

На правах рукописи

МИЧУРИН Сергей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛОВ И ПЕРКОЛЯЦИИ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УМЕРЕННОЙ  
ИНТЕНСИВНОСТИ НА ВЕЩЕСТВО**

01.04.21 - лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2005

Работа выполнена в НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

**Научный руководитель:**

доктор физ.-мат. наук, профессор **Каск Николай Евгеньевич**  
(НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова)

**Официальные оппоненты:**

доктор физ.-мат. наук, профессор **Платоненко Виктор Трифонович**  
(физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова)

кандидат физ.-мат. наук **Пилипецкий Николай Федорович**  
(Институт проблем механики РАН)

**Ведущая организация**

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

Защита состоится 22 июня 2005 года в 14.00 часов на заседании  
диссертационного совета Д501.001.45 Московского государственного университета  
им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Воробьевы горы, НИИЯФ МГУ,  
19 корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан 20 мая 2005 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д501.001.45  
доктор физ.-мат. наук



Васильев А. Н.

2006-4  
6888

214 49 74

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Воздействие лазерного излучения на вещество и образование приповерхностной лазерной плазмы - традиционный вопрос физики лазеров. В литературе представлены исследования для разных длин волн излучения, различных диапазонов длительности лазерного импульса и подводимой энергии, различных мишеней и т.д. Не смотря на всестороннее исследование, не было проведено систематического изучения роли дисперсной компоненты в лазерном факеле. В то же время, известно, что в других физических ситуациях в плазме с конденсированной дисперсной фазой (КДФ), широко распространенной в природе и являющейся объектом лабораторных исследований, КДФ существенно влияет на ее свойства. Интерес к исследованиям в этом направлении связан так же с получением и изучением нанокластеров. В результате действия лазерного излучения на мишень кроме образования кластеров происходит их сборка в мезоскопические неупорядоченные структуры. Физика этого процесса и его контроль представляют интерес с точки зрения управляемого получения таких структур.

Характерная черта современного научного исследования - применение в разных областях сходных понятий и методов. К понятиям, имеющим общенаучное значение, в частности, относятся фракталы и перколяция, использование которых при анализе экспериментальных результатов является особенностью развиваемого в работе подхода к исследованию лазерной плазмы.

**Цель данной работы** состояла в исследовании для миллисекундного диапазона длительностей импульса излучения влияния дисперсной фазы на оптические и электрические свойства лазерной плазмы, в изучении перколяции в лазерной плазме и образования фрактальных структур при лазерной абляции металлов, диэлектриков и их композитов.

### **Научная новизна диссертационной работы.**

- Впервые выполнено систематическое исследование влияния дисперсной компоненты на свойства лазерной плазмы при действии на мишень лазерного излучения умеренной плотности с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм и длительностью до 10 мс.



- Разработаны методики экспериментального исследования перколяции в плазме и на основе модели перколяционного кластера интерпретированы и изучены свойства лазерного факела.

- Исследовано образование фрактальных структур в результате действия лазерного излучения на мишень для большого ряда веществ. Установлено, что лазерная плазма в исследованном диапазоне воздействия является эффективным источником кластеров и фрактальных структур.

- Исследованы оптические спектры эрозионной и связанной лазерной плазмы для различных мишеней. Представлены эффективные температуры свечения.

- Проведено систематическое исследование влияния электронной структуры атомов мишени на характеристики лазерной плазмы.

#### **Практическая значимость работы.**

- Результаты, полученные в работе, дополняют картину явлений и процессов в плазме с дисперсной компонентой и показывают целесообразность использования концепций фракталов и перколяции.

- Учет дисперсной фазы может оказаться важным при решении ряда задач лазерной абляции, в частности, при обработке материалов. Эффективность выноса материала определяется режимом генерации лазерного факела и связана с изменением его параметров, которое исследовано в работе.

- Лазерный факел относится к классу объектов, в которых перенос излучения осуществляется в условиях градиента температуры и плотности, флуктуаций плотности, присутствия дисперсной компоненты. В связи с этим систематическое исследование спектров свечения лазерной плазмы представляет широкий научный интерес и позволяет экспериментально изучать влияние дисперсной фазы в условиях контролируемого внешнего воздействия. Объекты этого класса являются предметом исследования в астрофизике, исследованиях атмосферных явлений, распространения излучения в неоднородных средах и др.

- Разработан ряд оригинальных методик исследования перколяции и фракталообразования в лазерной плазме.

- Для различных групп веществ исследована эффективность образования фрактальных структур от условий воздействия – объектов, построенных из нанокластеров,

исследование которых в настоящее время широко проводится в связи с возможными приложениями. Продемонстрировано, что соответствующий выбор условий воздействия излучения на мишень позволяет эффективно получать фрактальные структуры практически для всех материалов. Это расширяет возможности синтеза наноразмерных структур (дополнительно к углеродным структурам) и позволяет рассматривать новые области приложения.

- Исследовано влияние давления на свойства лазерного факела. Показано, что давление можно использовать в качестве управляющего параметра, определяющего свойства лазерной плазмы и эффективность образования фрактальных структур.

- Кроме исследования возможности синтеза наноструктур и эффективности их образования, в работе рассматривается механизм сборки кластеров в мезоскопические неупорядоченные структуры. Физика этого процесса и его контроль представляют интерес с точки зрения управляемого получения таких структур.

#### **На защиту выносятся:**

- 1) вывод о том, что в исследованном диапазоне лазерного воздействия на мишень, при изменении внешнего давления происходит смена режима генерации лазерной плазмы (от эрозионной плазмы к связанной плазме); соответствующее изменение параметров плазмы коррелирует с эффективностью образования дисперсной компоненты;

- 2) результаты исследования оптических свойств и микроволнового поглощения лазерной плазмы и их интерпретация на основе модели перколяционного кластера;

- 3) результаты исследования образования и морфологии фрактальных структур, из которых следует, что лазерная плазма в исследованном диапазоне воздействия является эффективным источником низкоразмерных структур, а внешнее давление может быть управляющим параметром, определяющим их характеристики;

- 4) вывод о влиянии электронной структуры атомов мишени на следующие свойства лазерной плазмы: эффективность фракталообразования; соотношение магнито- и электродипольного поглощения микроволнового излучения; сплошной спектр свечения лазерной плазмы.

### **Достоверность результатов.**

Результаты, полученные в работе, являются оригинальными и достоверными. Они основаны на систематическом исследовании роли дисперсной компоненты в лазерном факеле и образования фрактальных структур и базируются на большом экспериментальном материале (исследовано более полусотни различных материалов). Достоверность результатов обусловлена тем, что экспериментально полученные закономерности и факты повторяются для исследованных материалов и подтверждается тем, что экспериментальные результаты согласуются с рассматриваемыми теоретическими моделями (теория перколяции, модели роста фрактальных структур, возникновение динольных цепочек и др.) и имеющимися отдельными экспериментальными результатами других авторов, соответствующих теме работы.

