

УДК 535.345.9

ЛАЗЕРНАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ СПЕКТРОХРОНОГРАФИЯ

Разработка и применение лазерной нелинейно-оптической структурно-чувствительной спектрохронографии сверхбыстрых процессов в веществе в диапазоне длительностей от наносекунд до фемтосекунд

Н. И. Коротев

(кафедра общей физики и волновых процессов;
Международный лазерный центр МГУ)

Описывается цикл работ, представленных на Ломоносовских чтениях 1996 г. В цикле развиты физические основы и с помощью специально созданных импульсных лазерных систем проведены приоритетные эксперименты по сверхбыстродействующей нелинейно-оптической диагностике лазерно-индуцированных процессов в объеме вещества и на границе раздела. Развитые структурно-чувствительные методы нелинейно-оптической диагностики с разрешением по времени (спектрохронографии) имеют быстродействие в диапазоне от единиц и десятков наносекунд до десятков и сотен фемтосекунд.

Цикл работ, представленных на Ломоносовских чтениях 1996 г., выполнялся автором совместно с группой сотрудников, аспирантов и студентов в Лаборатории нелинейной оптики им. Р. В. Хохлова физического факультета МГУ и в Международном лазерном центре МГУ с 1982 по 1995 г. В результате выполненных исследований были развиты физические основы, созданы экспериментальные импульсные лазерные системы и проведена обширная серия экспериментов по применению методов сверхбыстродействующей нелинейно-оптической диагностики лазерно-индуцированных процессов в газовых и плазменных средах в объеме и на поверхности твердых тел, в химических и биологических системах. Развитые структурно-чувствительные методы нелинейно-оптической диагностики с разрешением по времени (спектрохронографии) имеют быстродействие в диапазоне от единиц и десятков наносекунд (10^{-9} — 10^{-8} с) до десятков и сотен фемтосекунд (10^{-14} — 10^{-13} с).

Постоянное повышение информативности разработанных методов нелинейно-оптической спектрохронографии, увеличение ее быстродействия осуществлялись по мере прогресса лазерной техники и технологии в последние десятилетия. Наиболее драматический прорыв в технике и физике импульсных лазеров произошел в конце 1980-х — начале 1990-х гг., когда впервые в истории науки был достигнут «фемтосекундный рубеж» длительности генерации лазерных импульсов. Оптические импульсы длительностью в несколько фемтосекунд имеют под своей огибающей всего несколько осциллиций электромагнитного поля (период колебаний световой волны оптического диапазона 1—3 фс) и, строго говоря, более короткими уже сделаны быть не могут, поскольку в оптике импульсов короче, чем период световой волны, просто не бывает. Это означает, что и для скорости протекания светоиндуцированных процессов в структурно-организованном веществе также имеется нижний фемтосекундный предел, который в случае примене-

Обзорные доклады Н. И. Коротева, О. В. Руденко и А. П. Сухорукова были прочитаны на юбилейном заседании секции радиофизики научной конференции «Ломоносовские чтения», посвященном 70-летию со дня рождения профессора физического факультета Рема Викторовича Хохлова.

ния сверхкоротких фемтосекундных лазерных импульсов оказывается достижимым экспериментально.

Развитие работ по нелинейно-оптической сверхбыстродействующей спектхронографии протекало в условиях острейшей международной конкуренции. Выполнение представленного цикла приоритетных исследований стало возможным исключительно благодаря фундаментальному заделу, созданному научной школой Московского университета по нелинейной оптике — школой Р. В. Хохлова и С. А. Ахманова. Работы представленного цикла были начаты при непосредственном участии ныне покойного С. А. Ахманова, к числу учеников и последователей которого имеет честь принадлежать автор. Методы нелинейно-оптической диагностики сверхбыстрых процессов в веществе идейно основываются на принципах когерентной активной спектроскопии рассеяния и поглощения света, последовательно изложенных (для случая стационарного и квазистационарного возбуждения и зондирования) С. А. Ахмановым и автором в монографии «Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света» (М.: Наука, 1981), которая, однако, не включается в представленный цикл.

Принцип развитой в цикле работ сверхбыстродействующей лазерной диагностики, чувствительной к структурным изменениям в исследуемом веществе, базируется на измерении временного хода нелинейно-оптического отклика изучаемой среды, т. е. на измерении эволюции во времени нелинейно-оптических восприимчивостей второго, третьего и более высоких порядков по амплитуде оптического поля. Используется схема «возбуждение—зондирование». Наличие оптических нелинейностей во всех формах вещества, давно и надежно установленных нелинейной оптикой [1, 2], обеспечивает возможность протекания процессов когерентного смешения трех, четырех и более волн. В результате вещество, облучаемое лазерными импульсами с определенным набором частот, переизлучает световые импульсы с другими частотами, являющиеся второй, третьей и другой кратности гармониками, а также линейными комбинациями частот падающего излучения. Новые спектральные компоненты несут информацию о состоянии и быстрых преобразованиях исследуемой среды — как о макроскопических (в том числе о фазовых переходах: плавление—отвердевание, испарение—конденсация, кристаллизация—разупорядочение и т. п.), так и о процессах возбуждения—релаксации, ассоциации—диссоциации, ионизации—рекомбинации и т. п. в атомах, молекулах, ионах и других структурных микрочастицах вещества [3—11] (см. рис. 1). Быстродействие метода в конечном итоге определяется длительностью использованных лазерных импульсов. Измерение временных характеристик оптических импульсов, несущих информацию о быстропротекающих процессах в веществе в диапазоне десятков пикосекунд и меньше (особенно в тех случаях, когда измеряемые световые потоки малы), — чрезвычайно трудная проблема, не поддающаяся решению традиционными для более медленных процессов фотоэлектрическими методами [12]. В настоящем цикле используются специально развитые для этих целей нелинейно-оптические корреляционные методы, которые в конечном счете сводят проблему измерения временных промежутков к измерению времени задержки одних импульсов относительно других.

