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

Преобразование импульсов Эйри при нелинейном распространении в оптических волокнах

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТАРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 254 группы

направления 03.04.02 «Физика» физического факультета

Барановского Владислава Алексеевича

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент ____________________ А.И. Конюхов

Зав. кафедрой

д. ф.-м. н., профессор ____________________ В.М. Аникин

Саратов 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Волновые пакеты Эйри впервые были введены в контексте квантовой механики. Такие пакеты являются решением уравнения Шредингера. Пакет Эйри сохраняет свою форму. Однако такие пакеты, физически не реализуемы, поскольку их полная энергия является бесконечной. В экспериментальных исследованиях используются ограниченные импульсы Эйри. Такие импульсы можно создать, применив кубическую фазовую маску для гауссового импульс. Свойства пучков Эйри и импульсов Эйри сохранять свою форму вызвали большой интерес, применимые к нескольким областям исследования и в настоящее время являются темой исследований для многих исследовательских групп. Пространственно-усеченные пучки Эйри были применены для создания изогнутых плазменных каналов, очистки частиц, маршрутизации плазменной энергии и способны восстанавливаться из пространственных искажений благодаря их механизму перераспределения энергии, что делает их полезными для получения изображений в рассеивающих средах.

Цель выпускной квалификационной работы (ВКР). Выявление особенностей распространения ограниченных импульсов Эйри в оптических волокнах при наличии аномальной дисперсии и нелинейности керровского типа.

Задачи ВКР:

1. Построить численную модель распространение импульсов на основе параболического волнового уравнения.
2. Рассмотреть влияние дисперсии на распространение ограниченных импульсов Эйри.

3. Рассмотреть распространение импульсов в условиях керровской нелинейности.
4. На основе численного моделирования рассмотреть особенности преобразование импульсов Эйри в оптические солитоны.

Структура и объём работы

Дипломная работа состоит из введения, трёх глав, результатов расчётов, заключения и списка используемой источников. Общий объём работы составляет 55 страниц, 25 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность работы, обсуждается научная новизна и практическая значимость импульсов Эйри.

В первой главе дается вывод параболического волнового уравнения и методы его решения.

Большинство нелинейных эффектов в волоконных световодах изучаются с использованием импульсов длительностью от $\sim$10 нс до $\sim$10 фс. Когда такие импульсы распространяются в световоде, на их форму и спектр влияют как дисперсионные, так и нелинейные эффекты. И в первом разделе выводится основное уравнение, описывающее распространение оптических импульсов в волоконных световодах, как в нелинейной среде с дисперсией.

Для коротких импульсов, с длительностью менее 1 пс, уравнение Шредингера может быть дополнено слагаемыми, описывающими поглощение, дисперсию третьего порядка, самоукручение, вынужденное комбинационное рассеяние:

$$\frac{\partial A}{\partial z}+\frac{\alpha}{2}A+\frac{i}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial T^2}-\frac{1}{6}\beta_3\frac{\partial^3 A}{\partial T^3}=i\gamma[|A|^2A+\frac{2i}{w_0}\frac{\partial}{\partial T}(|A|^2A)-T_RA\frac{\partial |A|^2}{\partial T} \tag{1}$$

Уравнение распространения (1) — нелинейное дифференциальное уравнение с частными производными, которое, вообще говоря, нельзя решить аналитически, за исключением некоторых частных случаев, когда для решения применим метод обратной задачи рассеяния. Потому часто для изучения нелинейных эффектов в световодах необходимо численное моделирование. Для этой цели можно использовать множество численных методов, которые можно отнести к одному из двух классов: 1) разностные методы и 2) псевдоспектральные методы. Псевдоспектральные методы на порядок или даже более быстрее при той же точности счета. Одним из наиболее широко используемых методов решения задачи распространения импульсов в нелинейной среде с дисперсией является Фурье-метод расщепления по физическим факторам. Относительно большая скорость счета этим методом по сравнению с большинством методов конечных разностей достигается благодаря использованию алгоритма быстрого Фурье-преобразования. Во втором разделе кратко описывается Фурье-метод с расщеплением по физическим факторам, а также его применение для задачи распространения импульсов в волоконном световоде.

В второй главе описываются пакеты Эйри, их классическая механика и их движение в изменяющимся во времени пространственно однородной форме.

