

OPTICAL SOLITONS

A. I. MAIMISTOV

Two principal examples of the nonlinear optics solitons are observed, 2π -pulses of the self-induced transparency and the dispersionless pulses propagating in nonlinear fibers. Other situations where the optical pulses belong to class of the steady state solitary waves are briefly discussed.

Рассмотрены два основных примера солитонов в нелинейной оптике: 2π -импульсы самоиндуцированной прозрачности и импульсы в нелинейных волоконных световодах, распространяющихся без дисперсионного уширения. Кратко обсуждаются другие ситуации, когда оптические импульсы относятся к классу стационарных уединенных волн, близких по своим свойствам к истинным солитонам.

ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ

А. И. МАЙМИСТОВ

Московский инженерно-физический институт
(технический университет)

ВВЕДЕНИЕ

Для настоящего времени характерно широкое распространение понятий теории солитонов, которые, подобно эпидемии, охватили различные области естественных наук. Возникнув первоначально при изучении волн на воде и в других задачах гидродинамики, они проникли вместе с гидродинамической моделью в физику плазмы и физику конденсированных сред. Чуть позже исследование солитонов и связанных с ними явлений началось в классической и квантовой теории поля и статистической механике. Солитоны встречаются при описании электрических длинных линий, в динамике популяций и биофизике. Неудивительно, что нелинейная оптика оказалась одной из областей физики, также охваченной солитонной чумой. Замечательно, что здесь исследование солитонов оказалось возможным как теоретически, так и экспериментально.

Волны, которые обычно рассматриваются в школьном курсе физики, принадлежат классу монохроматических волн. Но кроме них существует широкий класс волн, называемых уединенными. Световой импульс дает пример такой волны. Очень удобно представлять уединенную волну как волновой пакет — линейную суперпозицию (сумму) большого числа монохроматических волн, имеющих частоты, близкие к частоте несущей волны. Во многих случаях каждая из компонент волнового пакета распространяется в пространстве со своей фазовой скоростью, то есть имеется дисперсия (разброс) скоростей. Это приводит к увеличению ширины волнового пакета — его дисперсионному уширению. Скорость всего пакета как целого называют групповой скоростью, а среды, обладающие дисперсией скоростей, называются диспергирующими.

НЕЛИНЕЙНЫЕ УЕДИНЕННЫЕ ВОЛНЫ

В 1965 году Н. Забуски и М. Крускал обнаружили, что решения уравнения Кортевега—де Фриса, описывающие распространение уединенных волн на мелкой воде, обладают замечательными свойствами: они не испытывают дисперсионного уширения и упруго взаимодействуют, то есть сохраняют свою форму после столкновения и прохождения друг сквозь друга. Чтобы подчеркнуть исключительный элементарный характер этих уединенных волн, им дали название “солитон” (от англ. solitary — “уединенная”, -он — типичное окончание таких терминов, как электрон, фотон, магنون и т.д., означающее “частица”).

Существует качественное объяснение причины образования солитона. Так, в случае распространения световой волны в нелинейной диспергирующей диэлектрической среде показатель преломления среды изменяется в том месте, где напряженность электромагнитного поля достаточно велика. Если показатель преломления возрастает, то может произойти самозахват световой волны. При самофокусировке увеличение показателя преломления в центре светового пучка ведет к линзовому эффекту и подавляет дифракционную расходимость. В общем случае говорят, что происходит подавление дисперсии или дифракции нелинейными процессами.

САМОИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ

Хорошо известно, что поглощение монохроматического электромагнитного излучения в среде (газообразной, жидкой или твердой) происходит чрезвычайно сильно, когда частота несущей волны совпадает с частотой атомного, молекулярного или межзонного перехода. Но это утверждение не всегда оказывается справедливым.

Атомы или молекулы, составляющие среду, в которой распространяется излучение, характеризуются помимо энергий квантовых состояний, в которых они могут находиться (спектром испускания или поглощения), рядом времен релаксации. Прежде всего это время жизни возбужденного состояния, которое характеризует спонтанные переходы из возбужденного состояния в основное; его часто обозначают как T_1 . Далее существует время релаксации поляризации, которое характеризует скорость затухания дипольного излучения из всей системы атомов; это время, обозначаемое как T_2 , меньше (часто много меньше) времени жизни возбужденного состояния, поскольку атом может отдать запасенную энергию не только в электромагнитное поле, но например, стенкам кюветы, содержащей газ, или решетке ионов, образующих твердое тело. Если энергии возбужденного состояния каждого из атомов немного отличаются друг от друга (из-за эффекта Доплера в газах или парах металлов, из-за эффекта Штарка, порождаемого кристаллическим полем ионной решетки твердого тела и т.д.), поляризация затухает еще быстрее из-за расфазировки индивидуальных диполей и соответствующее время релаксации обозначают как T_2^* . Полуширина линии поглощения или испускания равна обратной величине минимального времени T_2 или T_2^* . Другие времена релаксации здесь рассматривать не будем.

