

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А.М. Прохорова



003054032

или вручную

Гундиенков Владимир Анатольевич

**Моделирование взаимодействия заряженных пылинок, распространения
волны ионизации и процесса экстракции ионов в лазерном разделении
изотопов**

(Специальность 01.04.21 – лазерная физика)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Яковленко Сергей Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Федоров Михаил Владимирович

доктор физико-математических наук
Дьячков Лев Гаврилович

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук (ФИАН)

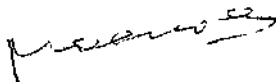
Защита состоится 4 апреля 2007 года в 15.00 на заседании диссертационного
совета Д-002 063.01 в ИОФ РАН по адресу:
119991, ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН

Автореферат разослан « 14 » апреля 2007 года

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н. И.А. Маслов



1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В диссертации представлено рассмотрение трех физических задач, представляющихся актуальными. Рассмотрено: 1) взаимодействие заряженных пылинок микронных размеров в плазме, 2) распространение волны размножения электронов фона в газе, находящемся в сильном электрическом поле; 3) экстракция ионов из плазмы при лазерном разделении изотопов методом селективной фотоионизации. Эти задачи в настоящее время представляются актуальными в связи с интенсивно проводимыми экспериментальными исследованиями в соответствующих направлениях.

1. Рассмотрение плазмы, в которой существенную роль играют заряженные частицы микронных размеров (так называемой пылевой плазмы) представляет интерес как фундаментального, так и прикладного характера (см. литературу в [1,2]). Особый интерес связан с наблюдением в пылевой плазме коллективных эффектов, обусловленных ее неидеальностью [3-6]. При этом ключевым вопросом является исследование механизма взаимодействия пылинок с учетом поляризации их зарядовых оболочек.

Согласно целому ряду экспериментов (см., например, [3-6]) пылинки микронных размеров в термоэмиссионной плазме, плазме газового разряда и ядерно-возбуждаемой плазме могут образовывать пространственные структуры. В связи с этим естественно предположить наличие сил притяжения, обусловленных поляризацией зарядовых оболочек дебаевских атомов

Проблема взаимодействия пылинок в пылевой плазме близка к проблеме взаимодействия коллоидных частиц в электролитах. Само понятие дебаевского радиуса пришло в плазму из теории электролитов. Однако, несмотря на то, что физика коллоидных частиц в электролитах исследуется давно [10], вопрос о возникновении сил притяжения и там пока не вполне выяснен (по крайней ме-

ре, для случая, когда диаметр частицы меньше дебаевского радиуса см например, [11-15]). Рассмотрение взаимодействия заряженных пылинок микронных размеров в плазме проведено в главе 1.

2 Вопрос о распространении волны размножения электронов фона (ВРЭФ) в плотном газе под воздействием электрического поля высокой напряженности важен для понимания механизма генерации мощных субнаносекундных пучков в газах атмосферного давления в оптимальных условиях [16-19] Быстрые электроны предимпульса осуществляют фоновую ионизацию газа, подготавливая распространение ВРЭФ. В то же время, волна размножения, приближаясь к аноду, приводит к тому, что выполняется нелокальный критерий убегания электронов [16-19] и в прианодной области генерируется мощный пучок

Особый интерес представляет и то, что плазма, формируемая таким ВРЭФ-разрядом, является переохлажденной по степени ионизации (рекомбинационно-неравновесной), а на таких средах работают плазменные лазеры [20-22,36,37] Ситуация во многом аналогична накачке плотного газа импульсом электронного пучка. Соответственно, плазма послесвечения волны размножения фоновых электронов перспективна для получения лазерной генерации на тех переходах, на которых была ранее получена генерация в плотном газе при накачке электронным пучком и в послесвечении импульсного разряда [20-22,36,37]

Двумерное моделирование ВРЭФ проведено в главе 2

3 Экстракция ионов из плазмы является одним из ключевых процессов при лазерном разделении изотопов методом AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotope Separation) Это процесс особенно важен при выделении весовых количеств редкого изотопа (см например, обзоры [23-26]) В этом случае целесообразно говорить о двух этапах экстракции. На первом этапе ионы вытягиваются из

плазменного сгустка, на втором – транспортируются на коллектор. При этом коллектор находится в области геометрической тени, где опасность засорения атомами основного изотопа достаточно мала.

