

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

На правах рукописи

Цыгвинцев Илья Павлович

**Трёхмерное моделирование коротковолнового
источника излучения на основе лазерной плазмы**

05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в *ИПМ им. М. В. Келдыша РАН*.

Научный руководитель: *д. ф.-м. н., профессор Гасилов Владимир Анатольевич, заведующий отделом №13 ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.*

Официальные оппоненты: *д. т. н. Валько Виктор Васильевич, ведущий научный сотрудник 12 ЦНИИ МО РФ,*

д. ф.-м. н. Рыжков Сергей Витальевич, доцент МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Ведущая организация: *Институт спектроскопии Российской академии наук.*

Защита состоится 8 декабря 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета *Д 002.024.03* при *ИПМ им. М. В. Келдыша РАН*, расположенном по адресу: *125047, Москва, Миусская пл., д.4.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ИПМ им. М. В. Келдыша РАН* и на сайте http://keldysh.ru/council/3/D00202403/tsygvintsev_diss.pdf.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Учёный секретарь
диссертационного совета,

к. ф.-м. н.

М. А. Корнилина

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Плазма, образующаяся под воздействием лазерных импульсов, используется во многих перспективных технологиях как источник ионов и излучения, характеристики которых можно менять в широких пределах путём варьирования параметров лазерного импульса и мишени. В качестве примеров здесь можно привести непрямо обжатию мишени для инерциального термоядерного синтеза («лазерный парник»), использование для модификации свойств поверхности и в фотолитографии¹. Именно на фотолитографию и ориентирована настоящая работа, что не отменяет возможности приложений её результата и к другим задачам.

Как известно, микросхема представляет из себя совокупность электронных элементов, таких как диоды, транзисторы, конденсаторы и т.п., размещённых на полупроводниковой подложке. Развитие технологий электронной промышленности идёт в направлении увеличения плотности размещения элементов на подложке. Соответственно, ведутся разработки с целью уменьшения размеров этих элементов, причём темп миниатюризации до последнего времени описывался известным экспоненциальным законом Мура. Вот уже более 50 лет производство микросхем осуществляется посредством проекционной фотолитографии. Принцип данной технологии достаточно прост. Монокристалл кремния облучается потоком света, пропущенного через «маску», — заранее приготовленное увеличенное изображение схемы. При увеличении разрешения в таком подходе возникают определённые трудности, часть из которых (например, искажение изображения вследствие дифракции на маске) решается, а часть имеет принципиальный характер. В частности, непреодолимым оказывается дифракционный предел — принципиальное ограничение разрешающей способности, связанное с

¹ Bakshi V. EUV Sources for Lithography. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005

волновой природой света. Именно оно приводит к необходимости уменьшения длины волны.

Прогресс в этом направлении продолжается с 60-х годов XX века, когда типичным источником излучения для фотолитографии был рубиновый лазер, излучающий в красной области видимого спектра. В настоящее время решается проблема освоения литографических систем, работающих на длине волны $13.5 \pm 1\%$ нм (так называемый «экстремальный ультрафиолет», EUV). На данный момент наиболее разработанным подходом к генерации такого излучения является схема, основанная на использовании лазерной плазмы олова. Под воздействием лазера плазма нагревается до температуры ($\sim 30 - 60$ эВ), когда ионы олова с Sn^{6+} до Sn^{13+} активно излучают в линиях, лежащих в нужном диапазоне. Частота повторения лазерных импульсов, модифицирующих и испаряющих оловянные капли, находится на уровне нескольких десятков кГц, а размеры капель имеют порядок нескольких десятков мкм. Излучение плазмы собирается коллекторным зеркалом и направляется в оптическую систему. От формы мишени и параметров основного импульса зависят спектральные характеристики и размер источника, а также характеристики «мусора», то есть ионов и жидкого вещества мишени, имеющего возможность загрязнить коллекторное зеркало. Достижение эффективности данной литографической схемы является многопараметрической проблемой. В силу нелинейности и взаимосвязи определяющих процессов, для её решения необходимо иметь надёжные инструменты моделирования, в том числе и трёхмерного. Таким образом возникает необходимость в разработке достаточно гибкого и легко модифицируемого кода для проведения вычислительных экспериментов в данном круге задач радиационной газодинамики (РГД).