В области теории развиты методы расчета нелинейных оптических восприимчивостей второго, третьего и четвертого порядка возбужденных кристаллических, атомно-молекулярных и плазменных сред, устанавливающие связь измеряемых в эксперименте характеристик нелинейно-оптического отклика исследуемых сред (амплитуда, поляриза-

ция, длительность и в ряде случаев фаза оптического импульса, излучаемого средой) и их микроскопических параметров — населенностей квантовых состояний, путей и скоростей релаксации, энергии возбуж-

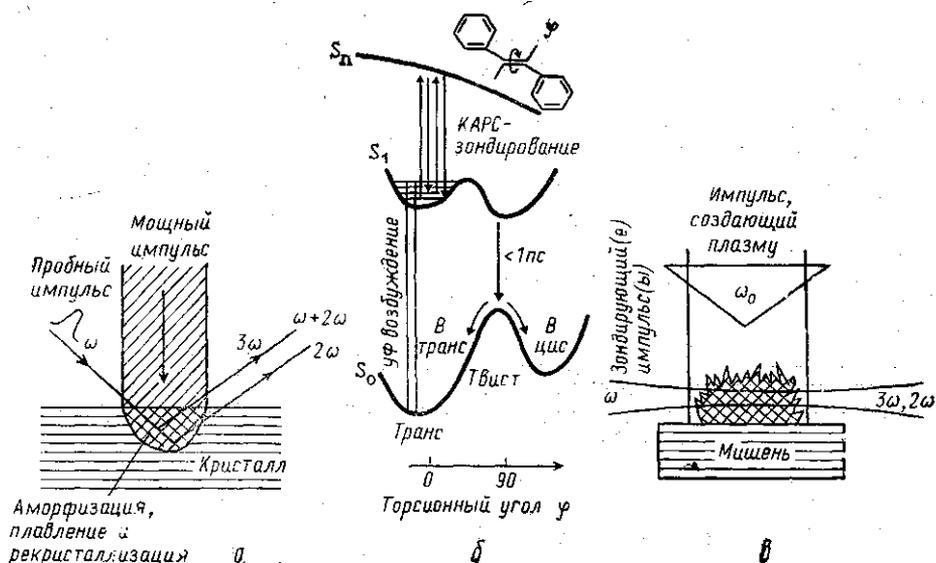


Рис. 1. Различные варианты структурно-чувствительной нелинейно-оптической диагностики с разрешением по времени (спектрохронографии) быстротекающих процессов, построенной по принципу «оптическое возбуждение—нелинейно-оптическое зондирование».

(а) Диагностирование в реальной наносекундной шкале времени лазерно-индуцированных фазовых переходов в приповерхностных слоях кристаллов (плавление, рекристаллизация, аморфизация). Мощный лазерный импульс возбуждения вызывает фазовые переходы в приповерхностной области кристалла, где поглощается энергия оптического возбуждения, а более слабый пробный импульс (с частотой ω), направляемый в подвергнутый облучению участок поверхности с изменяемой временной задержкой, зондирует происходящие структурные изменения, порождая отраженные сигналы с кратными и комбинационными частотами 2ω , 3ω , $\omega + 2\omega$.

(б) Возбуждение молекулы транс-стильбена (структурная формула показана вверху) в первое синглетное электронно-возбужденное состояние коротким (пикосекундным) импульсом ультрафиолетового излучения ($\lambda = 365 \text{ нм}$). Последующая трансформация структуры молекулы вдоль реакционной координаты (торсионный угол наклона одного фенольного кольца относительно другого) под воздействием сообщенной ей энергии возбуждения зондируется с переменной задержкой по времени с помощью нелинейно-оптической методики КАРС. Характерные времена внутримолекулярных конформационных изменений составляют единицы и десятки пикосекунд.

(в) Нелинейно-оптическое зондирование разлетающейся эрозивной лазерной плазмы, «приготовленной» с помощью мощного лазерного импульса, направляемого на металлическую мишень с помощью цилиндрической линзы. В нелинейно-оптическом отклике лазерной плазмы на зондирующие импульсы содержатся гармоники и комбинационные частоты, несущие информацию о составе, плотности и температуре плазмы

дения, момента дипольных, квадруольных и т. п. переходов между квантовыми уровнями, симметрии состояний, связанных между собой оптическими переходами и т. д. [5, 8, 9, 11, 13—20]. Учтены эффекты распространения и фазового синхронизма при зондировании возбужденных сред короткими мощными импульсами [21, 22]. В частности, впервые развита теория эффекта аномального возрастания нелиней-

ных оптических восприимчивостей возбужденных атомно-молекулярных газов и плазмы по мере увеличения температуры за счет учета квазирезонансного взаимодействия оптического излучения с электронными переходами в дискретном и непрерывном спектрах (см. рис. 2 и [14, 17, 18, 23]).

