

УДК 621.375.826,543.423
УДК 535.176;539.184.

На правах рукописи

Лю Тао

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ
ПРИ РАСПЫЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ Cd и Zn ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ
ЧАСТИЦАМИ

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:

Москва 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»
(государственном университете)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Миськевич Алексей Иустинович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Дьяченко Петр Петрович (ФЭИ)

доктор физико-математических наук,
Коробкин Владлен Васильевич (ИОФРАН)

Ведущая организация: Российский федеральный ядерный центр
“Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики” (РФЯЦ ВНИИТФ)

Защита состоится “30” июня 2010 г. в 14:00 час. на заседании диссертационного
совета Д 212.130.05 при НИЯУ МИФИ в конференцзале МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан “ ” мая 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор ф.-м. наук, профессор

И.В.Евсеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Прямое преобразование энергии ядерных реакций в световое излучение представляется важной технической задачей, имеющей большие практические применения. Её решение позволит создать высокоэффективные энергонасыщенные источники когерентного и некогерентного светового излучения. Одноступенчатый характер преобразования энергии ядерных частиц в световое излучение, минуя промежуточные стадии тепловой, механической и электрической энергии, обладает более высоким КПД, а устройства на его основе имеют низкие весогабаритные характеристики по сравнению с аналогичными устройствами традиционного типа.

Применение паров металлов в качестве активных сред лазеров с ядерной накачкой представляет особый интерес из-за большого количества потенциальных лазерных сред на основе парогазовых смесей и возможности получения генерации в видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн на многих переходах атомов и ионов одновременно. За счёт одновременного существования различных механизмов заселения рабочих уровней суммарный КПД парогазовой активной среды может достигать нескольких процентов.

В парометаллических средах может быть реализован новый эффективный механизм селективного заселения уровней, основанный на получении плазмы при распылении металлической мишени заряженными частицами. Использование эффекта ионного распыления для приготовления активной среды лазера вместо термического испарения металла позволяет существенно понизить рабочую температуру лазерной трубки, уменьшить давление буферного газа, увеличить в несколько раз КПД лазера (или снизить порог генерации) и использовать в дальнейшем в качестве лазерно-активной среды многие труднолетучие металлы, включая уран. В лазерах с ядерной накачкой, работающих за счёт энергии деления ядер уран-235, ионное распыление металла осколками деления уран-235 уменьшает осколочную радиоактивность

буферного газа. Уменьшение давления и температуры буферного газа в активном элементе лазера способствует существенному улучшению рабочих характеристик лазера за счёт снижения оптических неоднородностей активной среды и уменьшения внутрирезонаторных потерь.

Создание таких лазеров связывается с необходимостью проведения детальных экспериментальных исследований излучательных характеристик плазмы парометаллических сред, включая излучательные характеристики распылительной плазмы, поскольку в литературе практически отсутствует необходимая информация для плотных парометаллических сред и особенно для распылительной плазмы, образующейся при бомбардировке подогретых металлических мишеней заряженными частицами высокой энергии. Поэтому проведение экспериментальных исследований спектрально-кинетических характеристик люминесценций парогазовых сред и распылительной плазмы металлических мишеней является необходимой задачей для понимания и уточнения физических процессов создания инверсной заселенности уровней в этих средах, построения и проверки физической и математической моделей плазмы, и получения отсутствующих в литературе констант элементарных процессов.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование спектральных, временных, пространственных и температурных характеристик люминесценции плотных парометаллических сред, образующихся при бомбардировке металлического Cd и Zn заряженными частицами высокой энергии, и изучение процессов формирования инверсии в этих средах при термическом и распылительном способах получения парометаллической плазмы при ядерной накачке.

Для достижения поставленной цели были решены следующие конкретные задачи:

1. Разработана и создана экспериментальная установка для изучения спектрально-временных, температурных, и пространственных характеристик парометаллической плазмы, создаваемой импульсным электронным пучком при бомбардировке мишеней из металлического Cd и Zn.
2. Проведен цикл исследований спектральных характеристик люминесценции плотной $^3\text{He-Zn}$ и $^3\text{He-Cd}$ плазмы, в температурном диапазоне 70–500 °C при возбуждении продуктами $^3\text{He}(n, p)^3\text{T}$ ядерной реакции.
3. Измерены времена высвечивания отдельных уровней Cd I, Cd II, Zn I и ZnII в He-Zn и He-Cd плазме высокого давления, и определены константы тушения бейтлеровских уровней ионов Cd II и ZnII буферным газом (He) и другими инертными газами.
4. Измерены спектральные, температурные и пространственные характеристики металлической плазмы Cd и Zn, образующейся при бомбардировке парометаллических мишеней быстрыми электронами, α -частицами изотопного источника плутоний-238 и продуктами $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$ нейтронной ядерной реакции.
5. Разработана кинетическая модель плазмохимических процессов для плотной He-Zn и He-Cd плазмы, возбуждаемой продуктами $^3\text{He}(n, p)^3\text{T}$ нейтронной ядерной реакции и быстрыми электронами, и проведены компьютерные расчёты люминесцентных характеристик такой плазмы.
6. Проведены расчёты методом Монте-Карло для мишеней из Cd и Zn зоны диссипации кинетической энергии падающих быстрых электронов на поверхность металла.

Научная новизна

Научная и практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Впервые получена информация по временным характеристикам ионо-стимулированной люминесценции подогретых металлических мишеней

из Zn и Cd при их распылении импульсным электронным пучком высокой энергии.

2. Создана установка на основе малогабаритного ускорителя “Арина-2”, дифракционного спектрометра МДР-23, быстрого цифрового осциллографа “Rigol 5022ME” и специальной вакуумной камеры, предназначенная для исследования спектрально-временных, температурных и пространственных характеристик ионно-фотонной эмиссии металлов, возникающей при распылении подогретой металлической мишени импульсным пучком быстрых электронов.
3. Измерены константы тушения бейтлеровских уровней ионов CdII инертными газами Ar, Ne, Xe и молекулами CCl₄.
4. Измерены константы тушения бейтлеровских уровней иона ZnII собственными атомами Zn, буферным газом He и примесным газом Ar.
5. Выполнены расчеты методом Монте-Карло зоны диссипации кинетической энергии при бомбардировке плоской мишени из металлического Zn и Cd пучком быстрых электронов с энергией $E_e = 150 \text{ кэВ}$ при нормальном падении их на поверхность.

Практическая значимость работы

Результаты проведенных исследований спектрально-кинетических, пространственных и температурных характеристик плазмы, возникающей при бомбардировке мишеней из металлического Cd и Zn заряженными частицами высокой энергии могут найти применение при создании нового типа лазера с ядерной накачкой, основанного на эффекте ионной эмиссии металлов при бомбардировке высокоэнергетичными частицами.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований спектральных и температурных характеристик люминесценции $^3\text{He-Zn}$ и $^3\text{He-Cd}$ парогазовых смесей, возбуждаемых продуктами нейтронной $^3\text{He}(n, p)^3\text{T}$ ядерной реакции при распылении и испарении металлической мишени.