Цели и задачи диссертационной работы:

Основной целью настоящего диссертационного исследования являлась разработка и апробация трёхмерного РГД-кода, позволяющего проводить много-

параметрические численные исследования воздействия лазерного импульса на вещество мишени с учётом ограничений по срокам выполнения расчёта и подробности дискретизации вычислительной области. В качестве основы для разрабатываемого кода была использована трёхмерная модификация радиационного магнитогидродинамического (РМГД) кода в лагранжево-эйлеровых переменных РАЗРЯД². Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Разработана новая гибридная модель поглощения лазерной энергии в плазме и реализован соответствующий алгоритм [1].
2. Реализован алгоритм расчёта переноса излучения методом коротких характеристик, проведен анализ необходимости использования его в типичных задачах и оценка эффективности его распараллеливания [2].
3. Реализована работа кода в модели нестационарной ионизации [3].
4. Проведена модификация разностной схемы уравнений ГД, восстанавливающая её полную консервативность в трёхмерном случае.
5. Проведена адаптация кода для эффективного использования при вычислениях на гибридных кластерах (распараллеливание в рамках комбинированного MPI-OpenMP подхода, модификация работы с динамической памятью, оптимизация затрат памяти).
6. Проведено тестирование комплекса программ на ряде стандартных тестов и задач, имеющих аналитическое или автомодельное решение, на основе которого уточнены численные параметры, используемые в типовых расчётах.

² Гасилов В. А., Круковский А. Ю., Оточин А. А. Комплекс программ РАЗРЯД. Решение задач магнитной гидродинамики в r - z геометрии в двухтемпературном приближении // препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН №150 за 1990 г.

7. Проведено несколько расчётов реальных задач [4], [5], [6].

Научная новизна.

В настоящей работе описана построенная автором новая гибридная модель лазерного излучения, учитывающая рефракцию лазерного излучения в плазме, корректно описывающая поглощение излучения на скачке диэлектрической проницаемости и позволяющая проводить моделирование с «холодного старта» [1]. Несмотря на то, что отдельные элементы модели уже были описаны ранее^{3,4}, в том числе и для трёхмерной постановки⁵, а сама идея гибридного подхода была высказана ещё в 1982-м году⁶, её реализация и исследование свойств проведены впервые.

Также в работе описывается трёхмерная реализация классической полностью консервативной лагранжевой конечно-разностной схемы для уравнений РГД [6] с консервативной по массе, внутренней энергии, кинетической энергии и импульсу перестройкой сетки [7]. На её основе построен параллельный код 3DLINE, адаптированный под круг задач, связанных с моделированием лазерной плазмы. Существенно новым здесь являются как сам код, так и модификации схемы и алгоритмов, позволившие его распараллелить в рамках гибридного MPI-OpenMP подхода.

Новыми также являются некоторые результаты, полученные в рамках моделирования конкретных задач. Так, при моделировании неосесимметричного воздействия лазерного пучка на оловянную каплю, показан эффект возникнове-

³ Лебо И. Г., Тишкин В. Ф. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза. Москва: Физматлит, 2006

⁴ Povarnitsyn M. E., Andreev N. E., Levashov P. R. et al. Dynamics of thin metal foils irradiated by moderate-contrast high-intensity laser beams // *Physics of Plasmas*. 2012. Vol. 19, no. 2

⁵ Kaiser T. B. Laser ray tracing and power deposition on an unstructured three-dimensional grid // *Physical Review E*. 2000. Vol. 61, no. 1. P. 895 – 905

⁶ Афанасьев Ю. В., Гамалий Е. Г., Демченко Н. Н., Розанов В. Б. Поглощение лазерного излучения сферической мишенью с учётом рефракции и развитой гидродинамики // *Труды ФИАН / Под ред. Н. Г. Басова*. М.: Наука, 1982. Т. 134. С. 32 – 41

ния струи [6], влияющий на время жизни коллекторного зеркала. При моделировании динамической плазменной пластины впервые численно показан эффект гомогенизации пучка [8], ранее наблюдавшийся в экспериментах⁷.

Теоретическая и практическая значимость.

Изложенные в диссертации результаты могут быть использованы для создания инструмента трёхмерного моделирования воздействия лазерных импульсов умеренной мощности ($10^8 - 10^{14}$ Вт/см²) на вещество мишени, что представляет практическую значимость в проблеме разработки нового поколения фотолитографических установок.

Методология и методы исследования.

