

На правах рукописи



МКРТЫЧЕВ ОЛЕГ ВИТАЛЬЕВИЧ

**ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ СТЕКЛЯННЫХ ОБРАЗЦОВ
С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону

2017

Работа выполнена на кафедре общенаучных дисциплин в Новороссийском политехническом институте (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кубанский государственный технологический университет" (КубГТУ).

Научный руководитель: Шеманин Валерий Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Копытов Геннадий Филиппович,
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Кубанский государственный университет»,
заведующий кафедрой радиофизики и
нанотехнологий физико-технического факультета.

Вальшин Алыс Мустафович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Башкирский государственный университет", доцент
кафедры инфокоммуникационных технологий и
нанозлектроники физико-технического института.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский Томский
государственный университет".

Защита диссертации состоится 17 марта 2017 г. в 14⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 5, физический факультет, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю. А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 21 Ж и на сайте: <http://hub.sfedu.ru/diss/>

Автореферат разослан: 17 января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.208.10
доктор физико-математических наук,
профессор

Г. Ф. Заргано

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Лазерная абляция широко используется в различных областях науки и техники: оптике и медицине, в космических и IT-технологиях, в нанотехнологиях и микроэлектронике. Основные результаты, достигнутые на сегодняшний день различными авторами, опубликованы в ряде работ и энциклопедических изданиях. Однако многие проблемы, связанные с описанием лазерной абляции, остаются нерешёнными до сих пор. Исследование явлений, связанных с абляцией, имеет также большое значение для правильного понимания и объяснения явлений горения и взрыва, имеющих место при лазерном разрушении материала. Поэтому важной задачей остаётся теоретическое и экспериментальное исследование физико-химических превращений вещества мишени и окружающей её среды, а также динамики и состава разлетающегося плазменного факела при лазерном абляционном разрушении. Таким образом, разработка новых научных методов исследования оптических и геометрических параметров вещества мишени (таких как показатель преломления, толщина покрытия) и плазменного факела при лазерном абляционном разрушении вещества и создание оборудования для инструментального измерения этих параметров является **актуальной задачей**.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей процесса лазерной абляции стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями под действием мощного импульсного лазерного излучения и прогнозирования их свойств в экстремальных условиях на основе статистических закономерностей процесса лазерной абляции.

Для достижения этой цели решались следующие научные задачи:

1. Теоретические исследования взаимодействия лазерного излучения с наноразмерными покрытиями;
2. Создание стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями, которые представляли собой листовое флоат-стекло с нанесёнными на них

методом золь-гель технологии оксидным однослойным покрытием SiO_2 , TiO_2 и двухслойными покрытиями $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$;

3. Создание экспериментальной установки для экспериментальных исследований процесса лазерного разрушения стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями;

4. Экспериментальные измерения параметров процесса лазерного разрушения и обработка результатов измерений;

5. Компьютерное моделирование параметров процесса лазерной абляции в рамках тепловой модели;

6. Прогнозирование оптической прочности стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями под действием лазерного излучения на длине волны 1,064 мкм.

Научная новизна диссертации определяется поставленными задачами и методами, в том числе, впервые разработанными, и впервые полученными результатами работы.

1. Разработан теоретический способ определения оптических и геометрических параметров наноразмерных покрытий на основе решения системы рекуррентных уравнений.

2. Экспериментально подтверждена возможность бесконтактного определения этих параметров спектрофотометрическими методами.

3. Разработан экспериментальный образец установки для измерения параметров процесса лазерного абляционного разрушения стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями, отличающийся надёжностью работы, простотой калибровки и обеспечивающий относительную погрешность измерений пороговой плотности энергии пробоя порядка 8%.

4. Теоретически исследована динамика процесса лазерного абляционного разрушения стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями и распространение энергии в плоскопараллельных слоях.

5. Рассмотрена тепловая модель процесса лазерной абляции и с помощью метода моментов проведено компьютерное моделирование динамики процесса.

6. Теоретически и экспериментально подтверждена возможность применения статистических закономерностей при рассмотрении процесса лазерного абляционного разрушения и разработана методика определения параметров статистического распределения Вейбулла–Гнеденко для описания этого процесса по результатам экспериментов.

Научная и практическая значимость. Научная значимость работы заключается в разработанной автором методике определения параметров статистического распределения Вейбулла–Гнеденко по зависимости вероятности пробоя при лазерном абляционном разрушении от различных управляющих параметров (физико-химические характеристики излучения и вещества мишени). Это, при дополнительных модельных допущениях, позволяет определять оптическую прочность вещества мишени, не снижая точности вычислений. При заданной точности вычислений данная методика позволяет определять искомые параметры с использованием относительно небольшой статистической выборки исследуемых образцов.

Практическая значимость работы заключена в разработке методики определения пороговых характеристик процесса лазерной абляции стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями, которая позволяет получить ещё один способ бесконтактного исследования геометрических и оптических параметров облучаемого материала.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается их непротиворечивостью с фундаментальными положениями физики и химии, адекватностью используемых физических моделей и строгостью математических методов, корректностью используемых приближений, воспроизводимостью расчётных и экспериментальных данных, качественным

согласием с данными натуральных экспериментов, а также их соответствием результатам, полученным другими авторами [5-7, 11].