2. Результаты экспериментальных исследований спектральных, временных, температурных и пространственных характеристик люминесценции He-Cd, возбуждаемой импульсным электронным пучком и α -частицами изотопного источника плутоний-238.
3. Результаты измерений констант тушения бейтлеровских уровней ионов CdII буферным газом (He), инертными газами Ar, Ne, Xe и молекулами CCl₄.
4. Результаты измерений констант тушения бейтлеровских уровней иона ZnII буферным газом (He), собственными атомами Zn и примесным газом Ar.
5. Результат расчетов методом Монте-Карло зоны диссипации кинетической энергии быстрых электронов при бомбардировке мишени из металлического Zn и Cd.
6. Механизм возбуждения бейтлеровских уровней ионов CdII, ZnII при распылении подогретых металлических подложек ядерными частицами высокой энергии.

Авторский вклад

Автор принимал активное участие в модернизации экспериментальных установок и проведении измерений, и выполнил основной объем по математической обработке и анализу результатов измерений. Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены при его непосредственном участии.

Апробация работы

Полученные результаты и основные положения диссертационной работы докладывались на IV международной конференции “Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы ”(2007 г., ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск); на научных сессиях МИФИ (секция “Лазерная физика”) в 2007, 2008, 2009 и 2010гг.; на международной конференции ДААД-2009(МИФИ, 6-8 ноября 2009 г.).

Публикации

Полученные в диссертации результаты изложены в 8 печатных работах [13-20], из них 3 статьи в реферируемых журналах, 1 статья – в Трудах IV международной конференции “Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы”, и 4 статьи – в сборниках трудов научных сессий МИФИ 2007, 2008, 2009 и 2010 гг.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержание работы изложено на 170 страницах, включая 69 рисунков и 12 таблиц. Список использованных источников состоит из 136 наименований.

Краткое содержание работы

Во **введении** обсуждаются актуальность рассмотренных задач, сформулирована цель диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая ценность работы.

В **первой главе** диссертации дан общий обзор литературы по теме диссертации. В ней рассматриваются основные физические процессы, протекающие в плотных газовых средах при бомбардировке металлической мишени ядерными частицами высокой энергии и быстрыми электронами. Показано, что преобразование энергии ядерных частиц в световое излучение атомов мишени и буферного газа происходит в многоступенчатом процессе, включающем процессы торможения частиц в буферном газе, образование плотной низкотемпературной плазмы буферного газа, бомбардировку поверхности металлической мишени ядерными частицами и возбужденными состояниями буферного газа (ионами, метастабильными атомами), приводящей к эмиссии возбужденных ионизированных и нейтральных атомов металлической мишени.

Создаваемая в буферном газе ядерно-возбуждаемая плазма характеризуется высокой плотностью, низкой температурой электронов, низкой степенью

ионизации и трековой структурой. Именно в пределах объема трека происходит передача кинетической энергии ядерной частицы буферному газу в виде образования ионов, возбуждённых атомов и быстрых δ -электронов. Кинетика плазменных процессов, протекающих в треках частиц, определяется многочастичными столкновениями, рекомбинационными процессами, пленением резонансного излучения и диффузией вторичных заряженных частиц. Параметры образующейся плазмы слабо зависят от удельного энерговклада в газ до момента начала перекрытия треков. Характерное время жизни трека – 0.1~1мкс.

При бомбардировке металлической мишени заряженными частицами высокой энергии возникают структурные изменения материала, связанные с образованием различных дефектов кристаллической решётки – появлением

вакансий, внедренных и замещенных атомов, тепловых клиньев и клиньев смещения, распылением мишени. Этот процесс сопровождается вторичной электронной, ионной и фотонной эмиссией, обусловленной значительной

ионизацией и электронным возбуждением атомов кристаллической решетки(рис.1). Скорость эрозии поверхности мишени при бомбардировке зависит от многих факторов, в том числе от материала мишени, состояния поверхности, кинетической энергии бомбардируемых частиц и т.д. Источником светового излучения являются атомы и ионы, вылетающие из мишени в возбужденном состоянии. Спектральный состав излучения состоит из

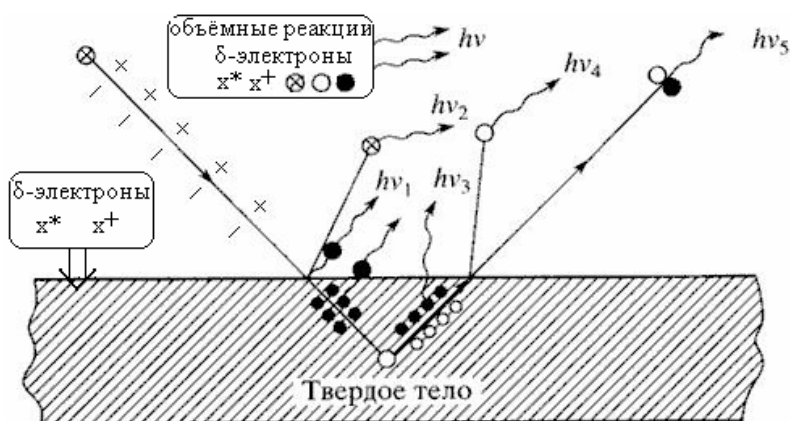


Рис.1. Источники светового излучения при бомбардировке металла заряженными частицами высокой энергии.

⊗-Первичная частица; ●,○,◐- Вторичные частицы;

hv1- излучение распыленных возбуждённых частиц, ***hv2***- излучение рассеянных или отраженных первичных частиц; ***hv3***- излучение объёмных дефектов, созданных бомбардировкой. ***hv4***- излучение десорбированных частиц. ***hv5***- излучение возбуждённых молекул.

отдельных спектральных линий атомов и ионов мишени, молекулярных полос и континуума(рис.2). Возникающее при распылении мишени излучение сосредоточено в области пространства, примыкающей к облучаемой быстрыми частицами поверхности мишени и имеющей толщину ≤ 10 мм.

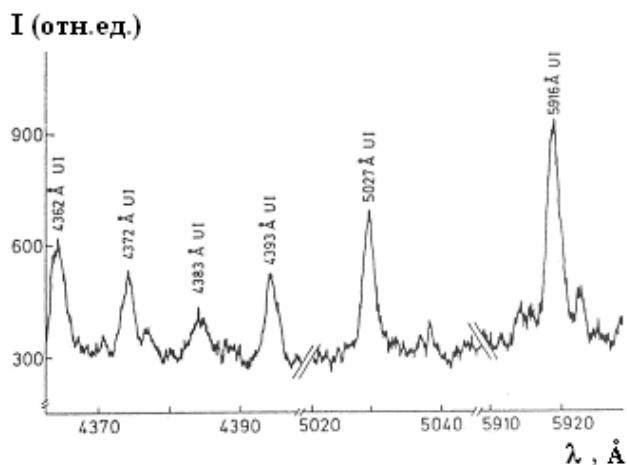


Рис.2. Спектр люминесценции металлического U при бомбардировке ионами Ag^+ с энергией 400 кэВ.(Phys.Rev.Lett. V.39. No.19. P.1192)

Распыление металлов заряженными частицами позволяет получать при комнатных температурах концентрации труднолетучих металлов таких, как Ag, Cu, Al, Mo, W, U ($\sim 10^{14}$ атом/см³) в количествах, достаточных для работы лазерных трубок при пониженных или даже комнатных температурах. Такие лазеры обладают улучшенными рабочими характеристиками по сравнению с

парометаллическими лазерами традиционного типа с внешним разогревом рабочего металла.

