

На правах рукописи

Балашов Андрей Дмитриевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МНОЖЕСТВЕННОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ
В СРЕДЕ С КУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

05.13.18 – “Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Пергамент Анна Халиловна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Иногамов Наиль Алимович

доктор физико-математических наук,
профессор Карамзин Юрий Николаевич

Ведущая организация: Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований (ТРИНИТИ)

Защита диссертации состоится «16» ноября 2006 года в 14-00 на заседании диссертационного совета № К 002.058.01 при Институте математического моделирования РАН по адресу 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института математического моделирования РАН

Автореферат разослан «02» октября 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Прончева Надежда Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Процессы дистанционного зондирования атмосферы с помощью мощного фемтосекундного лазерного импульса, дистанционное управление электрическим разрядом сопровождаются развитием мелкомасштабной самофокусировки. Это явление получило название филаментации (от английского *filament* – нить). Филаментация есть развитая стадия модуляционной неустойчивости лазерного пучка – неустойчивости Беспалова-Таланова.

В результате самофокусировки растет интенсивность импульса и уменьшается его полуширина, но «схлопывания» не происходит из-за дефокусирующего воздействия электронной плазмы, созданной многофотонной ионизацией молекул воздуха. В результате, максимальная интенсивность в филаменте не превышает 10^{14}Ватт/см^2 для инфракрасных импульсов. В зоне максимальной интенсивности регистрируется движущийся вдоль оси распространения импульса фокус, след которого принято называть филаментом. Возникновение нескольких фокусов при наличии достаточной мощности импульса обычно объясняется или мелкомасштабной самофокусировкой шумовых возмущений начального профиля импульса либо нарушением его аксиальной симметрии или флуктуациями показателя преломления среды.

В работе рассмотрены два явления, формирующие процесс филаментации: неустойчивость Беспалова-Таланова, которая порождает мелкомасштабную самофокусировку, и дефокусирующее влияние электронной плазмы, созданной за счет многофотонной ионизации. Данное исследование подтвердило, что до тех пор, пока максимальная интенсивность импульса не достигнет пороговых значений для многофотонной ионизации, не наблюдается потери энергии – мощность импульса не меняется*. Только после достижения порогового значения интенсивности начинается процесс многофотонной ионизации, и падают как мощность, так и интенсивность импульса, после чего многофотонная ионизация прекращается.

При этом необходимо решить несколько различных по характеру задач. В начале нужно выбрать и обосновать математическую модель, описывающую конкретные режимы распространения излучения в усилительных каскадах мощных лазерных систем. Одной из широко распространенных моделей является приближение Фока-Леонтовича, более известное в научной литературе как параксиальное приближение, которое представляет собой параболическое нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), описывающее

* С.Н.Власов, В.И.Таланов «Самофокусировка волн» ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1997

распространение для излучения в нелинейной среде. На основе модели НУШ можно исследовать эффекты схлопывания пучков в процессе самофокусировки, характер поля вблизи нелинейного фокуса, взаимодействие пучков.

Цель и задачи

Целью данной работы является исследование качественно и численными методами проблемы распространения мощных лазерных импульсов в среде с кубической нелинейностью, сопровождаемого множественной филаментацией. При этом были разработаны эффективные алгоритмы, и был создан комплекс параллельных программ для решения задачи о дальнейшем распространении мощного фемтосекундного импульса в воздухе.

Методы исследования

Для исследования задач распространения лазерных импульсов без диссипации был использован лагранжев формализм, ранее примененный в работах Дегтярева[†]. На основе этого формализма и использования сеток, адаптированных к особенностям решения, была исследована проблема эволюции уединенного импульса и взаимодействия двух гауссовых импульсов.

Была сформулирована система уравнений, состоящая из нелинейного уравнения Шредингера и кинетического уравнения, описывающего эволюцию лазерной плазмы (модель Друда[‡]) для решения задачи о дальнейшем распространении мощного фемтосекундного импульса. Был создан программный комплекс, реализующий методы параллельного программирования, и проведен цикл расчетов, позволивших исследовать процессы распространения для систем с параметрами, близкими к реальным.

Научная новизна

Комплекс программ, созданный при реализации данной работы, обладает возможностями, близкими к предельным для настоящего времени, и позволил исследовать системы с реальными параметрами. При реализации вычислительного комплекса были успешно совмещены методы параллельного

[†] Л.М.Дегтярев, В.В.Крылов «Метод численного решения задач динамики волновых полей с особенностями» Журнал вычислительной математики и математической физики, Т.17, ноябрь-декабрь, 1977

[‡] M.D.Feit, J.A.Fleck, Appl. Phys. Lett., V.24, 169, 1974

программирования и возможности упрощения системы уравнений для ее качественного исследования. Настоящая работа одна из первых, в которой реализовано прямое моделирование множественной филаментации. Впервые был установлен циклический ступенчатый характер эволюции гауссова импульса при наличии ионизационных эффектов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на третьем международном научном семинаре «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах», Москва 2006; на конференции «Ломоносовские чтения», Москва 2006; на научном семинаре им. К.И. Бабенко ИПМ РАН; на международной конференции «Тихонов и современная математика», Москва 2006.

Публикации

По теме диссертации опубликовано пять печатных работ, в том числе три в соавторстве. Из них 2 статьи в российских журналах, 3 статьи в препринтах ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 93 страницах, содержит 36 рисунков. Список литературы насчитывает 80 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассмотренной задачи, формулируются основные цели и положения работы.

