

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ

А. И. ПЛЕХАНОВ



Лаборатория физики лазеров, основателем которой был чл.-кор. РАН С.Г. Раутиан, насчитывает тридцатилетнюю историю. Возвращение С.Г. Раутиана в Академгородок и его появление в Институте было мощной интеллектуальной прививкой. Около полу-

сотни молодых, энергичных, увлеченных наукой людей с энтузиазмом стали осваиваться на новом месте. Появился общий физический семинар, а впоследствии и межинститутский семинар, который посещали как солидные ученые, так и научная молодежь. Стиль работы Сергея Глебовича заключался в предоставлении свободы творчества и конструктивной помощи в обсуждении и решении возникающих научных и научно-организационных вопросов. Этот подход способствовал творческой активности сотрудников и вылился в ряд важных открытий фундаментального характера. Сюда можно отнести очень весомый вклад в развитие нелинейной спектроскопии атомов и молекул (С.Г. Раутиан, А.М. Шалагин, С.Н. Атутов, Э.Г. Сапрыкин и др.), физики газовых (В.И. Долин с сотрудниками) и твердотельных (К.Г. Фоллин с сотрудниками) лазеров, взаимодействия лазерного излучения с биологическими молекулами (М.И. Штокман, С.Ю. Новожилов с сотрудниками).

Современный этап исследований, проводимых в лаборатории физики лазеров, связан с созданием и исследованием наноструктурных материалов, которые могут применяться в оптических нанотехнологиях, т.е. в технологиях, которые манипулируют фотонами на наномасштабах. Нанонаука развивается буквально на наших глазах, на «стыке» ряда считавшихся ранее несовместимых наук и технологий (физика, химия, атомная микроскопия, информационные технологии, биохимия и т.д.), что придает ей существенно междисциплинарный характер.

К числу наноструктурных материалов можно отнести фотонные кристаллы - периодические ансамбли наноструктур, обладающие системой энергетических зон, в которых запрещено существование электромагнитного излучения с длинами волн, соизмеримыми с периодом структуры. В основе приложений фотонных

кристаллов лежат две концепции - контроль над спонтанным излучением и локализация света. По существу, применение фотонных кристаллов для создания различных устройств управления светом - это новая парадигма, поскольку такие фотонно-кристаллические структуры могут управлять светом подобно тому, как обычные кристаллы делают это с электронами. В то же самое время ФК открывают новые возможности для фундаментальных исследований процессов, включающих взаимодействие излучения с веществом при новых условиях.

Несколько лет назад в сотрудничестве с Институтом минералогии и петрографии СО РАН были получены фотонные кристаллы на основе искусственного опала, состоящего из плотноупакованных в гранецентрированную решетку сфер кремнезёма. Приготовление тонких опалоподобных монокристаллических пленок позволило перейти к созданию трехмерных фотонных структур с заданной функциональностью (Д.В. Калинин (ИГиМ), А.И.Плекханов, В.В. Сердобинцева (ИГиМ)).

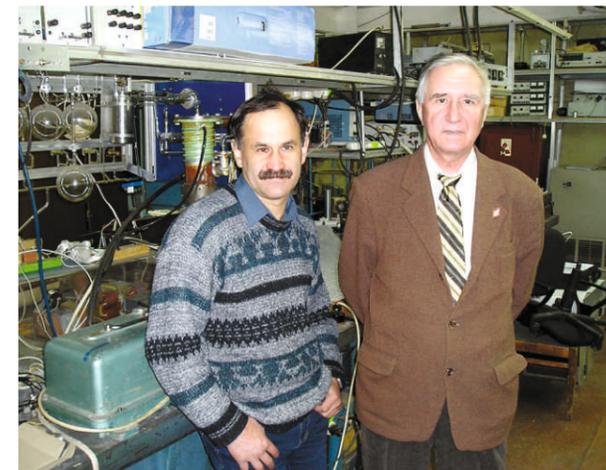
Приоритетное направление науки и техники, связанное с фотоникой, требует создания новых оптических материалов. Например, сверхбыстрое нелинейно-оптическое преобразование сигналов базируется на явлениях нелинейной оптики, которые происходят в средах с показателем преломления и поглощения, зависящих от интенсивности и поляризации излучения. Для эффективного преобразования сигналов необходимы среды, обладающие одновременно высокими и малоинерционными (время отклика менее 1 пс) нелинейно-оптическими коэффициентами, термической и фотохимической стабильностью и рядом других свойств. В связи с этим в последнее время в центре внимания исследователей оказываются наноструктурные материалы типа полупроводниковых квантовых ям и точек, полисопряженных полимеров, фуллеренов, фрактальных металлических кластеров и т.п. благодаря их необычным оптическим свойствам, обусловленным размерностью и дискретностью в пространстве таких систем.

