

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

К. П. КОМАРОВ



К. П. Комаров



Е. А. Кузнецов

В области нелинейной динамики отечественная наука всегда занимала и занимает ведущие позиции, в значительной мере определяя мировой уровень в этом направлении исследований. В настоящее время без привлечения нелинейной науки невозможно создание высокоэффективных приборов и технологий в самых различных областях: от термоядерного синтеза, реактивных самолетов, нефтедобычи, энергетики, связи, систем обработки информации до биологии, медицины, экологии, экономики. К работам по нелинейной тематике проявляют огромный интерес крупнейшие зарубежные промышленные фирмы, военные ведомства США и ведущих европейских стран. Ежегодно проводятся десятки международных конференций по нелинейным исследованиям, многие ведомства финансируют специальные исследовательские программы в этой области (например, Special NATO program "Chaos, Order and Patterns").

Среди нелинейных исследований важное место занимают работы по оптическим системам - лазерам, волоконным лазерным системам, волоконным линиям связи. И сотрудники лаборатории нелинейной физики ИАиЭ принимают активное участие в этих работах. Лаборатория была создана будущим чл.-кор. РАН, профессором Евгением Александровичем Кузнецовым. С 1994 по 1996 г. лабораторию возглавлял д-р физ.-мат. наук Борис Ицхакович Стурман, с 1996 г. по настоящее время - д-р физ.-мат. наук Константин Петрович Комаров. Отразить в рамках одной статьи все многообразие исследований, проводимых в лаборатории, практически невозможно, и поэтому ограничимся оптической тематикой.

В 1960 г. Мейманом был создан первый оптический квантовый генератор - твердотельный лазер с рубиновой активной средой. Благодаря уникальным свойствам генерируемого излучения такие лазеры получили наиболее широкое распространение в различных областях применения. Кроме того, они обладали рядом достоинств, которые выгодно отличали их от других типов лазерных систем:

практичностью, надежностью, компактностью, возможностью работать в самых разнообразных режимах - от ультракоротких импульсов с субпикосекундной и фемтосекундной длительностью до непрерывной генерации с высокой мощностью выходного излучения.

В то же время у первых твердотельных генераторов имелся один существенный недостаток, сдерживающий их более широкое применение: сложность в управлении их генерационной динамикой, а зачастую и невозможность контролировать режимы генерации. Выходное излучение, наблюдавшееся Мейманом в его первом лазере, представляло собой пички микросекундной длительности со случайной пиковой амплитудой и скважностью. Стохастический характер изменения параметров выходного излучения твердотельных лазеров стал предметом многочисленных исследований и горячих дискуссий на отечественных и зарубежных конференциях. Несоответствие между экспериментальными данными и результатами теоретических исследований носило характер физического парадокса: эксперимент давал случайные пички излучения в устанавливаемом режиме генерации, в то время как теория «пророчила» стационарную многомодовую генерацию. Многочисленные попытки описать режимы незатухающих пичков в рамках кинетических уравнений путем вариации их параметров терпели поражение одна за другой. Вокруг незатухающих пичков разгорались нешуточные страсти...

И тем приятнее осознавать, что в 1975 г. именно наша работа положила конец этим пламенным спорам. Нам первым удалось установить общие свойства решений этих уравнений. Для кинетических уравнений в самом общем случае был построен функционал Ляпунова (К. П. Комаров), из которого следовало, что все решения этих уравнений носят характер затухающих пульсаций, а потому проблема пичковой генерации твердотельных лазеров должна быть вынесена за рамки кинетической модели. Суть проведенных теоретических построений аналогична закону возрастания энтропии в замкнутой системе: какой бы сложной ни была замкнутая система, всякое движение в ней должно прекратиться, когда энтропия достигнет своего максимума. Нам также удалось установить повышенную чувствительность твердотельных генераторов к техническим возмущениям и предложить динамическую модель пичковой генерации

твердотельных лазеров, что сняло парадоксальное несоответствие между теоретическими и экспериментальными результатами (А.В.Гайнер, К.П.Комаров, 1976 г.). Большой вклад в экспериментальное исследование динамики генерации твердотельных лазеров внесли сотрудники группы физики твердотельных лазеров (профессор, д-р физ.-мат. наук В.В.Анциферов, канд.физ.-мат.наук А.С.Кучьянов, канд.физ.-мат.наук В. С. Пивцов, В. Д. Угожаев), которая в 1978 г. была переведена из Института физики полупроводников СО АН СССР в наш институт.