Первая глава работы посвящена описанию математической модели распространения лазерного импульса в среде с кубической нелинейностью. Приведен полный вывод системы уравнений. Сделаны комментарии относительно исследования распространения фемтосекундных импульсов в воздухе.

Также приведены результаты теоретического обоснования критерия поперечной неустойчивости плоской волны в нелинейной среде, сделанные Беспаловым и Талановым. Подтверждение этих результатов, а также обсуждение их влияния на характер распространения импульса затрагиваются в последующих главах диссертации.

Первый параграф главы посвящен выводу системы уравнений для моделирования распространения лазерного импульса. Обоснован выбор модели для описания распространения фемтосекундных импульсов в кубичной нелинейной среде, за которую в работе принят воздух. В итоге выписана система из двух уравнений. Первое из них шредингеровского типа для медленно меняющейся огибающей электрического поля. В модели учитываются дефокусировка в самонаведенной лазерной плазме и многофотонное поглощение. Также в эффекте Керра учитывается влияние времени установления поляризации молекул. В систему входит кинетическое уравнение для локальной плотности плазмы (модель Друда).

Во втором параграфе описаны качественные особенности математических моделей рассматриваемой системы. Основным элементом моделей является НУШ. Существенно, что для формулировки краевых задач, описывающих распространение электромагнитных полей в кубической нелинейной среде, может быть использован лагранжев (или гамильтонов) формализм. Трансляционная инвариантность относительно сдвига вдоль направления распространения луча приводит к сохранению Гамильтониана системы. Кроме того, в отсутствие внешних потоков излучения сохраняется мощность в пучке. Законы сохранения в дальнейшем используются для проверки правильности аппроксимации исходных уравнений на сетках различной структуры. Множественная филаментация есть развитая стадия модуляционной неустойчивости Беспалова-Таланова[§]. Особенностью этой неустойчивости является то, что неустойчивы длинноволновые моды. Если в спектре сигнала они слабо представлены, то такой импульс может распространяться устойчиво достаточно далеко. Таким образом, динамика образования филаментов зависит от спектрального состава излучения.

Из классических работ Таунса известно, что при превышении критического значения мощности в начальном пучке наблюдается явление самофокусировки. Однако, учитывая свойства неустойчивости Беспалова-Таланова, изложенные выше, эволюция пучка существенным образом зависит от его пространственного спектра. Таким образом, описанные во втором параграфе особенности являются основополагающими при заключениях, сделанных на основе численного моделирования в последующих главах.

Во второй главе описаны численные методы для решения нелинейного уравнения Шредингера, основанные на лагранжевом и эйлеровом подходах с применением нерегулярных сеток.

Построена усредненная система уравнений для качественного исследования дальнего распространения фемтосекундного импульса в воздухе. Описаны применяемые численные методы и методы параллельного программирования при реализации вычислительного комплекса.

§ В.И.Беспалов, В.И.Таланов «О нитевидной структуре пучков света в нелинейных жидкостях» Письма в ЖЭТФ, Т. 3, С.471-476, 1966

Исследованы основные итерационные методы решения линейных систем, выбор предобуславливателей и итерационных схем, между сочетаниями которых проводилось сравнение. Также описан процесс моделирования начального амплитудного шума импульса на основе использования обратного преобразования Фурье.

В первом параграфе проведено сравнение расчета уединенного гауссова импульса с использованием различных подходов на различных сетках. Сравнение проводилось для расчетов, основанных на лагранжевом формализме в одномерном осесимметрическом случае и прямого описания задачи в прямоугольной и цилиндрической системах координат, а также на нерегулярной сетке (рис. 1). Дано подробное описание коэффициентов для метода конечных объемов приведенной нерегулярной сетки. В качестве сравнительной характеристики выбиралось значение логарифма отношения интенсивностей в точке z и в начальный момент, величина R (рис. 2). Как и ожидалось, в случае использования прямоугольной сетки (кривая 4 на рис. 2) инкремент в точке коллапса значительно загроубляется. Применение же в центре гауссова профиля сетки цилиндрических координат (кривые 2 и 3 на рис. 2, соответствующие разной степени измельчения сетки) с высокой точностью воспроизводит значение инкремента, при этом характер его развития по координате распространения импульса z совпадает с кривой, полученной при решении задачи с использованием гидродинамической аналогии (кривая 1 на рис. 2).