### **Личный вклад автора.**

Автор принимал участие в проведении всех экспериментальных исследований, вошедших в диссертацию, обработке всего массива экспериментальных данных и интерпретации полученных результатов. Им была создана установка для исследования микроволнового поглощения лазерным факелом на двух частотах. Были проведены эксперименты на установках по исследованию оптических и электрических свойств лазерного факела и эффективности образования фрактальных структур. Выполнено исследование микроструктуры фрактальных объектов, в том числе на электронном микроскопе. Для обработки экспериментальных результатов был написан ряд программ.

### **Апробация работы и публикации.**

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Центра волоконной оптики при Институте общей физики РАН, кафедры оптики и спектроскопии физического факультета МГУ и содержатся в 6 публикациях, список которых приведен в конце реферата.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 177 наименований; изложена на 131 странице и содержит 55 рисунков и 4 таблицы.

## II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Литературный обзор

В главе приведен анализ образования дисперсной компоненты в низкотемпературной плазме. Т. к. дисперсная компонента влияет на свойства плазмы, исследования в этом направлении актуальны при изучении различных явлений, протекающих в присутствии конденсированной дисперсной фазы (КДФ).

В литературном обзоре рассмотрены следующие вопросы: пар и плазма вблизи поверхности мишени; плазма с дисперсной фазой; макромолекулы в насыщенном паре; формирование папокластеров; заряд кластеров; формирование фрактальных структур при релаксации плазмы; перколяция в плотном паре. Данные вопросы имеют непосредственное отношение к процессам, протекающей в лазерной плазме. Поэтому их рассмотрение, предшествующее изложению результатов исследования, оправдано.

### Глава 2. Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Для облучения мишеней использовался импульсный твердотельный лазер на стекле с неодимом. Импульс неполяризованного излучения с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм и энергией  $W \sim 100$  Дж имел колоколообразную форму с длительностью на полувысоте  $\tau \approx 10$  нс. Лазерное излучение фокусировалось сферической линзой с фокусным расстоянием  $F_1 = 300$  мм на поверхность мишени в пятно диаметром 0.5 – 5 мм, что позволяло получать плотности светового потока в диапазонах  $10^5 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

В качестве мишени использовались металлы и диэлектрики, а также их композиты – смеси порошковых материалов, спрессованные при давлении  $\sim 150$  атм.

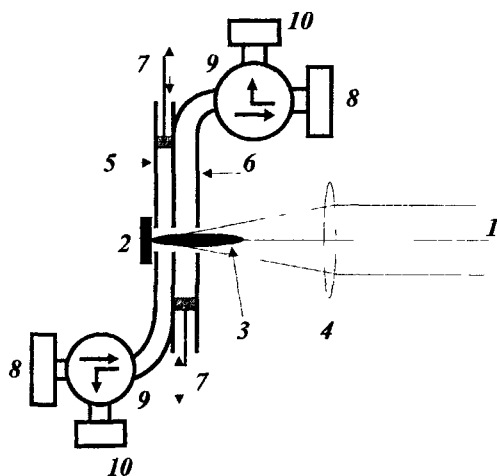
Мишень, испаряемая лазерным излучением, помещалась в герметичную камеру. В качестве буферного газа, задающего внешнее давление, использовались инертные газы He, Ar, Kr с чистотой 99.99%. Давление в камере менялось в пределах от 0.001 до 150 атм. В экспериментах по изучению СВЧ-поглощения использовалась стеклянная герметичная камера, соединенная с волноводом. В этом случае давление буферного газа в камере менялось от нескольких мм рт. ст. до 1 атм.

Схема эксперимента предусматривала регистрацию свечения плазмы и рассеянного лазерного излучения, позволяла исследовать спектральный состав излучения в диапазоне длин волн  $0.35 < \lambda < 1.1$  мкм.

Эффективные (яркостная и цветовая) температуры плазмы определялись из соотношения ингенсивностей свечения факела и эталонного источника яркости – вольфрамовой ленточной лампы СИ8-200У, свечение которой при заданном токе соответствует излучению черного тела с температурой 2400 К.

**Размеры и форма лазерного факела** регистрировались с помощью интегральной фоторегистрации и СФР (скоростной фотосъемки).

При исследовании **электрических свойств лазерного факела** в экспериментах использовалась установка (рис 1), позволяющая одновременно исследовать микроволновое поглощение на двух частотах и оптическую вспышку от лазерного факела. Лазерное излучение и встречный поток испаренного вещества с поверхности мишени (лазерный факел) проходили через отверстия (диаметр 5 мм), расположенные по центру стенок двух волноводных секций с сечениями  $8 \times 17$  и  $10 \times 23$  мм<sup>2</sup>. Использование отражательной схемы позволяло в зависимости от положения закорачивающего поршня в волноводном отрезке фиксировать в плоскости факела лучности электрического или магнитного поля стоячей СВЧ-волны.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для СВЧ исследования  
 1 - лазерный пучок;  
 2 - мишень;  
 3 - факел;  
 4 - фокусирующая линза ( $f = 17$  см);  
 5, 6 - двухсантиметровая и трехсантиметровая волноводные секции (секция (6) повернута на  $90^\circ$  относительно секции (5) вокруг оси лазерного пучка);  
 7 - закорачивающие поршни;  
 8 - генераторы микроволнового излучения;  
 9 - циркуляторы;  
 10 - приемники микроволнового излучения.



**Фракталообразование** измерялось по уменьшению интенсивности излучения He-Ne лазера и лампы накаливания, пропускаемого через образец (покровное стекло с осажденным слоем фракталов). Исследование микроструктуры фрактальных структур было выполнено с помощью оптического (МБИ-1) и электронного сканирующего (Hitachi S-405A) микроскопов.

**Изменение давления ( $\Delta P$ )** внутри камеры во время и после действия лазерного излучения регистрировалось с помощью пьезокерамического датчика, работающего в режиме источника напряжения с RC-постоянной  $\tau_{RC} \sim 5$  мс.

### **Глава 3. Влияние дисперсной компоненты на характеристики лазерной плазмы**

В третьей главе приведены результаты исследования лазерной плазмы. Особое внимание обращается на свойства, которые или впервые обнаружены, или наиболее отчетливо проявились в экспериментах по воздействию лазерного излучения 10-миллисекундной длительности, так или иначе связанные с присутствием в объеме лазерного факела дисперсной фазы.

Экспериментальные исследования показали: при переходе от малых давлений к большим качественно меняются форма и размеры факела, возрастает интенсивность свечения, меняется эффективность образования фракталов, поглощение факелом лазерного излучения и морфология разрушения, что соответствует смене режима генерации лазерного факела.

**Форма и размеры лазерного факела с КДФ.** Для давлений, меньших  $P_1$  (максимум эффективности образования фракталов), реализуется режим развитого испарения с характерным разлетом эрозивной плазмы. При некотором значении давления  $P_2$  область свечения имеет наименьшие размеры и прижата к поверхности мишени. При больших давлениях, продольный размер изображения плазменной области увеличивается и приобретает цилиндрическую форму с четкими границами. Такое поведение является результатом изменения режима распространения пламени: режим эрозивной плазмы переходит в режим со значительно более ярким световым горением в объеме парогазового потока. В последнем случае уменьшение размеров плазменной области и появление у нее резких границ скорее характерно для капли, чем для газового факела, и далее такое состояние плазмы называется связанным, по аналогии с работой [1], в которой исследуется пылевая плазма.