Рассмотрению процесса вытягивания ионов в рамках одномерной (плоской и цилиндрической) нестационарной модели двухжидкостной гидродинамики данная глава 3

Цель работы

Цель работы состояла в построении моделей, адекватных перечисленным задачам и исследовании этих задач численными методами.

1. В задаче о взаимодействии заряженных пылинок основной задачей было достаточно надежно выявить возможность таких параметров плазмы, при которых возможно притяжение заряженных пылинок на основе поляризационных сил.

2. В задаче о распространении волны размножения электронов малой фоновой плотности основной задачей было определить зависимость времени прохождения волны размножения между электродами от напряжения на электродах и других параметров задачи.

3. В задаче об экстракции ионов в лазерной плазме основной задачей было рассмотреть характерные времена вытягивания ионов. При больших наработках редкого изотопа становятся существенными ограничения токов экстракции, обусловленные объемным зарядом плазменного шнура, и связанный с этим рост характерного времени вытягивания основного количества ионов из плазмы. Для эффективного сбора наработанных ионов это время должно быть меньше времени между импульсами лазерной ионизации пара.

Научная новизна диссертации

Новыми в диссертации являются разработанные модели рассмотренных задач и методы решения.

1. В задаче о взаимодействии заряженных пылинки имеет место существенное отличие от предыдущих работ, как в постановке задачи, так и в методе решения

Во-первых, в отличие от целого ряда работ рассмотрена ситуация, когда суммарный заряд пылинки не пренебрежимо мал по сравнению с суммарным зарядом частиц плазмы (одного знака), окружающей пылинку. Более того, показано, что притяжение оказывается наиболее существенным, когда почти весь заряд одного из знаков сосредоточен на пылинках, и зарядовые облака, соответственно, состоят из зарядов одного (противоположного) знака.

Во-вторых, в рассмотрении свойств дебаевской молекулы¹, существенно использован тот факт, что дебаевский атом имеет определенную структуру. В частности, даже если радиус пылинки много меньше дебаевского радиуса, ее заряд, как правило, не может быть рассмотрен в приближении дельта-функции

В третьих, вычисляется непосредственно результирующая сила, действующую на пылинку со стороны другой пылинки и ее зарядовой оболочки, а не потенциальная энергия системы. Зависимость энергии взаимодействия пылинки от расстояния между ними определяется интегрированием этой силы. При этом решение уравнения Пуассона-Больцмана осуществляется в не очень распространенной системе координат, основанной на овалах Кассини [27,28]. Именно это позволяет с большой точностью вычислять напряженность поля вблизи поверхности малой пылинки и надежно определить силу, действующую на пылинку.

2. Волна размножения электронов фона рассмотрена в двумерной геометрии впервые. Ранее [29-31] было получено аналитическое выражение для ско-

¹ Заряженную пылинку, окруженную облаком термодинамически равновесных зарядов противоположного знака, следуя [7], мы называем дебаевским атомом. Аналогично вводится понятие дебаевской молекулы [8,9] и дебаевского кристалла. Свойства таких дебаевских систем математически задаются распределением Больцмана и уравнением Пуассона, т.е. уравнением Пуассона-Больцмана

рости точки фронта ВРЭФ и рассмотрено ее распространение в одномерной геометрии. В данной работе учитывалось изменение формы плазменного ступенька, образующегося при распространении ионизации, и на каждом временном шаге решалось двумерное уравнение Лапласа для потенциала электрического поля. Для скорости продвижения точек фронта использовалось аналитическое выражение, полученное в [29-31].