Методологическая, теоретическая и экспериментальная база.

Основными методами исследования являлись: 1) экспериментальные измерения электрических, оптических, геометрических и термодинамических характеристик наноразмерных покрытий; 2) методы математического моделирования рассматриваемых процессов; 3) сравнение результатов, полученных в экспериментах с использованием разных выборок стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями; 4) анализ теоретических и экспериментальных результатов, уточнение и проверка модели и усовершенствование экспериментальной установки; 5) сопоставление результатов моделирования и экспериментов с результатами других авторов.

Теоретическая база включает классические законы распространения и поглощения оптического излучения, законы взаимодействия излучения и вещества, уравнения лазерной физики и термодинамики, законы математической статистики и теории вероятности.

Эмпирическая база включает собственный экспериментальный материал и опубликованные результаты других авторов [5, 6, 7, 11].

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. В рамках геометрической лучевой модели взаимодействия монохроматической поляризованной волны с линейными изотропными средами без пространственной дисперсии предложен алгоритм вычисления геометрических и оптических характеристик образцов, результаты применения которого хорошо соотносятся с результатами экспериментов.

2. На разработанной автором экспериментальной установке с длиной волны лазерного излучения 1,064 мкм были получены закономерности динамики процесса лазерного абляционного разрушения стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями, а также зависимости пороговых характеристик облучения от оптических и геометрических параметров образцов.

3. В рамках тепловой модели процесса лазерной абляции материалов выполнено численное моделирование разрушения исследуемых образцов, причём применение метода моментов позволило свести неоднородное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка к системе линейных дифференциальных уравнений первого порядка.

4. На основе статистики Вейбулла–Гнеденко предложена процедура для прогнозирования динамики оптической прочности стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями.

Личный вклад автора. Разработан и изготовлен ряд устройств для проведения экспериментов и изготовлена экспериментальная установка. Получены новые данные о пороговых характеристиках процесса лазерного абляционного разрушения стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями. Проведены новые теоретические и экспериментальные исследования для усовершенствования имеющихся способов измерения оптических характеристик материалов. Развита новые методы исследования оптических характеристик материалов.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

– XIX, XX, XXI, международных научных конференциях "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии", Абрау-Дюрсо, 2011, 2012, 2013 г.

– XXII, XXIII международных научных конференциях "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте", Новороссийск, 2014, 2015 г.

– IV, V международных научно-практических конференциях "Актуальные проблемы радиофизики. АПР" (НИУ ТГУ, радиофизический факультет), Томск, 2012, 2013 г.

– XIII международной конференции "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы" и всероссийской школе "Физические

основы наноэлектроники, нанотехнологий и микросистем", Абрау-Дюрсо, 2011 г.

– XIV, XVI международных конференциях "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», Ульяновск, 2012, 2013 г.

– XXI, XXII, XXIII международных научных конференциях "Лазеры. Измерения. Информация" (СПбГПУ), Санкт-Петербурге, 2012, 2013, 2014 г.

– XXVIII, XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, 2013, 2015.

– XXVII, XXIX, XXXI International Conference on Equation of State for Matter, Elbrus, 2012, 2014, 2016.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 33 работы. Из них 3 статьи [A1, A2, A6] опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, рекомендованных для публикации материалов кандидатских диссертаций и 30 статей в журналах, в сборниках трудов и тезисов научных конференций и школ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной источников. Объём диссертации составляет 142 страницы машинописного текста, в том числе 14 таблиц и 33 рисунка. Список источников содержит 136 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования свойств лазерного абляционного разрушения материалов, определена цель диссертационной работы и задачи, которые решались для достижения поставленной цели, исходные параметры, подлежащие исследованию и анализу, кратко изложено содержание диссертации и приведены выносимые на защиту основные результаты и положения. **В главе 1** представлен обзор литературы по теме лазерного абляционного разрушения вещества. Приведён краткий обзор явлений, связанных с абляцией, и, сложившаяся на данный момент, картина физического механизма лазерной абляции. Рассмотрены результаты измерений оптических и спектральных характеристик различных материалов в работах ряда авторов,

влияние на процесс лазерного абляционного разрушения химического состава образцов и параметров излучения лазера. Приведены экспериментальные измерения динамики разлёта абляционного плазменного факела и зависимости лазерной абляции от оптических характеристик композитов.

Физический механизм разрушения поверхности импульсным лазерным излучением состоит из ряда этапов. При этом оптические и спектральные характеристики веществ на уровне наноструктур (группы атомов или молекул порядка сотен и тысяч частиц вещества) обнаруживают аномальные свойства, связанные с принципиальными изменениями во взаимодействии излучения с наноразмерными структурами. Эксперименты показывают, что процессы, происходящие при лазерной абляции (динамика разрушения, форма образующегося кратера, размеры каналов пробоя и области разрушения, а также размер, форма и динамика парогазового облака, термохимические окислительно-восстановительные процессы, развивающиеся в паровой фазе), существенно зависят от основных физических характеристик анализируемых твёрдых образцов – коэффициента поглощения и отражения излучения, температуры плавления, теплопроводности, кристаллической структуры и её дефектов, пористости, пороговых значений абляции. В данной работе предложен метод определения оптических и геометрических параметров покрытия, являющихся характеристическими константами, а для прогнозирования оптической прочности стеклянных наноразмерных покрытий использована статистика Вейбулла–Гнеденко.