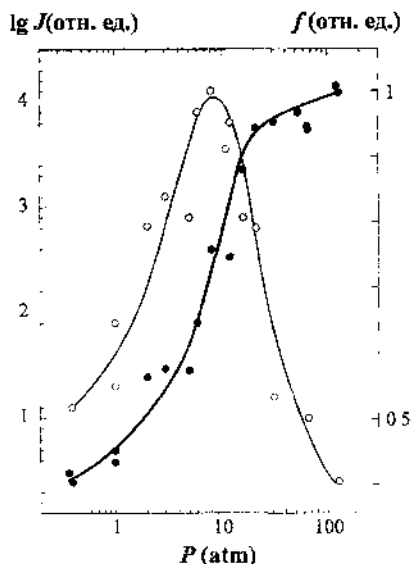


Рис. 2. Зависимость интенсивности свечения  $J$  на длине волны  $\lambda=0.47$  (●) и эффективности факталообразования  $f$  (○) от давления буферного газа (Ar) Мишень  $Al_2O_3$

Пример зависимости эффективности образования фракталов и свечения от давления буферного газа приведены на рис. 2 для мишени  $Al_2O_3$ . Подобные зависимости были получены для всех изученных веществ. Эрозионному факелу соответствует более эффективное образование фрактального слоя на подложке по сравнению с режимом связанной плазмы. Зависимость интенсивности свечения от давления имеет пороговый характер. Критическому (пороговому) давлению соответствует параметр  $P_2$ , выше которого происходит заметный рост экранировки поверхности плазмой разряда и наблюдается значительное увеличение излучательной способности факела навстречу греющему лазерному излучению.

**Поглощение лазерного излучения в лазерной плазме и морфология разрушения.** Для оценки поглощения лазерным факелом проведено изучение динамики ослабления лазерного излучения, прошедшего через факел. Поглощательная способность в режиме эрозионного факела заметно меньше, чем в режиме связанной плазмы, где она приближается к единице. Изменение поглощательной способности плазмы оказывает влияние на энергообмен в плазме и между лазерным факелом и поверхностью, что определяет эффективность воздействия излучения на поверхность мишени и морфологию ее разрушения.

При низких давлениях (в режиме эрозионного факела) происходит интенсивное испарение мишени, а при определенных условиях - выдавливание расплава из кратера и появление капельной фракции в факеле. В режиме связанной плазмы (при достаточно высоких давлениях) глубокого кратера на поверхности мишени не образуется, и часто наблюдается выступающий конус (рис. 3).

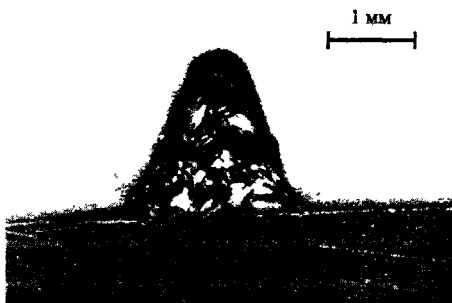


Рис. 3. Изображение среза конуса, возникшего на облученной поверхности никеля. Давление буферного газа (Ar) 10 атм.

нитевидные макроструктуры Фрактальные нити возникают через  $10^2$ – $10^3$  секунд после действия лазерного импульса

Отличный от агрегации механизм образования макроструктур, очевидно, реализуется при более длительном лазерном воздействии и, соответственно, более высокой плотности мелкодисперсной фракции в объеме факела На рис 4 приведена фотография фрактальной структуры появившейся на подложке сразу после действия лазерного импульса на железную мишень при давлении, немного превышающем  $P_1$

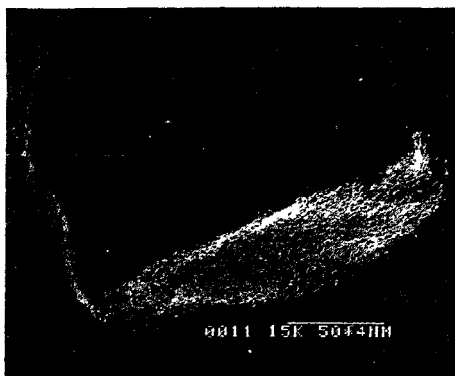


Рис. 4. Изображение макрофрактала, полученного при воздействии лазерного излучения на железную мишень в атмосфере Ar при давлении 12.5 атм.

### Образование кластеров и фракталов в лазерном факеле.

Согласно литературным данным [2] компактные частицы с характерным размером  $\sim 10$  нм в результате агрегации образуют фрактальные кластеры (агрегаты) с размерами  $\sim 1$  мкм через  $\sim 10^2$  с после воздействия миллисекундного лазерного импульса с плотностью потока  $10^6$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> Во внешнем электрическом поле фрактальные агрегаты собираются в

Почти вся масса вынесенного вещества оказывается вошедшей в наблюдаемую структуру (макрофрактал) с размерами порядка 1 мм В диссертации рассматривается модель, согласно которой, в лазерной плазме повышенной плотности существуют структуры, предшествующие появлению фракталов и ускоряющие процесс их формирования Связь между элементами достаточно высока, чтобы обеспечить образование макрофрактала Предположение о существовании

связанных структур в лазерном факеле, сформулированное, исходя из анализа динамики и особенностей образования фракталов, согласуется с проявлением перколяции в плазме и моделью перколяционного кластера, в частности.

Обычно процесс осаждения слоя фракталов на подложке занимал значительно большее время и проходил в два этапа: первоначально сразу после прекращения действия лазерного излучения появляется налет; и постепенное наращивание слоя со временем, зависящее от материала и массы вынесенного вещества. Полное время осаждения обычно составляло нескольких минут.

Плазма, возникающая под действием умеренных световых потоков на конденсированные среды, является эффективным источником фракталов. В диапазоне мощностей лазерной установки и давлений буферного газа можно подобрать условия, при которых образуются фрактальные структуры для всех исследованных материалов (чистых веществ, оксидов, галогенидов и др.)

#### **Спектры свечения лазерной плазмы с КДФ и эффективные температуры.**

Несмотря на многочисленные исследования спектров лазерной плазмы, систематического исследования вклада дисперсной компоненты в свечение факела в паучной периодике не представлено. Известно, что в кластерной плазме вклад в излучение со сплошным спектром наночастиц (кластеров) часто оказывается преобладающим [3]. Свечение кластеров хорошо аппроксимируется спектром черного тела с эффективной температурой заметно большей, чем у ламп накаливания, но меньшей температуры кипения материала мишени.

На рис. 5 приведен пример экспериментального спектра свечения лазерной плазмы. Особенность спектра свечения лазерной плазмы – наличие континуума, который оказывается доминирующим, если реализуется режим связанной плазмы. В отличие от характерного теплового свечения кластерной плазмы континуум излучения лазерного факела определяется электронной конфигурацией внешней оболочки атомов мишени. Имеет место подобие оптических спектров излучения лазерного факела у поверхности мишеней, атомы которых принадлежат одной и той же подгруппе Периодической системы. Зависимость интенсивности континуума от внешнего давления для элементов одной подгруппы имеет один и тот же характер поведения, что связано, прежде всего, с близостью пороговых давлений для перехода плазмы в связанное состояние.

