оптика и спектроскопия", в состав которого кафедра входит с 1998 г.

Благодаря различным контрактам и грантам, а также поддержке со стороны ректора МГУ В.А. Садовничего в последние годы появилась возможность пополнять научный парк кафедры общей физики и волновых процессов и МЛЦ новым дорогостоящим оборудованием. Для примера можно привести фемтосекундную лазерную систему на хром-форстерите с регенеративным усилителем, многопроходным усилителем, оптическим параметрическим генератором и лазерами накачки (1 мДж, 1236 нм, 120 фс, 50 Гц, 10^{17} Вт см⁻²) и фемтосекундную тераваттную лазерную систему на кристалле титансапфира (40 мДж, 800 нм, 70 фс, 10 Гц, 10^{18} Вт см⁻²), пикосекундную лазерную систему на основе Nd:YAG-лазера с диодной накачкой, лазерную оптико-акустическую систему для ультразвукового контроля изделий из металлов, сплавов и композитных материалов.

Ограниченный объем статьи, к сожалению, не позволяет рассказать о всех результатах, полученных работающими на кафедре общей физики и волновых процессов и в МЛЦ научными "детьми" и "внуками" Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова, к которым, кроме упомянутых выше, относятся И.В. Головин, М.С. Джиджоев, Ю.Е. Дьяков, Т.М. Ильинова, С.А. Магницкий, В.Б. Морозов, С.Ю. Никитин, Д.Ю. Парашук, В.М. Петникова, А.Б. Савельев-Трофимов, Д.А. Сидоров-Бирюков, В.Д. Таранухин, А.П. Шуринов, А.Ю. Чикишев. Приведем очень кратко лишь некоторые из результатов.

Показано, что в высокотемпературной плазме, возникающей при воздействии фемтосекундного лазерного импульса интенсивностью до 10^{17} Вт см⁻² на мишень, возможно возбуждение низкоэнергетических ядерных уровней, термоядерные реакции. Развита комплекс методов диагностики горячего электронного компонента высокотемпературной фемтосекундной лазерной плазмы от прямого измерения энергетического спектра электронов до оценки средней энергии и концентрации

горячих электронов по рентгеновским и ионным время-пролетным измерениям.

Предложен новый сценарий дистилляции требуемых энантиомеров хиральных молекул из рацемической смеси за счет создания квантового перепутанного состояния (конфигурацией возбуждающих лазерных полей) между внутренним вращением молекулы и ее вращением в пространстве.

Предложен метод ускорения заряженных частиц в вакууме, позволяющий, используя современные лазеры, ускорять электроны (в течение многих оптических циклов) до энергий порядка 1 ГэВ.

Развита теория самоорганизации нанометровых периодических дефектно-деформационных структур и солитонов на поверхности твердых тел под действием лазерного излучения. Проведена интерпретация эффектов наноструктурирования поверхности при лазерно-контролируемом осаждении атомов Ga, перекристаллизации тонких пленок и травлении полупроводников.

Исследовано изменение поперечного пространственного распределения поляризации света при генерации второй гармоники и суммарной частоты при отражении эллиптически поляризованных световых пучков гауссова профиля с однородным по поперечному сечению распределением поляризации от поверхности изотропной среды с пространственной дисперсией кубической нелинейности, а также при самофокусировке, генерации суммарной частоты и некоторых других нелинейных оптических эффектах в толще такой среды. Установлено, что в процессе нелинейных оптических взаимодействий возникает ярко выраженная неосесимметричность поперечного пространственного распределения интенсивности и поляризации взаимодействующих волн, в частности появляются области с различным направлением вращения вектора электрического поля.

Выполнено стохастическое моделирование образования многих филаментов при распространении лазерного импульса в среде со случайными флуктуациями показателя преломления. Создана модель, количественно описывающая начальную стадию формирования многих филаментов в турбулентной атмосфере. Исследованы статистические характеристики пучка филаментов в зависимости от параметров атмосферной турбулентности и мощности фемтосекундного лазерного импульса.