В главе 2 рассмотрено создание образцов для облучения и определение их элементного состава с помощью рентгено-фазового анализа на аналитическом рентген-дифрактометре ARL X TRA и рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL9900 Intellipower Workstation. Результаты моделирования фазового состава сведены в таблицы. Также описаны результаты измерения, основанные на технике спектроскопической эллипсометрии, проведённые на эллипсометре HORIBA Jobin Yvon с программным обеспечением DeltaPsi2. При этом измеренные данные, с помощью той или иной модели, которые выбирались

экспериментаторами из условий наилучшего совпадения экспериментальных и смоделированных значений, стали входными параметрами программ эллипсометра. Рассмотрены математические соотношения для нескольких моделей. Для экспериментального исследования процесса лазерного абляционного разрушения композитов были изготовлены образцы для исследований в виде стеклянной подложки, на которую была нанесена наноразмерная плёнка на основе оксидов кремния и титана, и были определены значения фаз основных оксидов и чистых элементов, содержащихся в образцах, а также показатели преломления и толщины нанесённых на стекло покрытий. В таблице 1 представлены результаты измерений значений показателя преломления и толщины плёнок на эллипсометре HORIBA Jobin Yvon.

Таблица 1 – Значения показателей преломления и толщин плёнок для образцов по результатам измерений на эллипсометре HORIBA Jobin Yvon.

Состав плёнки	SiO ₂				TiO ₂				
	<i>n</i>	1,47	1,46	1,46	1,47	1,97	1,97	1,97	1,99
<i>d</i> , нм	58	141	117	171	130	243	207	230	266

Для экспериментального исследования была построена установка (рис.1) с лазером на алюмоиттриевом гранате с неодимом, генерирующим импульсы на длине волны 1,064 мкм, проведена юстировка установки, калибровка и разработан алгоритм экспериментального исследования. На этой установке был экспериментально исследован процесс лазерного абляционного разрушения композитов и измерены значения пороговой плотности энергии лазерного излучения, при которых начинается пробой на поверхности образца с учётом размерных эффектов. Пороговые плотности энергии F_t были получены из этих зависимостей для условия равенства вероятности пробоя $p = 0,5$ и результаты экспериментов показаны в таблице 2 (для импульса лазерного излучения длительностью 300 мкс пороговая плотность обозначена $F_{t,m}$ и для длительности 20 нс – $F_{t,n}$). Была изучена взаимосвязь между значениями пороговой плотности лазерного разрушения и характеристиками образца.

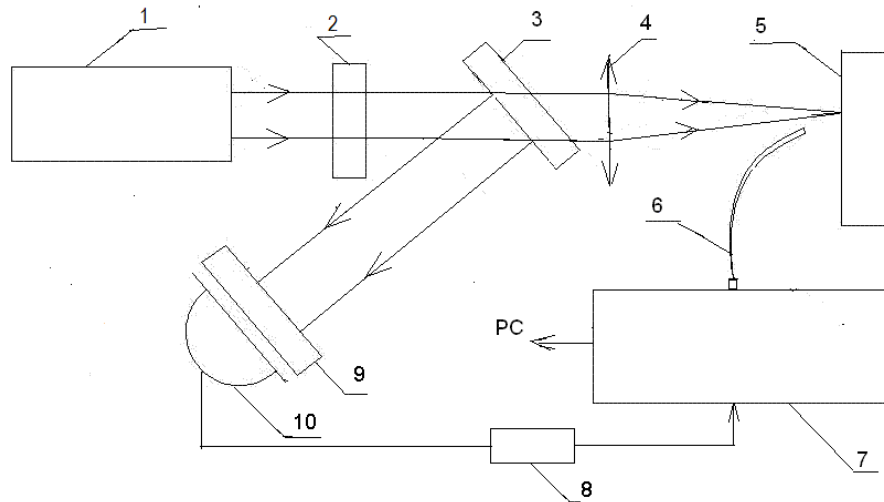


Рисунок 1 – Лабораторная лазерная абляционная станция: 1 – лазер, 2 – нейтральный светофильтр НС для изменения энергии излучения, 3 – стеклянная пластина, 4 – фокусирующий объектив, 5 – образец, 6 – световод, 7 – микроспектрометр FSD-8, 8 – управляемая ПК линия задержки, 9 – светофильтр ИКС-1 и 10 – фотодиод.

Таблица 2 – Значения пороговых плотностей F_t энергии лазерного разрушения для образцов.