Успешно была решена нами и задача нелинейной динамики лазерных систем, связанная с пассивной синхронизацией мод твердотельных лазеров. Как известно, введение в лазерный резонатор элемента, создающего нелинейные потери, которые уменьшаются с ростом интенсивности излучения, приводит к формированию внутри лазерного резонатора ультракоротких импульсов света. В то же время потери такого рода инициируют высвечивание гигантского импульса. Из-за срыва генерации в результате этого высвечивания процесс формирования ультракоротких импульсов через нелинейное самовоздействие излучения в насыщающемся поглотителе оказывается незавершенным. Как следствие, параметры формируемых импульсов во многом определяются флуктуационными свойствами первоначального затравочного шумового излучения, а процесс выделения наиболее интенсивного светового импульса также оказывается незаконченным. В результате возникает невоспроизводимость характеристик выходного излучения; основному импульсу, как правило, сопутствуют сателлиты, а длительность формируемых импульсов оказывается существенно больше ожидаемой. Такой механизм формирования ультракоротких импульсов света в твердотельных лазерах был назван флуктуационным механизмом. Теоретическое описание пассивной синхронизации мод, как правило, строилось в рамках флуктуационной теории, предсказывающей вероятность той или иной реализации выходного излучения в зависимости от параметров лазерной системы.

В течение длительного времени совершенствование твердотельных генераторов ультракоротких импульсов сводилось к попыткам увеличить вероятность реализации в лазерном резонаторе одиночного светового импульса. Речь о воспроизведении формы и спектральных характеристик ультракоротких импульсов при этом не шла. В ИАиЭ был предложен новый режим генерации твердотельных лазеров - режим устойчивых стационарных импульсов (К. П. Комаров, А. С. Кучьянов, В. Д. Угожаев).

Суть идеи стабилизации пассивной синхронизации мод заключается в следующем. Наряду с безынерционным (с малым временем релаксации) насыщающимся поглотителем в лазерный резонатор вводится нелинейный элемент, обеспечивающий инерционные потери, пропорциональные энергии внутрирезонаторного излучения. Такие потери подавляют высвечивание гигантского импульса, но не препятствуют формированию внутри лазерного резонатора ультракоротких импульсов света. В результате реализуется продолжительное самовоздействие излучения в нелинейной внутрирезонаторной среде, и режим одиночного на аксиальном периоде ультракороткого импульса стабилизируется. По воспроизводимости параметров световых импульсов такие лазеры сопоставимы с лазерами на красителях, но при этом сохраняют все достоинства твердотельных генераторов. В лазерах на стеклах, активированных неодимом, в таком режиме были получены воспроизводимые ультракороткие импульсы длительностью в 500 фемтосекунд. основополагающие экспериментальные исследования по стабилизации пассивной синхронизации мод твердотельных лазеров были выполнены А.С.Кучьяновым и В.Д.Угожаевым. Наши работы по стабилизации пассивной синхронизации мод имели широкий резонанс, аналогичные исследования проводились в других лазерных центрах (Московский государственный университет, ИОФАН, Вильнюсский университет, Байретский университет (Германия) и т.д.).

Переход к работе с лазерами на стеклах, активированных неодимом, с существенно большей (примерно в 20 раз) шириной полосы усиления по сравнению со средами типа рубина выявил новые особенности формирования ультракоротких импульсов света. Было установлено, что в таких лазерных системах существенным образом начинают проявляться эффекты фазовой модуляции формируемых импульсов, возникающие за счет керровской нелинейности показателя преломления. Исследование устойчивости режимов генерации ультракоротких импульсов света в таких условиях потребовало новых подходов при анализе формирования излучения во внутрирезонаторной нелинейной диспергирующей среде. Речь идет о нелинейности как потерь, так и показателя преломления, а также о частотной дисперсии усиления, потерь и показателя преломления. Необходимо было решить задачу об эволюции и определить устанавливающую форму и прочие характеристики светового импульса, распространяющегося в нелинейной диспергирующей среде с комплексной диспе-

трической проницаемостью. Простейшая модель учитывает квадратичную дисперсию среды, нелинейные потери и показатель преломления, пропорциональные интенсивности излучения.