Выполнены работы по компьютерному моделированию фотоиндуцированных конформационных превращений сложных органических молекул (на примере стильбена) на фемтосе-

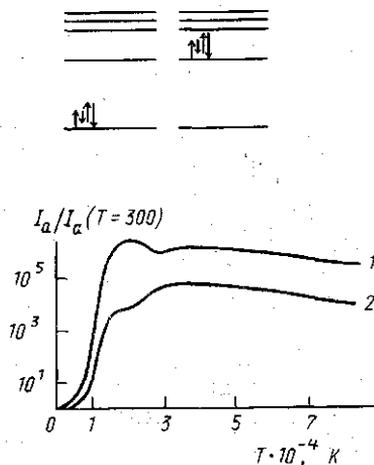


Рис. 2. Теоретически рассчитанная зависимость интенсивности сигнала КАРС I_a из атомарной водородной плазмы от температуры, нормированной на интенсивность I_a при $T=300$ К. При $T \approx 10^4$ К виден резкий рост интенсивности сигнала КАРС, вызванный термическим заселением высоколежащих состояний и «включением» квазирезонансных четырехфотонных переходов между дискретными состояниями и состояниями континуума [17] (см. вставку сверху рисунка). Частота сигнала КАРС $\omega_a = 2\omega_1 - \omega_2$. Используемые в расчетах значения частот зондирования: 1 — $\omega_1/2\pi c = 1,6 \cdot 10^4$ см $^{-1}$, $\omega_2/2\pi c = 1,5 \cdot 10^4$ см $^{-1}$; 2 — $\omega_1/2\pi c = 1,7 \cdot 10^4$ см $^{-1}$, $\omega_2/2\pi c = 1,6 \cdot 10^4$ см $^{-1}$.

кундной шкале времени. При этом впервые в практике компьютерного моделирования использовались методы молекулярной динамики с усреднением по фазовым траекториям в сочетании с точным учетом квантового характера фотостимулированных переходов [24—26].

Развита теория модификации спектра когерентного антистоксова рассеяния света кристалла (в частности, кремния), возбуждаемого короткими мощными импульсами излучения в полосе межзонного поглощения [5, 16, 27].

Впервые разработана теория четырехволнового смешения в газобразных атомарных средах в условиях резонанса гиперкомбинационного типа и предложена (а впоследствии экспериментально реализована и применена для диагностики оптических и электрических разрядов в газах) схема когерентной активной спектроскопии гиперкомбинационного рассеяния в возбужденных атомарных и ионизированных газах [28, 29]. Впервые предложена и теоретически обоснована поляризационно-чувствительная спектроскопия четырехволнового смешения типа КАРС с поляризационным подавлением когерентного пьедестала, в настоящее время широко применяемая для диагностики быстропротекающих процессов в молекулах, находящихся в малых концентрациях в растворах [5, 30].

В последние годы автором цикла предложены и развиты теоретические основы новых схем нелинейной оптической спектроскопии хиральных (зеркально-асимметричных) макромолекул, являющихся основными элементами живых организмов и продуктов их жизнедеятельности [20, 31, 32]. Показано, что путем измерения частотной дисперсии дипольных нелинейных восприимчивостей четных порядков в растворах таких молекул (отсутствующих в центросимметричных жидкостях и рацемических растворах хиральных молекул) возможно развитие новых схем когерентной нелинейной оптической спектроскопии, обладающих повышенными информативностью, пространственным и временным разрешением, чувствительностью к лазерно-индуцирован-

ным структурно-конформационным изменениям молекул со спиральной структурой. Тем самым открывается возможность приблизиться к разгадке удивительного феномена исключительной «хиральной чистоты» молекул живой природы, а также обеспечить полностью оптическое управление знаком «закрутки» молекулярных спиралей биологического происхождения.

Автор представленного цикла и руководимые им группы экспериментаторов создали несколько поколений экспериментальных лазерных систем и лазерных компьютерно-управляемых спектрохронографических комплексов высокого и сверхвысокого временного разрешения, воплощающих в себе самые современные (на момент создания) достижения нелинейной оптики и лазерной технологии.

В начале 1980-х гг. впервые в мировой практике в МГУ был создан лазерный комплекс для импульсного лазерного отжига (ИЛО) поверхности полупроводников с одновременным нелинейно-оптическим мониторингом процесса ИЛО по генерации отраженной второй гармоники, регистрирующим в реальном наносекундном масштабе времени процесс плавления—рекристаллизации приповерхностных слоев полупроводниковых материалов [8, 33, 34]. К середине 1980-х гг. также впервые в мировой практике был создан уникальный автоматизированный лазерный комплекс для импульсного резонансного многофотонного ИК-возбуждения многоатомных молекул в газовой фазе и селективного помодового контроля распределения энергии возбуждения в молекулах с помощью четырехволнового смещения в схеме КАРС с наносекундным временным разрешением [15, 35]. Впоследствии этот комплекс был дополнен системой для селективного двухквантового комбинационного возбуждения колебательных степеней свободы многоатомных молекул (см. рис. 3 и [36, 37]). Эти работы впоследствии получили развитие в исследованиях физиков из Гарвардского университета (США) и Института общей физики РАН.

В 1986 г. был создан экспериментальный комплекс с пикосекундным временным разрешением для регистрации лазерно-индуцированных изменений контура линии когерентного антистоксова комбинационного рассеяния поверхности кристаллического кремния. До настоящего времени нигде в мире не удалось повторить экспериментов, выполненных с применением этого комплекса [8, 27].

Начиная с 1988 г. создавался и непрерывно совершенствовался уникальный автоматизированный комплекс на базе пикосекундных лазеров с непрерывной накачкой для измерения фотоиндуцированных конформационных изменений в полиеновых молекулах, находящихся в растворе [38—41]. Современное развитие этой техники позволило исследовать начальные стадии фотоконформационных изменений в молекуле стильбена в течение первых нескольких пикосекунд после ее резонансного возбуждения ультрафиолетовым импульсом длительностью в несколько сотен фемтосекунд [42]. В настоящее время эта область исследований интенсивно развивается рядом экспериментальных групп в США, Японии, Франции.

Один из первых в мире нелинейно-оптических спектрометров с фемтосекундным временем разрешения был создан автором настоящего цикла с сотрудниками в начале 1990-х гг. [43, 44]. С помощью этого спектрометра были выполнены пионерские исследования первых стадий лазерно-индуцированных трансформаций приповерхностных слоев полупроводникового кристалла арсенида галлия, позволившие сделать вывод о наличии сверхбыстрых (временной масштаб — несколько десятков фемтосекунд, т. е. меньше периода колебаний опти-

ческих фононов в этом кристалле) стадий разупорядочения кристаллической решетки нетепловой природы («холодное плавление») [45]. В 1995 г. этот результат был подтвержден в экспериментах группы фон дер Линде из Университета Эссена (ФРГ).