3 Задача об экстракции ионов из плазмы рассмотрена в рамках одномерных задач – плоской и цилиндрической. При этом решались нестационарные уравнения двухжидкостной гидродинамики. Получены некоторые аналитические выражения для времени экстракции ионов, которые сопоставлены с численным решением и экспериментальными данными [32].

Положения диссертации, выносимые на защиту

Основные положения, представляемые к защите, можно сформулировать следующим образом.

1 В задаче о взаимодействии пылинок наиболее существенны следующие положения:

1.1 Возникновение сил притяжения одноименно заряженных пылинок обусловлено поляризацией их зарядовых оболочек. В отсутствие поляризации отсутствует и притяжение. Сила притяжения формируется за счет поляризации большей части электронов зарядовой оболочки. Поляризация кода несущественна.

1.2. Силы притяжения пылинок возникают на сравнительно большом расстоянии, немного меньшем среднего расстояния между пылинками. При этом дебаевский радиус должен быть примерно равен половине среднего расстояния между пылинками.

1.3 Притяжение имеет место, если заряды одного из знаков сосредоточены преимущественно на пылинках. Если пылинки несут пренебрежимо малую

долго заряда одного из знаков, на всех расстояниях имеет место отталкивание пылинок

2. В задаче о распространении волны размножения электронов фона в газе, находящемся в сильном электрическом поле наиболее существенны следующие положения

2 1 Волна размножения ускоряется по мере удаления от стартового электрода. Иначе говоря, ВРЭФ движется с ускорением

2 2 Время прохождения волны размножения между пластинами конденсатора резко падает с ростом напряженности поля, между ними. При высоких напряженностях поля время прохождения ВРЭФ между электродами соответствует моменту генерации мощных пучков в экспериментах [33,34]. Большая скорость ВРЭФ может объяснить тот факт, что в условиях экспериментов [35] пика тока пучка в газе появляется раньше, чем в вакууме.

2 3 В послесвечении ВРЭФ должны реализоваться условия, удобные для реализации плазменных лазеров [20-22,36,37]

3. В задаче об экстракции ионов из плазмы при лазерном разделении изотопов методом селективной фотоионизации наиболее существенны следующие положения:

3 1 При помещении плазмы в электрическое поле, которое не может разорвать все электроны и ионы плазменного сгустка, процесс экстракции ионов носит квазистационарный характер. Некоторое количество электронов покидает плазменный сгусток, и он приобретает потенциал близкий к потенциалу анода. Затем происходит вытягивание ионов.

3 2. Ионный ток на катод хорошо описывается законом трех вторых, в котором в качестве расстояния между электродами фигурирует расстояние от границы плазменного сгустка до катода, а в качестве разности потенциалов – разность потенциалов между обкладками конденсатора. Соответственно, время

экстракции ионов определяется интегрированием ионного тока, определяемого законом трех вторых

3 3. Характерное время экстракции ионов, наблюдаемое в экспериментах хорошо согласуется со временем, найденным на основе численного решения уравнений нестационарной двухжидкостной гидродинамики и качественно согласуется с аналитическими результатами

Научная и практическая ценность

Научная и практическая ценность в основном определяются актуальностью работы и новизной полученных результатов. Акцентируем внимание на некоторых вопросах.

1. В задаче о взаимодействии пылинкок научный интерес представляют два важных вывода о критериях проявления коллективных явлений

а) в случае термoeлектрошной плазмы плотность электронов должна быть такой, чтобы дебаевский радиус примерно равнялся половине среднего расстояния между пылинками,

б) в плазме газового разряда и в ядерно-возбуждаемой плазме, кроме того, свойства источника ионизации и плотность пылинкок должны быть согласованы так, чтобы основной (обычно отрицательный) заряд несли пылинки

2. Разряды на основе волны размножения электронов фона (ВРЭВ - разряды) представляют значительный интерес с двух точек зрения.

Во-первых, на их основе получены мощные субнаносекундные пучки электронов в различных газах при атмосферном давлении. Волна размножения, приближаясь к аноду, приводит к тому, что выполняется нелокальный критерий убегания электронов и генерируется электронный пучок [16,17].