Состав плёнки	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂
$F_{t,m}$, Дж·см ⁻²	116,27	116,27	132,11	128,54	153,15	152,02
$F_{t,n}$, Дж·см ⁻²	26,20	26,20	20,23	19,87	26,20	26,20

Состав плёнки	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	SiO ₂	SiO ₂ (2)	SiO ₂ (2)
$F_{t,m}$, Дж·см ⁻²	152,59	152,59	152,02	133,66	141,86	121,39
$F_{t,n}$, Дж·см ⁻²	20,65	26,20	26,10	19,34	31,65	20,65

Состав плёнки	SiO ₂ (3)	SiO ₂ (3)	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	SiO ₂ +TiO ₂
$F_{t,m}$, Дж·см ⁻²	152,58	142,35	116,27	147,95	116,27	116,27	119,85
$F_{t,n}$, Дж·см ⁻²	20,65	26,20	18,78	27,01	18,55	18,99	27,01

Состав плёнки	SiO ₂ +TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂
$F_{t,m}$, Дж·см ⁻²	123,42	116,27	121,39	121,39	116,27	116,27	119,86
$F_{t,n}$, Дж·см ⁻²	26,20	20,01	20,15	20,21	18,88	19,01	19,99

Одна из этих зависимостей – между значениями пороговой плотности процесса лазерного разрушения и пропусканием образца, которая была аппроксимирована полиномом второй степени – показана на рисунке 2.

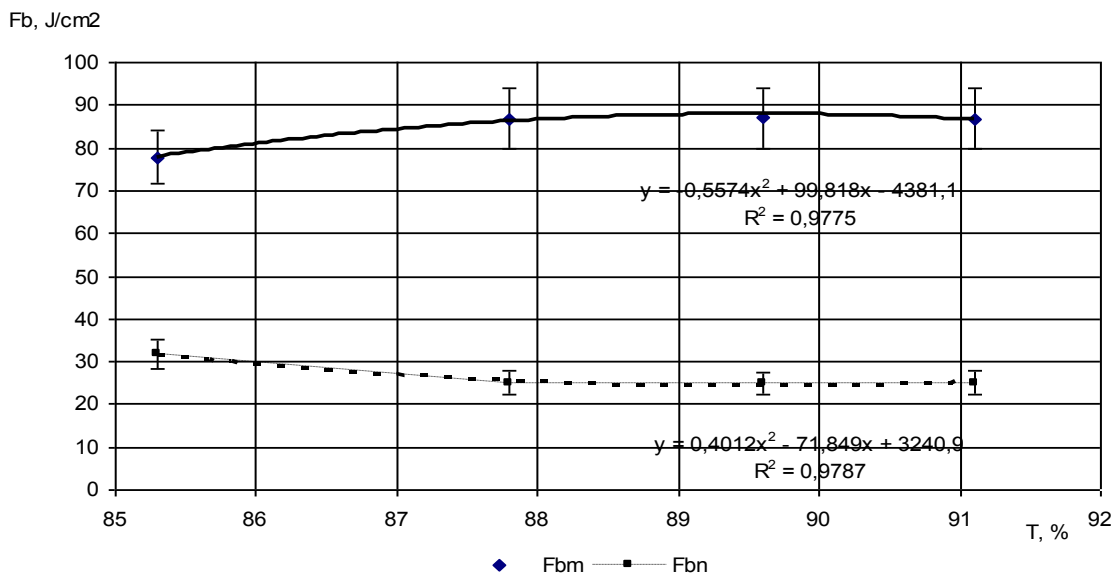


Рисунок 2 – Зависимость пороговой плотности энергии F_t лазерного разрушения от пропускания образца T для импульса длительностью 300 мкс (F_{bm} – \blacklozenge) и 30 нс (F_{bn} – \blacksquare) для плёнок TiO_2 . Уравнение полиномиальной аппроксимации и значение достоверности аппроксимации R^2 записано рядом с графиком.

Таким образом, для всех образцов были получены зависимости вероятности пробоя от плотности энергии лазерного импульса.

В главе 3 кратко рассмотрены результаты моделирования динамики лазерного разрушения вещества при облучении его короткими лазерными импульсами, проведённые рядом авторов. При этом подчёркнуто, что описание всей совокупности процессов лазерной абляции – поглощение излучения, электронный перенос, электрон-фононная релаксация, разлёт вещества, фазовые переходы, гидродинамическое движение – в рамках единой гибридной модели сильно затрудняет оценку реальной точности расчёта и резко увеличивает объём вычислений.

Рассмотрение в рамках геометрической оптики взаимодействия светового луча с системой плоскопараллельных сред (в виде распространения монохроматической поляризованной волны в линейных изотропных средах без пространственной дисперсии с идеальными границами раздела между ними) позволило по интегральным энергетическим характеристикам с помощью системы алгебраических уравнений найти оптические и геометрические характеристики каждой среды.

В виду трудностей, возникающих при построении моделей, которые описывают всю совокупность процессов лазерной абляции, автор рассмотрел однотемпературную тепловую модель разрушения наноразмерного покрытия. Для определения температурного поля численно решено одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial H}{\partial t} = v \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial I}{\partial z}$$

где $H(T)$ – удельная энтальпия твёрдого тела,

t – время развития лазерного абляционного разрушения,

$v(t)$ – скорость движения плоского фронта лазерной абляции вдоль оси z ,

$\kappa(T)$ – его коэффициент теплопроводности,

T – температура в данной точке образца,

I – интенсивность поглощённого твёрдым телом лазерного излучения.