Показана возможность создания на основе фотонных кристаллов эффективных компактных нелинейно-оптических устройств — компрессоров, умножителей частоты, оптических переключателей. Разработаны принципы микроскопии ближнего поля и управления движением атомов с помощью фотонно-кристаллических структур за счет использования эффекта локализации светового поля.

Предложена идея синхронной генерации второй гармоники сверхкоротких лазерных импульсов в фотонных кристаллах, заполненных нелинейной средой с практически произвольным законом дисперсии. Продемонстрирована возможность использования волноводов с фотонно-кристаллической оболочкой для увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов, в частности генерации суперконтинуума.

Экспериментально продемонстрирована возможность радикального увеличения эффективности четырехволновых взаимодействий в полых волокнах с фотонно-

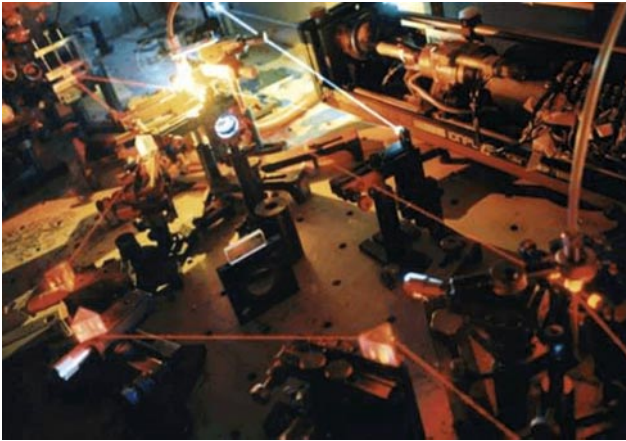


Рис. 6. В лаборатории сверхбыстрых процессов в биологии.

кристаллической оболочкой. Для процесса $3\omega = 2\omega + 2\omega - \omega$, где ω и 2ω — основная частота и частота второй гармоники пикосекундных импульсов лазера на гранате с неодимом, достигнуто 800-кратное увеличение мощности сигнала по сравнению с режимом жесткой фокусировки².

Разработаны классическая и квантовая теории последовательных квазисинхронных взаимодействий световых волн в периодически неоднородных нелинейных оптических кристаллах. Впервые показано, что в таких кристаллах можно получить поляризационно перепутанные состояния света при коллинеарной геометрии взаимодействия и при одновременной реализации двух нелинейно-оптических процессов.

Впервые методом стационарной КАРС-спектроскопии измерены молекулярные спектры вблизи критической точки вещества. Зарегистрировано дополнительное уширение спектров Q-полосы колебательного перехода 1285 см^{-1} молекулы CO_2 , связанное с увеличением флуктуаций плотности вблизи критической точки углекислого газа.

Использование поляризационно-чувствительной КАРС-спектроскопии позволило выявить спектральные компоненты широких (порядка 40–50 обратных сантиметров) полос в колебательном спектре белка, определяемых нормальными колебаниями амидной группы, и таким образом реализовать новый метод диагностики вторичной структуры белковых молекул, не требующий априорных предположений о структуре полос.

Установлено, что нелинейность сильно коррелированных систем приводит к спонтанному формированию в них "метастабильного" порядка, индуцированного лазерным излучением. Протекание фазовых переходов такого типа объясняет "аномальные" результаты в нестационарной лазерной спектроскопии сопряженных полимеров, ферромагнитных пленок и целого ряда других объектов. Пространственно неоднородное возбуждение ферромагнитных пленок пучком сверхкоротких лазерных импульсов позволяет "записывать" в них заданные распределением интенсивности света регулярные доменные структуры. Реализована методика нераз-

рушающего оптико-акустического контроля состояния конструкционных материалов (металлов, композитов) при двустороннем и одностороннем доступах к исследуемому объекту. Разработан и создан оптико-акустический томограф для ранней диагностики рака молочной железы.

Обнаружены нелинейно-оптические аналоги эффектов Фарадея и Керра при генерации магнитоиндуцированных второй и третьей гармоник от поверхности ферромагнитных материалов. Зафиксировано гигантское усиление (на 4–5 порядков) интенсивности излучения на удвоенной и утроенной частотах при возбуждении локализованных плазмонов в наноструктурах, а также в фотонных кристаллах на основе пористого кремния. Обнаружен эффект оптической казимировской нелокальности полупроводников нового типа.

