

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского
филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Распад и взаимодействие многосолитонных импульсов в оптических
волокнах с изменением дисперсии вдоль длины волокна
АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 2 курса 254 группы

направления 03.04.02 «Физика» физического факультета

Маврина Петра Анатольевича

Научный руководитель

к. ф.-м. н., доцент

А.И. Конюхов

29.05.2019

Зав. кафедрой

д. ф.-м. н., профессор

В.М. Аникин

29.05.2019

Саратов 2019 год

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Предсказания свойств волноводов со сложным строением и составом это одна из актуальных проблем современной оптики. В выпускной квалификационной работе (ВКР) исследуется распространение излучения в волокнах с переменным диаметром, динамика и способы управления солитонами.

Управление оптическими солитонами подразумевает собой возможность изменения числа солитонов, их амплитуд, групповых скоростей. При упругом взаимодействии солитоны сохраняют свои параметры. Изменение параметров оптических солитонов возможно при неупругих столкновениях. Неупругие столкновения описываются нелинейным уравнением Шредингера, в котором присутствуют некоторые слагаемые, описывающие возмущение. В качестве таких возмущений может использоваться спектральная фильтрация, нелинейные потери, нелинейное усиление, дисперсия высших порядков. В данном случае модифицированное нелинейное уравнение Шредингера часто называют комплексным уравнением Гинзбурга-Ландау. Данное уравнение описывает достаточно большой класс задач, связанный с неупругим взаимодействием солитонов. Солитонные пары, описываемые комплексным уравнением Гинзбурга-Ландау, могут существовать в различных формах. Возможно формирование связанных солитонных состояний, формирование структур, которые изменяются периодически, квазипериодически или хаотично. Для управления динамикой солитонов возможно использование модуляции фазы поля во времени. Фазовая модуляция может использоваться для управления временным интервалом между солитонами. Другой подход для управления взаимодействием солитонов основан на использовании поляризованных оптических солитонов. В данном случае роль возмущения играет фазовая кросс-модуляция в системе двух связанных нелинейных уравнений

Шредингера. Анализ данной системы показывает возможность управление групповыми скоростями и амплитудами солитонных импульсов.

У каждого из данных методов для управления оптическими солитонами при практической реализации имеются определенные недостатки. Спектральная фильтрация увеличивает длительность импульсов, что может быть нежелательным эффектом. Модуляцию фазы, синхронную с последовательностью импульсов, технически сложно реализовать. Особенно, если речь идет о частотах порядком в несколько гигагерц и, тем более, для терагерцовых несущих частот битовой последовательности. Ряд эффектов, которые были описаны на основе комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау, требуют специального типа нелинейности, дисперсии или потерь. Было показано, что если период модуляции возмущения сравним с периодом осцилляций многосолитонного импульса, то он разделяется на несколько фундаментальных солитонов. Экспериментальная демонстрация данного эффекта стала возможной с развитием технологии изготовления оптических волокон с переменным по длине диаметром. Оптические солитоны, распространяющихся в волокнах с изменяемым по длине диаметром, подчиняются неавтономному нелинейному уравнению Шредингера с переменными коэффициентами дисперсии и нелинейности. При определенном соотношении между коэффициентами можно получить аналитические выражения для односолитонных и многосолитонных решений неавтономного нелинейного уравнения Шредингера. Такой тип взаимодействия наблюдается при частотах модуляции, находящихся вдали от резонанса. Как будет показано далее, если период модуляции коэффициента дисперсии или коэффициента нелинейности нелинейного уравнения Шредингера сравним с периодом осцилляций солитона, то характер взаимодействия солитонов становится существенно неупругим.

Цель дипломной работы. Целью ВКР является разработка методов управления амплитудой, групповой скоростью и длительностью оптических солитонов в одномодовых световодах с переменной по длине дисперсией.

Задачи дипломной работы:

1. Изучить поведение двух солитонов в оптическом волокне в случае их неупругого взаимодействия.
2. Рассмотреть способ разделения двухсолитонного импульса на два фундаментальных солитона.
3. Изучить способы управления основными характеристиками солитонов.

Структура и объём работы

Дипломная работа состоит из введения, семи глав, списка использованных источников. Общий объём работы составляет 53 страницы, 22 рисунков. Библиография включает 21 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, описываются методы управления оптическими солитонами, их недостатки и преимущества.