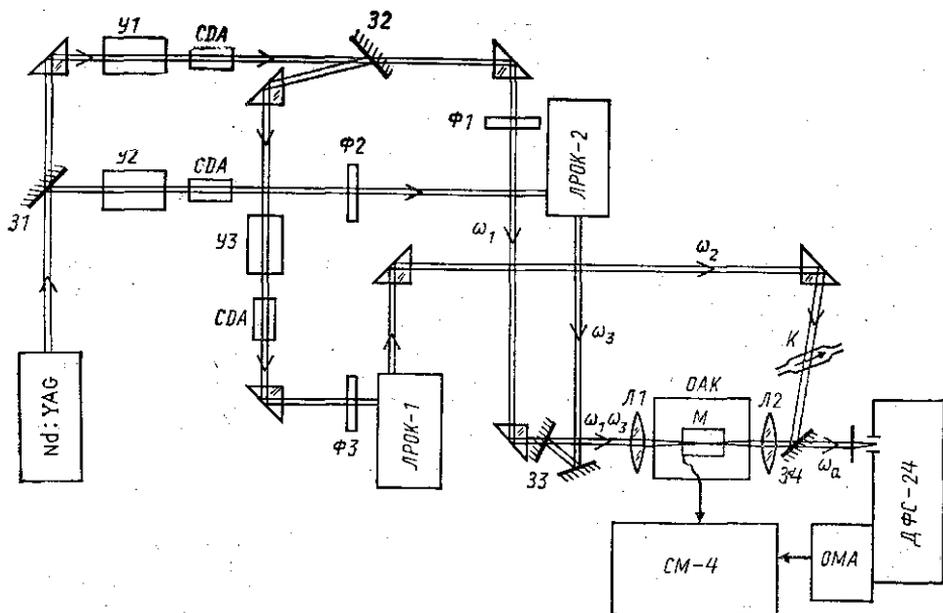


Рис. 3. Блок-схема автоматизированного нелинейно-оптического спектрохронографического комплекса с наносекундным временным разрешением для диагностики процессов переноса колебательной энергии в ансамбле многоатомных молекул в газовой фазе. Селективное возбуждение полностью симметричных колебаний молекул газа, содержащегося в оптико-акустической кювете (ОАК), осуществляется за счет двухквантового комбинационного возбуждения (ДКВ); измерение населенностей в других колебательных модах, возникших в течение длительности импульсов накачки за счет колебательно-неупругих столкновений молекул, производится с помощью КАРС одновременно с ДКВ. Изменением давления в ОАК варьируется время колебательной релаксации селективно-возбужденного колебательного состояния [36]. Nd:YAG — наносекундный лазер на кристалле алюмоиттриевого граната, активированного ионами неодима, У1—У3 — лазерные усилители на тех же кристаллах, CDA — удвоители частоты лазерного излучения на кристаллах CDA, ЛРОК-1,2 — перестраиваемые по частоте лазеры на растворах органических красителей, ОМА — оптический многоканальный анализатор, ДФС-24 — двойной монохроматор, 31—34 — зеркала, Ф1—Ф3 — оптические фильтры, Л1 и Л2 — линзы, ω_1 , ω_2 , ω_3 — частоты волн накачки, ω_a — частота сигнала КАРС. Мини-ЭВМ СМ-4 управляет отдельными элементами комплекса и собирает и обрабатывает данные с фотодетекторов и акустического микрофона М

С 1988 г. по настоящее время в лаборатории Международного лазерного центра МГУ работает (и постоянно совершенствуется) уникальный компьютеризованный лазерный комплекс четырехволнового нелинейно-оптического смешения для диагностики сверхбыстрых процессов в газовой плазме электрических и оптических разрядов [13, 21, 29, 46, 47]. Лишь в самое последнее время исследователи из научных групп ФРГ и США, Узбекистана и Гонконга смогли повторить некоторые из экспериментов, выполненных ранее на этом комплексе в МГУ.

Не имеет аналогов в мире созданный в 1989—1991 гг. под руководством автора лазерный микроспектроаналитический комплекс с пикосекундным временным разрешением и микронным пространственным разрешением для изучения сверхбыстрых фотоиндуцированных процес-

сов в молекулах красителей фотосенсибилизаторов, внедренных в живые клетки. Этот комплекс представляет собой гибрид спектрометра комбинационного рассеяния, флуоресцентного спектрометра с пикосекундным лазерным возбуждением и микроскопа, снабженный дополнительно системой коррелированного по времени счета отдельных фотон с временным разрешением в десятки пикосекунд [48—51].

Ряд нелинейно-оптических спектрохронографов с нано- и пикосекундным временным разрешением, созданных под руководством автора, эксплуатируется в зарубежных лабораториях (университеты Белграда (Югославия), Братиславы (Словакия), Бордо (Франция), Твенте (Нидерланды)).

Основные обобщенные физические результаты, полученные в цикле работ автора, состоят в следующем.

Впервые непосредственно измерены пути и скорости межмодового распределения и релаксации энергии колебательного возбуждения в многоатомных молекулах в газовой фазе, селективно возбуждаемых с помощью импульсного лазерного инфракрасного излучения [15, 52] или двухквантовой комбинационно-лазерной накачки [36, 52—56]. Установлено отсутствие «кинетического» проявления резонанса Ферми между близкими колебательными состояниями одинаковой симметрии в молекуле двуокиси углерода (см. рис. 4 и [36, 52]).