Во **второй главе** описаны экспериментальные установки, оборудование, методики, использованные в диссертационной работе для измерений температурных, спектральных, временных и пространственных характеристик люминесценции распылительной плазмы, возникающей при бомбардировке мишеней из металлического кадмия и цинка быстрыми электронами ($E_e=150$ кэВ), альфа-частицами радионуклида ^{238}Pu и продуктами нейтронной $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$ ядерной реакции.

Измерения временных характеристики люминесценции производились в режиме импульсного распыления – пучком быстрых электронов электронного ускорителя “Арина-2” (энергия электронов $E_e =150$ кэВ, амплитуда импульса тока $I_e= 500\text{A}$, длительность импульса $T_{\text{и}}= 3\sim 5$ нс). Блок-схема экспериментальной установки показана на рис.3. Установка состоит из двух

камер (1) и (2), соединённых между собой и с системой откачки, напуска и очистки газа(8). При работе системы очистки газ с помощью циркуляционного насоса последовательно прокачивается через обе камеры и фильтр из титановой губки. Камера(1) предназначена для измерения временных характеристик люминесценции. В ней возбуждение исследуемого объекта производится с помощью электронного ускорителя (5) с энергией электронов $E_e \approx 150$ кэВ, длительностью импульса $\tau \approx 3$ нс и пиковым током $I \approx 500$ А. Камера (1) имеет два окна из кварца и установлена на входной щели монохроматора (3). Световое излучение выходит через окно и регистрируется фотоумножителем ФЭУ1, работающим в токовом режиме. Форма импульса тока записывается с помощью осциллографа(9). Камера (2) имеет источник α -частиц для возбуждения объекта. Внутри камеры находится фольга из Cd и нагреватель с термопарой (12), расположенные напротив источника α частиц. Постоянство температуры нагревателя поддерживается с помощью терморегулятора(11). Камера (2) установлена на входной щели монохроматора (4). Световое излучение выводится через кварцевое окно и регистрируется охлаждаемым фотоумножителем ФЭУ2, работающим в режиме счёта фотонов и частотомером (10).

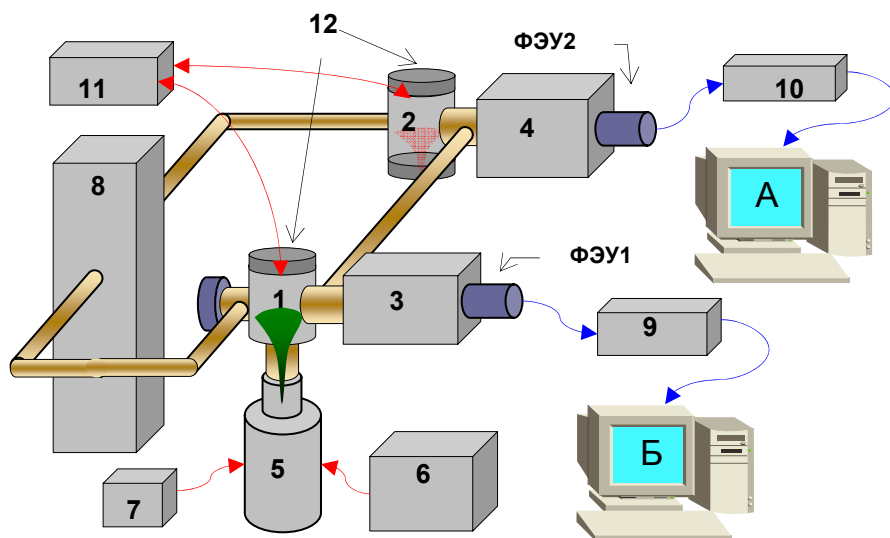
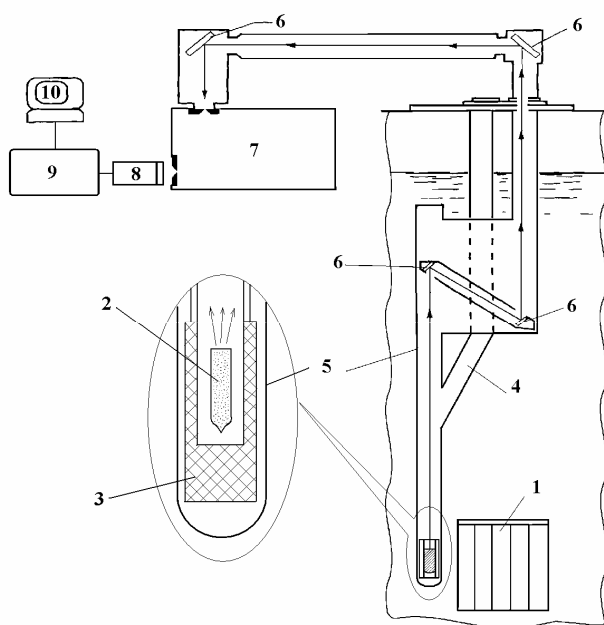


Рис.3. Схема экспериментальной установки для изучения характеристик люминесценции распылительной плазмы, образующейся при бомбардировке мишеней из металлического Cd или Zn α -частицами ^{238}Pu и быстрыми электронами.

При работе обе камеры после вакуумной откачки заполняются буферным газом (гелием) и в процессе измерений непрерывно производится его очистка.

Измерения спектров люминесценции и пространственных распределений интенсивности светового излучения производились в режиме непрерывного распыления мишени потоком альфа-частиц с энергией 5.3 МэВ от изотопного источника ^{238}Pu и продуктами $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$ нейтронной ядерной реакции. Для инициирования ядерных реакций использовались тепловые нейтроны ядерного реактора ИРТ МИФИ. Схема установки показана на рис.4. Отпаянная кварцевая кювета(2), заполненная газообразным ^3He и содержащая навеску металлического Cd или Zn, помещалась в электрическую печь коаксиальной конструкции(3) и опускалась по специальному загрузочному каналу(4) в зону облучения тепловыми нейтронами(1). Загрузочный канал был присоединен к оптическому каналу(5), по которому световое излучение кюветы выводилось до монохроматора (7) с помощью зеркал(6). Световое излучения регистрируется



фотоумножителем (8), работающим в одноэлектронном режиме.

Управление спектроскопическим комплексом осуществлялось микро ЭВМ ДЗ-28 и персональным компьютером IBM PC (10). При работе на максимальной мощности реактора ($P_{\text{реактора}} = 2500 \text{ кВт}$) поток тепловых нейтронов в месте расположения кюветы составлял около $8 \cdot 10^{11}$ нейтрон / $\text{см}^2 \cdot \text{с}$. Температура нагрева кюветы контролировалась хромель-копелевой

Рис.4. Установка “Оптический канал ИРТ”

термопарой и регулировалась автоматически регулятором температуры Щ-4231. Максимальная температура нагрева составляла 500°C . Обычно, кюветы наполнялись гелием-3 до давления 650 Торр. Перед наполнением на боковые

стенки кюветы в вакууме термическим способом распылялся исследуемый металл (Cd, Zn) до образования непрозрачной зеркальной пленки в количестве 0.5 г. В экспериментах использовались чистые металлы – изотопы ^{116}Cd и ^{64}Zn . С помощью одной кюветы можно было измерить температурную зависимость спектра люминесценции парометаллической среды $^3\text{He}\text{--Cd}$ или $^3\text{He}\text{--Zn}$.