Процессы релаксации обусловлены межатомным взаимодействием или взаимодействием атомов с окружающей их средой. Если на атомную систему воздействовать импульсом когерентного электромагнитного излучения, длительность которого много меньше времен релаксации, то вся резонансная система ведет себя как один атом, все они испускают или поглощают фотоны синфазно. Когерентное

поле подобно дирижеру в оркестре. Только по прошествии времени порядка T_2 или T_2^* эта синфазность разрушится, но к тому времени и действие импульса излучения прекратится. Для газовых сред типичные значения T_2 — это наносекунды, для ионов в стеклах это пикосекунды и меньше. Например, для ионов Er^{3+} в стеклянной матрице время релаксации поляризации 100 фс (10^{-13} с). Процессы взаимодействия резонансной среды с электромагнитным излучением в течение столь коротких интервалов времени, когда фазовые соотношения между отдельными излучателями не успевают существенно измениться, называют когерентными. Понятие когерентности имеет очень широкую область применения. Ограничиваясь оптическими явлениями, часто говорят, что система излучателей обладает фазовой памятью. Электромагнитные (обычно оптические) импульсы соответствующей длительности принято называть ультракороткими импульсами (УКИ).

Изучая распространение ультракоротких импульсов длительностью t_p в условиях резонансного поглощения в рубиновом стержне при температуре меньше 40 К, С. Мак-Колл и Э. Хан в 1967 году обнаружили удивительное явление: когда мощность импульса превышала некоторое критическое значение, его распространение происходило с аномально малыми потерями энергии несмотря на условие резонансного поглощения. Импульсы, имеющие мощность много меньше, чем критическая, ослаблялись в 10^3 раз. Это явление получило название самоиндуцированной прозрачности (СИП). Физическое объяснение СИП основано на представлении резонансной среды ансамблем двухуровневых атомов, эволюция которых происходит только за счет вынужденных процессов (поглощения и испускания фотонов), что является прямым следствием условия $t_p \ll T_2, T_1$. В идеальной картине СИП атомы переходят в возбужденное состояние, поглощая энергию поля УКИ, и возвращают ее полностью обратно при вынужденном переходе в исходное состояние. Подобным образом стрелка часов, совершив полный оборот (поворот на 2π радиан), возвращается в исходное положение. Стационарные УКИ, которые формируются в процессе СИП, Мак-Колл и Хан назвали 2π -импульсами. Эксперимент также показал, что скорость распространения 2π -импульса примерно в сто раз меньше скорости света в среде. Следует заметить, что в режиме некогерентного взаимодействия с резонансной средой оптический импульс из-за насыщения поглощения тоже может распространяться как бы без потерь, но его скорость близка к скорости света.

Первые солитонные решения уравнений теории СИП были найдены в 1969 году и отождествлены с 2π -импульсами Мак-Колла–Хана. Многосолитонные решения, следуя их терминологии, стали называть $N\pi$ -импульсами. На рис. 1 и 2 показаны 4π -импульсы, которые в действительности представляют

собой два сталкивающихся 2π -импульса различной длительности. Можно видеть, что картина столкновения зависит от соотношения между амплитудами солитонов. 0π -импульс представляет сталкивающиеся 2π -импульсы, находящиеся в противофазе, иначе говоря, 2π - и -2π -импульсы (рис. 3). Вместе с тем существует 0π -импульс, который можно понимать как связанное состояние пары 2π -импульсов, имеющих одинаковые групповые, но различные фазовые скорости. В результате форма огибающей тако-

го импульса постоянно меняется, она как бы дышит (рис. 4). Отсюда его название “бризер”. По мере распространения бризеры остаются локализованными (уединенными) в пространстве волнами и по отношению к столкновениям ведут себя как обычные, стационарные солитоны. Привлечение современных методов теории солитонов к анализу системы уравнений СИП позволило заново воспроизвести с единых позиций многие ранее полученные результаты, определить условия образования 2π -импульсов