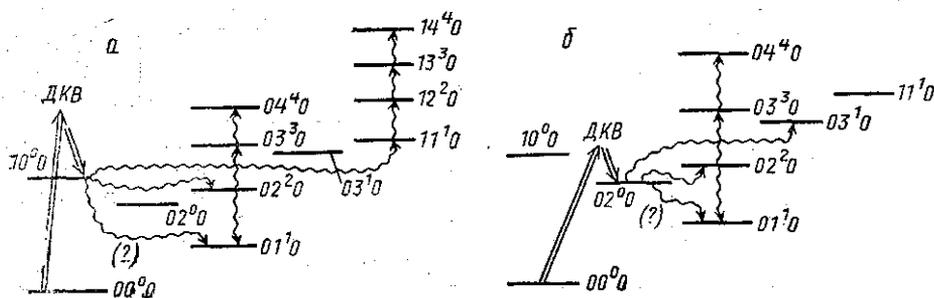


Рис. 4. Диаграмма энергетических состояний в молекуле углекислого газа и путей столкновительного энергообмена между ними [36]. Состояния 10^0_0 (а) (полносимметричное колебание молекулы CO_2) и 02^2_0 (б) (обертон) селективно заселялись с помощью двухквантового комбинационного возбуждения (ДКВ) (т. е. парой лазерных импульсов с частотами ω_1, ω_2 такими, что разность частот $\omega_1 - \omega_2$ равна частоте соответствующего перехода в молекуле CO_2). Населенности других колебательных состояний этой молекулы зондировались с помощью КАРС. Основным (и весьма неожиданным) результатом этих исследований оказалось отсутствие «кинетического» проявления резонанса Ферми, т. е. практически полное отсутствие канала столкновительной передачи энергии между связанными внутримолекулярным резонансом Ферми состояниями одинаковой симметрии 10^0_0 и 02^2_0 .

Выполнены первые эксперименты по диагностике процесса ИЛО разупорядоченных ионной бомбардировкой приповерхностных слоев кристалла арсенида галлия с наносекундным временным разрешением с помощью генерации второй гармоники, отраженной от подверженно ИЛО участка кристалла [3, 4, 33, 34]. По отчетливо регистрируемому исчезновению сигнала отраженной второй гармоники в течение длительности отжигающего лазерного импульса (рис. 5) было установлено возникновение центросимметричной фазы на поверхности образца (т. е. расплава), и по постепенному нарастанию интенсивности отраженной второй гармоники по окончании импульса, осуществляющего ИЛО, регистрировался процесс рекристаллизации облученного приповерхностного участка. Тем самым было впервые экспериментально до-

казано плавление приповерхностного слоя кристалла арсенида галлия, подвергнутого ИЛО с помощью наносекундных лазерных импульсов, и отвергнута активно дискутировавшаяся гипотеза «холодного» лазерного отжига, не сопровождаемого плавлением на наносекундных временах. В дальнейшем с применением фемтосекундных лазерных импульсов было установлено наличие фазы «холодного плавления» кристалла арсенида галлия на временах, не превышающих период оптических колебаний кристаллической решетки (меньше 200 фс) (см. рис. 6 и [45]). В настоящее время техника отраженной второй гармо-

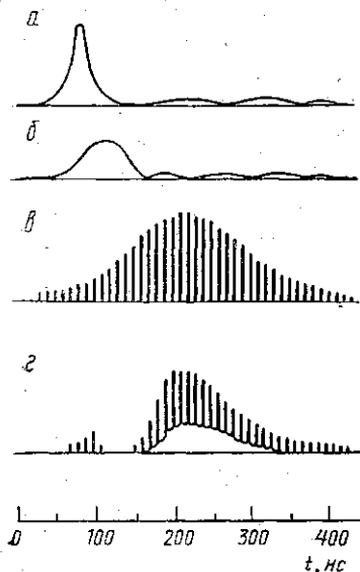


Рис. 5. Осциллограммы вызывающего плавление поверхности полупроводника импульса рубинового лазера (а), отраженного пучка гелий-неонового лазера (б), пучка зондирующих пикосекундных импульсов лазера на Nd:YAG (в) и отраженного сигнала на частоте второй гармоники (г). Развертки на осциллограммах синхронизованы [5]

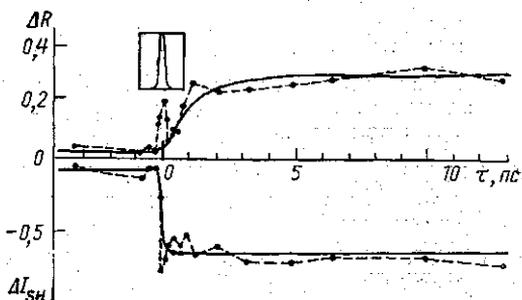


Рис. 6. Динамика линейного (вверху) и нелинейного (внизу) отражения на частоте второй оптической гармоники пробных импульсов фемтосекундного лазера на красителе от поверхности кристалла арсенида галлия, подвергнутого воздействию мощного фемтосекундного импульса возбуждения (точки — эксперимент, сплошная кривая — теория). По оси абсцисс отложено время задержки. На вставке вверху показана кросс-корреляционная функция импульсов возбуждения, вызывающих сверхбыстрое плавление поверхности, и импульсов зондирования. Видно, что падение сигнала отраженной второй гармоники как функции времени задержки между импульсами возбуждения и зондирования происходит за время, меньшее длительности используемых импульсов (~ 100 фс), тогда как изменение линейного отражения происходит за большее время (~ 1 пс) [45]

ники нашла широкое применение при исследовании состояния и диагностике быстрых процессов на поверхности твердых тел и на внутренних границах раздела. В работах автора с сотрудниками, относящихся к 1985—1992 гг., с помощью этой техники изучены особенности разупорядочения приповерхностных слоев полупроводниковых кристаллов при ионной имплантации, механические напряжения в двухслойных системах полупроводник—окисел, генерация плотной горячей плазмы при воздействии мощных фемтосекундных импульсов на поверхность металлов и др. [57]. Итоги первого этапа этих исследований подведены в монографиях, опубликованных в 1989 и 1990 гг. издательствами Харвуд (Лондон) [3] и Тойбнер (Лейпциг) [4].