В третьей главе приводятся результаты исследований люминесцентных характеристик плотной He-Cd плазмы. В ней представлены спектральные и температурные характеристики плазмы, образующейся при бомбардировке металлического кадмия ядерными частицами высокой энергии – продуктами $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$ нейтронной ядерной реакции и α -частицами ^{238}Pu при постоянной концентрации газа гелия-3 в кювете, равной $2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при температурах кюветы от 70°C до 480°C в условиях непрерывно действующей накачки при облучении кюветы потоком тепловых нейтронов $8 \cdot 10^{11} \text{ тепл.нейтр/см}^2 \cdot \text{с}$.

На установке с изотопным источником α -частиц ^{238}Pu работы проводились в атмосфере гелия-4 в температурном диапазоне $20 - 290^\circ\text{C}$ при различных концентрациях газа в камере ($2.69 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} - 6.75 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) в условиях непрерывно действующего облучения кадмиевой мишени потоком α -частиц.

Было обнаружено, что при распылении подогретой до температуры $220\text{--}250^\circ\text{C}$ кадмиевой мишени наблюдается аномально высокое селективное заселение бейтлеровских уровней иона CdII , в (5-7) раз превышающее заселение этих уровней в парогазовых смесях оптимального состава ($T_{\text{опт}} = 320^\circ\text{C}$, $P_{\text{Cd}} = 0.1 \text{ Торр}$)(рис.5).

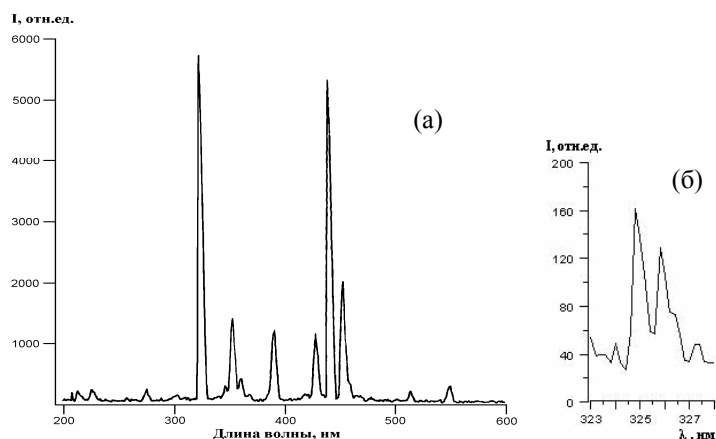


Рис.5. Аппаратурный спектр люминесценции, наблюдаемый при бомбардировке металлического кадмия α -частицами ^{238}Pu с энергией 5 МэВ при температуре фольги 240°C и давлении буферного газа гелия $P_{\text{He}} = 600 \text{ Торр}$ (а), и участок спектра $\lambda = 323\text{--}328 \text{ нм}$, измеренный с высоким разрешением при тех же условиях (б).

Интенсивность бейтлеровских спектральных линий при бомбардировке ядерными частицами подогретой кадмиевой мишени зависит экспоненциально от температуры поверхности Cd, возрастая многократно при температурах, превышающих 150-160°C, и слабо зависит от давления буферного газа:

$$I \sim \exp(-B/kT)$$

Здесь I- интенсивность линии; T- температура Cd, К; B–энергия активации данного процесса. B=72 кДж/моль для линии $\lambda=441.6$ нм. (рис.6,7).

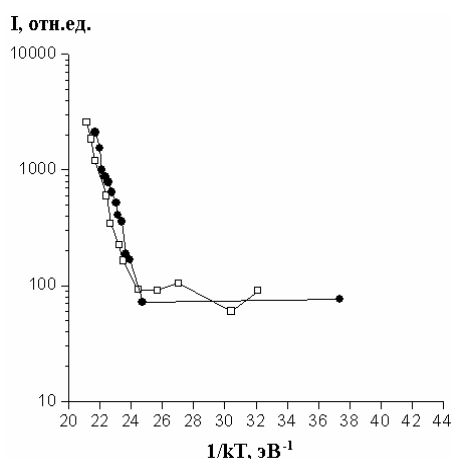


Рис.6. Температурная зависимость интенсивности бейтлеровских линий CdII при распылении металлического кадмия α -частицами. при давлении гелия 300 Торр. $\square$ – 441.6 нм, $\bullet$ – 325.0 нм (вместе с неразрешенной резонансной линией CdI 326.1 нм).

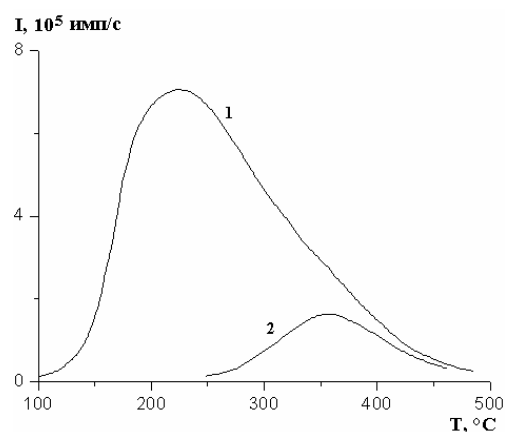


Рис.7. Интенсивность спектральных линий CdII (441,6 нм) при разных температурах кюветы при возбуждении продуктами ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{T}$ ядерной реакции. Кривая (1) –при распылении Cd плёнки; (2) –для парогазовой ${}^3\text{He}$ -Cd смеси. Давление ${}^3\text{He}$ - 650 Торр.

При температуре мишени 240°C и различных давлениях буферного газа гелия – от 76 Торр до 2280 Торр, измерены времена жизни бейтлеровских уровней иона CdII в чистом гелии и в гелии с контролируруемыми примесями газов Ne, Ar, Xe и CCl₄ при бомбардировке металлического кадмия импульсным электронным пучком с энергией 150 кэВ и длительностью 3 нс(рис.8). Определены константы столкновительного тушения $5s^2\ 2D_{5/2}$, $5s^2\ 2D_{3/2}$ уровня CdII атомами He, Ne, Ar и CCl₄, равные соответственно $9.3 \cdot 10^{-15}/[\text{Cd}]$ см⁶/с (He), $8.1 \cdot 10^{-12}$ см³/с (Ar), $1.2 \cdot 10^{-12}$ см³/с (Xe), $1.5 \cdot 10^{-13}$ см³/с (Ne) и $1.8 \cdot 10^{-10}$ см³/с (CCl₄, только для $5s^2\ 2D_{3/2}$ CdII уровня, $\lambda=325$ нм) и определены интегральные константы тушения люминесценции иона CdII ($\lambda=441.6$ нм)

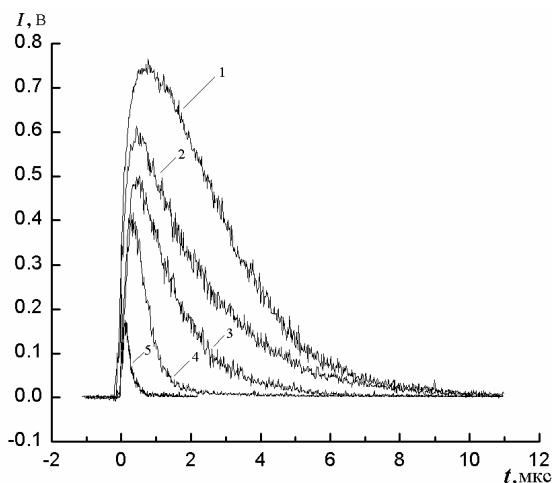


Рис.8. Временные осциллограммы импульсов люминесценции иона CdII на длине волн $\lambda = 442$ нм при возбуждении импульсным электронным пучком ($E_e = 150$ кэВ, $T_{и} = 3$ нс, $T_{Cd} = 240$ °С). 1- He (760 Торр); 2- He (760 Торр)+ Ne (1 Торр); 3- He(760 Торр)+ Xe (2 Торр) 4-He(760 Торр)+ Ar (10 Торр); 5- He (760 Торр)+CCl₄ (1 Торр).