В первой главе поясняется значение термина оптический солитон. Оптический солитон (от английского «solitary») представляет собой уединенный лазерный импульс определенной длительности (от нано- до фемтосекунд), обладающий несущей частотой видимого диапазона и способный распространяться в нелинейной диспергирующей среде без изменения своей формы на большие расстояния. Важным представляется также и то обстоятельство, что солитоны обладают свойством упругого взаимодействия друг с другом, т.е. после столкновения солитоны восстанавливают свою первоначальную форму. Здесь следует подчеркнуть, что все это происходит в нелинейной среде, поэтому принцип суперпозиции,

как он понимается в линейных средах, не справедлив. Солитоны именно взаимодействуют между собой, вначале деформируясь, а затем восстанавливая свои исходные параметры. В связи с этим на солитоны возлагаются большие надежды в целях их широкого использования в системах оптической связи. С укорочением длительности солитона может увеличиваться пропускная способность соответствующих информационных систем.

В главе идет описание характеристик волоконных световодов и хроматической дисперсии. В самом простом случае волоконный световод состоит из сердцевины и оболочки. Показатель преломления оболочки немного меньше показателя преломления сердцевины. Такие световоды обычно называют световодами со ступенчатым профилем показателя преломления, чтобы отличать их от градиентных волоконных световодов, у которых показатель преломления сердцевины плавно уменьшается от ее центра к границе.

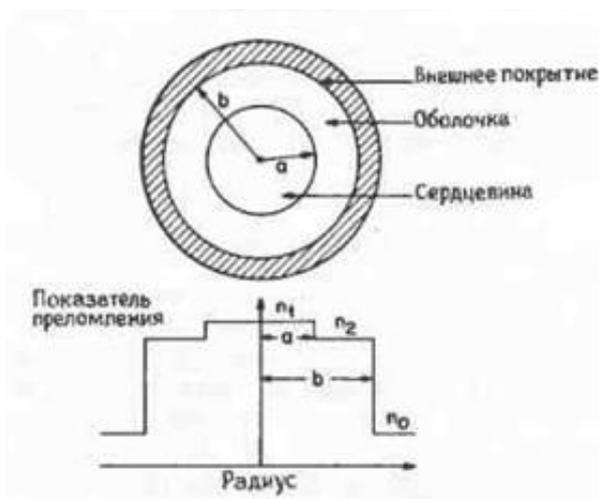


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения и профиля показателя преломления волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления

Такой волоконный световод характеризуется двумя параметрами - относительной разностью показателей преломления сердцевины и оболочки:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.0)$$

и нормированной частотой (параметром V):

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$, a - радиус сердцевины. λ - длина волны света.

При взаимодействии электромагнитной волны со связанными электронами диэлектрика отклик среды зависит от оптической частоты ω . Это свойство, называемое хроматической дисперсией, проявляется как частотная зависимость показателя преломления $n(\omega)$. Возникновение хроматической дисперсии связано с характерными частотами, на которых среда поглощает электромагнитное излучение вследствие осцилляций связанных электронов. Дисперсия в волоконном световоде имеет определяющее значение при распространении коротких оптических импульсов, так как различные спектральные компоненты спектра импульса распространяются с разными скоростями $c/n(\omega)$. Даже в тех случаях, когда нелинейные эффекты не важны, дисперсионное уширение импульса может быть вредным для оптических линии связи.

Во второй главе приводится описание распространения волн в волоконных световодах. Как и все электромагнитные явления, распространение оптического поля в волокне описывается уравнением Максвелла. В СИ эти уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} \nabla * E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla * H &= J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla * D &= P_f \\ \nabla * B &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

где E и H - векторы электрического и магнитного полей, а D и B — векторы электрической и магнитной индукции соответственно. Источниками электромагнитного поля являются вектор плотности тока J_f и плотности

заряда P_f . Векторы электрической и магнитной индукции D и B возникают как отклик среды на электрическое и магнитное поля E и H , распространяющиеся в среде и связаны с ними следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon_0 E + P \\ B &= \mu_0 H + M \end{aligned} \quad (2.2)$$

где ε_0 - и μ_0 - диэлектрическая и магнитная постоянные вакуума, P и M - электрическая и магнитная поляризации. В случае волоконного световода, являющегося немагнитным веществом, $M = 0$.