Исследованы генерация второй гармоники и суммарной частоты при отражении фемтосекундных импульсов от свободной поверхности раствора, содержащего нецентросимметричные молекулы, в условиях коллинеарной и неколлинеарной схем возбуждения поверхностных электромагнитных волн различного типа, усиливающих нелинейное оптическое взаимодействие.

Построена самосогласованная теория оптического отклика тонких и ультратонких металлических пленок (1–10 нм). Показано, что в условиях возбуждения нечетных продольных коллективных мод, металлическая пленка нанометровой толщины может практически полностью отражать падающее лазерное излучение.

С помощью методов спектроскопии комбинационного рассеяния света, фотоиндуцированной спектроскопии, фотоиндуцированной поляриметрии и др. получен ряд приоритетных результатов относительно свойств и природы основного и низших возбужденных состояний трансполиацетилена на образцах нанополиацетилена, проведена диагностика анизотропии оптических переходов из долгоживущих фотоиндуцированных состояний на временных шкалах от сотен фемтосекунд до миллисекунд.

Исследована возможность фазового контроля надпороговой туннельной ионизации и последующего управления параметрами рекомбинационного излучения при использовании двухчастотных лазерных полей. Показано, что в таких полях возможен контроль как момента ионизации (в пределах оптического цикла), так и момента рекомбинации. Фазовый контроль позволяет реализовать генерацию рекомбинационного излучения с селекцией узкого спектрального диапазона и режим "усиления" высоких гармоник. Показано, что в случае специальной двухчастотной накачки с использованием эллиптической поляризованного излучения возможна генерация когерентных электромагнитных импульсов аттосекундной длительности.

Научная школа по когерентной и нелинейной оптике, созданная Р.В. Хохловым и развитая С.А. Ахмановым, — поистине национальное достояние России, одна из жемчужин Московского университета. В условиях продолжающегося глубокого кризиса науки и образования у нас в стране задача сохранения этой и других не менее уникальных научных школ является основной для коллектива МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автор благодарен К.Н. Дравовичу за неоценимую помощь.

² Результаты последних исследований в этой области подробно изложены в монографии А.М. Желтикова *Оптика микроструктурированных волокон* (М.: Наука, 2004).

Список литературы

1. Хохлов Р В *Нелинейные процессы в оптике* (М.: Наука, 1970)
2. Вавилов С И *Микроструктура света; исследования и очерки* (М.: Изд-во АН СССР, 1950)

PACS numbers: 42.55.Wd, 52.55.Ye

Волоконные лазеры

Е.М. Дианов

1. Введение

Создание волоконных лазеров — одно из наиболее ярких достижений квантовой электроники.

Первый волоконный лазер был создан Снитцером в 1963 г. [1]. В качестве активного элемента использовался стеклянный волоконный световод, содержащий ионы неодима. Однако в то время это направление лазерной физики не получило развития и понятно почему. Создание современных высокоэффективных и компактных волоконных лазеров стало возможным только благодаря разработке в начале 70-х годов стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями (≤ 1 дБ км⁻¹ в ближней ИК-области) и последующему бурному развитию волоконно-оптической связи. Последнее обстоятельство стало решающим фактором в разработке и промышленном производстве долгоживущих и высокоярких лазерных диодов и целого набора специальных волоконных световодов. Среди них — световоды, легированные редкоземельными элементами, нелинейные, фоточувствительные, инфракрасные и ряд других. Эта элементная база и явилась основой для создания волоконных лазеров. Особо следует отметить разработку технологии записи в фоточувствительных световодах брэгговских решеток показателя преломления, используемых в качестве распределенных отражателей в волоконных лазерах (см., например, [2]).

Вместе с тем, развитие волоконно-оптических систем связи с высокой скоростью передачи информации (более 1 Гбит с⁻¹) потребовало создания эффективных волоконных лазеров и усилителей, совместимых с такими системами. Этим объясняются проведение широких исследований и большие финансовые вложения для решения данной проблемы.