С использованием нелинейно-оптической спектхронографии газовой плазмы оптического и электрического разрядов установлены каналы возбуждения и релаксации отдельных атомарных и ионных компонент активной среды импульсных лазеров на парах металлов и пред-

ложены методы оптимизации работы таких лазеров [58—60]. С помощью когерентной спектроскопии комбинационного и гиперкомбинационного рассеяния света выявлена природа аномально высокой оптической нелинейности возбужденных атомно-молекулярных газов и плазмы (квазирезонанс с электронными переходами в дискретном и непрерывном спектрах) [14, 17, 23]. Горячая подкритическая газовая плазма оптического разряда с оптимизированными параметрами предложена в качестве новой высокоэффективной среды для умножителей частоты мощных импульсных лазеров; экспериментально зарегистрирована рекордно высокая для далеких от точного резонанса газообразных сред эффективность утроения частоты пикосекундного лазера (3%), получены интенсивные импульсы более высоких гармоник вплоть до 9-й, выработаны новые алгоритмы измерения динамических пространственных параметров плазмы [11, 21, 61].

Методами флуоресцентной и КАРС-спектроскопии с пикосекундным, а в последнее время и фемтосекундным временным разрешением исследована динамика процессов электронного возбуждения, релаксации и фотоиндуцированных конформационных изменений в органических молекулах, резонансно возбуждаемых сверхкороткими лазерными импульсами (см. рис. 7 и [10, 39—41, 62—64]).

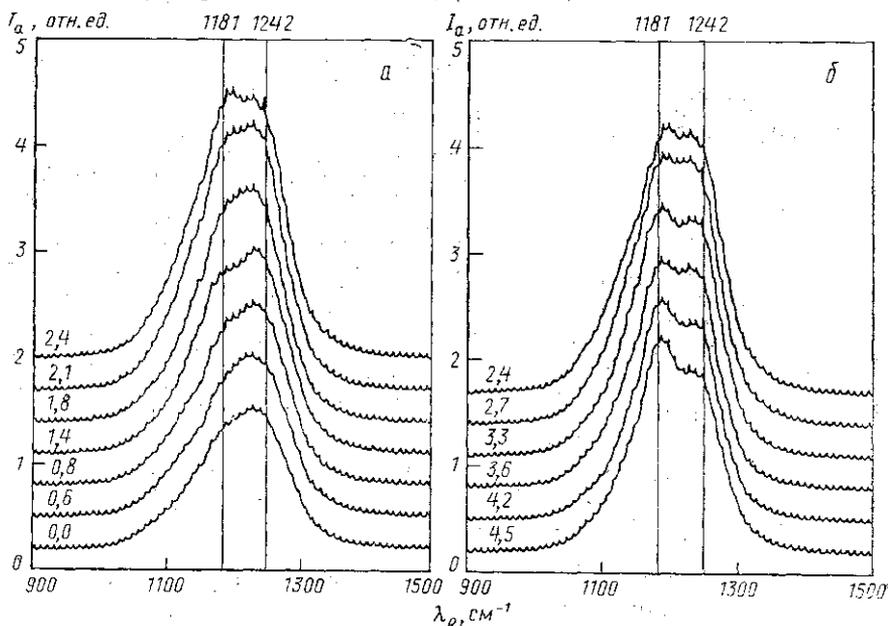


Рис. 7. Спектры КАРС из возбужденного S_1 -состояния молекулы транс-стильбена в гептане с субпикосекундным временным разрешением в области полос комбинационного рассеяния с частотами 1181 и 1242 см^{-1} при различных временах задержки между импульсами УФ-возбуждения ($\tau_p < 500$ фс, $\lambda = 299$ нм) и КАРС-зондирования ($\tau_p < 500$ фс, $\lambda_1 = 598$ нм, $\lambda_2 \approx 640\text{--}665$ нм): от 0 до 2,4 пс (а) и от 2,4 до 4,5 пс (б) [42] (цифры рядом с кривыми; λ_R — отстройка от комбинационного резонанса)

Методы нелинейной оптики оказались весьма эффективными в изучении биологической роли возбужденного молекулярного кислорода в синглетном состоянии, процессов фотодинамического действия лазерного излучения на опухолевые ткани, при исследовании структуры и фотоиндуцированных конформационных изменений белков и полипептидов [30, 48, 50, 51, 65, 66].

Автором цикла предложены новые высокочувствительные нелинейно-оптические методы для исследования состояния и конформационных изменений в биомолекулах со спиральной структурой и начато экспериментальное изучение явления исключительной «хиральной чистоты» живой природы на молекулярном уровне [20, 31, 32, 67—71].

Таким образом, можно заключить, что в результате выполнения представленного цикла работ создано новое плодотворное научное направление — нелинейно-оптическая структурно-чувствительная лазерная диагностика для исследования сверхбыстрых процессов в веществе (лазерная спектхронография) с временным разрешением от единиц наносекунд до десятков и сотен фемтосекунд.

Приоритет работ, вошедших в настоящий цикл, подкреплен многочисленным цитированием этих работ в отечественной и зарубежной литературе, участием автора и его сотрудников с приглашенными докладами в крупнейших международных конференциях по оптике сверхбыстрых процессов, когерентной и нелинейной оптике, спектроскопии с разрешением по времени, физике и технике лазеров ультракоротких импульсов и т. д.