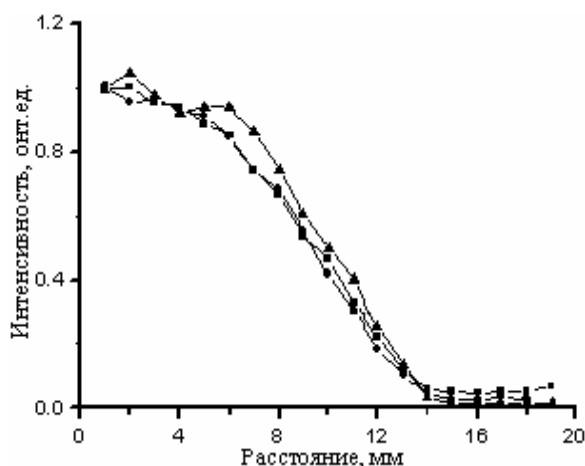


Рис.9. Пространственные распределения плотности возбужденных ионов CdII, излучающих на длинах волн 325 нм, 441.6 нм и 274.9 нм. ■- 325 нм; ▲- 441.6 нм; ● - 274.9 нм. По оси абсцисс отложено расстояние от поверхности мишени в мм. Распыление металлического Cd производится при температуре мишени 240 °С и давлении He 1900 Торр при бомбардировке α -частицами.

примесными газами Ar, Ne, Xe и CCl₄ при давлении буферного газ гелия 760 Торр, учитывающие столкновительное тушение примесями и изменение кинетики плазмохимических процессов в буферном газе за счет участия атомов примесных газов в цепочке плазмохимических реакций.

Измерены пространственные распределения плотности возбужденных ионов CdII при распылении металлического Cd α -частицами в атмосфере гелия для долгоживущих (325нм, 441.6 нм) и короткоживущей (274.9 нм) линий иона CdII. Для всех спектральных линий область свечения распыленных частиц занимает прилегающее к мишени пространство толщиной ~ 10 мм (при давлении гелия 1900 Торр)(рис.9).

Для парогазовой He-Cd смеси проведены квазистационарные расчеты температурных зависимостей интенсивности бейтлеровской линии 441.6 нм иона CdII при различных начальных концентрациях атомов кадмия при накачке продуктами ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{T}$ ядерной реакции. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными значениями. Наилучшее совпадение расчетных данных

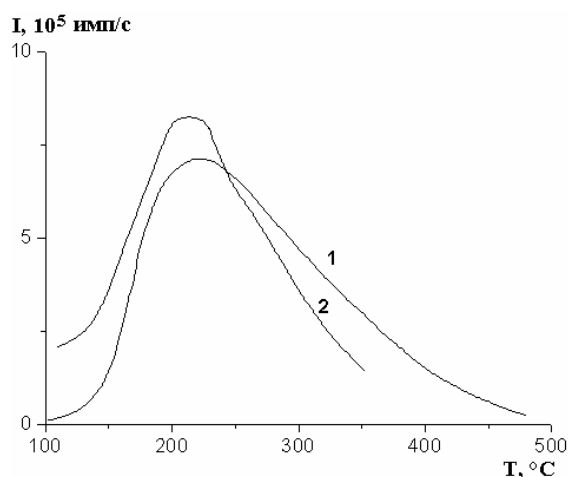


Рис.10. Интенсивность линии $\lambda = 441.6$ нм как функция температуры кадмиевой пленки.
1- экспериментальные значения.
2- результаты расчета при концентрации Cd, превышающей в 3 раза соответствующие температурные концентрации.

для парогазовой смеси и

экспериментальных данных, полученных в условиях действия распылительного механизма кадмиевой мишени, наблюдалось в случае, если начальные концентрации атомов Cd в парогазовой смеси превышали в 3 раза соответствующие температурные концентрации (рис.10). Для парогазовой He-Cd смеси проведены расчеты интенсивности линии $\lambda = 442$ нм иона CdII как функции времени при накачке коротким (3нс) импульсом быстрых электронов ($E_e = 150$ кэВ) для различных давлений буферного газа и концентрации атомов Cd в смеси $2.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Проведена оценка относительного вклада в заселение бейтлеровского $5s^2 \text{ } ^2D_{5/2}$ уровня CdII за счет распыления и поверхностной ионизации компонентами гелиевой плазмы при бомбардировке мишени электронным пучком в атмосфере гелия. Этот вклад зависит от давления гелия и в интервале давлений газа 0.25-2.5 атм описывается линейной зависимостью $\alpha = 0.28 + 0.23 \cdot P$, где P – давление He в атм.

В четвертой главе приводятся результаты исследования люминесцентных характеристик плотной He-Zn плазмы. В ней представлены экспериментальные результаты, полученные на установке “Оптический канал ИРТ” при температуре кюветы от 70°C до 600°C и концентрации гелия-3 в ней $2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При низких температурах кюветы ($< 400^\circ\text{C}$) люминесценция He-Zn смеси определялась продуктами бомбардировки металлической плёнки. При температурах выше $T_{\text{пл}} = 419^\circ\text{C}$ плёнка испарялась и люминесценция определялась процессами объемного возбуждения парогазовой смеси.

Было обнаружено, что при температурах пленки $\sim(0.5-0.7) \cdot T_{\text{пл}}$ (здесь $T_{\text{пл}}$ – температура плавления Zn), возникает механизм аномально высокого заселения бейтлеровских $4s^2 \ ^2D_{5/2,3/2}$ уровней иона ZnII и 4^3P_1 атомарного уровня ZnI , превышающих заселенность этих уровней в парогазовой He-Zn смеси при оптимальных температурных условиях накачки. (таблица 1, рис.11).