Программный комплекс 3DLINE основан на двухэтапной полностью консервативной конечно-разностной методике решения уравнений радиационной газовой динамики в смешанных лагранжево-эйлеровых переменных. Её выбор был обусловлен требованиями к производительности и устойчивости счёта. Ввиду наличия в задаче как областей со сверхзвуковыми течениями плазмы, так и областей с медленно деформирующейся жидкой фазой, потребовалось использование схемы неявной не только в части, касающейся процессов теплопроводности и лучистого переноса, но и в части расчёта газодинамики плазмы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана новая гибридная модель поглощения лазерной энергии в плазме и реализован соответствующий алгоритм.
2. Разработана трёхмерная полностью консервативная конечно-разностная схема уравнений РГД с учётом нестационарности ионизации и параллельные алгоритмы решения соответствующих систем нелинейных уравнений, реализованные в виде комплекса программ 3DLINE.

⁷ Voronich I. N., Garanin S. G., Derkach V. N. et al. Control of Laser Radiation Parameters: Spatiotemporal smoothing of a laser beam employing a dynamic plasma phase plate // Quantum Electronics. 2001. Vol. 31.

3. Проведена верификация и апробация кода на модельных и прикладных задачах. Воспроизведён в расчётах и проанализирован ряд экспериментально наблюдаемых эффектов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Основные результаты диссертации докладывались автором на следующих конференциях:

Семинар шестого отдела ИПМ РАН «Методы вычислительной физики» [9], 2012 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources [10], 2014 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources [11], XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС [12], XII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» [13], XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС [14], German-Russian conference «Supercomputing in Scientific and Industrial Problems» [15], V международная конференция «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование» [8].

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах [1], [3], [6], 4 статьи в сборниках трудов конференций [12], [13], [14], [8] и 5 препринтов ИПМ [2], [4], [5], [7], [16], причём препринт [7] входит в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для опубликования научных результатов.

Личный вклад автора.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами (см. раздел «Благодарности» диссертации), причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты

получены лично автором.

Трёхмерная модификация кода РАЗРЯД, послужившая основой для построения кода 3DLINE, была выполнена сотрудником ИПМ к. ф.-м. н. А. Ю. Круковским.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырёх глав, заключения и библиографии. Общий объём диссертации 156 страниц, из них 142 страницы текста, включая 56 рисунков, 4 блок-схемы и 5 таблиц. Библиография включает 94 наименования на 11 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В обзоре литературы обсуждается современное состояние разработок в предметной области диссертации. Проводится сопоставление физико-математических моделей и вычислительных методик, на основе которых построены двумерные коды RZLINE⁸, RALEF⁹, Z* (ZETA)¹⁰, и трёхмерные Open-

⁸ Koshelev K. N., Ivanov V. V., Novikov V. G. et al. RZLINE code modeling of distributed tin targets for laser-produced plasma sources of extreme ultraviolet radiation // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. 2012. Vol. 11, no. 2. P. 021112-1-021112-6

⁹ Basko M. M., Maruhn J. A., Tauschwitz A. Development of a 2D Radiation-Hydrodynamics Code RALEF for Laser Plasma Simulations. GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, 2010. GSI Report

¹⁰ Zakharov S. V., Zakharov V. S., Novikov V. G. et al. Plasma dynamics in a hollow cathode triggered discharge with the influence of fast electrons on ionization phenomena and EUV emission // Plasma Sources Science and Technology. 2008. Vol. 17, no. 2. P. 17 – 24

FOAM¹¹, HEIGHTS¹², HYDRA¹³. Сравнение этих программ с комплексом 3D-LINE, являющимся результатом настоящего диссертационного исследования, представлено в форме таблицы 1.

В первой главе описана физико-математическая модель процессов, протекающих в лазерной плазме. В её основу положены уравнения двухтемпературной одножидкостной газодинамики с учётом нестационарности ионизации.

В качестве уравнения состояния для ионной компоненты плазмы используется приближение идеального одноатомного газа, а для электронной — табличное уравнение состояния, рассчитанное по методике¹⁴. Влияние излучения на параметры плазмы учитывается методом интерполяции таблиц, рассчитанных в предположениях различного поля излучения¹⁵. Расчёт ионизации осуществляется либо в приближении эффективного времени релаксации для среднего заряда иона, либо в квазистационарном приближении. Рассмотрен вопрос о границах применимости приближения эффективного времени релаксации средней ионизации, показано, что при относительно малом отклонении среднего заряда иона от равновесного значения ($Z_0 - Z_0^S < 5$), это приближение адекватно описывает динамику ионизации.