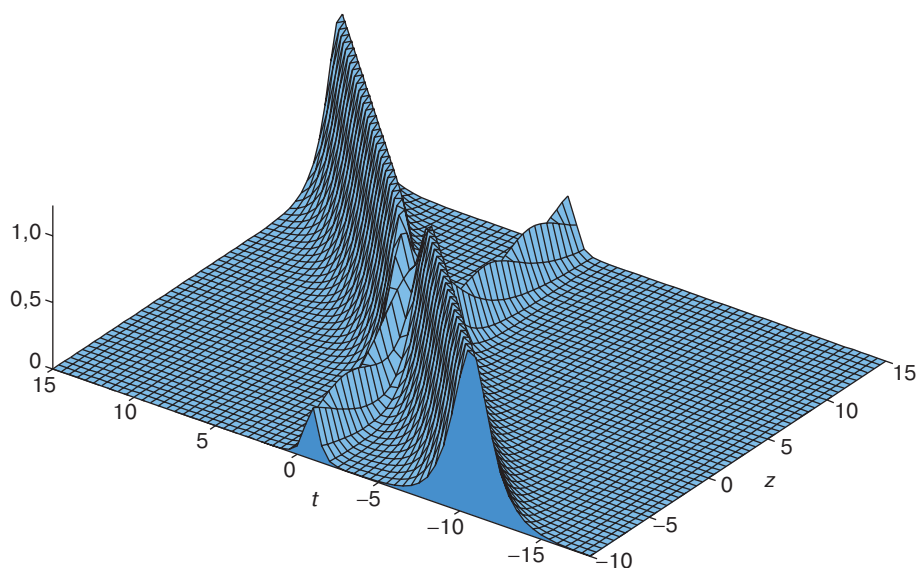


Рис. 1. Картина столкновения двух солитонов СИП (2π -импульсов), амплитуды которых различаются в несколько раз. Один из солитонов пронизывает другой

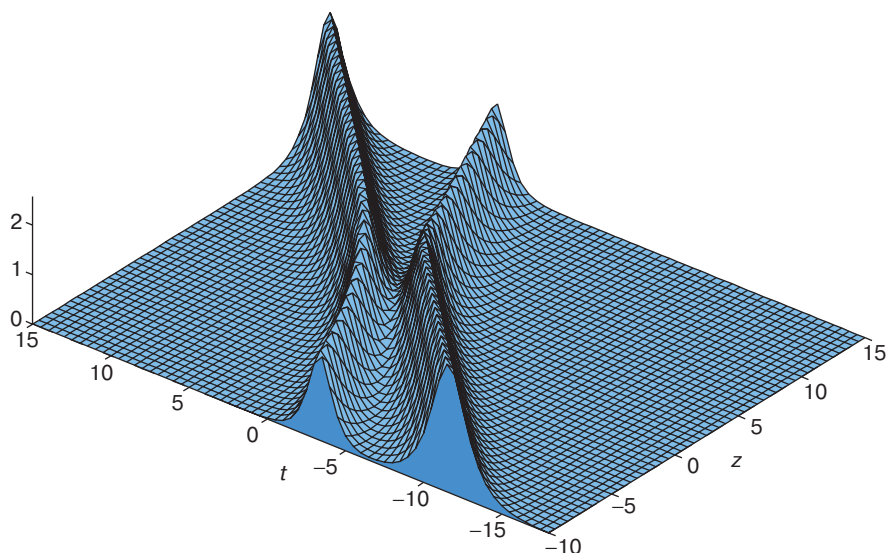


Рис. 2. Столкновение двух 2π -импульсов близких амплитуд. При столкновении происходит как бы обмен энергией и возникает заметный фазовый сдвиг у этих импульсов

из исходного УКИ и рассмотреть влияние слабых релаксационных процессов на распространение 2π -импульсов.