Первоначально пакеты Эйри были рассмотрены в квантовой механике. Все выводы, полученные для пакетов Эйри, являются справедливыми как для лазерных пучков, так и для лазерных импульсов, поскольку все эти явления описываются одним и тем же уравнением Шредингера. Во второй главе рассматриваются свойства пакетов Эйри, используя запись уравнение Шредингера для квантовой механики. Волновой пакет для частицы с массой m изменяется в соответствии с уравнением Шредингера

$$\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = i\hbar\frac{\partial A}{\partial t} \qquad (2)$$

Дисперсия в уравнении Шредингера, описываемая слагаемым $(\partial^2 A/\partial x^2)$, предполагает, что по мере своего распространения в свободном пространстве все волновые пакеты должны менять свою форму. Однако существуют решения, для которых волновой пакет $A(x,t)$, плотность вероятности которого $|A(x,t)|^2$ не только не меняет свою форму, но и продолжает ускоряться. Так же во главе рассмотрим такие пакеты в формулировке, принятой для квантовой механики.

Для световых импульсов, распространяющихся в оптическом волокне справедливо аналогичной уравнение:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \qquad (3)$$

При $t = 0$ этот волновой пакет выражается

$$A(x,0) = Ai(B\,x/\hbar^{2/3}) \qquad (4)$$

где B - произвольная постоянная (для удобства взята положительно) и Ai означает функцию Эйри.

Общее решение (2) выражается через

$$A(x,t) = Ai[\frac{B}{\hbar^{2/3}}(x - \frac{B^3 t^2}{4m^2})]e^{\left(\frac{iB^3 t}{2m\hbar}\right)[x-(B^3t^2/6m^2)]} \qquad (5)$$

Это легко подтверждается прямой заменой и использованием функции Эйри в дифференциальном уравнении (2). Так же мы можем использовать решение (5) для плоских волн, используя интегральное выражение функции Эйри:

$$A(x,t) = \frac{\hbar^{2/3}}{2\pi B}\int_{-\infty}^{\infty} dk e^{i(kx - \frac{\hbar k^2 t}{2m} + \hbar^2 k^3/3B^3)}$$

Из уравнения (5) понятно, что и в самом деле распространяется без изменения формы и ускоряется со скоростью $B^3t^2/2m^2$. Эти свойства пакета Эйри будут рассмотрены во главе. Оба свойства имеют классическое происхождение и иллюстрируют тот факт, что функции квантовой волны отвечают не отдельным классическим частицам, а семействам частиц. В пакете Эйри ускоряется не любая отдельная частица, а огибающая группы частиц. Классический анализ траекторий показывает, что свойство нераспространения пакета Эйри – уникально (в отличие от обычной плоской волны, для которой $|A|^2$ независимо от x).

Во втором разделе показано, что пакеты Эйри продолжают распространяться с сохранением своей формы, даже при воздействии внешней силы $F(t)$, как постоянной, так и периодической.

В третьей главе рассмотрено распространение пакетов (импульсов) Эйри в одномодовых оптических волокнах. В данном случае, классическое уравнение Шредингера (2) должно быть дополнено слагаемым, описывающим высокочастотную керровскую нелинейность. Также могут быть добавлены слагаемые, отвечающие за дисперсию высших порядков, поглощение, и т.д. (3), (1). Рассмотрены нелинейные эффекты, проявляющиеся при распространении импульсов в оптических волокнах.

Во многих нелинейных системах стационарное волновое состояние оказывается неустойчивым: совместное действие нелинейных и дисперсионных эффектов приводит к его модуляции. Такое явление, называемое модуляционной неустойчивостью, которое исследовалось в самых разных областях физики: гидродинамике, нелинейной оптике, физике плазмы. Что касается волоконной оптики, то 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.

Второй раздел посвящён фундаментальным солитонам и солитонам высших порядков

$$i\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A \qquad (6)$$

Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) (6) принадлежит к специальному классу уравнений, которые можно точно решить, используя метод обратной задачи рассеяния (ОЗР). Этот метод был открыт Гарднером. Захаров и Шабат использовали его для решения НУШ; данный метод стал важным инструментом в математической физике. Метод ОЗР по духу похож на метод преобразования Фурье, который обычно используют для решения нелинейных уравнений в частных производных. Этот подход состоит в определении подходящей задачи рассеяния, потенциал которой и есть искомое решение. И этот метод кратко описывается во втором разделе, как решения для уравнения (6).

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены, пакеты Эйри и их свойства. Свойства являются нетривиальной иллюстрацией факта, что волновая функция согласовывается с семейством частиц, а не с отдельной частицей.

Так же рассмотрены, основные уравнения распространения (**параболическое волновое уравнение**) и методы их решения, явление, называемое **модуляционной неустойчивостью** и **фундаментальные солитоны и солитоны высших порядков.**

Особое внимание в работе уделяется **нелинейному уравнению Шредингера** принадлежащее к специальному классу уравнений, которые можно точно решить, используя **метод обратной задачи рассеяния**. Это метод по духу похож на метод преобразования Фурье, который обычно используют для решения нелинейных уравнений в частных производных.