Принципиальное преимущество волоконных световодов как лазерной среды по сравнению с объемными активными средами заключается в низких оптических потерях, большой длине взаимодействия и малом диаметре световедущей сердцевины (обычно 4–20 мкм), что обеспечивает высокую эффективность накачки излучением лазерных диодов. Большое отношение площади поверхности волоконного световода (диаметром ~ 100 мкм) к его объему радикально решает проблему теплоотвода, позволяя создавать волоконные лазеры с выходной мощностью ~ 1 кВт и воздушным охлаждением. Исключительно важным для многих применений является высокое качество выходного пучка волоконных лазеров. Использование внутриволоконных брэгговских решеток показателя преломления в качестве распределенных отражателей обеспечивает компактность и высокую стабильность волоконных лазеров. Указанные обстоятельства привели к разработке разнообразных

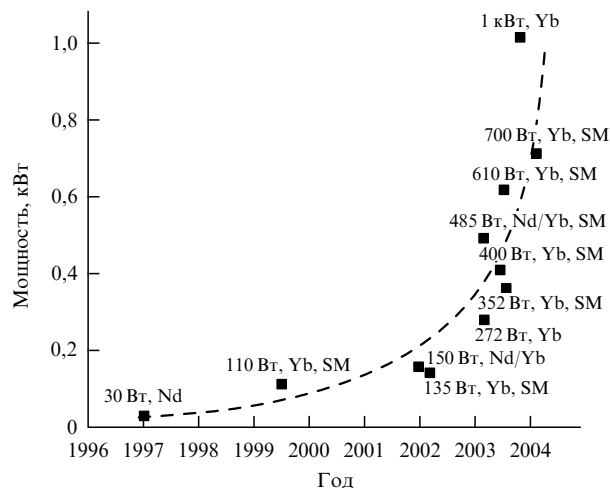


Рис. 1. Рост выходной мощности непрерывных волоконных лазеров (SM — одномодовый лазер).

волоконных лазеров, включая непрерывные мощные лазеры, пико- и фемтосекундные лазеры, одночастотные лазеры, ВКР-лазеры и ряд других.

В данной статье я остановлюсь лишь на недавних результатах по созданию мощных непрерывных волоконных лазеров и лазеров, работающих на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния в волоконных световодах (ВКР-лазеры).

2. Мощные непрерывные волоконные лазеры

За последние годы наблюдается исключительно быстрый прогресс в создании непрерывных волоконных лазеров большой мощности (см., например, [3, 4] и ссылки в них). Рисунок 1 демонстрирует рост выходной мощности лазеров с длиной волны генерации около 1 мкм (Yb и Nd), достигнутый за последние 8 лет. Видно, что за это время мощность увеличилась с 30 Вт до ~ 1 кВт. Такой быстрый прогресс в росте выходной мощности объясняется, прежде всего, разработкой улучшенной структуры активных волоконных световодов и успехами в создании систем накачки на основе лазерных диодов.

Принципиальная схема волоконного лазера приведена на рис. 2а. В качестве активного волоконного световода (1а) используются световоды на основе кварцевого стекла с добавками редкоземельных элементов, таких как Nd, Yb, Er, Ho, Tm. В настоящее время для создания мощных лазеров наибольшее распространение получили волоконные световоды с Yb, обеспечивающие наибольшую эффективность генерации на волне с $\lambda \cong 1,1$ мкм. Большой интерес проявляется к лазерам, генерирующим излучение в спектральной области 1,5–2,0 мкм, которое считается безопасным для глаз. В этом случае используются волоконные световоды с добавками Er/Yb (1,5–1,6 мкм), Tm и Ho ($\sim 2,0$ мкм).

Весьма перспективными представляются в настоящее время и неодимовые волоконные лазеры, генерирующие в спектральной области вблизи 0,9 мкм. Это связано, прежде всего, с возможностью получения мощного излучения в синей области спектра путем умножения частоты излучения неодимового лазера. Основная проблема создания такого лазера — подавление генерации на длине волны 1,06 мкм, соответствующей более сильному переходу иона неодима. В работе [5] это