Для большинства материалов взаимодействие между светом и веществом уменьшается, когда размер структур много меньше, чем длина волны света. Однако металлы, в которых возможно возбуждение коллективных осцилляций свободных электронов, называемых

поверхностными плазмонами, могут концентрировать электромагнитные поля на наномасштабах, усиливая величину локального поля на несколько порядков величины. По этой причине плазмонные наноструктуры могут быть использованы как нанофотонные компоненты для усиления нелинейно-оптического отклика среды или как оптический соединитель на границе нано/микрораздела, действуя как оптическая наноантенна, значительно увеличивая эффективность взаимодействия света с веществом на наномасштабах.

В лаборатории физики лазеров выполнены фундаментальные нелинейно-спектроскопические исследования оптических свойств фрактальных кластеров металлов, открыто гигантское усиление собственной оптической нелинейности при агрегации наночастиц серебра в кластеры, обнаружена селективная наномасштабная фотомодификация металлических кластеров и нелинейная оптическая активность наноагрегатов серебра (Ю.Э. Данилова, В.П. Сафонов, С.В. Перминов (ИФП)).

Если кластеры серебра имеют неупорядоченную структуру, то такой класс объектов как комплексы органических красителей - так называемые J-агрегаты, обладают упорядоченной структурой и коллективными оптическими и нелинейно-оптическими свойствами. В содружестве с Новосибирским институтом органической химии СО РАН нами был создан новый вид эффективных нелинейно-оптических сред - тонкопленочный композиционный материал на основе J-агрегатов цианиновых красителей с высокой степенью конверсии и устойчивостью J-агрегатного состояния (А.И. Плеханов, В.В. Шелковников (НИОХ) с сотрудниками). Впервые обнаружено: повышение нелинейной восприимчивости среды при её легировании кластерами благородных металлов, скейлинг кубической восприимчивости J-агрегатов от длины делокализации экситона, а также существенный рост нелинейного оптического отклика J-агрегатов тиокарбониланина с увеличением длительности возбуждающего излучения от фемтосекунд до наносекунд. Впервые предложены и успешно применены пассивные



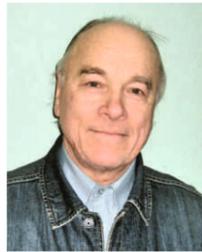
В. А. Сорокин и Э. Г. Сапрыкин.

тонкопленочные лазерные затворы для синхронизации мод Nd:YAG-лазера на основе J-агрегатов тиокарбониланинбетаниновых красителей, в несколько раз увеличивающие глубину модуляции потерь по сравнению с обычным затвором на основе раствора быстрорелаксирующего красителя (Р.В. Марков, А.С. Кучьянов, А.И. Плеханов, А.Э. Симанчук). Практическая ценность полученных результатов заключается в возможных применениях стабильных пленок молекулярных агрегатов в качестве малоинерционных пассивных лазерных затворов, в качестве элементов для терагерцового демультимплексирования световых сигналов в оптической коммуникации и в схемах для устранения нестабильности ультракоротких импульсов лазеров. Следует заметить, что процессы фотовозбуждения молекулярных J-агрегатов подобны тем, что происходят в светособирающих антеннах зеленого листа, а одной из наиболее тонких технологий в масштабе нескольких молекулярных агрегатов является процесс фотосинтеза, аккумулирующий энергию для жизни на Земле. Тот, кто