Атомарный спектр соответствующего элемента проявляется на фоне сплошного спектра в виде уширенных самообращенных линий как результат атомарного поглощения в охлажденных периферийных областях факела. Помимо дискретного спектра, соответствующего атомам мишени, обнаружены широкие полосы поглощения, форма и положение которых в спектрах континуума зависят от номера подгруппы. С переходом к режиму эрозийного факела интенсивность континуума заметно (на два-три порядка) уменьшается, и в спектре свечения проявляются линии излучения, соответствующие переходам атомарного спектра.

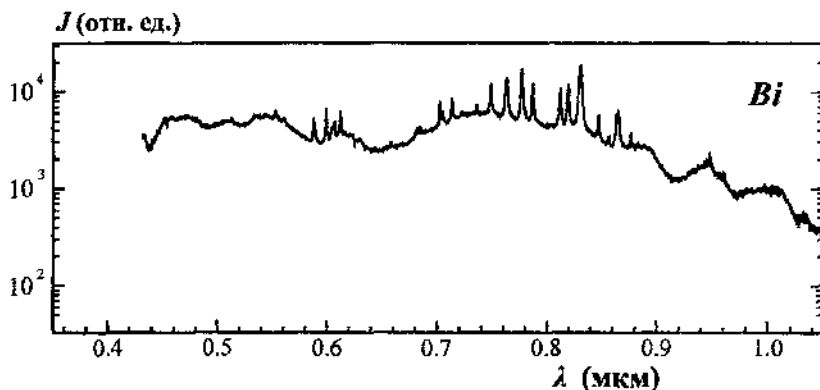


Рис. 5. Оптические спектры свечения при давлении аргона 30 атм Мишень Bi.

В спектре отсутствуют дискретные линии и полосы, принадлежащие ионам и молекулярным соединениям испаренного вещества (димерам, тримерам и г.п., за исключением углерода, для которого отчетливо наблюдаются полосы Свана).

В режиме связанной плазмы (см. рис. 5), для всех исследованных элементов, у которых внешнюю оболочку образуют  $s$ - и  $p$ -электроны, над уровнем сплошного континуума в диапазоне длин волн  $0.7 < \lambda < 0.9$  мкм наблюдается линейчатый спектр излучения атомов буферного газа (аргона или криптона). Интенсивность лазерного излучения не достаточна для возбуждения соответствующих уровней. Возможная причина появления этого спектра - локальное усиление поля греющего лазерного излучения на микро неоднородностях фрактальных структур, в результате которого происходит фиктивное снижение порога для возбуждения атомов инертного газа и появление дискретного спектра излучения.

На рис 6 представлены величины цветовой температуры при нормальном давлении для исследованных металлов в зависимости от номера подгруппы Периодической системы, т.е. использована так называемая длинная форма системы, в которой всем элементам, имеющим одинаковую структуру внешней электронной оболочки, отводится отдельная группа. Результаты, приведенные на рис. 6 свидетельствуют, что периодичность, свойственная температурам кипения химических элементов, проявляется и для цветовой температуры лазерной плазмы, возникающей у поверхности металлов при внешнем давлении 1 атм. При давлении 30 атм эффективная цветовая температура слабо зависит от материала мишени и составляет примерно 6000 К.

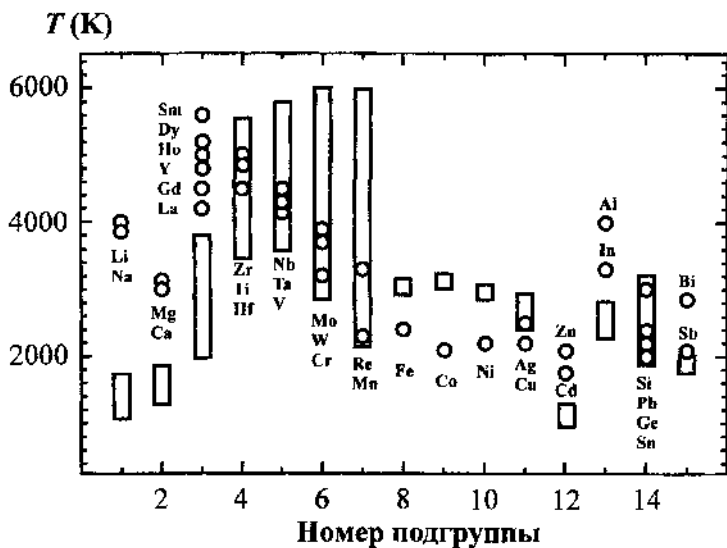


Рис. 6. Значения цветовой температуры свечения лазерного факела для металлов из различных подгрупп таблицы Менделеева при давлении аргона 1 атм. Светлые прямоугольники задают диапазон табличных значений температур кипения для соответствующих исследованных металлов.

**Проводимость лазерной плазмы, содержащей кластерную компоненту.** При анализе СВЧ-проводимости лазерного факела при нормальном давлении обращает на себя внимание сравнительно высокое ее значение ( $>10^2 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ). Согласно формуле Друде, такую проводимость могла бы обеспечить концентрация электронов, превышающая  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При условии ионизационного равновесия для металлов расчетные значения на полтора-два порядка меньше. В качестве причины этого рассматривается влияние

конденсированной дисперсной фазы на концентрацию электронов, которое рассмотрено в литературе для ряда экспериментальных ситуаций

Т. о., результаты данной главы показывают, что роль конденсированной дисперсной фазы в лазерной плазме существенна. Экспериментальные результаты, в следующих главах, рассматриваются, исходя из предположения, что лазерная плазма является кластерной плазмой, и дисперсная компонента определенным образом влияет на ее свойства и эволюцию

#### **Глава 4. Перколяция в лазерной эрозионной плазме**

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты исследования перколяции в лазерной плазме, которые получены с использованием оригинальной методики, основанной на изучении СВЧ-поглощения и свечения. Экспериментально исследованы: СВЧ-поглощение и интенсивности свечения лазерного факела для двухкомпонентных и трехкомпонентных мишеней, отношения магнито- и электродипольного поглощения лазерной плазмы и конденсированного композита. Оптические и электрические свойства лазерного факела в условиях эксперимента согласуются с моделью перколяционного кластера. Экспериментальные результаты получены при давлениях буферного газа до 1 атм. В этих условиях для большинства исследованных мишеней реализуется режим эрозионного факела, при котором эффективно образуются фрактальные структуры.

**Перколяционные зависимости свечения и СВЧ-поглощения.** Так с перколяцией в задачах электропроводности связано изменение физических свойств при достижении критической плотности проводящего компонента, то для исследования изменения проводимости, соответствующего появлению перколяционного проводящего кластера, необходимо в широких пределах менять концентрацию проводящего компонента. При лазерном облучении однокомпонентных мишеней возникают сложности с определением и регулированием абсолютной плотности в факеле. Альтернативный способ заключается в использовании двухкомпонентной мишени, в которой помимо перколирующего вещества содержится разбавитель.

Исследованы зависимости СВЧ-поглощения и свечения от состава бинарных металлических мишеней и мишеней металл-диэлектрик. Обнаружено, что существует область концентраций, в которой наблюдается пороговое изменение физических

характеристик лазерного факела. Такие концентрационные зависимости исследуются в теории перколяции. Перколяционные зависимости для оптического свечения и СВЧ-поглощения имеют аналогичный вид.