Уравнения Максвелла могут быть использованы для получения уравнения, описывающего распространение света в волоконных световодах:

$$\nabla * \nabla * E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

где используется соотношение $\mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$, c - скорость света в вакууме.

В данной главе также рассматриваются моды волоконного световода.

При любой частоте ω волоконный световод может иметь конечное число направляемых мод. Кроме того, световод может иметь континуум (счетное число) ненаправляемых излучательных мод. Излучательные моды не играют важной роли в обсуждении нелинейных эффектов, поскольку предполагается, что световод имеет совершенную (идеальную) цилиндрическую геометрию, хотя излучательные моды важны в задачах, рассматривающих передачу энергии между связанными излучательными модами. Число мод, поддерживаемых световодом на данной длине волны, зависит от его параметров - радиуса сердцевины a и разности показателей преломления для сердцевины и оболочкой $n_1 - n_2$. Важным параметром каждой моды является ее частота отсечки. Эта частота определяется условием $\gamma = 0$.

В третьей главе изучается эффект дисперсионного уширения импульсов. Процесс дисперсионного уширения импульса состоит в том, что из-за ДГС разные частотные компоненты импульса распространяются по

световоду с несколько различными скоростями. А именно, длинноволновые компоненты движутся быстрее, чем коротковолновые в области нормальной дисперсии. В области аномальной дисперсии наблюдается обратное. Длительность импульса может оставаться неизменной, если только все спектральные компоненты распространяются с одной скоростью или, что то же самое, если $\beta_2 = 0$. Любые временные задержки разных спектральных компонент приводят к уширению импульса.

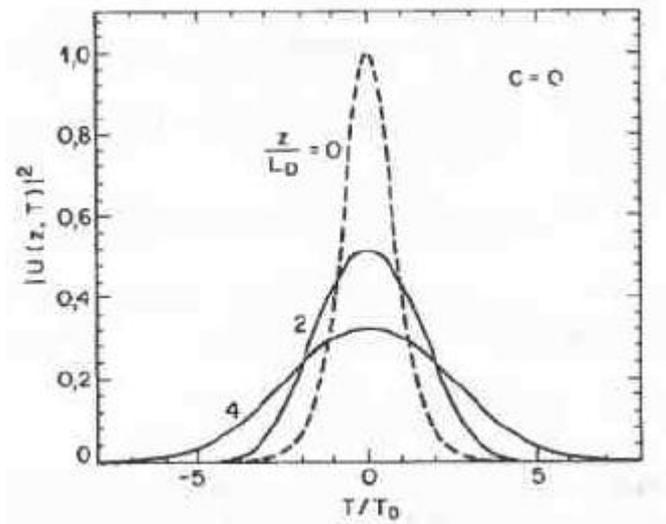


Рисунок 3.1 Дисперсионное уширение гауссовского импульса в световоде при $z=2L_p$ и $z=4L_p$. Штрихованная линия показывает начальный импульс при $z=0$

В четвертой и пятой главах рассматривается нелинейное уравнение Шредингера. Во многих нелинейных системах стационарное волновое состояние оказывается неустойчивым: совместное действие нелинейных и дисперсионных эффектов приводит к его модуляции. Данное явление называется модуляционной неустойчивостью. Оно исследовалось в самых разных областях физики: нелинейной оптике, гидродинамике, физике плазмы. В волоконной оптике для наблюдения модуляционной неустойчивости требуется отрицательная дисперсия. Сам эффект проявляется как распад непрерывной или квазинепрерывной периодической волны на последовательность сверхкоротких импульсов. Отрицательная дисперсия необходима и для существования оптических солитонов.