При этом применён метод моментов, который свёл нелинейную задачу для дифференциальных уравнений в частных производных к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{T}_s = f_1(T_s, l, h, v) \\ \dot{l} = f_2(T_s, l, h, v) \\ \dot{h} = f_3(T_s, l, h, v) \\ \dot{v} = f_4(T_s, l, h, v) \end{cases}$$

где $T_s = T(z = 0, t)$ – температура поверхности,

$l(t)$ – пространственный масштаб распределения энтальпии (глубина прогрева или характерная тепловая длина),

$h(t)$ – толщина слоя удалённого вещества,

$v = \frac{dh}{dt}$ – скорость изменения толщины удалённого слоя, то есть

скорость движения плоского фронта лазерной абляции, что позволило быстро получить решение, достоверность которого подтверждается совпадением значений температуры с результатами, полученными другими авторами и другими методами. Результат одного из вычислений показан на рисунке 3.

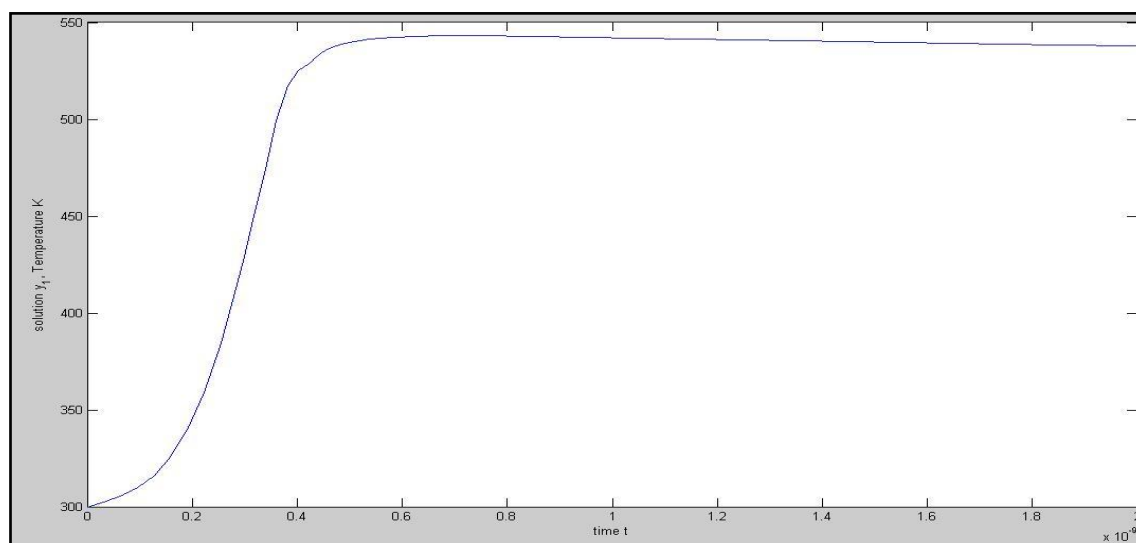


Рисунок 3 – График зависимости температуры поверхности T_s от времени t (в нс).

В главе 4 рассмотрено прогнозирование динамики оптической прочности материалов при лазерном облучении и предложено практическое применение статистических закономерностей лазерного абляционного разрушения материалов. Случайное распределение микродефектов на поверхности материала предопределяет статистический характер прочности материала. Поэтому порог лазерного разрушения будет зависеть от характеристик дефектов в объёме взаимодействия, от вероятности попадания того или иного дефекта в этот объём, как и от флуктуаций лазерного излучения. В предположении, что облучаемый материал – это однородная среда с одним типом дефектов, случайно распределённых по объёму или поверхности образца, то есть, вероятность лазерного разрушения определяется дефектами

одного рода, может быть применена статистика однопараметрического распределения Вейбулла–Гнеденко, например, для определения зависимости исследуемых характеристик лазерного разрушения от модуля Вейбулла.

В простейшем случае, когда вероятность лазерного разрушения определяется дефектами одного рода на поверхности или в объёме образца, вероятность разрушения может быть описана показательной функцией типа

$$p(F) = 1 - e^{-\rho(F)A} = 1 - e^{-kAF^m}$$

где $\rho(F) = kF^m$ – средняя поверхностная/объёмная концентрация дефектов, и A – площадь или объём области, подвергнутой воздействию лазерного излучения с плотностью энергии F . Зная площадь воздействия луча лазера при лазерном разрушении, можно определить концентрацию дефектов и затем вычислить вероятность разрушения для фактического значения плотности энергии луча, используемого в конкретном эксперименте

$$p(F) = 1 - e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0.5}}\right)^m}.$$

Надёжность (оптическая прочность) определяется в этом случае по формуле:

$$R(F) = 1 - p(F) = e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0.5}}\right)^m}.$$

Результат анализа экспериментальных данных по лазерному разрушению для одного из облучаемых образцов приведён на рисунке 4.

