

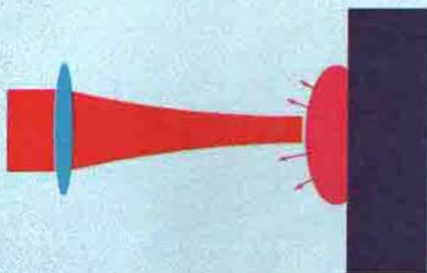
Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с веществом

Под общей редакцией

профессора Н. С. Захарова

профессора В. Д. Урлина

профессора Н. И. Шенцева



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"РФЯЦ – ВНИИЭФ"

**ТЕПЛОВЫЕ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И
ПЛАЗМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

Монография

Под общей редакцией

*профессора Н. С. Захарова
профессора В. Д. Урлина,
профессора Н. И. Шенцева,*

Саров, 2004

УДК 621.378

ББК 32.86

У 69

Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с веществом: Монография / Под общей ред. проф. Н. С. Захарова, проф. В. Д. Урлина, проф. Н. И. Шенцева. – Саратов: ФГУП "РФЯЦ – ВНИИЭФ", 2004. – 425 с. – ил.
ISBN 5-9515-0037-0.

Монография представляет собой обзор основных направлений теоретических и экспериментальных исследований по воздействию лазерного излучения на вещество. Главное внимание уделяется описанию физико-математических моделей и методов численного моделирования физических процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с материалами различного состава в области умеренных потоков излучения, при которых возникают тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты, представляющие интерес для лазерной технологии и научных исследований. Для подтверждения достоверности расчётных моделей широко привлекаются результаты экспериментов.

Монография предназначена для широкого круга специалистов, аспирантов и студентов старших курсов, занимающихся физикой высоких плотностей энергии, физикой взаимодействия мощных направленных потоков электромагнитной энергии с веществом, технологией обработки различных материалов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследования физики взаимодействия лазерного излучения с веществом были начаты практически сразу же после создания первых лазеров в 60-х годах 20-го столетия. К настоящему времени в этой области знаний накоплен значительный объем экспериментальных и теоретических результатов, имеющих важное фундаментальное и прикладное значение. Эти результаты послужили научно-методической основой широкого использования лазеров как в исследовательских целях, так и в промышленных технологиях, медицине, измерительной технике. Однако проведение дальнейших исследований в рамках данной проблемы требует применения все более сложных и дорогостоящих технических решений, что зачастую является серьезным сдерживающим фактором. Для правильного понимания новых перспективных направлений развития и применения лазерной техники необходим прежде всего тщательный анализ и обобщение обширного экспериментального и теоретического материала, накопленного за прошедшие годы.

В настоящей монографии приведены материалы исследований, выполненных в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском НИИ экспериментальной физики и Центральном физико-техническом институте. Сформулированы задачи, возникающие при изучении лазерного воздействия на различные материалы, в том числе многокомпонентные, при разных условиях и режимах облучения. Большое внимание уделено описанию физико-математических моделей и методов численного моделирования разнообразных физических процессов: тепловых, газо- и плазменно-динамических, механических, ударно-волновых, электромагнитных. Для подтверждения достоверности расчетных моделей используются результаты экспериментов. Многие материалы исследований ранее не были опубликованы и могут представлять значительный интерес для специалистов в области лазерных технологий. Например, данные по воздействию лазерного излучения в условиях сверхзвукового обтекания, лазерному горению и инициированию химически активных сред, облучению материалов ультракороткими импульсами. Необходимость и своевременность монографии обусловлена еще и тем, что в настоящее время новое поколение исследователей, проявляя заметный интерес к проблеме лазерного взаимодействия с веществом, нередко повторяет уже сделанное предшественниками.

Авторы монографии, известные ученые профессора Н. С. Захаров, В. Д. Урлин, Н. И. Шенцев и их сотрудники, являются авторами многочисленных оригинальных работ по исследованию взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Монография состоит из восьми глав, охватывающих широкий круг вопросов по данной тематике.

В **первой** главе представлено описание общей физической картины процессов взаимодействия лазерного излучения с конденсированными средами, приводятся терминологические определения, используемые в последующих главах.