Длина волны (нм)	200°C	265°C	275°C	310°C	393°C
250.2	533	2733	1412	2790	12060
255.7	1385	7713	3827	7686	34770
307.6	928	1505	1751	1112	4367
328.5		130		241	5706
330.5		252	237	609	15260
334.5	100	372		939	25910
468		110			
472.2		229			
481		336			
589.4	1162	5270	16260	19890	33580
610.2	329		269	226	396
621.4	329	1040	2837	3232	5485
636.5	106	325	922	2055	62680
747.8	386	1166			7410
758.8					
773					

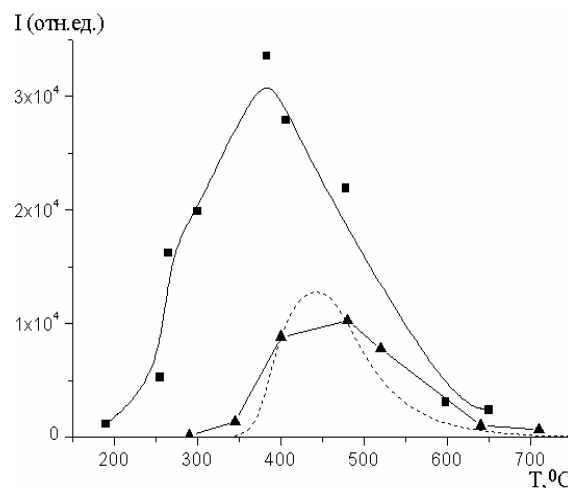


Рис.11. Температурная зависимость интенсивности бейтлеровской линии 589.4 нм ZnII при распылении металлической пленки(■) и объемном возбуждении $^3\text{He-Zn}$ смеси(▲) продуктами $^3\text{He}(n,p)^3\text{T}$ ядерной реакции. Пунктирной линией показаны расчетные значения интенсивности этой линии при $[^3\text{He}] = 2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $f^+ = 3 \cdot 10^{18} \text{ ион/см}^3 \cdot \text{с}$, $f^* = 1.53 \cdot 10^{18} \text{ атом/см}^3 \cdot \text{с}$, $[\text{Zn}]$ – определяется температурой кюветы.

Температурная зависимость интенсивности I бейтлеровских линий в диапазоне 170–380°C описывается экспоненциальным законом:

$$I \sim \exp(-B/kT).$$

Здесь $B=0.7$ эВ – энергия активации данного процесса, эВ; $k = 8.6153 \cdot 10^{-5}$ эВ/град – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура цинковой пленки, К.

Используя установку с ускорителем электронов “Арина-2” измерены времена жизни возбужденных уровней иона Zn II и $4p \ ^3P_1$ уровня Zn I при бомбардировке мишени из металлического цинка импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 кэВ и длительностью 3 – 5 нс. при нескольких

фиксированных температурах мишени в диапазоне от 300°C до 370°C и при давлениях буферного газа 0.25 атм, 0.5 атм, 0.75 атм, 1.0 атм, 1.25 атм и 1.5 атм. В качестве буферного газа использовался чистый He и He с контролируемыми добавками Ag(рис.12,13).

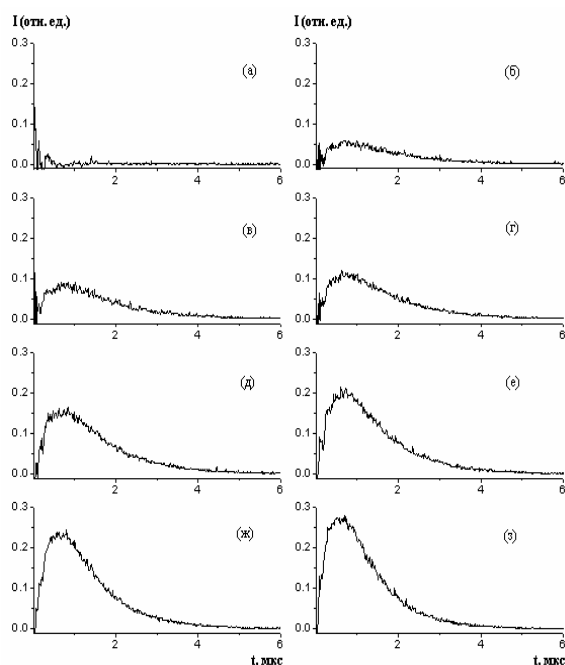


Рис.12. Осциллограммы импульсов люминесценции для перехода с верхнего бейтлеровского уровня $3d^9 4s^2 \ ^2D_{3/2}$ ($\lambda=589.4$ нм) при разных температурах мишени. (а)- 260 °С, (б)-320 °С, (в)-330 °С, (г)-340 °С, (д)-350 °С, (е)-360 °С, (ж)-370 °С, (з)-380 °С. Концентрация атомов буферного газа He равна $2.69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

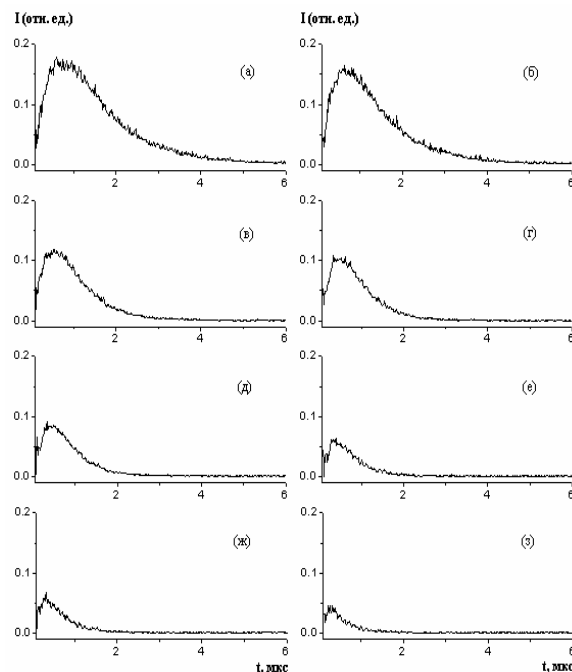


Рис.13. Осциллограммы импульсов люминесценции He-Zn-Ag смеси ($\lambda=589.4$ нм, верхний бейтлеровский уровень) при разных парциальных давлениях Ag. (а)- 0 Торр, (б)- 0.1 Торр, (в)- 0.4 Торр, (г)- 0.7 Торр, (д)- 1 Торр, (е)- 2 Торр, (ж)- 3 Торр, (з)- 5 Торр. Температура мишени – 350°C, Концентрация атомов буферного газа He равна $2.69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Эти результаты позволили определить вид функции накачки верхнего бейтлеровского $3d^9 4s^2 \ ^2D_{3/2}$ и нижнего $3d^{10} 4p \ ^2P_{1/2}$ уровней перехода $\lambda=589.4$ нм для разных значений температуры Zn мишени и давлений буферного газа He. Было обнаружено, что функция накачки содержит две компоненты – быструю и медленную. Быстрая компонента связана с процессами поверхностной ионизации, происходящими на поверхности мишени. Быстрая компонента существует в течение ~ 0.5 мкс после окончания электронного импульса. При постоянной концентрации буферного газа ($\sim 2.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) увеличение

температуры мишени от 260°C до 380°C приводит к её росту, связанным с увеличением концентрации нейтральной компоненты ZnI с ростом температуры мишени. В условиях наших экспериментов быстрая компонента функции накачки может быть также связана с процессами ионизации Пеннинга с участием He(2¹P) атомов и Zn. Медленная компонента возникает спустя ~1 мкс после окончания импульса электронов, имеет длительность ~1 мкс и обусловлена объемными плазмохимическими процессами в буферном газе.

Определены отсутствующие константы столкновительного тушения бейтлеровского 3d⁹4s² 2D_{3/2} уровня атомами буферного газа He(рис.14) и атомами Zn: $K_{\text{He}} = 1.59 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $K_{\text{Zn}} = 9.02 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Измерен интегральный коэффициент тушения K этого уровня примесным газом Ar, учитывающий как столкновительное тушение уровня Ar, так и снижение накачки из-за участия примесного газа в цепочке плазмохимических реакций.