В 1984 г. нам удалось не только вывести соответствующее эволюционное уравнение из первых принципов уравнений Максвелла для поля и уравнения Шредингера для среды, но и найти его решение в виде стационарного импульса с частотной модуляцией (т. е. такого импульса, характеристики которого не изменяются со временем) (К. П. Комаров). Установлено, что форма этого импульса описывается гиперболическим секансом, а меняющаяся вдоль импульса частота - гиперболическим тангенсом. Именно мы впервые ввели в физику ультракоротких импульсов света понятие о таком световом импульсе (1984 г.), которое и сегодня широко используется при анализе режимов генерации лазеров фемтосекундных импульсов и волоконных линий связи. Также были получены в аналитическом виде спектральные характеристики этих импульсов. Оказалось, что возникающие в различных задачах фазомодулированные гауссовы импульсы и импульсы в форме гиперболического секанса с фазовой модуляцией имеют достаточно простые спектральные характеристики, выражающиеся в аналитической форме. Построенное нами эволюционное уравнение, описывающее нелинейную динамику световых импульсов, распространяющихся в нелинейной диспергирующей среде с комплексной диэлектрической проницаемостью, получило широкое распространение при анализе генераторов световых импульсов и волоконных линий связи. По форме оно близко к уравнению Гинзбурга Ландау, которое используется при решении задач о гидродинамических течениях, сверхпроводимости и других нелинейных системах.

С появлением лазеров с широкополосными усиливающими средами с электрон-фононным рабочим переходом стало возможным генерировать световые импульсы длительностью в один оптический период. В таких лазерах эффекты фазовой модуляции ультракоротких импульсов за счет керровской нелинейности и частотной дисперсии показателя преломления играют принципиальную роль в формировании пространственно-временной структуры внутрирезонаторного излучения. Безынерционные нелинейные потери, необходимые для формирования предельно коротких световых импульсов, обеспечиваются за счет нелинейных дифракционных потерь, возникающих из-за самофокусировки на керровской нелинейности

показателя преломления.

Разработанная в ИИЭ теория формирования ультракоротких импульсов света в нелинейных диспергирующих средах и системах оказалась востребованной для описания такого типа лазеров. Разумеется, для анализа ряда явлений полученные уравнения потребовали определенной модификации. Так, для того чтобы адекватно описать экспериментально наблюдаемую пороговую зависимость самостарта пассивной синхронизации лазерных мод от интенсивности затравочных импульсов, пришлось дополнить развитую нами теоретическую модель слабой узкополосной частотной селекцией.

В титан-сапфировых лазерах экспериментально наблюдался режим многоимпульсной генерации. Причем все ультракороткие импульсы в лазерном резонаторе характеризуются одной и той же пиковой амплитудой, формой и частотным чирпом. Такая особенность лазерной генерации получила название эффекта квантования внутрирезонаторного излучения на отдельные солитоны - отдельные импульсы. Тот факт, что в реальных лазерных системах нелинейность потерь уменьшается с ростом интенсивности, позволил адекватно описать такую генерационную особенность (канд. физ.-мат. наук А. К. Комаров, д-р физ.-мат. наук К. П. Комаров, 1998 г.).

Эффект квантования в ряде случаев - явление нежелательное. Действительно, увеличение накачки с целью получения более мощных импульсов приводит не к увеличению мощности и энергии отдельных световых импульсов, а к росту их численности в лазерном резонаторе. Для того чтобы эффективно управлять параметрами выходного излучения лазерной системы, необходимо знать условия, при которых эффект квантования подавляется. В других случаях, например, для реализации гармонической пассивной синхронизации мод (многоимпульсная пассивная синхронизация мод с эквидистантным расположением импульсов в резонаторе) эффект квантования оказывается полезным. Нами было открыто явление мультитабильности: число ультракоротких импульсов в лазерном резонаторе зависит от начальных условий генерации. Также обнаружена мультитабильная зависимость числа импульсов в лазерном резонаторе от накачки.

В последние годы стали интенсивно разрабатываться генераторы ультракоротких импульсов света на основе волоконных лазеров. Стекловолокна активируются редкоземельными ионами. Ширина полосы усиления такой активной среды примерно та же, что и у стекла,

активированном неодимом. Спектральная полоса усиления позволяет генерировать световые импульсы длительностью порядка сотни фемтосекунд. Будучи разновидностью твердотельных лазеров, волоконные лазеры обладают всеми их достоинствами. Кроме того, для них не требуется использования зеркал, и они характеризуются значительно большей помехоустойчивостью к техническим возмущениям, приводящим к расстройке лазерных резонаторов. Ряд таких лазерных систем может работать от диодной накачки, что значительно повышает КПД лазера и уменьшает резонаторные термические искажения. По сути, безынерционные нелинейные потери в таких лазерах возникают за счет внутрирезонаторного поляризатора и нелинейной оптической активности в волокне, реализующейся благодаря керровской нелинейности. Изменение глубины модуляции нелинейных потерь и интенсивности, насыщающей эти потери, достигается простым поворотом внутрирезонаторных фазовых пластин.