**Таблица.** Характеристики порога перколяции для смесей металла (Me) с  $MgF_2$  и LiF.  $x_c$  - весовая доля Me,  $v_c$  - объемная доля Me в мишени,  $n_c$  - относительная атомная концентрация Me,  $p_c$  - относительная атомная концентрация с учетом металла разбавителя.

Металл	Разбавитель	$x_c$	$v_c$	$n_c$	$p_c$
Al	$MgF_2$	0.35	0.39	0.55	0.53
Al	LiF	0.30	0.29	0.29	0.58
Mg	$MgF_2$	0.37	0.53	0.60	0.56
Mg	LiF	0.40	0.38	0.42	0.63
Nb	$MgF_2$	0.74	0.1	0.66	0.59
Mo	$MgF_2$	0.7	0.09	0.60	0.55
Ni	$MgF_2$	0.55	0.3	0.56	0.53

перколяции, наиболее приемлемым оказывается предположение, что в проводящей компоненте перколяционного кластера следует учитывать атомы металла, появляющиеся в результате разложения разбавителя.

Эксперименты с трехкомпонентной смесью, включающей близкие по термодинамическим характеристикам металлы (Cu и Al) и  $MgF_2$ , показали, что порог перколяции в этом случае принимает значение, характерное для бинарных мишеней, если учитывать в качестве проводящего компонента атомы обоих металлов.

Значения порога перколяции для разных образцов принимают близкие значения, если принять, что порог перколяции определяется атомной концентрацией. В этом случае экспериментальные значения порога могут быть описаны близкой величиной  $p_c = 0.55 \pm 0.05$ .

#### Магнито- и электродипольное СВЧ-поглощение в лазерной плазме.

Появление в системе перколяционного проводящего кластера сопровождается изменением характера взаимодействия системы с электромагнитным излучением. В частности, изменяется соотношение вероятностей магнито- и электродипольных переходов в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Пороговые характеристики для некоторых бинарных мишеней металл-диэлектрик приведены в таблице. Измерения концентрационных зависимостей СВЧ-поглощения и оптической эмиссии для ряда смесей Me- $MgF_2$  и Me-LiF, где Me - атом металла, дали совпадающие в пределах экспериментальной ошибки значения порогов перколяции  $p_c$  по числу атомов металла, включая атомы металла разбавителя. Т. е., если исходить из требования универсальности порога



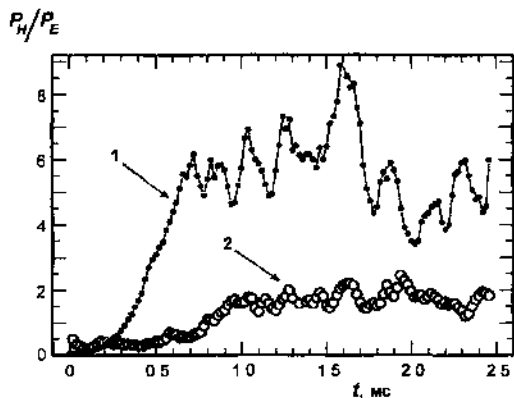


Рис. 7. Эволюция  $P_H/P_E$ -отношения в процессе лазерного воздействия на металлы: диспрозий (1) и ванадий (2). Буферный газ — воздух.

электродипольного поглощения микроволнового излучения в лазерной плазме в зависимости от электронной структуры атомов мишени. Здесь химические элементы одной группы характеризуются близкими значениями отношения  $P_H/P_E$ , за исключением редкоземельных элементов

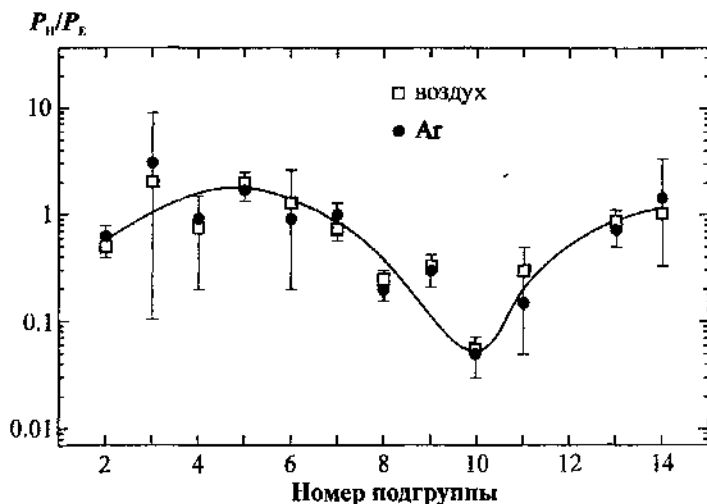


Рис. 8. Графики зависимости отношения  $P_H/P_E$  от номера группы Периодической системы. Буферный газ - воздух ( $\square$ ) и аргон ( $\bullet$ ) при давлении  $\sim 100$  мм рт. ст

В работе установлено, что магнитодипольное поглощение по мере развития лазерного факела растет быстрее электродипольного, и их отношение в развитом режиме испарения может достигать значений порядка единицы (рис. 7).  $P_H/P_E$ -отношение меняется в достаточно широком диапазоне и зависит от материала мишени. На рис. 8 приведены результаты изучения соотношения магнитодипольного

234X

и

в

здесь

здесь

здесь

здесь

В главе приведен анализ влияния структурных неоднородностей (микрокластеров, нитевидных и кольцевых, фрактальных и перколяционных структур) на соотношение магнито- и электродипольного поглощения. Показано, что полученные экспериментальные результаты находят качественное объяснение на основе модели перколяционного кластера.

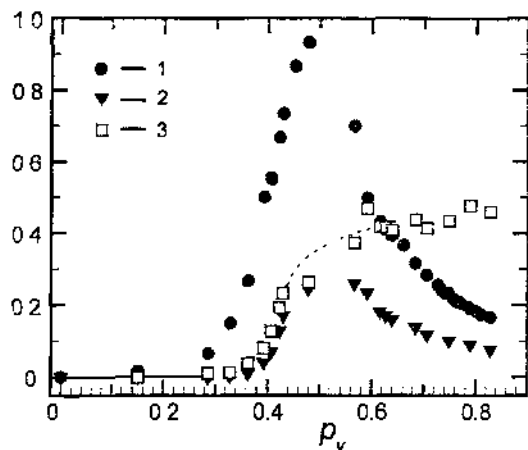
Согласно [4], для трехмерного фрактального кластера факторы усиления электродипольного и магнитодипольного поглощения по сравнению со случаем изолированных частиц соответственно равны.

$$\left(R_f/a\right)^{\frac{5}{2}(3-d_f)} \quad \text{и} \quad \left(R_f/a\right)^{\frac{1}{2}(1+d)}$$

где  $R_f$  — размер кластера,  $d_f$  — его фрактальная размерность. То рост отношения  $P_H/P_E$  будет иметь место, если фрактальная размерность превышает  $7/3$ , что выполняется в трехмерном случае для перколяционного кластера ( $d_f = 2.5$ ).