Во вторых, плазма, формируемая ВРЭВ - разрядом, является переохлажденной по степени ионизации (рекомбинационно-неравновесной), а на таких средах работают плазменные лазеры [20-22,36,37]

Кроме того, ВРЭВ - разряды представляют интерес для создания эксипламп, дающих мощное спонтанное излучение в импульсе с единицы объема

Отметим, что сам факт существования ВРЭВ – разрядов получил недавно косвенное экспериментальное подтверждение. В работе [38] было показано, что при субнаносекундном фронте импульса высокого напряжения пространственное распределение свечения в газе атмосферного давления между плоским и сферическим (а также острым) электродом имеет объемный характер. При этом геометрия светящихся областей почти не меняется при смене знака подаваемого напряжения. Например, разряд с острия при отрицательном потенциале выглядит примерно так же, как разряд с острия при положительном потенциале.

3 Процесс экстракция ионов из плазмы особенно сложен при выделении весовых количеств редкого изотопа (см например, обзоры [23-26]). Поэтому его рассмотрение представляет практическую ценность. При больших параболках редкого изотопа становятся существенными ограничения токов экстракции, обусловленные объемным зарядом плазменного шнура, и связанный с этим рост характерного времени вытягивания основного количества ионов из плазмы. Для эффективного сбора параболкашых ионов это время должно быть меньше времени между импульсами лазерной ионизации пара. Представленные в диссертации расчеты использовались в работах по лазерному разделению изотопов, проводимых в ИОФРАИ совместно с НПО ЛАД.

Личный вклад автора

Все исследования, определившие записываемые положения, выполнены лично автором или при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит в

- выборе методов решения
- проведении численных расчетов

- анализе и интерпретации результатов численного моделирования и расчетов

Работа выполнялась под непосредственным научным руководством С.И. Яковленко, который определял выбор направления исследований. Вычислительные аспекты задачи о взаимодействии заряженных пылинкок обсуждались с

Ю.И. Сьцько. В работе над задачей об экстракции ионов из лазерной плазмы принимал участие, А.Н. Ткачев, в работе над вычислительными аспектами этой задачи большую помощь оказал В.В. Савельев

Апробация результатов работы

Материалы, включенные в диссертацию, опубликованы в 8 печатных работах в рецензируемых журналах и сборниках, общий список публикаций включает 8 работ

Полученные результаты докладывались на научных семинарах ИОФАН, на ежегодной научно-координационной сессии "Исследования неидеальной плазмы" (2002, 2003 г, руководитель В.Е. Фортгов), на регулярно проводимых Международных конференциях «Лазеры на парах металлов и их применение» (Ростов-на-Дону, 2002,2004 гг.), на Забабахских научных чтениях (Спежинск, 2003 г) Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (ICPIG, Германия, Greifswald 2003)

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений 1-3 и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 118 страниц, в том числе 23 рисунка, 1 таблица и 77 литературных ссылок

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены вопросы, связанные с актуальностью проведенной диссертационной работы, сформулирована ее цель, научная новизна, научная и практическая ценность, приведены защищаемые положения

Глава 1 посвящена моделированию взаимодействия заряженных пылинок в облаках термодинамически равновесных зарядов

В п п 1.1. Введение дается краткий обзор проблемы, вводятся некоторые термины, рассмотрены методические отличия от других работ по теме Эти отличия состоят в первую очередь в том, что вычисляется непосредственно результирующая сила, действующая на пылинку со стороны другой пылинки и зарядовой оболочки, а не потенциальная энергия системы

В п п 1.2. Постановка задачи записывается основное модельное уравнение Пуассона-Больцмана, вводятся безразмерные величины, проводится безразмеривание уравнения и ставятся граничные условия Введен параметр δ , такой, что величина $1 - \delta$ характеризует долю зарядов, которую несут пылинки (при $\delta = 0$ все заряды одного из знаков несут пылинки) Одним из граничных условий является условие на напряженность поля на поверхности пылинок определяемую ее зарядом Вторым граничным условием является задание поверхности, на которой поле равно нулю.