Уравнение переноса теплового излучения решается в стационарной форме.

Основная часть первой главы посвящена построению гибридной модели переноса лазерного излучения, совмещающей геометрическую оптику и одно-

¹¹ Vichev I. Y., Novikov V. G., Basko M. M. et al. Modeling of target deformations due to pre-pulse with debris analysis // 2014 International Workshop on Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray Sources. Ireland, Dublin: 2014

¹² Hassanein A., Sizyuk V., Harilal S. S., Sizyuk T. Analysis, simulation, and experimental studies of YAG and CO₂ laser-produced plasma for EUV lithography sources // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7636. P. 76360A-76360A-7

¹³ Purvis M. A., Schafgans A., Brown D. J. W. et al. Advancements in predictive plasma formation modeling // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9776. P. 97760K-97760K-12

¹⁴ Никифоров А. Ф., Новиков В. Г., Уваров В. Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчёта росселандовых пробегов и уравнений состояния. Москва: Физматлит, 2000

¹⁵ Соломянная А. Д., Новиков В. Г. Спектральные характеристики плазмы, согласованные с излучением // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36, № 6. С. 858 – 864

Код	rz —геометрия	xy —геометрия	xyz —геометрия	Адаптивность сетки	Динамика испарённого вещества мишени	Уравнение состояния плазмы	Кинетика ионизации	Отражение лазера	Рефракция в плазме	Диффузионное приближение для уравнения переноса	Решение уравнения переноса методом характеристик	Непланковский источник	Параллельность кода
RZLINE	+	−	−	−	−	+	+	+	+	=	+	+	−
RALEF	+	+	−	+	+	+	−	+	+	−	+	−	+
OpenFOAM	+	+	+	+	+	−	#	#	#	#	#	#	+
Z*	+	−	?	+	+	+	?	−	−	−	±	+	−
HEIGHTS	?	?	+	−	+	+	−	±	−	−	+	−	?
HYDRA	+	+	+	+	+	+	?	+	+	+	+	+	+
3DLINE	=	+	+	+	+	+	±	+	+	+	+	+	±

Таблица 1. Сравнение кодов, применяющихся к моделированию EUV-источника. Обозначения: + — реализовано, − — не реализовано, ± — реализовано частично либо в упрощённой постановке, = — отсутствует в текущей версии кода, но было реализовано в предыдущей, # — нерелевантно для данного кода, ? — неизвестно.

мерное волновое уравнение Гельмгольца. Исследовано поведение построенной модели на различных простых модельных случаях. Показано, что она учитывает рефракцию и обеспечивает корректный выход на формулы Френеля для разрывной диэлектрической проницаемости, что позволяет проводить моделирование с «холодного старта».

Во второй главе описана дискретизация построенной физико-математической модели. Исследованы свойства полученной системы конечно-разностных уравнений газодинамики, показана её полная консервативность. Отдельно рассмотрен вопрос о методике пересчёта величин на скорректированную сетку [7], для которой в линейном приближении получено условие устойчивости. Также описаны методы расчёта переноса теплового [2] и лазерного [1] излучения в плазме. Для расчёта переноса лазерного излучения в области применимости геометрической оптики использована схема второго порядка⁵, для решения уравнения Гельмгольца — конечно-аналитическая схема⁴. Уравнение переноса излучения в многогрупповом диффузионном приближении решается методом конечных объёмов с использованием гармонического среднего для интерполяции коэффициента поглощения из ячейки на грань. Для расчёта переноса излучения без использования диффузионного приближения используется метод дискретных ординат, в котором уравнение переноса решается вдоль длинных или коротких характеристик, испущенных в соответствии с заданным набором направлений.

Также во второй главе описывается методика интерполяции таблиц с уравнениями состояния. Для большинства величин используется логарифмическая интерполяция по плотности и температуре и линейная по параметру ξ , характеризующему тип равновесия излучения с веществом.

В третьей главе построены итерационные алгоритмы решения как системы уравнений РГД в целом, так и отдельных подсистем, сохраняющие полную энергию системы с заданной точностью.