В настоящее время теория СИП переживает новый этап своего развития. Для него характерны выход за рамки двухуровневого приближения для резонансной среды и усложнение спектрального состава электромагнитного излучения УКИ. Последнее означает, что с резонансной средой взаимодействует излучение, характеризуемое не одной, а несколькими частотами несущей волны. Кроме того, во внимание принимается поляризация излучения. Наиболее простая ситуация отвечает трехуров-

невой модели резонансной среды, где при условии равенства сил осцилляторов на каждом из переходов возможно стационарное распространение двухчастотного УКИ (характеризуемого двумя частотами несущей волны). Такой импульс был назван симултоном. Могут существовать и многосолитонные решения, описывающие распространение и столкновения отдельных симултонов, а также осциллирующие симултоны – цветные бризеры, двухчастотное обобщение бризеров Мак-Колла–Хана. Симултон в общем случае неустойчив по отношению к превращению его в обычный одночастотный 2π -импульс и может оставаться двухчастотным,

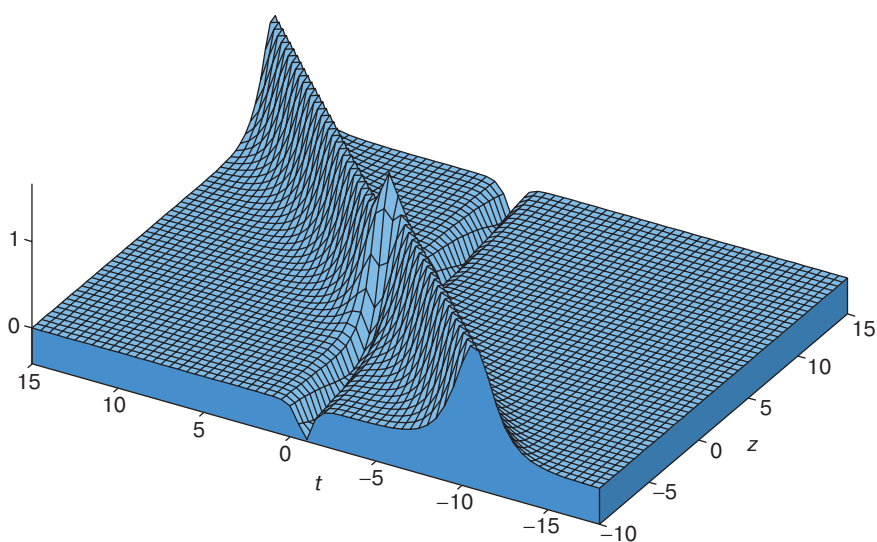


Рис. 3. 0π -импульс, или столкновение двух 2π -импульсов с противоположными знаками амплитуды

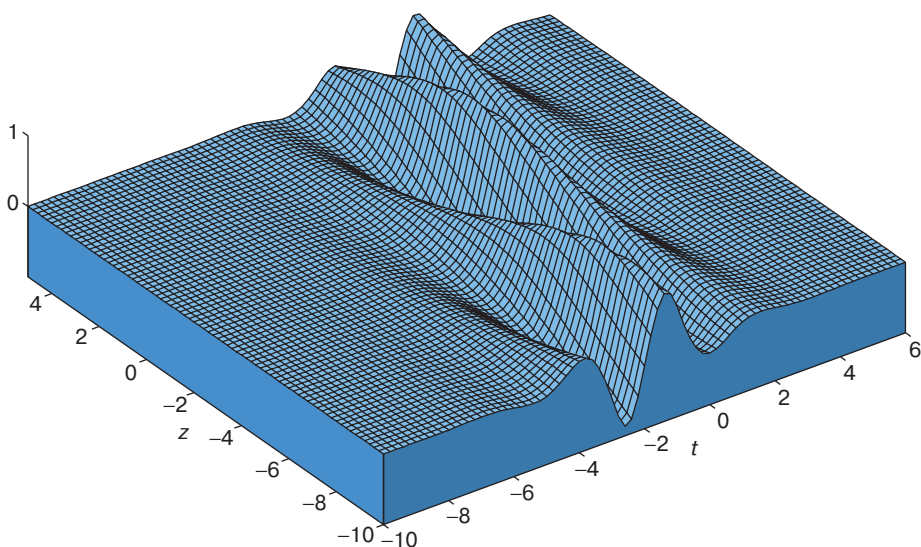


Рис. 4. Бризер. Раньше назывался тоже 0π -импульсом

только если населенности резонансных уровней приготовлены определенным образом.