В п п 1.3. Некоторые свойства дебаевских атомов рассмотрены свойства пылинки, окруженной облаком зарядов противоположного знака, существенные при дальнейшем рассмотрении дебаевской молекулы В п п 1.3.1. Дебаевский атом рассмотрен уединенный дебаевский атом в облаке зарядов одного знака, также дебаевский атом в плазме В п п 1.3.2. О характере взаимодействия пылинок разобраны предельные случаи двух взаимодействующих дебаевских атомов с одной стороны при отсутствии взаимодействия оболочек друг другом (расстояние велико), с другой стороны взаимодействие двух заряженных плоскостей На основе рассмотрения точного решения для плоского случая показано, что требования к точности решения уравнения Пуассона-Больцмана вблизи поверхности пылинки очень высоки Поэтому в обычных системах ко-

ординат трудно добиться достаточной точности в вычислении силы, действующей на малые пылинки.

В п п 1.4. Метод решения двуцентровой задачи рассмотрены координаты Кассини в которых ведется решение задачи, их преимущества перед другими системами координат Во-первых, семейство овалов Кассини качественно соответствует картине эквипотенциалей для двух одинаково заряженных частиц, находящихся в фокусах овала Во-вторых, область решения уравнения в этих координатах становится прямоугольной. В-третьих, плотность овалов экспоненциально сгущается к поверхности пылинок Это позволяет использовать равномерную сетку даже при больших расстояниях между частицами малых размеров Кратко рассмотрен численный метод решения уравнения Пуассона-Больцмана. Оно решалось методом итераций Гаусса-Ньютона.

В п п. 1.5. Результаты расчетов приводятся результаты расчетов для различных типов окружающих облаков, в 1.5.1. Дебаевская молекула в облаке зарядов одного знака ($\delta = 0$) приведены результаты расчетов для облаков содержащих заряды только противоположного с частицей знака (заряд одного из знаков содержится на пылинках) Обосновывается выбор параметров расчетов, обсуждается зависимость силы взаимодействия пылинок от расстояния между ними и от размеров дебаевских атомов В 1.5.2. Дебаевская молекула в облаке заряда обоих знаков ($\delta \neq 0$) приведены результаты расчетов для облаков, содержащих заряды обоих знаков Также рассматривается зависимость силы взаимодействия пылинок от расстояния между ними. Приводится критика некоторых работ основанных на аналитическом подходе к рассматриваемой проблеме

В п п. 1.6. Заключение подводятся итоги проведенного рассмотрения, проведенного в этой главе, формулируются выводы о критериях проявления коллективных явлений в пылевой плазме (см. ниже раздел Заключение)

Глава 2 посвящена моделированию распространения волны размножения электронов фона в плотном газе, находящемся в сильном электрическом поле

В п.п. 2.1 Введение дается краткий обзор проблемы, подчеркивается важность вопроса о распространении волны распространения электронов фона для понимания механизма генерации мощных субнаносекундных пучков в газах атмосферного давления в оптимальных условиях

В п.п. 2.2 Постановка задачи дается краткое описание двумерной модели распространения волны ионизации. Она состоит в том, что скорость каждой точки границы волны размножения определяется полученным ранее аналитическим выражением [30], а напряженность поля и градиент модуля напряженности поля вычисляются на основе решения уравнения Лапласа для заданной конфигурации плазменного сгустка.

В п.п. 2.3 Алгоритм решения задачи приводится описание метода решения задачи о распространении ВРЭФ, описывается, в какой геометрии и с какими граничными и начальными условиями проводилось пошаговое решение уравнения Лапласа. На каждом шаге уравнение Лапласа решалось методом конечных элементов. Граница сгустка плазмы аппроксимировалась многоугольником при этом контролировалось, чтобы многоугольник, являющийся стартовым для следующего временного шага, был всюду выпуклым

В п.п. 2.4. Результаты расчетов исследовалась зависимость развития волны размножения от напряжения U_0 на обкладках конденсатора при различных расстояниях между ними. Получены зависимости времени прохождения расстояния между электродами от приведенной напряженности поля при различных расстояниях между электродами и начальном радиусе сгустка.