А. К. Комаров совместно с коллегами из Университета Анже (Франция) разработали физическую модель генерации волоконных лазеров, которая позволяет адекватно описать их основные генерационные закономерности: многоимпульсность, мультитабильность, мультитабильную зависимость числа идентичных импульсов в устанавливаемом режиме генерации от накачки, пороговую зависимость пассивной синхронизации лазерных мод от интенсивности затравочных импульсов, переход от непрерывной генерации к пиковой, и далее - к режиму устойчивой пассивной

синхронизации мод. Для волоконных лазеров эффекты, связанные с многоимпульсностью, проявляются более ярко, поскольку глубина модуляции и интенсивность насыщения нелинейных потерь могут изменяться в широких пределах.

Полученные теоретические результаты по смене режимов генерации, мультитабильности, гистерезисным явлениям нашли исчерпывающее подтверждение в экспериментальных работах. Развитая теория пассивной синхронизации мод волоконных лазеров позволяет эффективно управлять режимами генерации, предсказывать новые режимы, оптимизировать параметры выходного излучения. В частности, нами был обнаружен новый режим генерации режим гибридной пассивной синхронизации мод (А. К. Комаров, К. П. Комаров). В этом режиме в лазерном резонаторе сосуществуют ультракороткие световые импульсы и постоянная составляющая излучения между ними. В результате возникает эффективный механизм взаимодействия между импульсами через постоянную составляющую поля, что способствует появлению фиксированных разностей фаз для амплитуд импульсов и реализации механизмов притяжения или отталкивания между импульсами. Как следствие, формируются новые эффективные механизмы управления взаимодействием внутрирезонаторных световых импульсов.

В волоконных линиях связи имеются все элементы лазерной системы: усилители, компенсирующие диссипацию энергии при распространении сигнальных импульсов в волокне; среда с керровской нелинейностью; частотная



Б. И. Стурман



Андрей Комаров.
Барселона, Испания.
Международная конференция по оптическим сетям, июль 2005 г. (приглашенный доклад).

дисперсия усиления и показателя преломления и т. д. При нелинейном режиме распространения сигнальных импульсов на далекие расстояния необходима их стабилизация. Следовательно, задача ставится таким же образом, что и в случае пассивной синхронизации лазерных мод: необходимо обеспечить устойчивость ультракороткого импульса света при его распространении в нелинейной диспергирующей среде с комплексной диэлектрической проницаемостью. Неудивительно, что полученные ранее в ИАиЭ результаты оказались востребованными в этой области физики и до сих пор широко используются при анализе режимов распространения сигнальных импульсов в волоконных линиях связи. Разумеется, разработка современных волоконных линий связи представляет собой существенно более сложную задачу, в которой нелинейно-дисперсионные эффекты оказываются лишь одной из составляющих.

Важный вклад в создание теоретических основ волоконных линий связи внесли сотрудники лаборатории нелинейной физики ИАиЭ С. К. Турицын и В. К. Мезенцев. Совместно с коллегами ими разработаны эффективные методы анализа распространения и устойчивости световых импульсов в волоконных линиях с управляемой частотной дисперсией. Методы дисперсионного управления оказались наиболее перспективными для увеличения скорости передачи информации до 40 Гбит/с в одном частотном канале. Ими также предложены новые подходы в изучении воздействия случайных факторов на распростра-

нение последовательности световых импульсов, что позволило более эффективно производить оптимизацию помехоустойчивости передаваемой информации.

Полученные сотрудниками лаборатории результаты по стабилизации последовательности световых импульсов, мультистабильным состояниям, управлению режимами взаимодействия световыми импульсами и т. д., представляют интерес для оптимизации режимов распространения сигнальных импульсов в волоконных линиях связи, для создания устройств оперативного хранения информации в форме последовательности сигнальных импульсов, управления потоками таких импульсов, в том числе через их взаимодействие.

Многие исследования, выполненные сотрудниками лаборатории нелинейной физики, проводились совместно с коллегами из зарубежных научных центров: Йенский, Боннский и Оснабрюкский университеты (Германия), Мадридский университет (Испания), Астонский университет (Англия), Анжуйский университет (Франция) и др. Благодаря сотрудничеству с иностранными коллегами и различными академическими, отраслевыми организациями и вузами России, лаборатория занимает лидирующие позиции по созданию перспективных нелинейных технологий и их использованию. В частности, полученные результаты по созданию высокоинформативных нелинейно-волновых методов анализа случайно-неоднородных сред отмечены Государственной премией Российской Федерации за 1998 г. (д-р физ.-мат. наук Геннадий Иванович Смирнов).



С. К. Турицын