В большинстве случаев реальные среды обладают резонансными уровнями, вырожденными по проекциям полного углового момента. Вырождение здесь означает, что квантовые состояния, отвечающие различным проекциям углового момента, имеют одинаковые энергии. Естественным обобщением теории СИП явилось ее расширение на случай вырожденных резонансных уровней. Оказалось, что если кратность вырождения уровней не превышает трех, то соответствующие системы уравнений, описывающие когерентное распространение оптических импульсов, имеют солитонные решения. В отличие от 2π -импульсов Мак-Колла–Хана здесь солитоны при взаимном столкновении в общем случае могут изменить свою плоскость поляризации, но в остальном их параметры остаются неизменными.

Экспериментальное наблюдение СИП проводилось либо в кюветах с газом резонансно поглощающих молекул или атомарных паров, либо в стеклянных стержнях с резонансными примесями. Размеры таких сред невелики, и это осложняло наблюдение процесса взаимодействия нескольких импульсов. В 1992–1993 годах Мазатака Наказава с коллегами осуществили серию экспериментов по когерентному распространению УКИ в волоконном световоде, содержащем примеси эрбия, и наблюдали явление СИП при охлаждении волокна до гелиевых температур. Время релаксации T_2 для ионов эрбия в стекле при комнатной температуре порядка 100 фс, и, чтобы можно было использовать имеющиеся в распоряжении экспериментаторов оптические импульсы длительностью 500 пс, необходимо было охлаждение волокна, что увеличивало T_2 до 1–3 нс. Использование отрезков волоконного световода от 1,5 до 6 м позволило продемонстрировать все свойства оптических солитонов СИП, такие, как устойчивость по отношению к столкновениям, разбиение многосолитонного импульса на ряд односолитонных (или 2π -) импульсов, уменьшение скорости распространения.

СОЛИТОНЫ В ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

Когерентное распространение УКИ и самоиндуцированная прозрачность не единственная область нелинейной оптики, где обнаруживаются солитоны. Давно известно явление самофокусировки, в частном случае двумерной самофокусировки, при которой поперечное распределение электрического поля пучка света не меняется вдоль оси пучка, описывается солитонными решениями нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ):

$$i\frac{\partial E}{\partial t} + \sigma\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + k|E|^2 E = 0,$$

где слагаемое с параметром σ описывает эффект дифракционного расширения пучка, k – коэффициент, характеризующий нелинейные свойства среды. В этом случае говорят о пространственных солитонах. Временной аналог самофокусировки – автомодуляция волн в нелинейной среде – приводит к образованию цепочки солитонов (отвечающих решениям нелинейного уравнения Шрёдингера, в котором временная и пространственная переменные меняются местами).

Стремительное развитие теории распространения оптических импульсов в нелинейной слабодиспергирующей среде началось с работы Акиры Хасегавы и Ф. Тапперта, в которой была показана возможность образования оптического солитона в нелинейном волоконном световоде. Развитие теории этого процесса привело в 1979–1980 годах к экспериментальному наблюдению оптических солитонов в волоконном световоде и исследованию их динамики. Л. Молленауэр с сотрудниками наблюдали уширение из-за дисперсии групповых скоростей оптического импульса исходной длительностью 7 пс, прошедшего по волоконному световоду 700 м, более чем в два раза, если пиковая мощность импульса не превышала ~1 Вт. Но импульс мощностью 1,24 Вт не испытывал дисперсионного уширения. При мощности 5 Вт импульс сжимался в 3,5 раза. Также наблюдались периодическое расщепление импульсов большей мощности на несколько пиков (субимпульсов) и последующее восстановление их формы. Такое поведение типично для солитонов НУШ. Периодическое изменение формы мощного импульса аналогично поведению бризеров в явлении СИП, но если подобрать должную глубину фазовой модуляции исходного импульса, то можно наблюдать разбиение такого импульса на ряд односолитонных сигналов.

В последние годы исследование оптических солитонов в волоконных световодах переместилось в область более коротких, фемтосекундных импульсов. Теория, описывающая эволюцию таких импульсов, основывается на разнообразных обобщениях НУШ, которые, строго говоря, не имеют солитонных решений, но их по традиции продолжают называть солитонами.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ

Солитоны в волоконных световодах, как оказалось, могут иметь разнообразное практическое применение. Они являются очень подходящими переносчиками информации в волоконно-оптических линиях связи. Если использовать промежуточные усилители на основе Er^{3+} -легированного волокна, то можно создать линии связи чрезвычайно большой длины, которые обеспечивают скорость передачи сигналов, превышающую Гбит/с. Впечатляющие результаты достигнуты в этой области в 1991 году Наказавой с сотрудниками: по оптическому волокну

была осуществлена передача информации на 10^6 км со скоростью 10 Гбит/с.