В работе представлены результаты эксперимента по СВЧ-поглощению в конденсированном композите, меняя состав которого можно пройти через окрестность

$P_H, P_E$  (отн. ед.),  $P_H/P_E$



**Рис. 9.** Зависимость микроволнового поглощения от состава композита графит-MgO. Поглощение (относительные единицы) в пучностях электрического ( $I$ ) и магнитного поля (2) в волноводе ( $\lambda = 3$  см).

перколяционного порога. В соответствии с формулой, для трехмерного перколяционного кластера ( $d_f = 2.5$ ,  $R_f = 2$  мм)  $P_H/P_E$ -отношение увеличивается в 45 раз по сравнению со случаем изолированных частиц размером 1 мкм, что хорошо согласуется с результатами эксперимента (рис 9). То, большие экспериментальные величины для  $P_H/P_E$  находят удовлетворительное объяснение в рамках предположения о наличии перколяционных кластеров в лазерной плазме.

## Глава 5. Фрактальные структуры в лазерном факеле

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования образования фракталов в результате действия лазерного излучения на мишень.

Изучена эффективность образования фракталов в зависимости от условий лазерного воздействия (давления буферного газа, геометрии эксперимента, плотности

светового потока и т.д.). Исследовано влияние электронной структуры атомов мишени на зависимости свечения и эффективности фракталообразования от давления. Обсуждается механизм формирования фрактальных структур

Анализ микроструктуры фрактальных слоев (рис 10) позволяет сделать заключение, что спад эффективности образования фракталов при высоких давлениях сопровождается сверткой фракталов. Этот факт проявляется в уменьшении фрактальной размерности структур, и увеличении размера элементарных узлов. При давлениях  $P < P_1$  фрактальные структуры содержат линейные фрагменты с длиной  $L_1 \sim 2 \mu\text{м}$ , собранные из микрочастиц с размерами порядка 50 нм. С увеличением давления буферного газа ( $P > P_1$ ) характерные диаметр и длина фрагментов увеличиваются приблизительно в два раза. Кроме того,

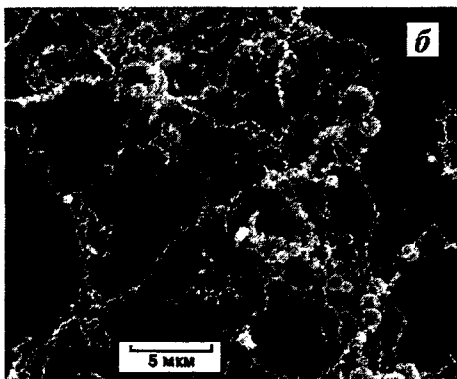
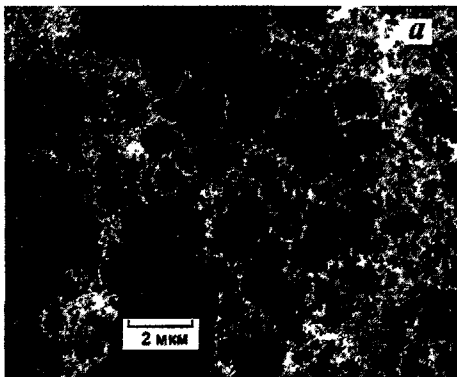


Рис. 10. Электронно-микроскопические изображения фрактальных слоев (а и б), полученные при испарении железной мишени в атмосфере аргона при давлении 0.1 атм (а) и 12.5 атм (б).

в осадченных слоях появляются отдельные застывшие капли, и пелочки из 10–20 монодисперсных шариков (см. рис 10б). Фрактальная размерность структур на рис. 10а и рис. 10б, полученная с помощью «клеточного» метода, равна 1.8 и 1.5, соответственно

С ростом давления толщина фрактального слоя уменьшается. При давлениях, много больших  $P_1$ , вместо слоя разветвленных фракталов на покровном стекле наблюдается множество капелек, диаметр которых равен  $\sim 1$  мкм. Образование капелек при больших давлениях и высокой температуре плазмы разряда происходит в результате уплотнения структур и сокращения внутренней поверхности фрактала.

Анализ влияния дипольного взаимодействия между субъединицами на образование цепочек показал, что для цепочек из капелек железа энергия диполь-дипольного взаимодействия между отдельными частицами (капельками) в четыре раза превышает тепловую энергию.

Одна из целей диссертации - исследование влияния электронной структуры атомов мишени на характеристики лазерной плазмы. Получены зависимости эффективности образования фракталов и интенсивности свечения плазменного облака у поверхности мишени в зависимости от давления буферного газа для металлов из различных групп Периодической системы элементов.

Средние значения давлений ( $P_1$  и  $P_2$ ) в пределах группы Периодической системы в зависимости от ее номера приведены на рис. 11. Положения максимума фракталообразования и скачка яркостной температуры слабо меняются в каждой

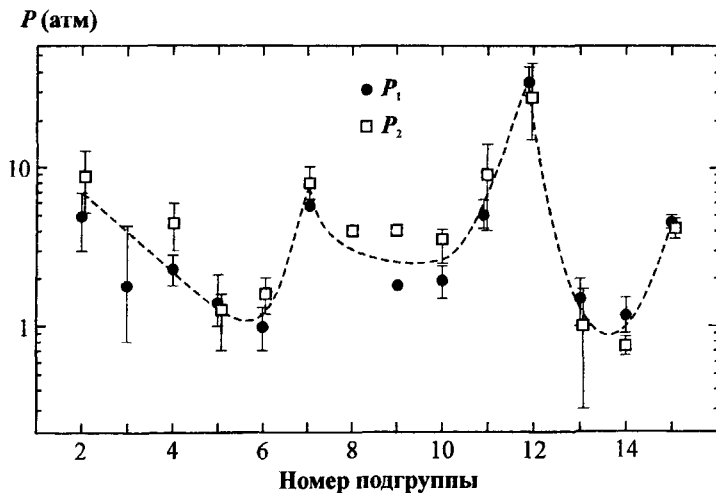


Рис. 11. Зависимость от номера группы давления для максимума фракталообразования ( $P_1$ ) и для порогового увеличения светимости факела ( $P_2$ ).

отдельной группе и заметно сдвигаются при переходе от одной группы к другой. Исключение составляют элементы редкоземельной группы, для которой максимум образования фракталов существенно сдвигается при переходе от одного редкоземельного элемента к другому.

Исследована **зависимость эффективности фракталообразования и световой суммы** (интеграл от интенсивности свечения факела за время импульса) от **плотности светового потока**. Очевидно, что пороговая плотность потока для образования фракталов определяется появлением развитого испарения мишени. При малых давлениях во всем диапазоне световых потоков на покровном стекле наблюдается лишь слой фракталов. При больших давлениях при незначительном превышении (~30%) плотности мощности над порогом, на покровном стекле помимо фрактального слоя появляются макроскопические фрактальные структуры (рис. 4). При более высоких плотностях потока такие структуры образуются нерегулярно, причем в аргоне реже, чем в гелии.