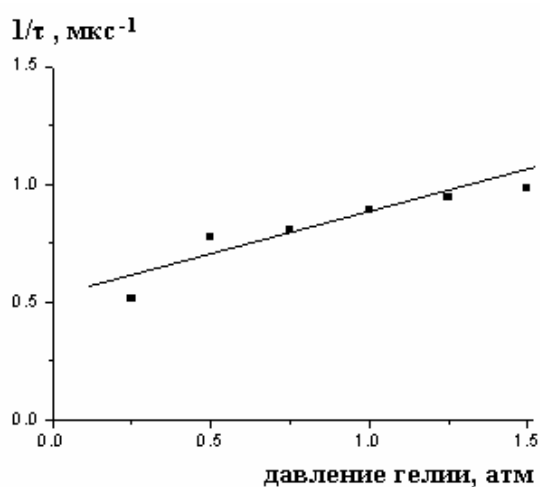


Рис.14. Зависимость обратного времени жизни уровня 4s² 2D_{3/2} ZnII от давления He. T_{zn}=350 °C.

$K_{\text{Ar}} = 3.8214 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (для P_{He} = 760 Торр при комнатной температуре).

В главе приводится модель кинетических процессов в плотной ³He-Zn парогазовой смеси при высоких температурах и представлены результаты расчета компонент ³He-Zn плазмы и спектров люминесценции для условий экспериментов на реакторах ИРТ-МИФИ и ВИР-2М. Спектральный состав излучения

рассчитывался с учетом по уровневой кинетики для наиболее ярких спектральных линий люминесценции ³He-Zn смеси, наблюдавшихся экспериментально при высоких температурах. Совпадение в температурном диапазоне 200–600°C расчетных значений с экспериментальными имело место только в том случае, если в расчете использовались завышенные значения

скоростей образования ионов He^+ , равные концентрации ионов He^+ в треке отдельной частицы.

Пространственные характеристики люминесценции, возникающей при бомбардировке мишени из металлического цинка импульсным пучком быстрых электронов, исследовались фотографическим методом. Снимки, сделанные при различных температурах мишени и давлениях He , приведены на рис.15.

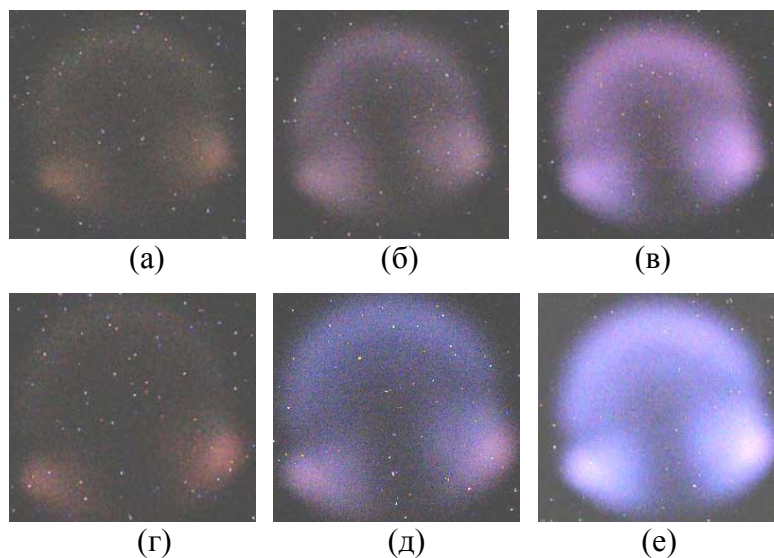


Рис.15 Фотографии области люминесценции He-Zn смеси при бомбардировке быстрыми электронами при разных давлениях буферного газа He и температурах мишени.

(а) P_{He} -0.125 атм, T -220 °С,
 (б) P_{He} -0.125 атм, T -330 °С,
 (в) P_{He} -0.125 атм, T -380 °С,
 (г) P_{He} -0.25 атм, T -220 °С,
 (д) P_{He} -0.25 атм, T -330 °С,
 (е) P_{He} -0.25 атм, T -380 °С.

Пятая глава – заключительная. В ней рассматриваются основные источники световой эмиссии при бомбардировке металлической мишени частицами высокой энергии, представлены расчеты методом Монте_Карло траекторий движения быстрых электронов ($E_0=120$ кэВ) в металлическом Cd и Zn и определены размеры зоны диссипации их энергии, обсуждаются особенности световой эмиссии атомов и ионов металлов Cd и Zn при бомбардировке высокоэнергичными частицами.

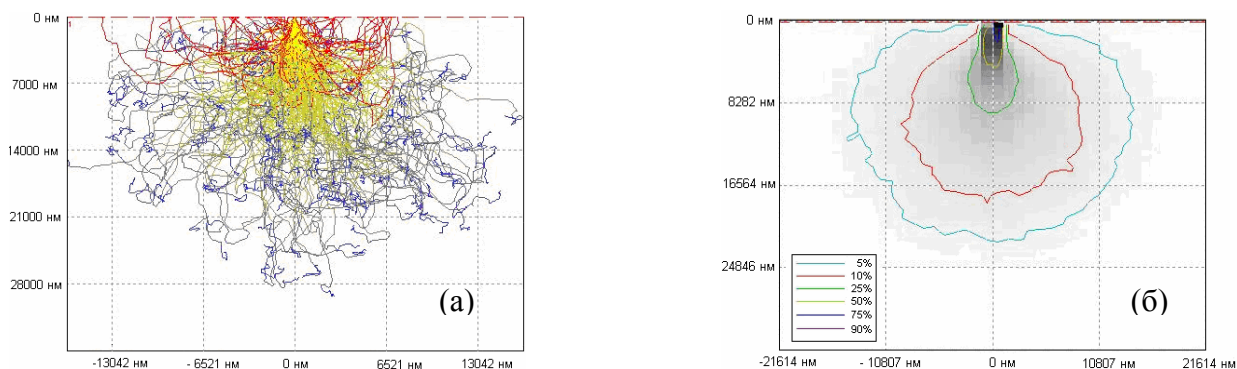


Рис.16. Результаты расчёта с помощью программы “Casino” для мишени из Zn траекторий движения электрона (а) и зоны диссипации кинетической энергии электронов (б) при бомбардировке электронами энергией 120 кэВ.

Последний параграф этой главы посвящен рассмотрению перспектив использования явления распыления мишеней из металлического Cd и Zn в лазерах с ядерной накачкой.

Основные результаты работы

Среди наиболее значимых результатов диссертационной работы можно выделить следующие.

1. Впервые экспериментально обнаружено, что при бомбардировке мишеней из металлического кадмия и цинка при температурах мишени $\sim (0.5-0.7) \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления металла наблюдается аномально высокое селективное заселение бейтлеровских уровней ионов металлов, в 5-7 раз превышающее заселенность этих уровней в парогазовых смесях оптимального состава. Интенсивность бейтлеровских спектральных линий зависит экспоненциально от температуры поверхности мишени, возрастая многократно при температурах, превышающих 150-160°C, и слабо зависит от давления буферного газа:

$$I \sim \exp(-B/kT)$$

Здесь I – интенсивность линии; T – температура мишени, K ; B – энергия активации данного процесса. $B=72$ кДж/моль для линии $\lambda=441.6$ нм(CdII) и ~ 70 кДж/ моль для линии 589.4 нм(ZnII).