Применение однопараметрического распределения Вейбулла–Гнеденко позволило получить значения функции распределения вероятности пробоя при лазерном разрушении наноразмерных покрытий, хорошо совпадающие с экспериментально измеренными вероятности. Полученные зависимости оптической прочности (или надёжности) различных образцов от продолжительности облучения и от плотности энергии облучения при заданной частоте f следования лазерных импульсов позволяют прогнозировать оптическую прочность $R(F, t)$ (или надёжность) при данном значении плотности энергии F лазерного облучения

$$R(F, t) = e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0.5}}\right)^m ft}.$$

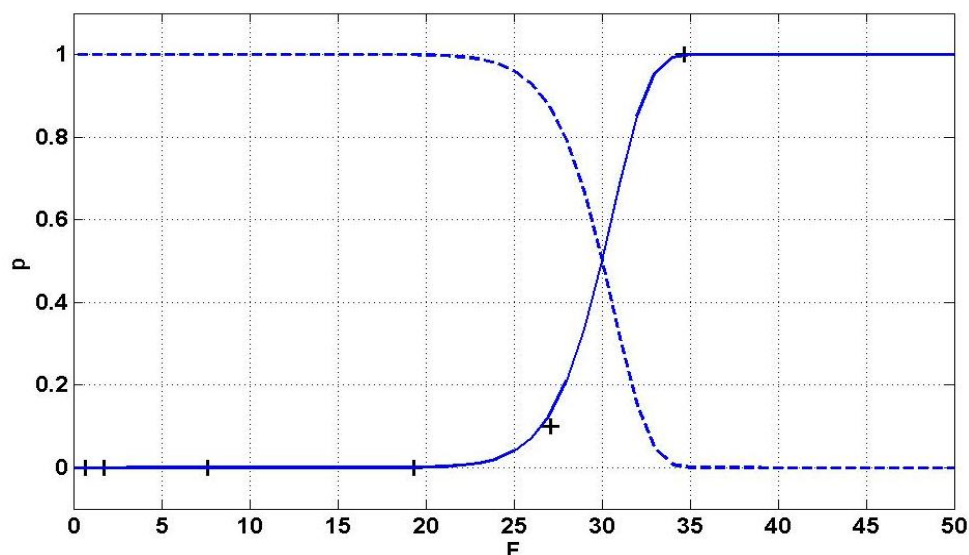


Рисунок 4 – Интегральная функция распределения (точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – аппроксимация функцией распределения Вейбулла–Гнеденко) и оптическая прочность (штриховая линия) образца 46 с лазерным импульсом 20 нс.

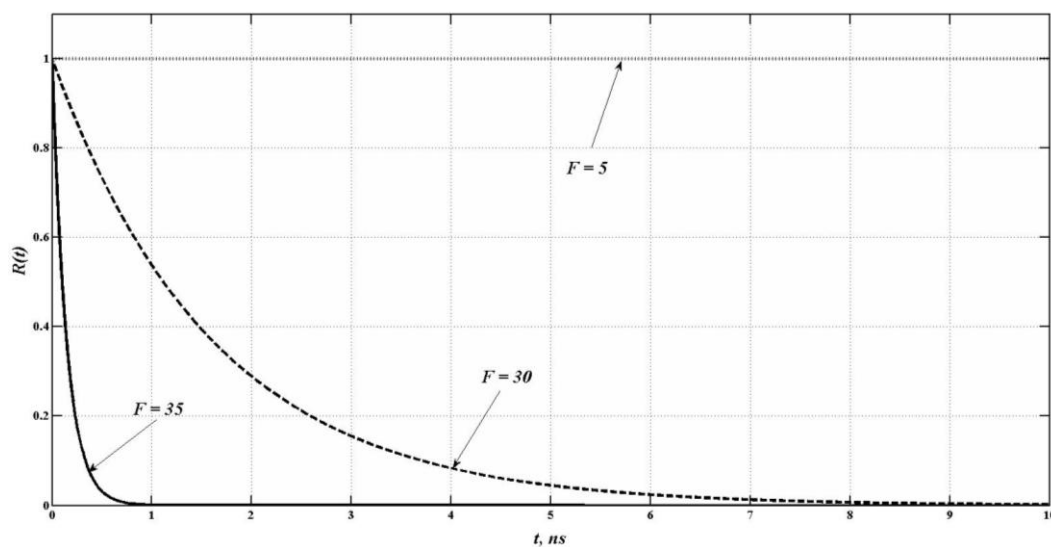


Рисунок 5. – Графики зависимости оптической прочности R от времени t , с, значений плотности энергии падающего излучения $F = 5; 30$ и $35 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ с лазерным импульсом длительностью 20 нс.

Параметры $F_{0,5}$ и t определялись по результатам экспериментов, а частота следования лазерных импульсов f являлась входным параметром.

Зависимости оптической прочности R от времени t для значений плотности энергии падающего излучения $F = 5; 30$ и 35 Дж·см⁻² в наносекундном диапазоне показаны на рисунке 5.

Таким образом, рассмотренный алгоритм применения статистики Вейбулла–Гнеденко позволяет быстро получить параметры статистического распределения по экспериментальным данным вероятности пробоя при лазерном разрушении стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями, рассчитать оптическую прочность элементов и прогнозировать срок безотказной работы в реальных режимах эксплуатации.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы, полученные в процессе работы над диссертацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. На разработанной установке, для нанесения покрытий из диоксида кремния и диоксида титана на стеклянную подложку методом золь-гель технологии, получены образцы стеклянных образцов с наноразмерными покрытиями – листовое флоат-стекло с нанесённым на него оксидным однократным или многократным покрытием SiO₂, TiO₂. Измерены фазовые, оптические и геометрические параметры изготовленных образцов методами рентгенофазового анализа и спектроскопической эллипсометрии.