Прочный научный авторитет автора представленного цикла в области сверхбыстрой нелинейно-оптической диагностики и спектроскопии подтвержден его участием в программных и организационных комитетах крупнейших российских и международных конференций по этой тематике и членством в редколлегиях научных журналов «Квантовая электроника» (Москва, Россия — с 1992 г.), «Nonlinear Optics» (London, U. K. — с 1992 г.), «Journal of Raman Spectroscopy» (Amsterdam, Holland — с 1994 г.), «Optics Communications» (London, U. K. — с 1995 г.).

Автор глубоко признателен своим коллегам, аспирантам и студентам, в сотрудничестве с которыми только и было возможно выполнение этого большого и трудного цикла экспериментальных и теоретических работ.

С особой теплотой и глубокой благодарностью автор вспоминает многолетнее тесное сотрудничество и дружескую, твердую поддержку этих работ со стороны своего учителя С. А. Ахманова. Его точные советы, конструктивная критика, научно-организационная поддержка на всех этапах выполнения этих работ — от выработки основной идеи до обсуждения результатов — сыграли неоценимо важную роль.

Особое счастье выпало автору этих работ на начальном этапе разворачивания исследований по лазерной сверхбыстродействующей диагностике — учиться и работать в Лаборатории нелинейной оптики и на кафедре волновых процессов физического факультета МГУ, основанных и руководимых академиком Р. В. Хохловым до его безвременной кончины в 1977 г.

В год 70-летия со дня рождения Р. В. Хохлова автор посвящает эту работу его светлой памяти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Проблемы нелинейной оптики. М., 1964.
2. Бломберг Н. Нелинейная оптика/Пер. с англ. под ред. С. А. Ахманова, Р. В. Хохлова. М., 1965.
3. Akhmanov S. A., Shumay I. L., Koroteev N. I.//Laser Science and Technology: An International Handbook/Eds. V. S. Letokhov, S. V. Shank, Y. R. Shen, H. Walther. London, 1989. P. 76.
4. Akhmanov S. A., Emel'yanov V. I., Koroteev N. I. Interaction of Strong Laser Radiation with Solids and Nonlinear Optical Diagnostics of Surfaces. Leipzig, 1990.

5. Коротеев Н. И., Шумай И. Л. Физика мощного лазерного излучения. М., 1991.
6. Коротеев Н. И.//УФН. 1972. 106. № 4. С. 735.
7. Коротеев Н. И.//УФН. 1987. 152, № 3. С. 493.
8. Коротеев Н. И., Шумай И. Л.//Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. М., 1988. Т. 1. С. 49.
9. Koroteev N. I. Lasers in Atomic, Molecular and Nuclear Physics/Ed. V. S. Letokhov. Singapore, 1989. P. 220.
10. Шкуринов А. П., Толеутаев Б. Н., Коротеев Н. И.//Coherent Raman Spect. Recent Adv./Eds. G. Marowsky, V. V. Smirnov. 1992. V. 63. P. 186.
11. Желтиков А. М., Коротеев Н. И., Федотов А. Б.//Опт. и спектр. 1992. 72, № 4. С. 971.
12. Ахманов С. А., Выслоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М., 1989.
13. Gladkov S. M., Koroteev N. I.//Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. М., 1988. Т. 2. С. 4.
14. Gladkov S. M., Koroteev N. I.//УФН. 1990. 160, № 7. С. 42.
15. Амбарцумян Р. В., Коротеев Н. И. и др.//Изв. АН СССР, сер. физ. 1983. 47, № 10. С. 1931.
16. Говорков С. М., Коротеев Н. И. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1986. 44, № 2. С. 98.
17. Gladkov S. M., Koroteev N. I. и др.//Письма в ЖТФ. 1986. 12, № 12. С. 728.
18. Koroteev N. I.//Phys. Rev. Lett. 1979. 43. P. 398.
19. Коротеев Н. И., Макаров В. А. и др.//Nonlinear Opt. 1994. 8. P. 231.
20. Коротеев Н. И.//ЖЭТФ. 1994. 106, № 5(11). С. 1260.
21. Koroteev N. I., Zheltikov A. M., Fedotov A. B.//Laser Physics. 1994. 4, N 3. P. 569.
22. Koroteev N. I., Naumov A. N., Zheltikov A. M.//Laser Physics. 1994. 4, N 6. P. 1160.
23. Коротеев Н. И., Gladkov S. M., Zheltikov A. M. и др.//Изв. АН СССР, сер. физ. 1988. 52, № 2. С. 217.
24. Koroteev N. I., Zadkov V. N., Grishanin B. A., Chikishev A. Yu.//Femtosecond Reaction Dynamics. Elsevier, 1993.
25. Zadkov V. N., Grishanin B. A., Vachev V. D. et al.//Chem. Phys. Lett. 1993. 215, N 4. P. 306.
26. Koroteev N. I., Zadkov V. N., Vachev V. D. et al.//J. Phys. Chem. 1995. 99, N 4. P. 5247.
27. Gоворков S. V., Shumay I. L., Koroteev N. I., Zadkov V. N.//Solid State Commun. 1987. 62. P. 331.
28. Коротеев Н. И., Желтиков А. М., Ильясов О. С.//Письма в ЖЭТФ. 1991. 54, № 1. С. 143.
29. Koroteev N. I., Zheltikov A. M., Fedotov A. B., Ilyasov O. S.//Nuovo Cim. 1993. 14D, N 10. P. 1003.
30. Koroteev N. I., Chikishev A. Yu., Lucassen G. W. et al.//Biophys. J. 1992. 63. P. 976.
31. Коротеев Н. И. Преприят физ. ф-та МГУ. 1985, № 29.
32. Koroteev N. I.//Frontier in Nonlinear Optics. The Sergei Akhmanov Memorial Volume/Eds. H. Walther, N. Koroteev, M. O. Scully. Inst. of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993. P. 228.
33. Коротеев Н. И., Ахманов С. А. и др.//Квант. электроника. 1983. 10, № 6. С. 1077.
34. Koroteev N. I., Akhmanov S. A. et al.//Opt. Commun. 1983. 43, N 3. P. 202.
35. Коротеев Н. И., Gladkov S. M. и др.//Квант. электроника. 1984. 11, № 3. С. 559.
36. Бродниковский А. М., Коротеев Н. И. и др.//ЖЭТФ. 1983. 84, № 5. С. 1664.
37. Koroteev N. I., Gladkov S. M., Karimov M. G.//Opt. Lett. 1983. 8, N 6. P. 298.
38. Kamalov V. F., Toleutaev B. N., Koroteev N. I., Shkurinov A. P.//Chem. Phys. Lett. 1988. 147, N 4. P. 335.
39. Камалов В. Ф., Коротеев Н. И.//Опт. и спектр. 1988. 64, № 4. С. 770.
40. Kamalov-V. F., Toleutaev B. N., Koroteev N. I. et al.//J. Phys. Chem. 1989. 93. P. 5645.
41. Kamalov V. F., Toleutaev B., Koroteev N. I.//Time Resolved Spectroscopy/Ed. R. Clark, R. Hester. London, 1989. P. 255.
42. Koroteev N. I., Shkurinov A. P., Jonusauskas G., Rulliere C.//Chem. Phys. Lett. 1994. 223. P. 573.