2. При температуре мишени 240°C (Cd) и 300°C– 370°C (Zn) и различных давлениях буферного газа гелия – от 76 Торр до 2280 Торр, измерены времена жизни бейтлеровских уровней ионов CdII и ZnII в чистом гелии и в гелии с контролируемыми примесями газов Ne, Ar, Xe и CCl₄ (Cd) и Ar (Zn) при бомбардировке импульсным электронным пучком с энергией 150 кэВ и длительностью 3 нс. Определены константы столкновительного тушения $5s^2\ ^2D_{5/2}$, $5s^2\ ^2D_{3/2}$ уровня CdII атомами He, Ne, Ar и CCl₄, равные соответственно $9.3 \cdot 10^{-15}/[Cd]$ см⁶·с⁻¹ (He), $8.1 \cdot 10^{-12}$ см³/с (Ar), $1.2 \cdot 10^{-12}$ см³/с (Xe), $1.5 \cdot 10^{-13}$ см³/с (Ne) и $1.8 \cdot 10^{-10}$ см³/с (CCl₄, только для $5s^2\ ^2D_{3/2}$ CdII уровня, $\lambda=325$ нм).

Определены интегральные константы тушения люминесценции иона CdII ($\lambda=441.6$ нм) примесными газами Ar, Ne, Xe и CCl₄ при давлении буферного газа гелия 760 Торр, учитывающие столкновительное тушение примесями и изменение кинетики плазмохимических процессов в буферном газе за счет участия атомов примесных газов в цепочке плазмохимических реакций.

Проведена оценка относительного вклада в заселение бейтлеровского $5s^2\ ^2D_{5/2}$ уровня CdII за счет распыления и поверхностной ионизации компонентами гелиевой плазмы при бомбардировке мишени электронным пучком в атмосфере гелия. Этот вклад зависит от давления гелия и в интервале давлений газа 0.25-2.5 атм описывается линейной зависимостью $\alpha = 0.28 + 0.23 \cdot P$, где P –давление He в атм (Температура мишени = 240°C).

3. Измерены времена жизни возбужденных уровней иона ZnII и $4p\ ^3P_1$ уровня Zn I при нескольких фиксированных температурах мишени в диапазоне от 300°C до 370°C и при давлениях буферного газа 0.25 атм, 0.5 атм, 0.75 атм, 1.0 атм, 1.25 атм и 1.5 атм. В качестве буферного газа использовался чистый He и He с контролируемыми добавками Ar. Определены отсутствующие константы столкновительного тушения бейтлеровского $3d^9 4s^2\ ^2D_{3/2}$ ZnII уровня атомами буферного газа He и атомами Zn: $K_{He} = 1.59 \cdot 10^{-14}\ \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $K_{Zn} = 9.02 \cdot 10^{-10}\ \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Измерен интегральный коэффициент тушения K этого уровня примесным газом Ar, $K_{Ar} = 3.8214 \cdot 10^{-11}\ \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (для $P_{He} = 760$ Торр при комнатной температуре)

4. Рассмотрены основные физические процессы, протекающие в плотных газовых средах при бомбардировке металлической мишени ядерными частицами высокой энергии и быстрыми электронами. Распыление металлов заряженными частицами позволяет получать при комнатных температурах концентрации труднолетучих металлов таких, как Ag, Cu, Al, Mo, W, U ($\sim 10^{14}$ атом/см³) в количествах, достаточных для работы лазерных трубок при пониженных или даже комнатных температурах. Такие лазеры обладают улучшенными рабочими характеристиками по сравнению с парометаллическими лазерами традиционного типа с внешним разогревом рабочего металла.

Для парогазовых He-Cd и He-Zn смесей разработана модель кинетических процессов и проведены квазистационарные расчеты температурных зависимостей интенсивности бейтлеровских линий (441.6 нм CdII, 589.4 нм ZnII) при различных начальных концентрациях атомов металла. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными значениями.

5. Измерены пространственные распределения плотности возбужденных ионов CdII при распылении металлического Cd α -частицами в атмосфере гелия для долгоживущих (325 нм, 441.6 нм) и короткоживущей (274.9 нм) линий иона CdII. Для всех спектральных линий область свечения распыленных частиц занимает прилегающее к мишени пространство толщиной ~ 10 мм (при давлении гелия 1900 Торр).

6. Методом Монте-Карло проведены расчеты траекторий движения электронов и области диссипации кинетической энергии в мишени из металлического Zn и Cd при её бомбардировке электронами с энергией ~ 150 кэВ.

7. Проведена модернизация экспериментальных установок “Оптический канал ИРТ” и установки на основе малогабаритного ускорителя электронов “Арина-2”, что позволило провести исследования спектрально-кинетических, температурных и пространственных характеристик люминесценции, возникающей при бомбардировке мишеней из металлического кадмия и цинка продуктами ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{T}$ нейтронной ядерной реакции, α -частицами радионуклида ${}^{238}\text{Pu}$ и импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 кэВ.

Основные публикации по теме диссертации

1. Миськевич А.И., Лю Тао. Саламаха Б.С. Люминесцентные характеристики плотной $^3\text{He-Zn}$ плазмы при ядерной накачке.// Тр.IV международной конф. “Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы”. 18-21 сент. 2007 г., г. Обнинск. т.1. с.73-80.
2. Миськевич А.И., Лю Тао. Температурные характеристики люминесценции плазмы $^3\text{He-Zn}$ высокого давления при ядерной накачке // Оптика и спектроскопия. 2008. т.105. В.5. с.755-763
3. Миськевич А.И., Лю Тао. Влияние примесей Ar, Ne, Xe и CCl_4 на кинетику люминесценции иона CdII (переход $5s^2 \ ^2D_{5/2}-5P \ ^2P_{3/2} \ \lambda=441.6 \text{ нм}$) в He-Cd смеси // Оптика и спектроскопия. 2009. т.107. №.1. с.48-52.
4. Миськевич А.И., Лю Тао. Кинетика люминесценции при распылении металлического Cd импульсным пучком быстрых электронов в среде гелия // Журнал технической физики. 2010. т.80. №.2. с.105-110.
5. Миськевич А.И., Лю Тао. Спектрометрическая установка для измерения характеристик распылительной плазмы.// Сборник научных трудов “Научная сессия МИФИ 2008”, т.2.с.88
6. Миськевич А.И., Саламаха Б.С., Лю Тао. Люминесцентные характеристики распылительной плазмы.// Сборник научных трудов “Научная сессия МИФИ 2008”, т.2.с.58
7. Лю Тао, Миськевич А.И.. Эмиссия возбужденных ионов при распылении металлического кадмия ядерными частицами.// Сборник научных трудов “Научная сессия МИФИ 2009”, т.2.с.236
8. Миськевич А.И., Гуо Цзинь Бо, Лю Тао, Спектроскопический комплекс для изучения процессов возбуждения активных сред эксимерных и парометаллических ионноэмиссионных лазеров с ядерной накачкой.// Сборник научных трудов “Научная сессия МИФИ 2010”, т.2.с.195.