Г. Н. Николаев



В. Д. Угожаев



А. С. Кучьянов



С. Л. Микерин

сможет воспроизвести этот процесс с помощью нанотехнологий, будет всегда иметь неограниченное количество энергии. Молекулярные J-агрегаты могут также применяться в качестве активного слоя в органических светоизлучающих диодах. Достигнутая на сегодняшний день спектральная яркость таких светодиодов на два порядка превышает яркость экрана монитора.

С целью получить новые способы лазерной генерации и расширить ее диапазон особый интерес вызывает возможность генерации на переходах в основное состояние атомов или молекул или на нижайшие энергетические уровни, максимально заселенные в отсутствие возмущения. Именно с этой ситуацией связывается надежда получить максимально коротковолновое излучение.

Начиная с Роберта Вуда классическим объектом исследования оптических переходов в газовых средах являются пары натрия. На примере паров натрия в смеси с буферным газом нами была продемонстрирована возможность генерации на D₁-линии, т.е генерации в основное состояние. Этот эффект наблюдался при резонансном возбуждении D₂-линии и достигался за счет частых столкновений с частицами буферного газа за время длительности возбуждающего импульса (С. Н. Атутов, А.И.Плеханов, А.М. Шалагин).

Особый интерес связан с исследованием механизмов, которые могли бы быть использованы для получения когерентного излучения с частотой большей, чем частота накачки. К числу таких механизмов можно отнести лазерную генерацию без инверсии заселенности, в основе которого лежит нелинейный интерференционный эффект, нелинейное смещение частот в атомарных и молекулярных средах.

Нами был предложен и экспериментально реализован иной способ. Путем выбора поляризационных условий возбуждения D₁-линии и столкновений с буферным газом получена генерация в режиме сверхсветимости на D₂-линии натрия. Предложенный подход, в котором используется оптическая ориентация основного состояния резонансным излучением, открывает возможности создания инверсной

заселенности между основным и высоколежащим состоянием (Р.В. Марков, А.И. Плеханов, А.М. Шалагин).

Из учебников по оптике известно, что получить генерацию в двухуровневой системе нельзя. Однако существовавшее ранее привычное для специалистов в лазерной физике представление, что непрерывное лазерное излучение с повышением интенсивности выравнивает заселенности комбинирующих подуровней, перестает быть справедливым. В условиях, когда частицы газа, моделируемые двухуровневой квантовой системой, подвержены частым столкновениям с частицами буферного газа, спектральные плотности коэффициентов Эйнштейна для поглощения и вынужденного испускания перестают быть равными друг другу за пределами линии поглощения (испускания). При этом между ними устанавливается определенное соотношение, приводящее к новым физическим эффектам. Наиболее яркий из них - формирование инверсии заселенностей в двухуровневой системе при нерезонансном оптическом возбуждении. Эффект зарегистрирован нами экспериментально в виде генерации излучения на резонансных переходах атомов натрия (Р.В.Марков, А.И. Плеханов, А.М. Шалагин).

Рассказанные выше успехи лаборатории носят, безусловно, фрагментарный и субъективный характер. Я попытался охватить все стороны наших исследований, но не уверен, что мне это удалось. Важным представляется также вопрос о том, что включать в исторический обзор? Дело в том, что многие эксперименты кажутся важными и необходимыми. В данных воспоминаниях я говорил только о тех работах, которые, как мне сейчас видится, сыграли определенную роль в продвижении нашего понимания физических процессов в газовых и твердотельных системах, хотя и здесь представлено не все. Я практически не касался теоретических работ. Я приношу свои искренние извинения всем, чьи работы, несмотря на их оригинальность и новизну, не нашли отражения в этих воспоминаниях: очень трудно охватить весь круг исследований, проводившихся в лаборатории физики лазеров за эти годы.