Вторая глава посвящена методикам численного моделирования испарительных и газодинамических процессов, развивающихся под действием лазерного излучения широкого диапазона интенсивностей на непрозрачные материалы.

Особенности нагрева и терморазрушения неоднородных полимерных материалов под действием непрерывного и квазинепрерывного лазерного излучения изучаются в **третьей** главе.

В **четвертой** главе исследуются эффекты теплового и газодинамического воздействия паров и плазменного факела на сверхзвуковой воздушный поток, обтекающий облучаемую мишень.

Пятая глава посвящена процессам генерации токов и электромагнитных полей в лазерной плазме, изучению их пространственно-временной структуры.

В **шестой** главе излагаются физико-математические модели взаимодействия нано- и фемтосекундных лазерных импульсов с непрозрачными конденсированными средами.

Особенности взаимодействия лазерного излучения с оптическими материалами рассматриваются в **седьмой** главе.

В **восьмой** главе представлены результаты расчетно-теоретического исследования лазерного зажигания и горения химически активных конденсированных сред.

Основное содержание монографии составляют результаты исследований, выполненных российскими учеными. Вне поля зрения авторов остался ряд зарубежных публикаций. Библиография для удобства восприятия помещена в конце каждой главы.

Работа по написанию монографии выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (проект № 1299-00).

Обозначения физических величин

$\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·с = $0,658 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – постоянная Планка;

$k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

$N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль – число Авогадро;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света;

$m_e = 0,911 \cdot 10^{-27}$ г – масса электрона;

λ – длина волны света, 1 эВ \Rightarrow 1,24 мкм;

$\nu = \lambda/c = \omega/2\pi$ – частота света;

$$B_V = 2 \left(\frac{m_e k}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} = 6 \cdot 10^{21} \text{ в см}^{-3} \cdot \text{эВ}^{-3/2};$$

$$V_Q = \left(\frac{2\pi \hbar^2}{MkT} \right)^{3/2} \text{ – квантовый объем частицы с массой } M;$$

$V_Q = 10^{-24} \text{ см}^{-3}$ – квантовый объем атома водорода при $T = 300$ К;

A – атомный вес в г/моль;

N – концентрация в $1/\text{см}^3$;

W – энергия падающего излучения в Дж/см²;

$q = N\hbar\omega c = Nh\nu c$ – интенсивность излучения в Вт/см²;

τ – длительность облучения;

P – давление в Па, 1 Па = $10 \text{ дин}/\text{см}^2 = 10^{-5}$ бар;

E – энергия в Дж/г, 1 эВ \Rightarrow $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж;

ρ – плотность в г/см³;

T – температура, 1 эВ \Rightarrow 11605 К;

t – время;

r – коэффициент отражения.

Основные сокращения

ЛИ – лазерное излучение;

УВ – ударная волна;

ВВ – взрывчатое вещество.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Обозначения физических величин	5
Основные сокращения	5
<i>Н. С. Захаров, В. Д. Урлин, Н. И. Шенцев.</i> Глава 1. Физическая картина взаимодействия ЛИ с конденсированными средами . . .	6
1.1. Общие понятия	6
1.1.1. Передача энергии и импульса от фотонов к электронам при падении света на вещество	11
1.1.2. Уравнение состояния газовой плазмы	12
1.1.3. Уравнение состояния конденсированного вещества	15
1.1.4. Понятие о зонной структуре конденсированного вещества	17
1.1.5. Оптические свойства конденсированных диэлектриков и металлов	18
1.1.6. Обмен энергией между электронами и ионами	20
1.1.7. Обмен энергией между электронами и решеткой	25
1.1.8. Температура электронов и решетки в металле	27
1.1.9. Явление пробоя (бурной ионизации) газов под действием ЛИ. Электронная лавина	29
1.1.10. Черное излучение	30
1.2. Свойства лазеров, характерные для действия ЛИ на вещество	31
1.2.1. Интенсивность, направленность, монохроматичность, когерентность	32
1.2.2. Временной ход излучения лазеров	35
1.2.3. Модовые свойства лазеров	37
1.2.4. Пространственное распределение лазерного излучения	38
1.2.5. Особенности фокусировки лазерного излучения	40
1.3. Эффекты, вызываемые поглощением лазерного излучения на поверхности непрозрачного материала	45
1.3.1. Нагрев в отсутствие фазового перехода	46
1.3.2. Профили температуры при нагреве лазерным импульсом типичной формы	49
1.3.3. Нагрев излучением лазеров непрерывного действия	55