В работе предложена **модель фрактальной оболочки**, согласно которой, фракталы возникают за время действия лазерного импульса как результат следующей последовательности процессов: конденсации пара с образованием компактных кластеров, выталкивания последних термофоретической силой на периферию лазерного факела; торможения их силой Стокса и накопление в некотором слое, окружающем плазму разряда; агрегация во фрактальные слабосвязанные микрокластеры при низких плотностях испаренного материала или при превышении некоторой критической плотности частиц в макроскопическую фрактальную структуру. В результате, вблизи границ разрядной области находится слой, в котором накапливаются достаточно крупные частицы. По мере приближения концентрации частиц к критической частицы объединяются в кластеры. Появление бесконечного кластера на перколяционном пороге сопровождается возникновением связанной структуры – оболочки, что приводит к появлению макрофрактала на подложке после распада плазмы. Увеличение давления буферного газа и плотности парогазовой фазы ведет к ускорению образования кластеров и фрактальных агрегатов и сдвигу области конденсации и агрегации ближе к каустике лазерного излучения. Если эта область и каустика достаточно сильно перекрываются, происходит плавление внутренней поверхности оболочки с образованием крупных капель.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе развитого в работе подхода к исследованию лазерной плазмы лежит использование концепций фракталов и перколяции. В ходе изучения перколяции и образования фрактальных структур, а также влияния конденсированной фазы на оптические и электрические свойства лазерной плазмы, использовался ряд экспериментальных методик: фоторегистрация формы и размеров факела; оптическая спектроскопия и микроволновая диагностика плазмы; оптическая и электронная микроскопия.

Экспериментальные методики позволили изучить следующие объекты и процессы, которые имеют место при действии лазерного излучения на мишень: кластеры, перколяцию, фракталы; рассмотреть их влияние на свойства лазерной плазмы; отметить общие закономерности.

**Кластеры.** В лазерном факеле присутствуют кластеры в различных состояниях: газоподобные и компактные. Существования газоподобных кластеров возможно при температуре лазерной плазмы, превышающей температуру кипения материала мишени. Динамика кластеров приводит к их объединению, изменению агрегатного состояния, формированию кластерных цепочек, что прослеживается по микрофотографиям фрактальных структур. Кроме визуального наблюдения кластеров в составе фракталов рассмотрено их влияние на свойства лазерного факела, в частности на спектры свечения и проводимость плазмы. Для оценки эффективности кластеризации заимствована методика Хагены. Оценки роли кластерной компоненты приведены при анализе отношения магнито- и электродипольного поглощения.

**Перколяция.** Разработана методика микроволнового исследования перколяции в лазерной плазме, что позволило, во-первых, получить и интерпретировать зависимости оптического свечения и микроволнового поглощения от состава мишени. Во-вторых, измерить отношение вероятностей магнито- и электродипольных переходов при поглощении микроволнового излучения в лазерной плазме и показать, что количественные результаты согласуются с моделью перколяционного кластера. При обсуждении роли кластеров в перколяции оценка эффективности кластеризации по методу Хагены сопоставляется с перколяционной зависимостью микроволновой проводимости от состава мишени.

**Фракталы.** Особенность лазерной плазмы в исследованном диапазоне воздействия – образование фрактальных структур, эффективность которого определялось по оптической толщине слоя фракталов, осажденных на подложку. Микрофотографии фрактальных слоев на стеклянной подложке дают представление об их структуре и позволяют сделать выводы о некоторых закономерностях их формирования до и после осаждения на подложку. Один из результатов исследования фракталов – получение макрофрактала, образование которого связано с тем, что концентрация кластеров на периферии лазерной плазмы достигает критической величины. При наличии пороговой плотности числа частиц дисперсной фазы можно говорить о перколяционном механизме формирования макрофрактала.

**Исследование общих закономерностей.** Систематическое исследование различных свойств лазерного факела для большого числа мишеней, состоящих из веществ, относящихся к разным группам, позволило установить некоторые закономерности. С изменением давления буферного газа для ряда характеристик лазерной плазмы отмечены особенности общие для всех мишеней: пороговое поведение оптических и микроволновых свойств лазерной плазмы, а также эффективности образования фракталов. Исследована роль электронной структуры атомов мишени. Для этого собирались и анализировались результаты для элементов соответствующих подгрупп Периодической системы.

**В результате проведенного исследования получены следующие результаты.**

1. Установлено, что дисперсная компонента влияет на проводимость, оптические свойства лазерного факела, вынос материала из области воздействия, образование фрактальных структур. Лазерная плазма, возникающая при повышенных давлениях под действием умеренных световых потоков на конденсированные среды, является эффективным источником фракталов.
2. Результаты исследования оптических свойств и микроволнового поглощения лазерной плазмы интерпретированы на основе модели перколяционного кластера.
3. Исследованы спектры свечения лазерной плазмы и получены значения эффективных температур. Установлено, что для режима связанной плазмы яркостная и цветовая температуры практически совпадают и превышают температуру кипения материала мишени.

4 Обнаружено влияние электронной структуры атомов мишени на следующие свойства лазерной плазмы:

- характерные значения давления буферного газа, при которых экспериментально наблюдается изменение формы и размеров лазерного факела, интенсивности свечения лазерной плазмы, эффективности фракталообразования;
- отношение магнито- и электродипольного СВЧ-поглощения лазерного факела;
- континуум спектра свечения лазерной плазмы.

#### IV. ПУБЛИКАЦИИ

1. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М., Васильев О.А., Столяров Д.Л., Чопорняк Д.Б. Перколяция в лазерном факеле у поверхности трехкомпонентной мишени Al-Cu-MgF<sub>2</sub>. *Квантовая электроника*, **25** (10), с.951-953 (1998).

2. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М. Перколяция в дисперсной плазме лазерного факела. *ТВТ*, **37** (1), с. 13-17 (1999).

3. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М. Магнито- и электродипольное поглощение в дисперсной плазме лазерного факела. *ЖЭТФ*, **116**, вып. 6 (12), с.1979-1989 (1999).

4. Каск Н.Е., Лексина Е.Г., Мичурин С.В., Федоров Г.М. Эффективность образования фрактальных структур при лазерном испарении. *Квантовая электроника*, **32** (5), с.437-442 (2002).

5. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М. Фрактальные структуры в лазерном факеле. *Квантовая электроника*, **33** (1), с.57-68 (2003).