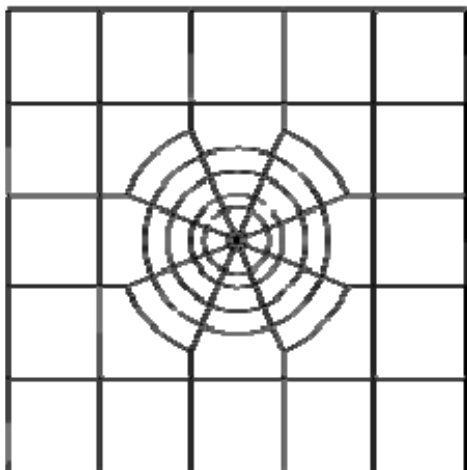


Рис. 1. Нерегулярная сетка

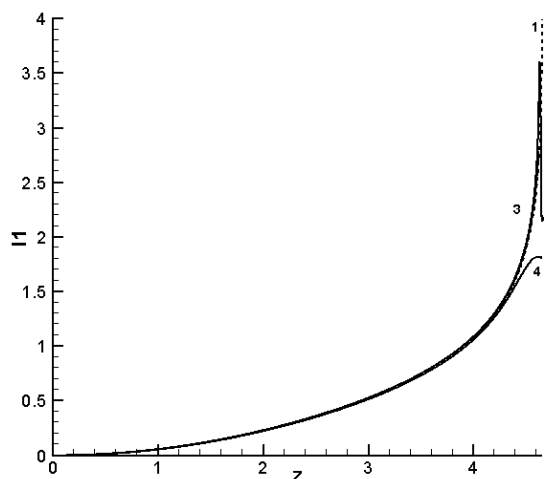


Рис. 2. Сравнение величины R

Во втором параграфе приводится алгоритм упрощения решаемой системы уравнений в целях сокращения времени счета для качественного исследования задачи. Здесь использован тот факт, что исследование проводится для фемтосекундного импульса. Это позволяет построить усредненное по времени импульса уравнение, которое после обезразмеривания имеет вид:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = i\nabla_{\perp}^2 A + i|A|^2 A - i|A|^{2K} A - \nu|A|^{2K-2} A, \quad (1)$$

где параметр ν принимает значение $\nu = 0.154$ и $K = 8$ при выбранных параметрах для среды распространения импульса (воздух). В качестве граничных условий выбираются равенства нулю потока. Начальное условие для моделирования распространения лазерного импульса обычно имеет гауссов профиль и задается в следующем виде

$$A_{(z=0)} = \sqrt{I_0} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)^N}{\omega_0^{2N}}\right],$$

где ω_0 – начальная ширина импульса; $\sqrt{I_0}$ – начальная амплитуда. Степень N обычно полагается равной 1 или 2.

Далее в параграфе описывается построение симметричной консервативной разностной схемы и применение метода Ньютона для решения полученного уравнения. В конце параграфа приводятся оценки для размерности задачи, определяемой пространственными масштабами филаментов, при моделировании распространения мощного импульса в атмосфере исходя из экспериментальных данных проекта Teramobile (Франция, Германия, 2002-2006 годы). Кроме начальной полуширины и мощности импульса, которые в экспериментах достигают 2-4 см и 300-1500 ГВт, принимается во внимание тот факт, что наблюдаемая полуширина филаментов постоянна и достигает 100-150 мкм, а интенсивность в фокусе может превышать интенсивность фона в десятки раз. На основе сделанных выводов о размерности задачи применение методов параллельных вычислений становится очевидным.

Третий параграф содержит описание используемых при работе итерационных методов. Как правило, свойства матрицы исходной системы обычно неизвестны, но, тем не менее, часто пытаются улучшить эти свойства при помощи хорошо известной методики, которая называется «предобуславливание». Идея метода заключается в изменении спектральных свойств матрицы для достижения быстрой сходимости. Задача нахождения наилучшей пары итерационного метода и предобуславливателя важна для оптимизации основного ресурсоемкого процесса настоящей работы в силу использования неявной схемы для решения уравнения.

В четвертом параграфе структурно описываются основные блоки построенного параллельного программного комплекса для решения задачи распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере на дальние дистанции. Приводятся данные сравнения пар итерационных методов и различных стандартных предобуславливателей. Для анализа эффективности параллельных алгоритмов обычно используются такие понятия, как эффективность и ускорение. Ускорением параллельного алгоритма называют отношение времени выполнения алгоритма на одном

процессоре ко времени выполнения на системе из N_{pr} процессоров. Эффективностью параллельного алгоритма называют отношение его ускорения к числу процессоров, на котором это ускорение получено. Для реализованного параллельного алгоритма приводится ускорение, полученное в ходе его апробации на МВС-1000 в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН (рис. 3).

Также описана идеология построения программного комплекса при распределении данных в памяти используемых процессоров и организации обмена между ними необходимыми элементами предусмотренных массивов. Построенная программа уникальна тем, что не требует при реализации жесткой привязки к количеству процессоров, на которых планируется запуск. Т.е. достаточно указать необходимое количество процессоров и оно будет задействовано при запуске. Программа прошла успешные испытания на количестве процессоров до 100, при этом размерность решаемой системы превосходила 33 млн. уравнений.

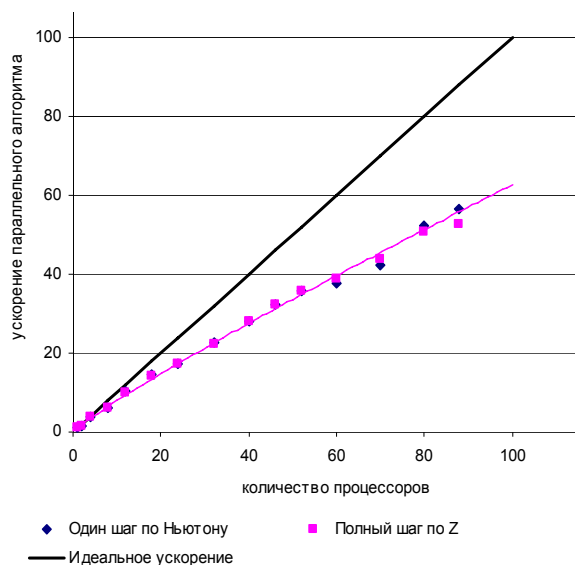


Рис. 3. Ускорение параллельного алгоритма

В пятом параграфе описывается задание начального условия для решаемой задачи. Еще в 1966 году В.И.Беспаловым и В.И.Талановым было сделано предположение относительно зарождения многофокусной картины в фокальной плоскости рассматриваемого лазерного импульса. Они предположили, что оптические неоднородности влияют на качество получаемого на входе в нелинейную среду импульса, из-за чего его профиль содержит мелкомасштабные флуктуации («шум»). В своих работах они исследовали параметры, при которых такие шумовые возмущения будут неустойчивы и приведут к появлению фокусов. Особенно важно изучение многофокусной картины для широких и мощных импульсов, т.к. именно полуширина возмущения влияет на степень его неустойчивости, и в каждом фокусе (филамент) концентрируется мощность порядка критической. Такое явление получило название множественной филаментации.