1.3.4. Плавление под действием излучения лазера	56
1.3.5. Изменение оптических характеристик материалов под действием мощного ЛИ	62
1.4. Образование ударных волн	63
1.5. Испарение под действием лазерного излучения	66
1.5.1. Испарение под действием миллисекундных лазерных импульсов	67
1.5.2. Испарение импульсами лазера с модулированной добротностью	72
1.6. Образование плазмы. Основные явления	74
1.7. Газодинамика разлета в газовую среду облака плазмы, возникающей на поверхности мишени при лазерном воздействии	77
1.7.1. Световая детонация	80
1.7.2. Звуковой радиационный фронт с волной разрежения	81
1.7.3. Дозвуковой радиационный фронт	82
1.7.4. Взаимодействие ЛИ с мишенью в условиях сильно разреженной атмосферы	83
1.8. Методы диагностики плазмы, образованной действием мощного ЛИ	85
1.8.1. Фотографические методы	85
1.8.2. Интерферометрические методы	86
1.8.3. Спектроскопические исследования	87
1.8.4. Рентгеновское излучение	88
1.8.5. Импульсы давления	89
Список литературы к главе 1	89
<i>О. М. Величко, Н. С. Захаров, В. Д. Урлин, Б. П. Якутов.</i>	
Глава 2. Газодинамические эффекты и методы расчета взаимодействия лазерного излучения с веществом	91
2.1. Физико-математическая модель поверхностного испарения . .	91
2.1.1. Метод численного расчета	98
2.1.2. Численное изучение структуры и динамики разлета паров . .	102
2.1.2.1. Структура течения вещества в факеле	103
2.1.2.2. Импульс отдачи паров	106
2.1.2.3. Унос массы вещества	111
2.2. Динамика поглощающей лазерной плазмы	115
2.2.1. Физико-математическая модель воздействия в плазменных режимах	116

2.2.1.1. Качественное рассмотрение процессов в режимах с плазмообразованием	116
2.2.1.2. Постановка задачи и метод решения	121
2.2.2. Численное исследование течений лазерной плазмы в воздухе различной плотности	125
2.2.2.1. Структура и динамика лазерной плазмы	126
2.2.2.2. Газодинамическое давление на мишени	134
2.3. Численное моделирование пространственных нестационарных газодинамических течений	139
2.3.1. Общая характеристика пакета программ ВЕРА для численного моделирования пространственных нестационарных газодинамических течений	140
2.3.2. Трехмерные нестационарные задачи взаимодействия струи газа, вдуваемого с поверхности тела, с потоком воздуха, обтекающего это тело	142
2.3.2.1. Постановка задачи	142
2.3.2.2. Метод расчета	145
2.3.3. Метод расчета пространственного обтекания тел неоднородным сверхзвуковым потоком	146
2.3.3.1. Постановка задачи	147
2.3.3.2. Метод расчета	148
2.4. Численное моделирование воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердотельную мишень	150
2.4.1. Модуль гидродинамики	151
2.4.2. Модуль кинетики	153
2.4.3. Модуль расчета поглощения ЛИ	154
2.4.4. Модуль расчета рентгеновского излучения	155
2.4.5. Модуль уравнений состояния	155
2.4.6. Реализация полного расчета лазерного воздействия	156
Список литературы к главе 2	157
Н. С. Захаров, Н. И. Шенцев. Глава 3. Нагрев и разрушение неоднородных материалов под действием лазерного излучения	164
3.1. Теоретическая модель лазерного нагрева и разрушения полимеров	164
3.1.1. Физико-химические процессы при лазерном облучении полимерных материалов	164
3.1.1.1. Поглощение лазерного излучения	165
3.1.1.2. Пиролиз связующего	167