Проведены оценки, показывающие, что важным применением разрядов на основе ВРЭФ может явиться тот факт, что послесвечения ВРЭФ должны реали-

зоваться условия, удобные для реализации плазменных лазеров и мощных эк-
силламп

В п.п. 2.5 заключение формулируются основные результаты главы

Глава 3 Посвящена задаче о времени экстракции ионов при лазерном
разделении изотопов.

В п.п. 3.1 Введение дается краткий обзор проблемы, рассматриваются,
обусловленные объемом зарядом, ограничения на токи экстракции обосно-
вывается выбранный подход к решению. Он основан на численном решении
одномерных уравнений гидродинамики [39]

В п.п. 3.2. Оценка времени вытягивания ионов по закону «трех вторых»
делаются аналитические оценки времен экстракции для плоской и цилиндриче-
ской геометрии обкладок конденсатора, рассматриваются ограничения модели
и обосновывается численный подход к решению.

В п.п. 3.3. Расчеты в рамках одномерной нестационарной модели обсу-
ждаются результаты расчетов на основе уравнений двухжидкостной гидродина-
мики в различных геометриях конденсатора. В п.п. 3.3.1 Плоская геометрия
рассматриваются особенности плоской модели, указываются трудности, возник-
ающие при решении, пути и методы их преодоления, обсуждаются результаты
расчетов эволюции плазменного слоя в плоской геометрии. В п.п. 3.3.2 Цилин-
дрическая геометрия рассматриваются особенности цилиндрической модели,
обсуждаются трудности возникающие при решении, методы их преодоления,
приводятся результаты расчетов эволюции плазменного слоя в цилиндрической
геометрии

В п.п. 3.4. Сравнение с результатами экспериментов проводятся сравне-
ния полученных результатов с результатами измерений времен экстракции ио-
нов из плазменных сгустков. Показано качественное совпадение результатов
расчетов и экспериментальных данных

В п.п 3.5. Заключение делаются выводы следующие из результатов рассмотрения

В Приложении 1 приводятся справочные материалы по формулам и выражениям, используемым при решении задачи взаимодействия двух заряженных частиц

В Приложении 2 приводятся характеристики поля, создаваемого проводящим эллипсоидом

В Приложении 3 приведены, в справочных целях, некоторые, наиболее важные и интересные с вычислительной точки зрения, формулы вычислительной схемы решения задачи о характерном времени вытягивания ионов из плазменного сгустка при лазерном разделении изотопов.

В Заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

1 Рассмотрена задача о взаимодействии заряженных пылинок в плазме и на основе рассмотрения сделаны следующие выводы

1.1 Показано, что силы притяжения обусловлены поляризацией зарядовых оболочек дебаевских атомов. В отсутствие поляризации отсутствует и притяжение. Сила притяжения формируется за счет поляризации большей части электронов зарядовой оболочки. Поляризация кора несущественна

1.2 Из расчетов следует, что силы притяжения пылинок возникают на сравнительно большом расстоянии, примерно равном среднему расстоянию между пылинками. При этом дебаевский радиус должен быть примерно равен половине среднего расстояния между пылинками

1.3 Показано, что притяжение имеет место, если заряды одного из знаков сосредоточены преимущественно на пылинках. Если пылинки несут малую долю заряда одного из знаков, на всех расстояниях имеет место отталкивание пылинок.

1.4 Показано, что при некотором соотношении между плотностью электронов и плотностью пылинок имеет место равновесие дебаевской «жидкости» электростатические силы взаимодействия пылинок обращаются в нуль.