Теперь с помощью построенного программного комплекса стало возможным провести математическое моделирование описанного явления, наблюдаемого в реальных лазерных системах. Для моделирования случайной реализации комплексного поля флуктуаций начального гауссова профиля использовался метод, основанный на суммировании Фурье-гармоник пространственного спектра.

Третья глава диссертации содержит результаты численного моделирования. Были проверены результаты исследования В.И.Беспалова и В.И.Таланова о неустойчивости начальных возмущений как в одномерном так и в двумерном случае. Исследована нелинейная стадия развития самофокусировки и показано, что критерий верен лишь для начальной стадии процесса.

Затем приводятся результаты моделирования распространения гауссова импульса при наличии ионизационных эффектов с подробным описанием цикла филаментации и ступенчатого характера потери мощности.

Также в работе рассмотрен вопрос о взаимодействии двух импульсов, приведены результаты численного моделирования различных случаев взаимодействия.

На основании всех приведенных в работе сравнений результатов выбранного численного подхода с теоретическими и экспериментальными данными в работе приводится расчет реального лазерного импульса, процесс распространения которого сопровождается множественной филаментацией.

В первом параграфе приведены результаты расчетов теории Беспалова-Таланова для НУШ без учета ионизации. Полученные результаты полезны для дальнейшего изучения свойств распространения лазерных импульсов в рамках данной работы. В качестве начального условия бралось выражение вида:

$$A(r, 0) = 20 + 2 \cos(k_{\perp} x), \text{ т.е. } A_0 = 20.$$

В ходе моделирования рассмотрены различные значения k_{\perp} . На рис. 5 изображено развитие амплитуды в точке $x = 0$ для разных режимов. Из рисунка следует полное соответствие критерия устойчивости в линейном приближении, который схематически приведен на рис. 4. Аналогичная картина развития периодических возмущений в целом сохраняется и при рассмотрении в двумерном случае.

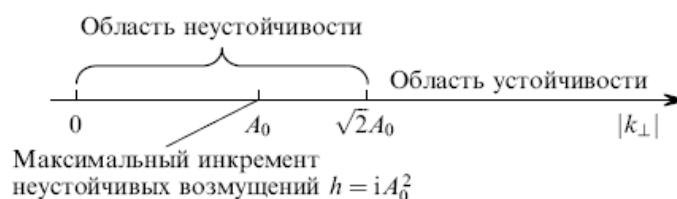


Рис. 4. Схематическое отображение критерия Беспалова-Таланова

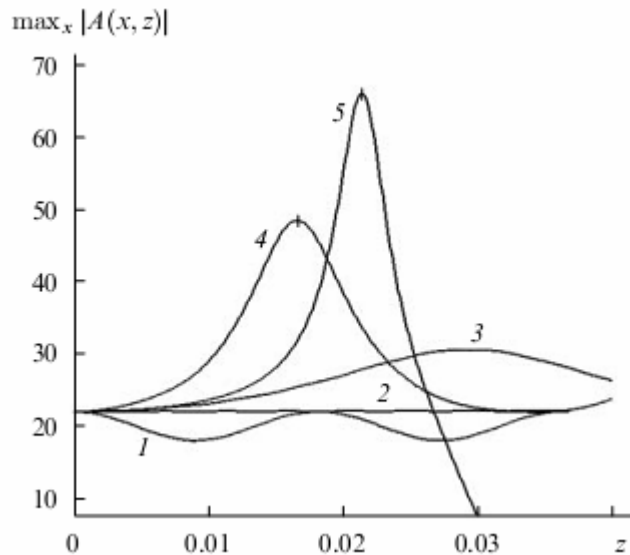


Рис. 5. Изменение амплитуды в центре возмущения

- Кривая 1 – $k_{\perp} = \sqrt{3}A_0 > \sqrt{2}A_0$ т.е. возмущения устойчивы. Происходят периодические колебания вдоль оси z .
- Кривая 2 – $k_{\perp} = \sqrt{2}A_0$, соответствует границе между двумя состояниями, возмущения никак не должны развиваться.
- Кривая 3 – $k_{\perp} = \sqrt{1 + \sqrt{3}/2}A_0 < \sqrt{2}A_0$, возмущения начинают развиваться.
- Кривая 4 – $k_{\perp} = A_0$, соответствует максимальному инкременту развития возмущений. Минимальное расстояние развития неустойчивости $z=0.016$.
- Кривая 5 – $k_{\perp} = \sqrt{1 - \sqrt{3}/2}A_0 < A_0$, т.е. возмущения развиваются не так быстро $z = 0.021 > z = 0.016$

Также была исследована нелинейная стадия развития неустойчивости и показано, что изначально устойчивая мода с параметром $k_{\perp} = \sqrt{3}A_0$ неустойчива на больших расстояниях. На рис. 6 приведены распределения для начальной стадии (кривая 1) и для развитой нелинейной стадии (кривая 2).