3.1.1.3. Механизмы разрушения поверхности	168
3.1.2. Постановка задачи и основные уравнения	170
3.1.3. Методика численного решения	177
3.2. Исследование процессов взаимодействия лазерного излучения с полимерными материалами	180
3.2.1. Воздействие непрерывного излучения	180
3.2.1.1. Нагрев материала	180
3.2.1.2. Прококсовка и линейный унос поверхности	183
3.2.1.3. Баланс энергии	192
3.2.1.4. Унос массы вещества	197
3.2.2. Воздействие частотно-импульсного излучения	200
3.2.2.1. Особенности расчета частотно-импульсного облучения . .	200
3.2.2.2. Примеры численных расчетов	201
Список литературы к главе 3	204
<i>О. М. Величко, В. Д. Урлин, Б. П. Якутов.</i> Глава 4. Особенности воздействия плазменного нагрева на сверхзвуковой газовый поток	206
4.1. Физическая картина течения при вдуве газа с поверхности тела в сверхзвуковой поток	207
4.2. Оценка параметров течения в области взаимодействия поток вдуваемого газа и воздуха на основе законов сохранения	208
4.2.1. Схема течения	209
4.2.2. Основные уравнения	209
4.2.3. Значение давления на участке вдува	210
4.2.4. Коэффициент увеличения давления при вдуве газа в сверхзвуковой поток	211
4.3. Численное моделирование течения, вызванного вдувом газа с участка поверхности тела в сверхзвуковой поток	212
4.3.1. Постановка задачи в двух- и трехмерной геометрии	212
4.3.2. Методика трехмерных расчетов	213
4.4. Результаты численного исследования пространственного течения с сильным распределенным вдувом. Пример конкретного расчета	215
4.4.1. Геометрия задачи	215
4.4.2. Особенности вдува	215
4.4.3. Уравнение состояния	216
4.4.4. Квазистационарность взаимодействия	216
4.4.5. Картина пространственного течения	216

4.4.6. Профили давления на участке вдува	220
4.5. Расчетная модель взаимодействия тела с неоднородным сверхзвуковым потоком	223
4.5.1. Постановка задачи	223
4.5.2. Граничные и начальные условия	224
4.5.3. Метод расчета	225
4.6. Нестационарная пространственная картина течения при взаимодействии неоднородного воздушного потока с обтекаемым телом	226
4.6.1. Деформация поверхности головной ударной волны	226
4.6.2. Изменение параметров течения в ударном слое и на поверхности тела	229
4.7. Аэродинамические силы, возникающие при взаимодействии тела с неоднородными областями в атмосфере. Аэродинамические коэффициенты	233
4.7.1. Взаимодействие с разреженным полупространством	234
4.7.2. Взаимодействие с продольным разреженным каналом	235
4.7.3. Взаимодействие с поперечным разреженным каналом	236
Список литературы к главе 4	236
<i>Н. В. Бугров, Н. С. Захаров.</i> Глава 5. Генерация токов и электромагнитных полей в лазерной плазме	239
5.1. Физические механизмы генерации токов и электромагнитных полей в лазерной плазме	239
5.2. Магнитные поля при воздействии микросекундных лазерных импульсов	245
5.2.1. Расчет электромагнитных полей в лазерной плазме	245
5.2.1.1. Постановка задачи	245
5.2.1.2. Метод решения	248
5.2.2. Примеры расчетов, сравнение с экспериментами	249
5.3. Магнитные поля при воздействии наносекундных лазерных импульсов	253
5.3.1. Особенности генерации и расчета магнитных полей при наносекундном лазерном воздействии	253
5.3.2. Пространственно-временная структура магнитных полей в плазменном факеле	264
5.3.3. Амплитудные характеристики магнитных полей лазерной плазмы при различных условиях воздействия	272
5.3.4. Магнитное поле вне плазменного факела	278
Список литературы к главе 5	287