2. Была создана экспериментальная установка для исследований процессов лазерного абляционного разрушения наноразмерных покрытий и измерены вероятности их пробоя под действием мощного импульсного лазерного излучения.

3. Теоретическое исследование взаимодействия лазерного излучения с системой плоскопараллельных слоёв в приближении геометрической лучевой модели распространения и преобразования световых пучков подтвердило результаты измерения пороговых плотностей энергии пробоя для наноразмерных покрытий различного состава. Исследовано взаимодействие монохроматической поляризованной волны в линейных изотропных средах без

пространственной дисперсии. Предложен, в рамках геометрической лучевой модели, алгоритм определения геометрических и оптических показателей. Результаты вычислений описаны системой рекуррентных уравнений.

4. Для обработки результатов измерений и их компьютерного моделирования разработано программное обеспечение в среде MatLab, которое позволило быстро и эффективно решать задачи обработки результатов экспериментов. Результаты компьютерного моделирования динамики разрушения образца и распространения в нём тепловой волны, в рамках стандартной тепловой модели процесса лазерной абляции, были получены путём упрощения методом моментов сложной системы дифференциальных уравнений в частных производных до системы линейных дифференциальных уравнений и совпали с предварительными оценками динамики этих явлений по экспериментальным данным. Эти данные находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

5. Применение статистики Вейбулла–Гнеденко позволяет прогнозировать динамику оптической прочности облучаемой поверхности и аппроксимировать эти результаты на наноразмерные покрытия другого состава и других геометрических размеров, в частности, разработан алгоритм прогнозирования динамики оптической прочности наноразмерных покрытий для оценки времени безотказной работы образцов в условиях мощного лазерного облучения на основе формулы надёжности в модели Вейбулла–Гнеденко.

Таким образом, разработана методика и получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение новой научной задачи, **соответствующей паспорту научной специальности 01.04.03 "Радиофизика"** по пункту 2 "Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах" и пункту 6 "Разработка физических основ и создание новых волновых технологий модификации и обработки материалов".

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

A1. **Мкртычев О. В.** Аналитическое исследование энергетических коэффициентов отражения и преломления света // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2012. №4. – С.36-37.

A2. **Мкртычев О. В.**, Аткарская А. Б., Шеманин В. Г. Изменение показателя преломления наноразмерных плёнок при модифицировании стеклянных подложек // Известия высших учебных заведений. Физика. – №8/2. 2012. – Издание ТомскГУ. – С.238-239.

A3. **Мкртычев О. В.**, Кадрик К. А. К динамике и кинематике энергетического взаимодействия с системой плоскопараллельных или концентрических сред // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова (научно-теоретический журнал). – №1. 2014. – Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова. – С. 233-237.

A4. **Мкртычев О. В.** Аналитическое исследование взаимодействия световых волн с системой плоскопараллельных сред // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. Научно-теоретический журнал – №6. 2014. – Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова. – С.239-241.

A5. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г., Аткарская А. Б. Аналитическое исследование энергетических коэффициентов отражения и преломления света от многослойных плоскопараллельных систем // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – Т. IV. №3. 2014. – Издательство: Кабардино-Балкарский государственный университет (Нальчик). – С. 29-34.

A6. A. B. Atkarskaya, **O. V. Mkrtychev**, V. E. Privalov, V. G. Shemanin. Laser ablation of the glass nanocomposites studies // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – V.23, Issue 4, October 2014. – ISSN: 1060-992X (Print) 1934-7898 (Online). p. 265-270.

A7. **Мкртычев О. В.**, Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазерная абляция нанокомпозитов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2015. № 1 (213). – С. 128-135.

A8. **Oleg V. Mkrtychev**, Vadim E. Privalov, Alexander E. Fotiadi, Valery G. Shemanin. Nanocomposites laser ablation studies // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics (SPJPM). – 2015. – P. 1-5. [электронный доступ: <http://dx.doi.org/10.1016/j.spjpm.2015.03.007>]

A9. V. G. Shemanin and **O. V. Mkrtychev**. The optical strength of the glass nanocomposites at laser ablation // Journal of Physics Conference Series (JPCS) **653** (2015) 012012.

A10. **О. В. Мкртычев**, В. Г. Шеманин. Лазерное абляционное разрушение наноплёнок на поверхности стеклянных образцов // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2015. № 2. – С. 5-10.

A11. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Численное моделирование процессов распространения тепла при микросекундной импульсной лазерной абляции // Труды XIII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы-2011» в пос. Абрау-Дюрсо, Новороссийск. 2011. – под ред. Булярского С.В. – Ульяновск, 2011. – С. 98-99.

A12. Аткарская А. Б., **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Определение показателя преломления нанокомпозитов по угловым зависимостям коэффициента отражения // Труды XIX международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии-2011» в пос. Абрау-Дюрсо, Новороссийск. 2011. – С. 49-50.

A13. **Mkrtychev O. V.**, Shemanin V. G., Atkarskaya A. B. The reflection energy factor analytical studies for the nanofilms of the different composition // Physics of extreme states of matter. XXVII International Conference on Equation of State for Matter. – Book of abstracts. Ed. by Fortov V.E. (March 1-6, 2012, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia) – Moscow. 2012.