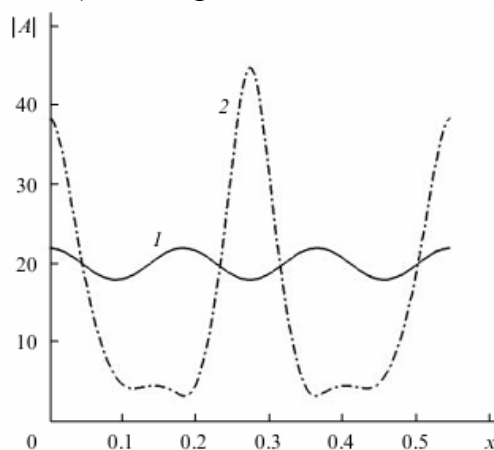


Рис. 6. Развитие неустойчивости в нелинейной стадии

Во втором параграфе проводится моделирование распространения одиночного гауссова импульса, т.е. начальное условие в задаче имело следующий вид:

$$A(r, 0) = A_0 + a \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \text{ при } A_0=10, a=1.$$

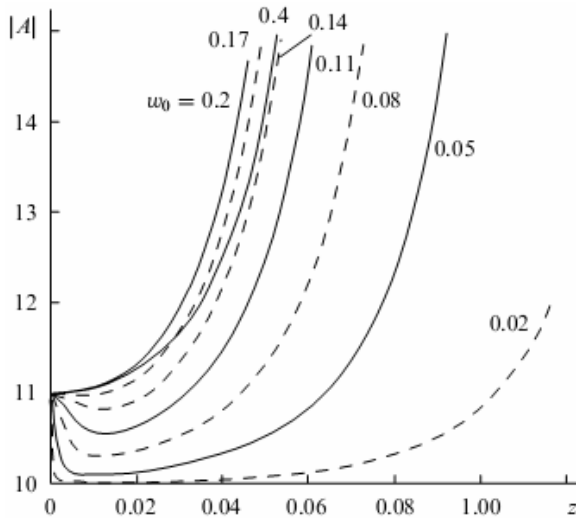


Рис. 7-а. Изменение амплитуды поля на оси импульса при различных значениях ω_0

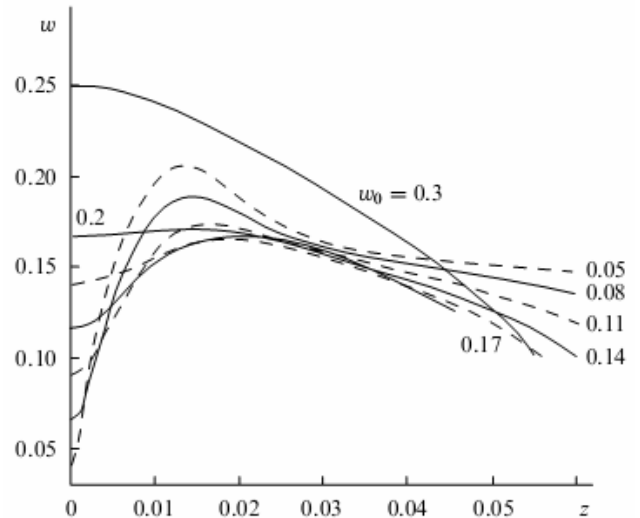


Рис. 7-б. Изменение полуширины пучка при различных значениях ω_0

Исходя из результатов моделирования (рис. 7) можно выделить два варианта начальной стадии развития гауссова возмущения на фоне.

- Интенсивность возмущения сразу возрастает с одновременным уменьшением его полуширины. Первоначальный спектр таких возмущений сосредоточен около нуля, т.е. в целом такие возмущения неустойчивы.
- Если же начальная полуширина возмущения мала, то вначале процесса наблюдается постепенное ее возрастание с одновременным уменьшением интенсивности. Это означает, что пучок обладает достаточно широким спектром и доля низкочастотных составляющих (которые согласно теории Беспалова-Таланова экспоненциально возрастают) мала. На втором этапе, после перетекания спектра в низкочастотную область наблюдается самофокусировка.

Далее сделаны аналитические оценки для начальной полуширины возмущения, разделяющей эти два варианта. Это значение $\tilde{\omega} \sim \sqrt{2}/A_0$ подтвердилось численно. Похожая ситуация наблюдается и в случае уединенного импульса в отсутствии фона. В этом случае оценки для порогового значения $\tilde{\omega}$ согласуются с общей теорией, развитой Таунсом, и соответствуют оценкам для критической мощности импульса, при превышении которой наблюдается самофокусировка.

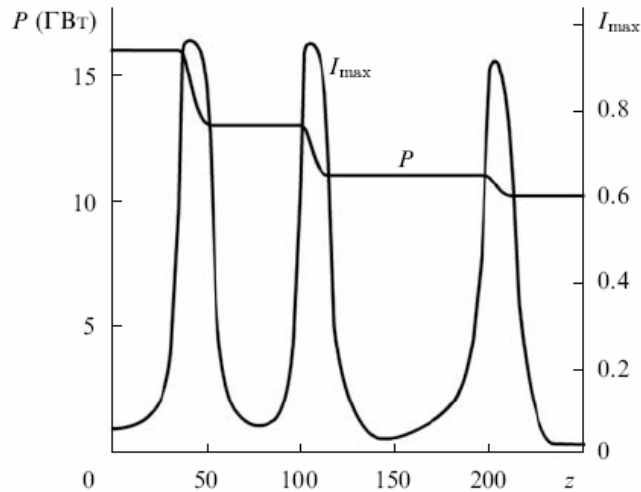


Рис. 8. Сопоставление интенсивности и мощности

Далее для гауссова импульса были получены решения при учете ионизационных членов – дефокусировке в самонаведенной плазме и многофотонного поглощения. В этом случае дано детальное описание этапов процесса филаментации, имеющего ступенчатый циклический характер (рис. 8). Каждый цикл этого процесса можно разделить на следующие этапы:

1. Мощность импульса постоянна, происходит самофокусировка, возрастает интенсивность (рис. 9-а, $0 < z < 37.6$)
2. При достижении порогового значения интенсивности включается механизм многофотонной ионизации и происходит падение мощности (рис. 8, $37.6 < z < 50$). Изменяется спектральный состав импульса, образуются кольцевые структуры (рис. 9-б), отмеченные в теории В.Н.Лугового и А.М.Прохорова.
3. При этом при наличии плазмы происходит дефокусировка, уменьшение интенсивности ($50 < z < 54.7$). Падение интенсивности ниже порогового значения (рис. 9-в) приводит к прекращению многофотонной ионизации.
4. Это падение интенсивности, наряду с изменением спектрального состава за счет образования кольцевых структур, создает условие для повторения самофокусировки (рис. 9-г, $54.7 < z < 85.9$).

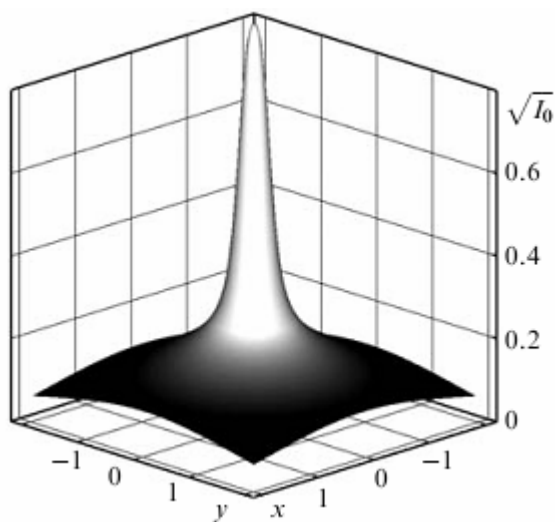


Рис. 9-а. Распределение амплитуды $\sqrt{I_0}$ при $z=37.6$

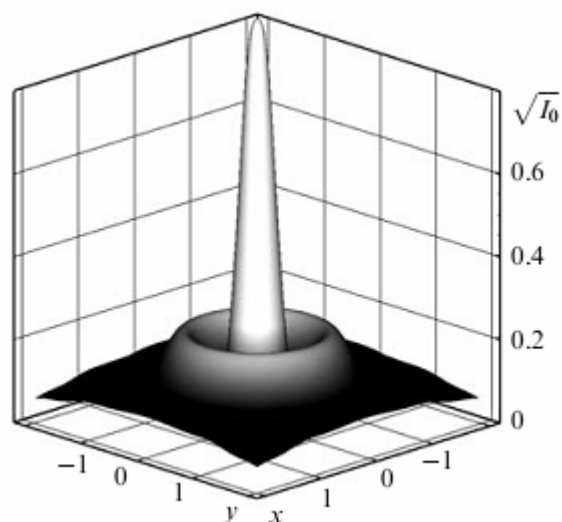


Рис. 9-б. Распределение амплитуды $\sqrt{I_0}$ при $z=45.4$

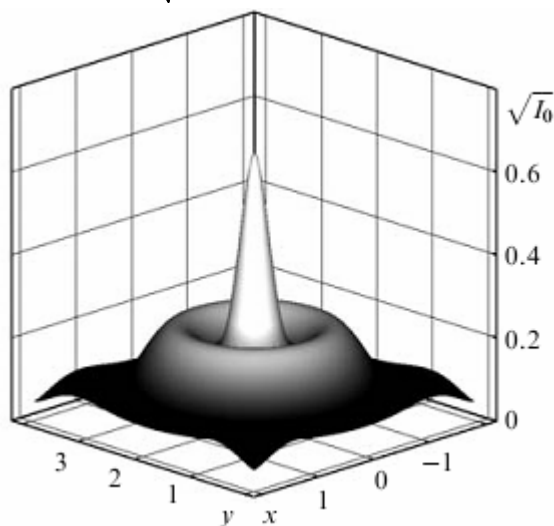


Рис. 9-в. Распределение амплитуды $\sqrt{I_0}$ при $z=54.7$

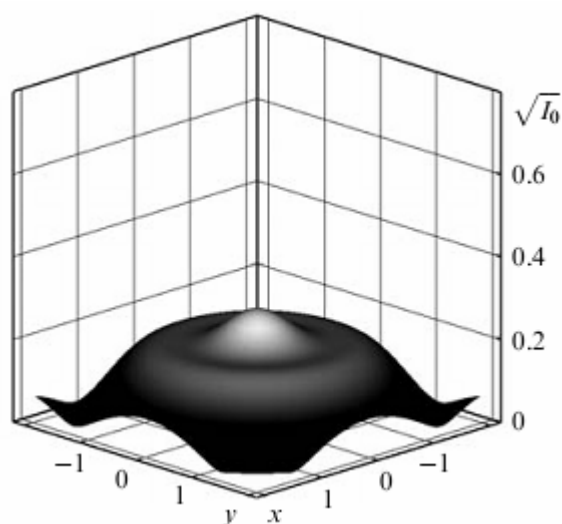


Рис. 9-г. Распределение амплитуды $\sqrt{I_0}$ при $z=85.9$

В третьем параграфе изучается взаимодействие двух гауссовых импульсов. Было установлено, что в отсутствии ионизации кольцевые структуры хоть и образуются, все же мало влияют на процесс объединения филаментов между собой. Объединение двух импульсов в этом случае происходит только при достаточно сильном сближении (рис. 10).