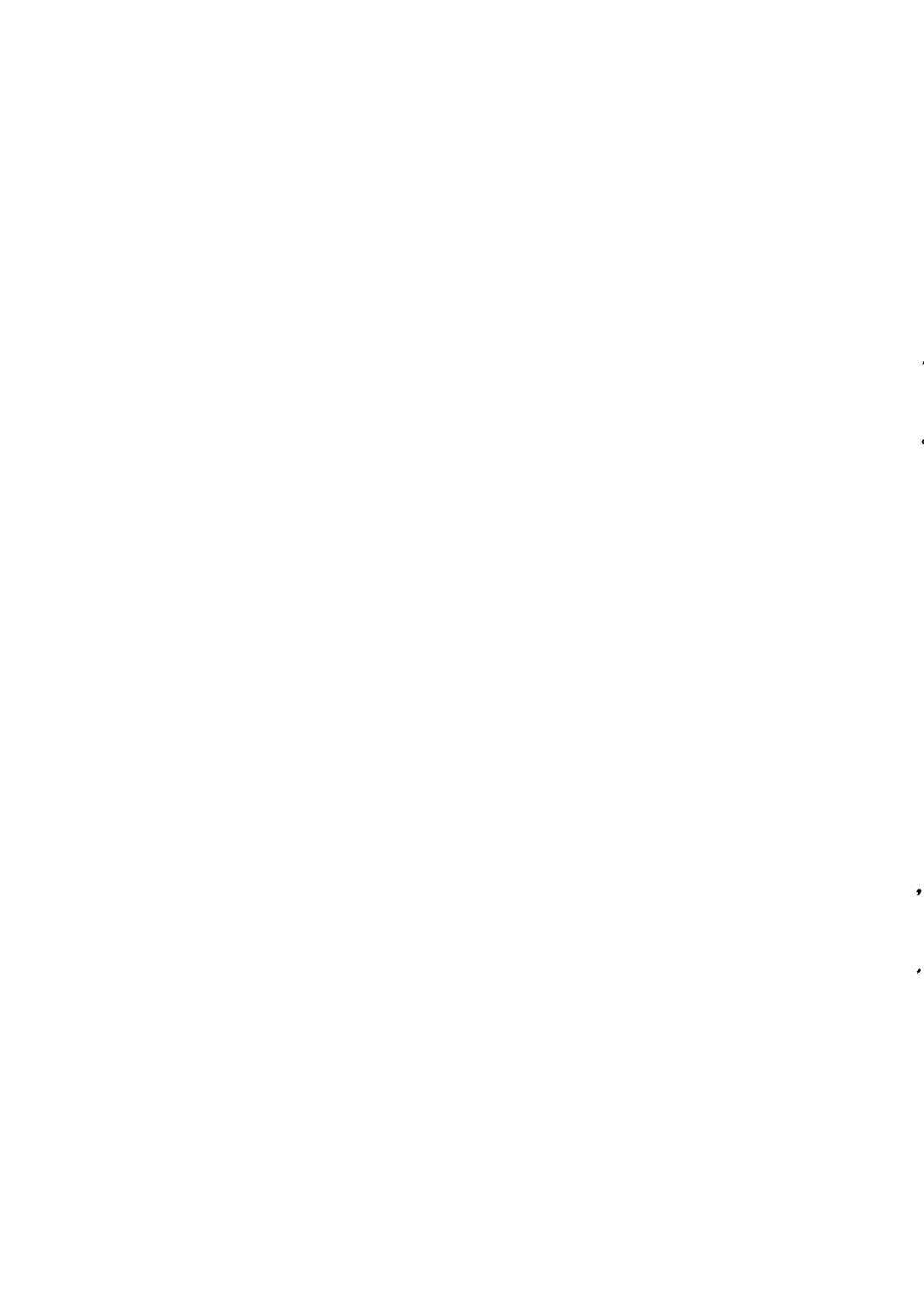
6. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М. Влияние электронной структуры атомов мишени на континуум излучения лазерной плазмы. *Квантовая электроника*, **34** (6), с.524-530 (2004).

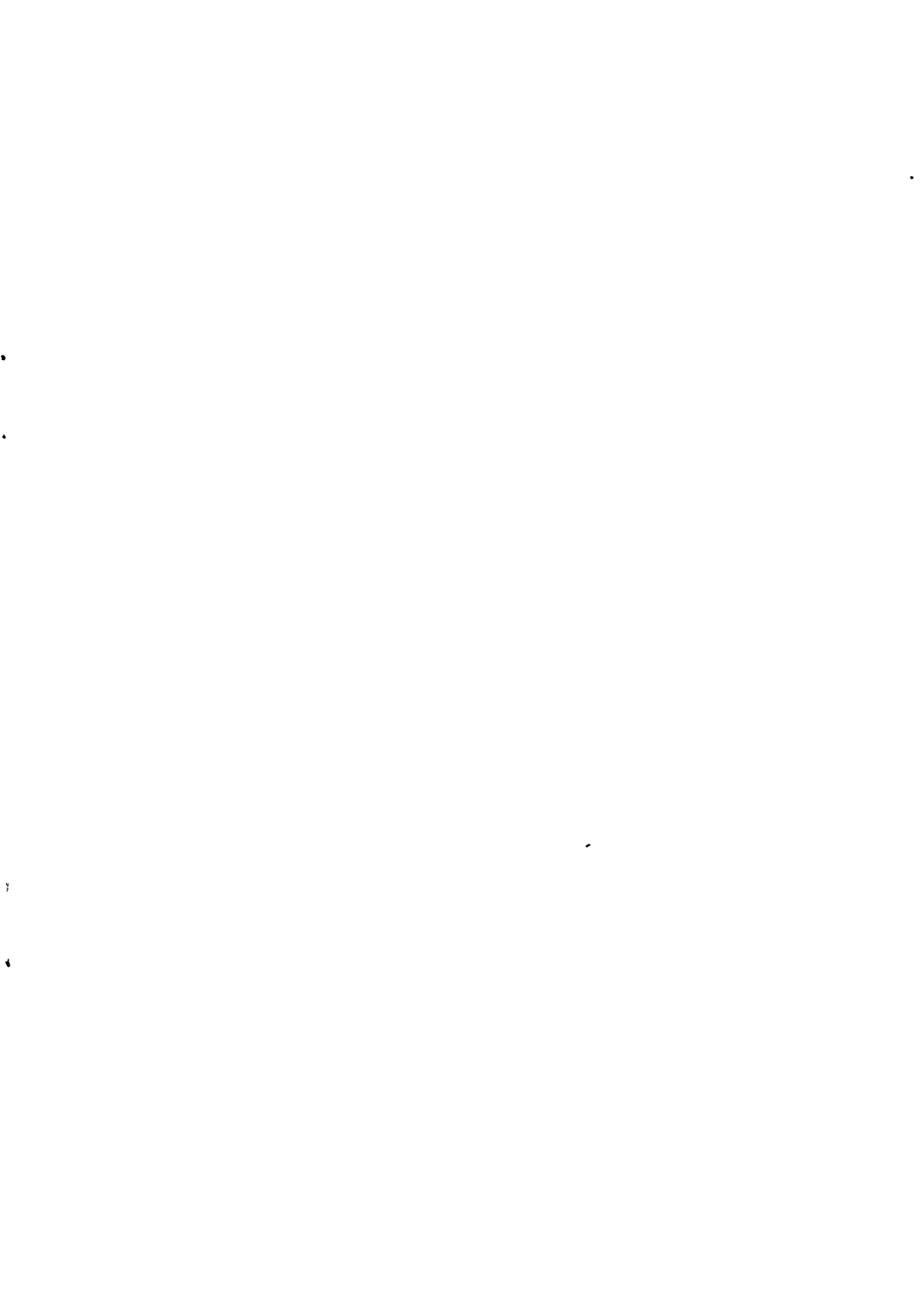
#### V. ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Samsonov D., Goree J. *Phys. Rev. E*, **59**, 1047 (1999).
2. Лушников А. А., Негин А. Е., Пахомов А. В. и др. *УФН*, **161**, 113 (1991)
3. Смирнов Б. М. *УФН*, **170**, 495 (2000).
4. P. M. Hui , D. Stroud. *Phys. Rev. B*, **33**, 2163 (1986).









№ 1 1 7 1 3

РНБ Русский фонд

2006-4

6888