Другим примером применения оптических солитонов является солитонный лазер. Это устройство служит источником стабильных и перестраиваемых по длительности импульсов со стандартной формой огибающей, которая описывается гиперболическим секансом.

Полученные в последнее время очень короткие (до 6 фс) оптические импульсы обязаны своим существованием свойствам многосолитонных импульсов в волоконных световодах.

Недавно появились исследования, показавшие возможность эффективного использования солитонов в чисто оптических устройствах цифровой обработки информации. Было найдено, что зеркало на основе волоконно-оптической петли (интерферометр Саньяка) или волоконный интерферометр Маха—Цендера позволяют переключать солитонный сигнал между двумя состояниями выходного канала интерферометра (сигнал либо есть, либо его нет), при этом контрастность достигала 93%. Более сложные переключатели на основе двулучепреломляющих волоконных световодов обеспечивают энергию переключения около 6 пДж и частоту переключения около 0,2 ТГц. С помощью этих переключателей можно реализовать логические вентили OR, AND, NOR и предлагается создание нового типа вентилей с высокой функциональностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь были рассмотрены самые яркие примеры оптических солитонов. В нелинейной оптике, однако, существуют еще другие явления, где успешно используются понятия теории солитонов. Самофокусировка светового пучка — одно из них. Строго говоря, происходящая в этом явлении автолокализация пучка света не описывается уравнением, которое имело бы солитонные решения. Процесс самофокусировки исследуется методом численного решения соответствующего уравнения. Альтернативным способом является представление его решения как солитонного, но с изменяющимися параметрами. На этом пути удалось получить оценки важных характеристик процесса автолокализации пучка света и его коллапса.

Оказывается, что взаимодействие трех волн в квадратично-нелинейной среде, когда происходит преобразование частот несущей волны, может быть описано системой уравнений, имеющих солитонные решения. Эта ситуация с точки зрения теории нелинейных волн интересна тем, что в ней отсутствует дисперсия скоростей.

Явление самоиндуцированной прозрачности, так же как и в рассмотренном случае, может происходить в условиях двухфотонного поглощения света или при вынужденном комбинационном рассеянии световых волн. Некоторые модели, описывающие

эти процессы, основаны на системах уравнений, имеющих солитонные решения. В последние два года внимание стала привлекать возможность существования оптических солитонов НУШ и 2π -импульсов СИП. Такой интерес вызван демонстрацией возможности создания новых типов полностью оптического переключателя и солитонного лазера, имеющих меньшие габариты, чем их волоконно-оптические аналоги.

Квантовая теория солитонов оказалась полезной при создании теории сверхфлуоресценции и квантовой теории кооперативного вынужденного комбинационного рассеяния.

Существуют теоретические работы, посвященные новым типам оптических солитонов, названных жесткими солитонами (*robust solitons*), которые могут проявлять себя в двух устойчивых состояниях, но при некотором условии под действием возмущений переходить из одного состояния в другое. Их еще называют бистабильными солитонами.

Среди оптических солитонов в волоконных световодах есть так называемые темные солитоны. Они проявляются как отсутствие света на фоне протяженной световой волны. В экспериментах такие солитоны регистрировались как темный участок внутри оптического импульса.

Таким образом, можно заключить, что нелинейная оптика является чрезвычайно подходящим полигоном для изучения нелинейных волн — солитонов и близких к ним волновых пакетов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Делоне Н.Б. Нелинейная оптика // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 3. С. 94–99.
2. *Солитоны в действии* / Под ред. К. Лонгрена, Э. Скотта. М.: Мир, 1981. 312 с.
3. Филитов А.Т. Многоликий солитон. М.: Наука, 1986. 223 с. (Б-чка “Квант”; Вып. 48).
4. Кудряшов Н.А. Нелинейные волны и солитоны // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 2. С. 85–91.
5. Абловиц А., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи. М.: Мир, 1987. 480 с.
6. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989. 560 с.
7. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.
8. Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 310 с.

* * *

Андрей Иванович Маймистов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела Московского инженерно-физического института. Область научных интересов — нелинейная оптика и нелинейные волновые процессы. Автор около 70 научных работ.