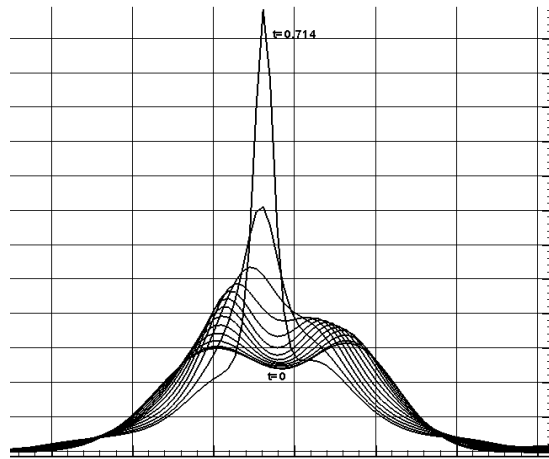


Рис. 10. Развитие двух возмущений с разными полуширинами. Графики представляют собой границу продольного сечения на разных удалениях по z , распределенных равномерно

Если же в расчет принимаются ионизационные члены, то кольцевая структура получается более явная и взаимодействие может происходить на достаточном удалении импульсов друг от друга. Также рассматривалось влияние поглощения на характер взаимодействия. Были рассмотрены два равных гауссовых возмущений с полушириной $\omega_0 = 5$ и амплитудой интенсивности $\sqrt{I_0} = 0.9$ на расстоянии $d = 15$. Распространение импульса моделировалось на расстояние $z = 230$.

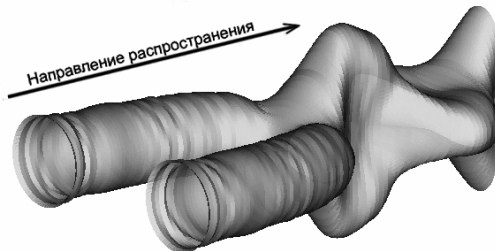


Рис. 11-а. Области высокой интенсивности для двух равных гауссовых возмущений без наличия диссипации

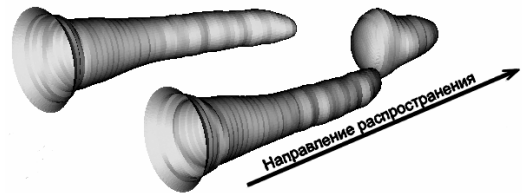


Рис. 11-б. Области высокой интенсивности для двух равных гауссовых возмущений при наличии диссипации ($\nu = 0.154$)

Как видно из рисунков, в консервативном случае (рис. 11-а), т.е. при $\nu = 0$ в формуле (1), мощность импульса концентрируется в середине между двух возмущений и сохраняется в области, подвергаясь колебаниям. При наличии диссипации ($\nu = 0.154$, рис. 11-б), каждый из двух импульсов начинает терять мощность, сужаясь при этом, а момент слияния находится намного дальше по z , чем в консервативном случае.

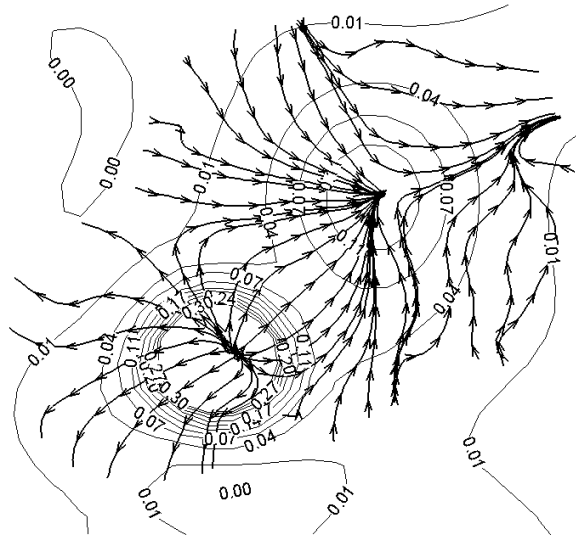


Рис. 12. Переток мощности
в мощном импульсе с большой полушириной

Взаимодействие между филаментами в широком импульсе с мощностью, на много превышающей критическую, более сложно. Пример перетока мощности из развитого филамента с максимальной интенсивностью в область, где только зарождается новый филамент, представлен на рис. 12.

Четвертый параграф главы посвящен математическому моделированию распространения реального лазерного импульса. В качестве примера расчета приводится расчет для среднего по мощности ($62P_{cr}$) импульса с полушириной $\omega_0 = 3\text{ мм}$. Расчетная область представляет собой квадрат с длиной стороны 2 см . На начальном профиле задан гауссов шум. Расчет проводился на сетке 2048×2048 ячеек.