Динамика солитонов в волокне с периодической модуляцией диаметра подчиняется нелинейному уравнению Шредингера с переменными коэффициентами:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\beta_2(z) \partial^2 A}{2 \partial \eta^2} = i \gamma(z) |A|^2 A(z, \eta) \quad (5.1)$$

где $A(z, \eta) = (cn\varepsilon_0 S_{eff}/2)^{1/2} E(z, \eta)$, c - скорость света в вакууме, n - показатель преломления, ε_0 - диэлектрическая постоянная, S_{eff} - эффективная площадь основной моды волокна, $E(z, \eta)$ - комплексная амплитуда напряженности электрического поля, z – длина распространения, η - время в бегущей системе координат ($z=z, \eta=t-z/u$), где u - групповая скорость импульса. Параметр η определяет временной интервал между импульсом, распространяющимся с групповой скоростью u , и исследуемым импульсом. Начальное поле задается в суперпозиции двух односолитонных импульсов:

$$E(0, \eta) = A_0 \operatorname{sech}(\eta / \eta_0 - T) + A_0 \operatorname{sech}(\eta / \eta_0 + T) \quad (5.2)$$

где η_0 – длительность начального импульса, $A_0 = \eta_0^{-1} \sqrt{\langle \beta_2 \rangle / \langle \gamma \rangle}$ – начальная амплитуда односолитонного импульса, T – безразмерный параметр, определяющий расстояние между пиками исходных импульсов. Применим метод обратной задачи рассеяния [21] для анализа численного решения нелинейного уравнения Шредингера с переменными коэффициентами. Алгоритм расчета параметров солитонов состоит из трех шагов:

- 1) Находим решение уравнения (5.1) в плоскости $z_s, E(\eta) = E(z_s, \eta)$.
- 2) Для функции $E(\eta)$ рассчитываем матрицу рассеяния нелинейного уравнения Шредингера с фиксированными коэффициентами дисперсии $\beta_2 = \beta_2(z_s)$ и $\gamma = \gamma(z_s)$ нелинейности.

3) Используя метод Ньютона, находим комплексные числа (спектральные параметры) λ_j , которые соответствуют нулю коэффициента матрицы рассеяния $a^*(\lambda_j) = 0$

Шаги 1-3 повторяются при новом значении $z = z_s$. В результате получаем спектральные параметры солитонов в зависимости от пройденного расстояния $\lambda_j = \lambda_j(z)$.

В шестой и седьмой главах приводятся полученные при моделировании результаты и их обсуждение. Были построены графики, отражающие динамику солитонной пары в волокне с периодическим изменением дисперсии (6 глава), солитона второго порядка в волокне со ступенчатым изменением дисперсии и периодическом изменении дисперсии (7 глава). С помощью полученных графиков можно оценить влияние модуляции диаметра на динамику солитона, что в дальнейшем возможно использовать для решения таких задач, как уменьшение потерь информации в волокне посредством реализации необходимого режима солитона. Или в общем эти задачи можно назвать следующим образом: улучшение качества передачи информации по оптическому волокну. Для моделирования использовался язык программирования Фортран (Fortran) и среда разработки CodeBlocks.

ВЫВОДЫ

В выпускной квалификационной работе рассмотрены оптические солитоны и особенности их динамики при движении в волокне с периодической и ступенчатой модуляцией диаметра. В качестве метода управления солитонным взаимодействием был использован метод периодической модуляции диаметра волокна и метод ступенчатого изменения диаметра волокна. За счет выбора периода модуляции достигался определенный режим. В случае ступенчатого изменения диаметра

необходимый режим достигался за счет уменьшения или увеличения параметра $|\beta_2|$ в момент сжатия солитона. Были рассмотрены три типа режимов для взаимодействия солитонной пары и пять режимов для солитона второго порядка. Данные режимы могут найти практическое применение в области управления лазерными импульсами, оптической обработке информации. Разделяя солитонную пару в волокне с периодическим изменением дисперсии возможно создать последовательность из пикосекундных импульсов с двумя несущими частотами. Получившиеся импульсы можно использовать для создания терабитовых линий связи с частотным разделением каналов, а также в терагерцовой спектроскопии. Объединяя два солитона можно получить один импульс с довольно высокой пиковой мощностью. Такой эффект можно использовать для преобразования цуга импульсов (близко расположенных импульсов) в импульсы с повышенной мощностью. Наличие притяжения между синфазными солитонами в оптических линиях связи может приводить к потере информации. Используя волокно с переменным диаметром можно изменять расстояние столкновения двух солитонов, распространяющихся на малом расстоянии друг от друга. А реализуя связанные состояния возможно избежать столкновения солитонов. Используя при работе с лазерами режим разделения солитона второго порядка можно создавать импульсы, между которыми либо не будет возникать притяжения, либо оно будет довольно слабым.