43. Govorkov S. V., Shumay I. L., Koroteev N. I.//Int. Conf. Ultraphast Processes in Spectroscopy, Bayreuth, London, 1991. P. 113.
44. Govorkov S. V., Shumay I. L., Koroteev N. I., Yakovlev V. V. //Nonlinear Optics. 1991. 1. P. 313.
45. Govorkov S. V., Shumay I. L., Koroteev N. I., Emel'yanov V. I.//J. Luminescence. 1992. 53. P. 153.
46. Коротеев Н. И., Бункин С. Б., Гладков С. М. и др.//Опт. и спектр. 1989. 66, № 5. С. 1182.
47. Гладков С. М., Коротеев Н. И., Желтиков А. М. и др.//Квант. электроника. 1989. 16, № 7. С. 1430.
48. Egorov S. Yu., Kamalov V. F., Koroteev N. I. et al.//Chem. Phys. Lett. 1989. 163, N 4, 5. P. 421.
49. Варданян А. Г., Коротеев Н. И. и др.//Квант. электроника. 1989. 16, № 9. С. 1920.
50. Koroteev N. I., Chernyaeva E. B., Vardanyan A. G. et al.//J. Photochemistry and Photobiology B: Biol. 1991. 10. P. 239.
51. Зинуков С. В., Камалов В. Ф., Коротеев Н. И., Красновский А. А. //Опт. и спектр. 1991. 70, № 4. С. 790.
52. Brodnikovskii A. M., Gladkov S. M., Koroteev N. I.//Opt. Commun. 1982. 40, N 4. P. 312.
53. Гладков С. М., Коротеев Н. И., Каримов М.//Письма в ЖЭТФ. 1982. 35, № 9. С. 381.
54. Бродниковский А. М., Коротеев Н. И. и др.//Опт. и спектр. 1983. 54. С. 385.
55. Амбарцумян Р. В., Ахманов С. А., Коротеев Н. И. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1982. 35, № 4. С. 170.
56. Гладков С. М., Коротеев Н. И., Желтиков А. М.//Опт. и спектр. 1988. 65, № 2. С. 249.
57. Абдуллаев А. Ю., Говорков С. В., Петров Г. И. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1986. 12, № 22. С. 1363.
58. Гладков С. М., Желтиков А. М., Ильясов О. С. и др.//Квант. электроника. 1991. 18, № 6. С. 727.
59. Koroteev N. I., Zheltikov A. M.//Mol. Cryst. Liq. Cryst.-Sec. B: Nonlinear Optics. 1992. 3. P. 319.
60. Koroteev N. I., Zheltikov A. M., Fedotov A. V. et al.//Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.: Suppl. Phys. Vibr. 1994. 58, N 3. P. 115.
61. Гладков С. М., Коротеев Н. И., Рычев М. В., Федоров А. Б.//Письма в ЖЭТФ. 1986. 12, № 20. С. 1272.
62. Камалов В. Ф., Квац В. В., Коротеев Н. И. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1987. 45, № 2. С. 69.
63. Камалов В. Ф., Толеутаев В. Н., Шкуринов А. П., Коротеев Н. И. //Письма в ЖЭТФ. 1988. 47, № 2. С. 82.
64. Kamalov V. F., Shkurinov A. P., Toleutaev V., Koroteev N. I.//J. Mol. Structure, 1990. 217. P. 19.
65. Егоров С. Ю., Зинуков С. В., Камалов В. Ф. и др.//Опт. и спектр. 1988. 65, № 4. С. 899.
66. Chikishev A. Yu., Toleutaev V. N., Shkurinov A. P., Koroteev N. I. //J. de Physique. 1991. V. I. Colloque N 7, Suppl. 111, N 12. P. 562.
67. Дубровский А. В., Коротеев Н. И., Шкуринов А. П.//Письма в ЖЭТФ. 1992. 56, № 11. С. 570.
68. Shkurinov A. P., Dubrovskii A. V., Koroteev N. I.//Phys. Rev. Lett. 1993. 70, N 8. P. 1085.
69. Коротеев Н. И.//Квант. электроника. 1994. 21, № 11. С. 1063.
70. Koroteev N. I.//Biospectroscopy. 1995. 1, N 5. P. 341.
71. Коротеев Н. И.//Письма в ЖЭТФ. 1995. 61, № 2. С. 83.