A14. Аткарская А. Б., **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Изменение показателя преломления наноразмерных пленок при модифицировании стеклянных подложек // Труды 4-ой международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы радиофизики "АПР-2012" в ТГУ, радиофизический факультет. – Томск. 2012.

A15. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Импульсная лазерная абляция в рамках тепловой модели. вычислительный эксперимент // Труды XIV международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы-2012». – под ред. Булярского С.В. – Ульяновск. 2012. – С.35-36.

A16. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Моделирование процессов распространения тепла в композите при лазерной абляции с применением метода моментов // Труды XX международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии-2012» в пос. Абрау-Дюрсо, Новороссийск. 2012. – С. 80-82.

A17. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Метод моментов при расчётах тепловой модели лазерной абляции // Сборник докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2012». СПбГПУ, 2012. – Т.3. – С.171-190.

A18. **Мкртычев О. В.**, Аткарская А. Б., Шеманин В. Г. Изменение показателя преломления наноразмерных покрытий под действием кислой среды // Сборник докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2012». – СПбГПУ, 2012. – Т. 2. – С.203-214.

A19. **Mkrtychev O. V.**, Shemanin V. G. Moment method in laser ablation thermal model // Physics of extreme states of matter. XXVIII International Conference of Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. – Book of abstracts. Ed. by Fortov V.E. (March 1-6, 2013, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia) – Moscow. 2013. – P.47-49.

A20. **Mkrtychev O. V.**, Shemanin V. G. Moment method in laser ablation thermal model // Physics of extreme states of matter. Abstracts of XXVIII International Conference of Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. – Book of proceedings. Ed. By Fortov V.E. – March 1-6, 2013, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. – Moscow. 2013. – P.39-40.

A21. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Импульсная лазерная абляция в рамках тепловой модели – вычислительный эксперимент // Труды XVI

международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы-2013». – под ред. Булярского С.В. – Ульяновск. 2013. – С.55-56.

A22. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Исследование геометрической модели взаимодействия светового луча с системой плоскопараллельных сред // Труды 5-ой международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы радиофизики "АПР-2013" в НИУ ТГУ, радиофизический факультет. – Томск. 2013.

A23. Шеманин В. Г., **Мкртычев О. В.** Статистические закономерности разрушения тонкоплёночных покрытий при микросекундной импульсной лазерной абляции // Труды XXI международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии-2013» в пос. Абрау-Дюрсо, Новороссийск. 2013. – С.39-40.

A24. Аткарская А.Б., **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Оптические и физические свойства наноразмерных золь-гель покрытий // Сборник докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2013». – СПбГПУ. 2013. – Т. 1. – С.72-82.

A25. Шеманин В. Г., **Мкртычев О. В.** Статистические закономерности разрушения тонкоплёночных покрытий при микросекундной импульсной лазерной абляции // Сборник докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2013». – СПбГПУ. 2013. – Т. 3. – С.233-245.

A26. Shemanin V. G., Atkarskaya A. B., **Mkrtychev O. V.** Glass nanocomposites laser ablation destruction studies // Physics of extreme states of matter. XXIX International Conference on Equation of State for Matter. – 2014. Ed. by Fortov V. E., Karamurzov B. S., Efremov V. P. et al. – Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow. 2014. – P. 135-138. ISBN 978-5-94691-625-7.

A27. Шеманин В. Г., **Мкртычев О. В.** Статистическая модель оптической прочности стеклянных нанокомпозитов // Сборник докладов международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация. 2014». – Т. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014.– С.64-82. – 250 с.

A28. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Метод моментов в тепловой модели лазерной абляции стеклянных нанокомпозитов // Материалы XX-ой всероссийской научной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» в пос. Агой 14-20 сентября 2014 г, Краснодарский край): Кубанский гос. ун-т. – Краснодар, 2014.– С. 154-158.

A29. **Mkrtychev O. V.**, Shemanin V. G. The optical strength of the glass nanocomposites by laser ablation studies // Physics of extreme states of matter. XXX International Conference of Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. – Book of abstracts. Ed. by Fortov V.E. et al. – March 1-6, 2015, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. – Moscow & Chernogolovka & Nalchik. 2015. – P. 46. ISBN 978-5-7558-0558-2.

A30. Аткарская А.Б., **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Оптическая прочность стеклянных нанокомпозитов // Труды XXII международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте-2014» в ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, г. Новороссийск в 2014. – С.

A31. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Прогнозирование времени жизни нанопокрываний стеклянного образца под действием импульсного лазерного излучения // Труды XXIII международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте-2015» в ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, г. Новороссийск в 2015. – С.

A32. **Mkrtychev O. V.**, Shemanin V. G. The glass nanocomposites optical strength laser ablation studies // Physics of extreme states of matter – 2016. Ed. by Fortov V. E., Karamurzov B. S., Efremov V. P. et al. – Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow. 2016.– (in print).

A33. **Мкртычев О. В.**, Шеманин В. Г. Прогнозирование динамики оптической прочности нанокомпозитов // Петербургский журнал электроники. – СПб. 2014.