<i>Н. В. Бугров, О. М. Величко, Н. С. Захаров, В. Д. Урлин, Б. П. Якутов.</i> Глава 6. Воздействие суперкоротких лазерных импульсов на вещество	291
6.1. Физико-математическая модель взаимодействия наносекундных лазерных импульсов с конденсированными средами	291
6.2. Особенности образования и развития плазменного факела над поверхностью мишени	296
6.3. Особенности формирования лазерных ударных волн в конденсированных средах. Откольные разрушения мишеней . . .	303
6.4. Приповерхностная плазма твердотельной плотности, создаваемая лазерным импульсом фемтосекундной длительности	313
6.4.1. Расчетно-теоретическая модель взаимодействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности с твердотельной мишенью	314
6.4.2. Модель поглощения <i>P</i> - и <i>S</i> -поляризованного ультракороткого импульса плотной плазмой	317
6.4.3. Рентгеновское излучение приповерхностной фемтосекундной плазмы	320
6.4.4. Характерные параметры и свойства фемтосекундной лазерной плазмы	322
6.4.5. Взаимодействие <i>P</i> - и <i>S</i> -поляризованного излучения с неоднородной плазмой	326
6.4.6. Отражение лазерных импульсов фемтосекундной длительности приповерхностной плазмой	329
6.4.7. Генерация пикосекундных рентгеновских импульсов ФЛП	332
Выводы	334
Список литературы к главе 6	334
<i>А. В. Никонов, И. П. Суханов, Н. И. Шенцев.</i> Глава 7. Действие лазерного излучения на оптические материалы	337
7.1. Физическая модель взаимодействия лазерного излучения с оптическими материалами	337
7.1.1. Типы оптических материалов	338
7.1.2. Физические процессы взаимодействия ЛИ с оптическими материалами	340
7.1.2.1. Факторы, влияющие на характер повреждений оптических материалов при лазерном воздействии	341

7.1.2.2. Механизмы разрушения оптических материалов лазерным излучением	348
7.2. Тепловое действие лазерного излучения на оптические материалы	349
7.2.1. Методы расчета температурных полей	350
7.2.2. Оценка эффекта "оплавления" поверхности оптического материала	356
7.2.3. Расчет температурных напряжений в оптических материалах в процессе и после воздействия лазерного излучения	359
7.3. Воздействие лазерного излучения на оптические материалы в режимах с образованием плазмы	371
7.3.1. Фокусировка излучения на лицевой поверхности стеклянной пластины	376
7.3.2. Фокусировка излучения на тыльной поверхности и в объеме стеклянной пластины	378
7.3.3. Пороги пробоя для некоторых оптических материалов ...	382
Список литературы к главе 7	383
Н. С. Захаров. Глава 8. Горение и инициирование химически активных сред под действием лазерного излучения	385
8.1. Теоретическая модель лазерного зажигания и горения химически активных конденсированных сред	385
8.1.1. Физико-химические процессы при лазерном инициировании химически активных веществ и кинетика их горения	385
8.1.2. Постановка задачи и основные уравнения	391
8.1.3. Метод численного решения	395
8.1.4. Примеры расчетов. Сравнение с литературными данными	399
8.2. Численное исследование процессов лазерного горения химически активных сред	404
8.2.1. Воздействие непрерывного лазерного излучения	405
8.2.1.1. Профили температур и концентраций продуктов горения	405
8.2.1.2. Скорость лазерного горения	407
8.2.1.3. Влияние оптико-физических характеристик на процессы зажигания и горения	411
8.2.2. Воздействие импульсно-периодического излучения	414
Список литературы к главе 8	416

Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с веществом

Монография

Под общей редакцией

Николая Семеновича Захарова

Виталия Дмитриевича Урлина

Николая Ивановича Шенцева

Редактор *В. М. Тагирова*

Корректор *М. В. Кривова*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. Н. Фролова*

Подписано в печать 22.06.04 Формат 60х84/16 Печать офсетная

Уч. изд. л. ~24 Усл. печ. л. ~ 25 Тираж 700 экз.

Зак. тип. 2186-2003 ПД № 00568 от 22.05.2000

Отпечатано в ИПК ФГУП "РФЯЦ – ВНИИЭФ"

607190, г. Саров Нижегородской обл.