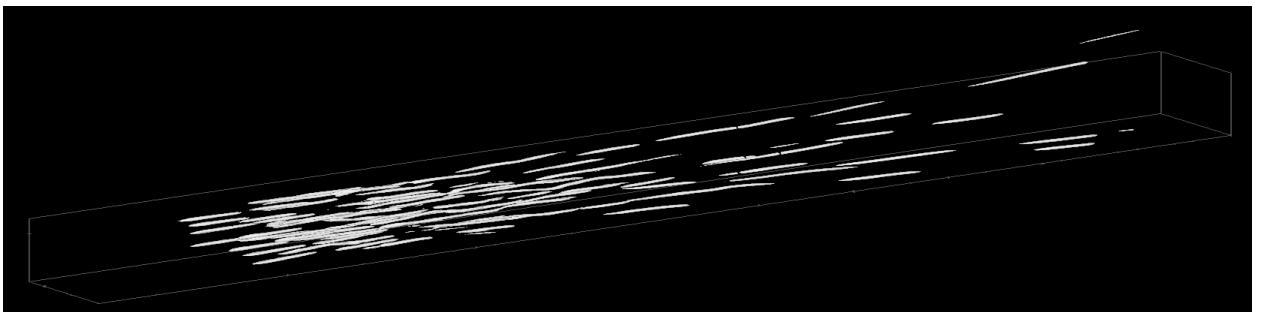


Рис. 13. Линии уровня $I_{iso} = 0.16$ распространения импульса
с мощностью $P = 62P_{cr}$ на расстояние около 9 м .

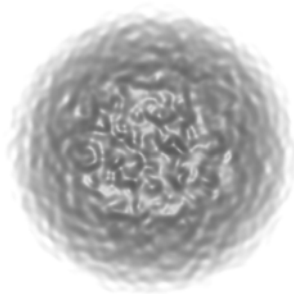


Рис. 14-а. Распределение интенсивности при $Z=1м$

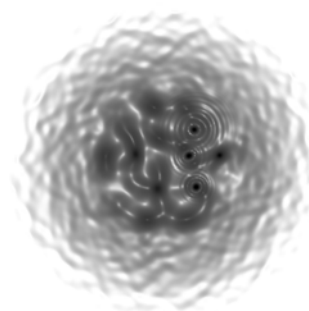


Рис. 14-б. Распределение интенсивности при $Z=3м$

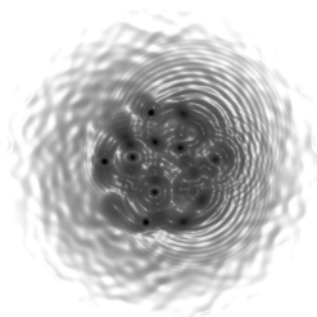


Рис. 14-в. Распределение интенсивности при $Z=4м$

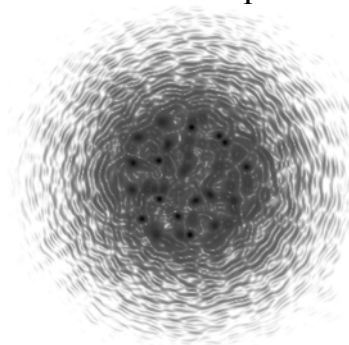


Рис. 14-г. Распределение интенсивности при $Z=6м$

Наблюдается процесс образования, слияния и последующего вновь образования филаментов. Результаты эволюции мощности и интенсивности (рис. 13, 14) такого импульса совпадают с полученными результатами проекта Teramobile. Более того, сравнение временных характеристик по скорости счета созданного в данной работе программного комплекса также дает хорошие результаты, несмотря на коренное различие в подходах к численному решению задачи исследователей проекта Teramobile. Следует отметить, что расчеты в проекте Teramobile проводились с использованием спектральных методов в отличие от прямых, использованных в данной работе. Сравнение характеристик по скорости счета и степени разрешения особенностей структуры пучка созданная программа не уступает возможностям программы проекта Teramobile, что подтверждает корректность избранных методов решения.

Основные результаты диссертации

1. Построена математическая модель для исследования явления филаментации при распространении импульсов фемтосекундной длительности на дальние дистанции. Разработаны эффективные алгоритмы расчета явлений филаментации в различных лазерных системах. Создан параллельный комплекс программ. Показана эффективность параллельного алгоритма. Проведено сравнение параллельных итерационных методов.
2. Рассмотрена динамика неустойчивости Беспалова-Таланова в зависимости от спектрального состава. Впервые продемонстрировано, что развитию самофокусировки предшествует перекачка энергии в длинноволновую часть спектра. Как следствие, в нелинейной стадии наблюдается неустойчивость мод, устойчивых в линейном приближении.
3. Показан ступенчатый характер развития процесса в рамках выбранной модели. При достижении пороговых значений интенсивности начинается потеря энергии на ионизацию и дефокусирующее воздействие электронной плазмы, что приводит к потере интенсивности. Когда интенсивность падает ниже порогового значения, вновь начинается самофокусировка. Проведено математическое моделирование процесса множественной филаментации для реального гауссова импульса.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. *А.Д.Балашов, А.Х.Пергамент* «Математическое моделирование процессов филаментации в средах с кубической нелинейностью» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №40, 2004
2. *А.Д.Балашов, А.Х.Пергамент* «Математическое моделирование распространения фемтосекундного импульса» Математическое моделирование, Т.18, №4, 2006
3. *А.Д.Балашов* «Математическое моделирование распространения фемтосекундных импульсов» труды международной конференции «Тихонов и современная математика», с.21, 2006
4. *А.Д.Балашов* «Решение задачи о распространении фемтосекундного импульса в атмосфере» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №30, 2006
5. *А.Д.Балашов* «Характер образования множественной филаментации фемтосекундного импульса» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №31, 2006
6. *А.Д.Балашов, А.Х.Пергамент* «Особенности распространения фемтосекундного импульса в воздухе», Квантовая электроника, Т.36, №9, с.825, 2006