Апробация работы:

A. Konyukhov, **P. Mavrin**, Inelastic collisions of Schroedinger solitons in dispersion oscillation fibers, /SFM'17, International Symposium Optics and Biophotonics-V 21st International School for Junior Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophotonics. September 25-30, 2017. Paper 29P.

A. Konyukhov, A. Plastun, S. Zarkov, **P. Mavrin**, Slicing of photonic band-gap of low-contrast solid-core bandgap fibre. International Symposium Optics and Biophotonics - IV. Laser Physics and Photonics XVIII. September 27 – 30, 2016, Saratov, Russia.

A. Konyukhov, L. Melnikov, V. Baranovsky, **P. Mavrin**, Coherence properties of optical solitons generated in dispersion oscillating fibers. International Symposium Optics and Biophotonics - IV. Laser Physics and Photonics XVIII. September 27 – 30, 2016, Saratov, Russia.

A. Konyukhov, S. Zarkov, **P. Mavrin**, Inelastic soliton collisions under effect of stimulated Raman scattering. International Symposium Optics and Biophotonics - IV. Laser Physics and Photonics XVIII. September 27 – 30, 2016, Saratov, Russia.

Доклад, А.И. Конюхов, **П.А. Маврин**, Е.В. Щуркин, Способ управления пикосекундными лазерными импульсами с использованием волокон с переменной дисперсией, III Всероссийского семинара, "Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения", Саратов, 05-07 июня 2017г.

Доклад, А. Konyukhov, **P. Mavrin**, Inelastic collisions of Schroedinger solitons in dispersion oscillation fibers SFM-17 International Symposium "Optics and Biophotonics-V", Workshop on Laser Physics and Photonics XIX, September 26-30, 2017 Saratov, Russia постер No.29P.

Доклад, А.И. Конюхов, **П.А. Маврин**, Е.В. Щуркин, Л.А. Мельников. Мультиплексирование в оптоволоконных линиях связи с использованием дискретного солитонного спектра. V Международная юбилейная научная конференция "Проблемы управления, обработки и передачи информации" УОПИ-2017, 28–30 сентября 2017, г. Саратов.

Публикации по теме ВКР

K. S. Gochelashvili, A. A. Sysoliatin, A. I. Konyukhov, L. A. Melnikov, **P. A. Mavrin**, M. Yu. Salgansky, Modification of the discrete spectral parameters of optical solitons in fibers with variable dispersion, Bull. Lebedev Phys. Inst. (2017), Vol. 44, No. 11, pp. 52–58. <https://doi.org/10.3103/S1068335617110082>

A.I. Konyukhov, **P.A. Mavrin**, E.V. Schurkin, K.S. Gochelashvili, A.A. Sysoliatin, L.A. Melnikov, Stimulated fission of high-order optical breather via pairwise interaction of solitons in model of nonlinear Schrodinger equation with variable coefficients, Proceedings of SPIE, (2017), Vol. SFM100-142, P.1-5. doi: 10.1117/12.2315186

А.И. Конюхов, **П.А. Маврин**, Е.В. Щуркин. Способ управления пикосекундными лазерными импульсами с использованием волокна с переменной дисперсией, Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения. Материалы III Всероссийского семинара памяти профессора Ю.П. Волкова 5-7 июня 2017 года. Саратов: Саратовский источник, 2017, 101 с. с.58-60. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30576404>

А.И. Конюхов, **П.А. Маврин**, Е.В. Щуркин, Влияние регулярной фазовой модуляции на разделение оптических солитонов в волокне с периодическим изменением дисперсии. Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения. Материалы III Всероссийского семинара памяти профессора Ю.П. Волкова 5-7 июня 2017 года. Саратов: Саратовский источник, 2017, 101 с. с.61-63. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30576404>

A.I. Konyukhov, **P.A. Mavrin**, E.V. Schurkin, K.S. Gochelashvili, A.A. Sysoliatin, L.A. Melnikov, Stimulated fission of high-order optical breather via pairwise interaction of solitons in model of nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients. Proceedings of SPIE, V.10717, 1071700. <https://doi.org/10.1117/12.2315186>