Проведено тестирование алгоритмов ГД на стандартных тестах и задачах,

имеющих аналитическое или автомодельное решение. Показано, что программа адекватно воспроизводит распространение ударной и нелинейной тепловой волны под произвольными углами к сетке. При этом в расчётах на полностью лагранжевой и фиксированной ортогональной сетке сферический характер ударной волны от точечного взрыва воспроизводился точнее, чем в расчёте с перестройкой сетки по заданному алгоритму. Сеточная неустойчивость типа «песочные часы» эффективно подавляется использованной в модели искусственной вязкостью. Вместе с тем, алгоритм адекватно воспроизводит развитие неустойчивости Релея-Тейлора вплоть до нелинейной фазы, при этом инкремент развития самой медленной моды отличается от аналитического менее чем на 8%, а самые быстрые моды (связанные с сеточными возмущениями) не развиваются.

Показан квадратичный характер сходимости используемого алгоритма расчёта поглощения лазерного излучения к точному решению.

Показано, что используемая простейшая реализация метода коротких характеристик корректно выходит на диффузионный предел лишь на сетке, не содержащей оптически толстых ячеек. Это существенно ограничивает применимость данного метода расчёта переноса излучения к практическим задачам.

Кратко описана методика распараллеливания кода в рамках гибридного подхода (MPI-OpenMP): посредством OpenMP распараллеливаются алгоритмы решения СЛАУ, полученные путём линеаризации уравнений движения, энергии и переноса излучения, процедуры обмена посредством библиотеки MPI используются для распределения вычислений на несколько вычислительных узлов с отдельной памятью. Показано семикратное ускорение кода на одном узле, содержащем 16 вычислительных ядер.

Четвёртая глава целиком посвящена приложению комплекса программ 3DLINE к практическим задачам.

На примере задачи о скользящем падении лазерного пучка на плоскую

мишень анализируется влияние метода расчёта переноса теплового излучения в плазме [2]. Сделан вывод о целесообразности использования в типовых расчётах диффузионного приближения с последующей трассировкой методом коротких или длинных характеристик для получения интегральных спектров.

Проведено моделирование центрального и нецентрального воздействия лазерного пучка на оловянную каплю [6]. Показано, что, не смотря на близость полученных интегральных коэффициентов конверсии, угловое распределение кинетической энергии плазмы во втором случае имеет ярко выраженный пик в направлении, зеркальном относительно смещения, вызванный эффектом образования струи.

Проведено моделирование динамической плазменной фазовой пластины [8], показан экспериментально наблюдаемый⁷ эффект сглаживания неоднородного импульса за счёт динамики дифракционной картины.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Основные результаты

Построена физико-математическая модель, описывающая ряд процессов, протекающих в лазерной плазме, ключевых для моделирования источника коротковолнового излучения. В её основу положена одножидкостная двухтемпературная модель квазинейтральной плазмы с нестационарной ионизацией. Для расчёта переноса лазерного излучения сформулирована «гибридная» модель, учитывающая как рефракцию, так и влияние волновых эффектов. Для расчёта переноса излучения использовано стационарное многогрупповое приближение, в рамках которого уравнение переноса решается либо методом дискретных ординат, либо с использованием диффузионного приближения.

Построена трёхмерная полностью консервативная конечно-разностная схе-

ма в произвольных лагранжево-эйлеровых переменных, обладающая вторым порядком аппроксимации на равномерных сетках.

Разработан алгоритм решения уравнений модели, сохраняющих баланс энергии с заданной точностью. Создан комплекс программ 3DLINE, осуществляющий вычисления в параллельном режиме и позволяющий проводить ширококомасштабный вычислительный эксперимент.

Проведено тестирование комплекса программ как на стандартных задачах ГД, имеющих аналитическое или автомодельное решение, так и на физических проблемах, близких к специфике предполагаемого приложения кода. Показано, что в расчёте адекватно воспроизводятся такие важные для приложений кода эффекты, как распространение ударной и тепловой волн под произвольными углами к сетке и развитие неустойчивости Релея-Тейлора.

Проведено моделирование для нескольких различных параметров импульса и мишени. Показано, что хотя наилучшее согласие с экспериментальными данными по доле лазерной энергии, конвертированной в EUV-излучение в верхнюю полусферу, достигается при решении уравнения переноса вдоль коротких характеристик на подробной спектральной сетке, оптимальным для практических расчётов является применение одnogруппового диффузионного приближения с последующей трассировкой вдоль длинных характеристик для уточнения угловой анизотропии и спектральной структуры излучения. Также в расчётах впервые показаны экспериментально наблюдаемые эффекты образования струи при воздействии смещённого симметричного пучка на сферическую мишень и гомогенизации сильно неоднородного пучка при прохождении через динамическую плазменную фазовую пластину. Последний факт может иметь приложения также и в области управляемого термоядерного синтеза.