1.5 Получены критерии проявления коллективных явлений, которые состоят в следующем

а) в случае термоэлектронной плазмы плотность электронов должна быть такой, чтобы дебаевский радиус примерно равнялся половине среднего расстояния между пылинками,

б) в плазме газового разряда и в ядерно-возбуждаемой плазме, кроме того, свойства источника ионизации и плотность пылинок должны быть согласованы так, чтобы основной (обычно отрицательный) заряд несли пылинки

2 Рассмотрена задача о распространении волны размножения электронов фона в газе, находящемся в сильном электрическом поле и на основе ее рассмотрения сделаны следующие выводы

2.1. Моделирование показывает, что волна размножения ускоряется по мере удаления от стартового электрода. Это связано с увеличением радиуса кривизны головки плазменного сгустка

2.2. Расчеты показывают, что время прохождения волны размножения между пластинами конденсатора резко падает с ростом напряженности поля, между ними

2.3. Оценки показывают, что в послесвечении ВРЭФ должны реализоваться условия, удобные для реализации плазменных лазеров [20-22,36,37]

3. Рассмотрена задача об экстракции ионов из плазмы при лазерном разделении изотопов методом селективной фотоионизации и из ее рассмотрения сделаны следующие выводы.

3.1 Проведены расчеты расширения плазмы и экстракции ионов в рамках одномерной (плоская и цилиндрическая геометрия) двухжидкостной гидроди-

намики. Расчеты показывают, что при помещении плазмы в сравнительно слабое электрическое поле, которое не может разорвать все электроны и ионы плазменного сгустка, процесс экстракции ионов носит квазистационарный характер. Некоторое количество электронов сразу покидает плазменный сгусток, и он приобретает потенциал близкий к потенциалу анода. Ионный ток на катод хорошо описывается законом трех вторых, в котором в качестве расстояния между электродами фигурирует расстояние от границы плазменного сгустка до катода, а в качестве разности потенциалов - разность потенциалов между обкладками конденсатора.

3.2 Проведен расчет ионного тока на коллектор в рамках нестационарной двухжидкостной гидродинамики. Сравнение результатов моделирования и расчетов по простым аналитическим формулам показывает, что ионный ток на катод хорошо описывается законом трех вторых, в котором в качестве расстояния между электродами фигурирует расстояние от границы плазменного сгустка до катода, а в качестве разности потенциалов - разность потенциалов между обкладками конденсатора. Время экстракции ионов определяется интегрированием ионного тока, определяемого законом трех вторых при переменной во времени границе сгустка.

3.3 Проведено сопоставление результатов моделирования с простыми аналитическими оценками и экспериментальными результатами. Характерное время экстракции ионов, наблюдаемое в экспериментах хорошо согласуется со временем, найденным на основе численного решения уравнений нестационарной двухжидкостной гидродинамики и качественно согласуется с аналитическими результатами.

Список используемой литературы:

- 1 В.Е. Фортов, И.Т. Якубов. Нестационарная плазма М: Энергоатомиздат.

1994

- 2 **Н.Н. Цытович.** УФН. -1997. - 167, №1. -С 57-99
- 3 **В.Е. Фортов, А.П. Нефедов, О.Ф. Петров, А.А. Самарян, А.В. Чернышев.** ЖЭТФ., -1997. - Т 111, №2 -С 467-477.
- 4 **В.Е. Фортов, В.С. Филинов, А.П. Нефедов, О.Ф. Петров, А.А. Самарян, А.М. Липаев.** ЖЭТФ , -1997 -Т.111, №3. -С 889-902
- 5 **Фортов В.Е., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Молотков В.И., Нефедов А.П., Рыков В.А., Торчинский В.М., Худяков А.В.** ДАН, т 336, № 2, с 184-187 1999
- 6 **А.П. Нефедов, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов.** УФН, 167 №11 1997 с 1215-1226 1997
- 7 **Ткачев А.Н., Яковленко С.И.** ЖГФ, Т. 69, № 1, с. 53-57, 1999
- 8 **Яковленко С.И.** О взаимодействии заряженных пылинок. Дебаевская квазимолекула Письма в ЖГФ, Т 25, № 16, с 83-89, 1999.
- 9 **Яковленко С.И.** Дебаевская квазимолекула. Краткие сообщения по физике ФИАН № 9, с 3-9, 1999
- 10 **Derjagin B., Landau L.** Acta Physicochimica U.R.S S v. XIV, No 6, p. 633, 1941
- 11 **A.M. Larsen, D.G. Grier.** Nature (London) **385**, 230, 1997
- 12 **D.G. Grier.** Nature (London) **393**, 621, 1998
- 13 **W.R. Bowen, A.O. Sharif.** Nature (London) **393**, 663, 1998
- 14 **J.C. New.** Phys. Rev. Lett. **82**, No 5, 1072-1074, 1999
- 15 **M. Tokuyama.** Phys. Rev. **59**, No 3, R2250-R2253, 1999
- 16 **Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.** УФН. Т 174. № 9 С 953-971, 2004.
- 17 **Tkachev A.N., Yakovlenko S.I.** Central European Journal of Physics (CEJP), Vol. 2(4), (2004), pp 579-635 (www.cesj.com/physics.html)
- 18 **Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.** Physica scripta, **72**(1), 41-67 (2005)