В конце была проделана практическая работа, которая заключалась в рассмотрение импульсов Эйри и их свойств. В ней показано, что ограниченные импульсы Эйри при достаточной интенсивности могут приводить к образованию солитонов, так же на ограниченных дистанциях распространения импульсы Эйри сохраняют свою форму, а на больших дистанциях преобладает дисперсионное расплывание, что приводит к значительному искажению данного импульса.

Список использованных источников

1. Rudnick A., Marom D.M. Airy-soliton interactions in Kerr media, Optics Express Vol. 19, Issue 25, pp. 25570-25582, (2011).

2. Майер А.А. Квант. электрон., т.11, с. 157, 1984.

3. Lattes A. An ultrafast all-optical gate., IEEE Journal of Quantum Electronics Vol. 19, Issue: 11, pp 1718 - 1723, (1983).

4. Wabnitz S. Instabilities and all-optical phase-controlled switching in a nonlinear directional coherent coupler, Applied Physics Letters Vol. 49, Issue: 14, pp 838, (1986).

5. Агравал, Г. П. Нелинейная волоконная оптика, Мир, 1996. 323 с.

6. Ахманов, С. А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов, Наука. Гл. ред. физ. -мат. лит., 1988. 312 с.

7. Reekie L. Diode-laser-pumped operation of an Er3+-doped single-mode fibre laser., Electronic Letters Vol. 23, Issue:20, pp. 1076 – 1078, (1987).

8. Hill K.O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication, Applied Physics Letters Vol. 32, Issue: 10, pp 647, (1978).

9. Farries M.C., Morkel P.R., Townsend J.E. Samarium/sup 3+/-doped glass laser operating at 651 nm, Electronic Letters Vol. 24, Issue: 11, pp 709 – 711, (1988).

10. Hanna D.C. Continuous-wave oscillation of a monomode ytterbium-doped fibre laser, Electronic Letters Vol. 24, Issue: 17, pp 1111-1113, (1988).

11. Kawasaki B.S. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers, Optics Letters Vol. 3, Issue: 11, pp 66 – 68, (1978).

12. Weiss G.H., Maradudin A.A. The Baker-Hausdorff Formula and a Problem in Crystal Physics, Journal of Mathematical Physics Vol. 3, Issue: 4, pp 771, (1962).

13. Fleck J.A., Morris J.R., Feit M.D. Cascaded electro-optic scanning of laser light over large angles using domain microengineered ferroelectrics, Applied Physics Letters Vol. 10, Issue: 17, pp 129, (1976).

14. Messiah A. Quantum Mechanics, North-Holland. Amsterdam Vol. l. pp. 216-222, (1961).

15. Abramowitz M., Stegun I. A. Handbook of Mathematical Functions, U.S. National Bureau of Standards, Washington, D.C. pp. 446-448, (1964).

16. Berry M. V., Balazs N. L. Nonspreading wave packets, American Journal of Physics Vol. 47, Issue 3, pp. 264-267, (1979).

17. Dirac P. A.M., The Principles of Quantifill Mechanics. 3rd cd. Oxford University, New York. pp 12 1 ff., (1947).

18. Feynman R.P., Hibbs A. R., Quantum Mechanics and Path Integrals, McGraw-Hill. New York, 1965.

19. Silberberg S.R., Stegeman G.I., Applied Physics Letters, Vol. 50,pp 801 (1983).

20. Trillo S., Wabnitz S., Wright E. M., Stegeman G. I. Soliton switching in fiber nonlinear directional couplers, Optics Letters Vol. 13, Issue: 4, pp 672 – 674, (1988).

21. Islam M.N., Dijali S.P., Gordon J.P., Optics Letters Vol. 13, pp 518, (1988).

22. Desurvire E., Simpson J.R., Becker P.C. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier, Optics Letters Vol. 12, Issue: 4, pp 888-890, (1987).

23. Jauncey I.M. Efficient diode-pumped CW and Q-switched single-mode fibre laser, Electronic Letters Vol. 22, Issue: 4, pp 198 – 199, (1986).

24. Liu K. Broadband diode-pumped fibre laser, Electronic Letters Vol. 24, Issue: 14, pp 838 – 840, (1988).

25. Brierley M.C., France P. W., Miliar C.A., Lasing at 2.08 mu m and 1.38 mu m in a holmium doped fluoro-zirconate fibre laser, Electronic Letters Vol. 24, pp 539, (1988).

26. Esterowitz: E., Allen R., Aggarwal I., Pulsed laser emission at 2.3 mu m in a thulium-doped fluorozirconate fibre, Electronic Letters Vol. 24, pp 1104 (1988).

27. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П., Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам, М: Физматлит, 2005 г.

28. Sysoliatin A. A., Dianov E. M., Konyukhov A. I., Melnikov L. A., Stasyuk V. A., Soliton Splitting in a Dispersion-Oscillating Fiber, Laser Physics, Volume 17, Issue 11, pp.1306-1310, (2007).