Список публикаций

1. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Гасилов В. А. и др. Сеточно-лучевая модель и методика расчёта поглощения лазерного излучения // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 12. С. 96 – 108. URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/mm/v27/i12/p96>.
2. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. Сравнение различных методов расчёта переноса излучения для трёхмерных задач // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2014. Т. 48. URL: http://keldysh.ru/papers/2014/prep2014_48.pdf.
3. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Гасилов В. А. и др. Моделирование формирования пинча в вакуумной диоде с лазерным поджигом // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 2. С. 146 – 160. URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/mm/v28/i2/p146>.
4. Круковский А. Ю., Новиков В. Г., Цыгвинцев И. П. Программа 3DLINE: численное моделирование трёхмерных нестационарных задач радиационной газовой динамики // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2014. Т. 20. URL: http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_20.pdf.
5. Круковский А. Ю., Новиков В. Г., Цыгвинцев И. П. Программа 3DLINE: моделирование воздействия несоосного лазерного импульса на оловянную каплю // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2015. Т. 63. URL: http://keldysh.ru/papers/2015/prep2015_63.pdf.
6. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. Трёхмерное численное моделирование воздействия нецентрального лазерного импульса на сферическую оловянную мишень // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 7. С. 81 – 95.
7. Гасилов В. А., Круковский А. Ю., Повещенко Ю. А., Цыгвинцев И. П. Неявная эйлерово-лагранжева разностная схема трёхмерной газовой дина-

- мики на основе согласованных аппроксимаций уравнений балансов массы и импульса // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2016. Т. 5. URL: http://keldysh.ru/papers/2016/prep2016_05.pdf.
8. Цыгвинцев И. П. Трёхмерное моделирование динамической плазменной фазовой пластины // V международная конференция «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование». 5 – 7 апреля 2016 г. URL: <https://mpmm.xyz/frontend/programs/last.pdf>.
 9. Цыгвинцев И. П. Моделирование поглощения лазерного излучения в приближении геометрической оптики // Семинар 6 отдела ИПМ «Методы вычислительной физики». 23 октября 2012 г. URL: <http://www.keldysh.ru/seminars/seminar.xhtm?src=seminar6.xml&filter=past>.
 10. Grushin A. S., Tsygvintsev I. P., Novikov V. G., Ivanov V. V. Modeling of Absorption and Scattering of IR Laser Radiation by LPP // 2012 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources. 8 – 11 октября 2012 г. URL: <http://www.euvlitho.com/2012/S53.pdf>.
 11. Tsygvintsev I. P., Krukovskiy A. Y., Novikov V. G. 3D simulation of shifted laser pulse coupling to tin target // 2014 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources. 3 – 6 ноября 2014 г. URL: <http://www.euvlitho.com/2014/S40.pdf>.
 12. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. Трёхмерное моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом мишени // XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 10 – 14 февраля 2014 г. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLI/It/ru/EP-Tsygvintsev.docx>.
 13. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г. Трёхмерное моделирование воздействия на мишень лазерного импульса умеренной мощности // XII Международная конференция «Забабахинские научные чтения». 2 – 6 июня 2014 г. URL: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2014/TezisZNCH-2014>.

pdf.

14. Романов И. В., Паперный В. Л., Рупасов А. и др. Формирование микропинчевых структур в плазме вакуумного разряда с лазерным поджигом (эксперимент и результаты численного моделирования) // XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 9 – 12 февраля 2016 г. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIII/It/ru/ER-Romanov.docx>.
15. Tsygvintsev I. Three-dimensional code for LPP EUV source modeling // German-Russian conference «Supercomputing in Scientific and Industrial Problems». 9 – 11 марта 2016 г. URL: <http://www.kiam.ru/SSIP/program.html>.
16. Цыгвинцев И. П., Круковский А. Ю., Новиков В. Г., Попов И. В. Трёхмерное моделирование поглощения лазерного излучения в приближении геометрической оптики // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2012. Т. 41. URL: http://www.keldysh.ru/papers/2012/prep2012_41.pdf.

Научное издание

Цыгвинцев Илья Павлович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе
лазерной плазмы

Подписано в печать 25.01.2016. Формат 60 × 84 1/16. Тираж 60 экз. Заказ 256.

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН 125047, Москва, Миусская пл., 4, <http://keldysh.ru>