- 19 **Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.** Plasma devices and operations, **13(4)**, 231-279 (2005)
- 20 **Гудзенко Л.И., Яковленко С.И.** Плазменные лазеры - М.: Атомиздат, 1978
- 21 Плазменные лазеры видимого и ближнего УФ-диапазонов - М.: Наука, 1989 142 с. (Гр. ИОФАН, Т. 21. Под ред. С.И. Яковленко)
- 22 Газовые и плазменные лазеры. Отв. ред. С.И. Яковленко М. «Наука» 2005. Серия «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Том XI-4 Под ред. В.Е. Фортова
- 23 **Яковленко С.И.** Основные проблемы лазерного выделения весовых количеств редкого изотопа иттербия Квантовая электроника, **25(11)**, 971-987 (1998)
- 24 **S.I. Yakovenko.** Main physical problems of AVLIS technology in producing ytterbium-168 in weighable amounts Laser and Particle Beams, **16(4)**, 541-568 (1998)
- 25 **S.I. Yakovlenko.** *Key Physical Problems in Laser Separation of Weighable Amounts of Ytterbium-168.* Advances in Laser and Optical Research. V. 1, p. 53-102, 2002 (Nowa Publishers, Inc)
- 26 **Ткачев А.Н., Яковленко С.И.** О лазерном разделении редких изотопов Квантовая электроника, **33(7)**, 581-592 (2003)
- 27 Математический энциклопедический словарь Гл. ред. Ю.В. Прохорова. М. Научн. Изд. «Большая российская энциклопедия», 1995
- 28 **И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев.** Справочник по математике. М. Наука, 1964
- 29 **С.И. Яковленко** Письма в ЖТФ, Т.30, Вып. 9, с. 12-20, 2004
- 30 **С.И. Яковленко** ЖТФ, Т. 34, Вып. 9, с. 47-54, 2004
- 31 **С.И. Яковленко** Письма в ЖТФ, Т. 31, Вып. 4, с. 76-82, 2005.

- 32 **K. Ogura, T. Arisawa, T. Shibata.** Ion Collection from Laser-Induced Plasma Using Biased Wire Electrode *Japanese Journal of Applied Physics*, No 5a, 1485-1490 (1992)
- 33 **Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.** Механизм убегания электронов в плотных газах и формирование мощных субнаносекундных электронных пучков *УФН* 174(9) 953 (2004)
- 34 **V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko.** High-power subnanosecond beams of runaway electrons generated in dense gases *Physica scripta* Vol 72(1), p 41-67, 2005
- 35 **Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.** Письма в ЖТФ, 32(1), 35-44 (2006)
- 36 **Yakovlenko S.I.** Plasma Lasers // *Laser Physics* - 1991 - Vol 1, No 6. - P 565
- 37 **Яковленко С.И.** Газовые и плазменные лазеры В сб. Энциклопедия низкотемпературной плазмы Под ред В.Е. Фортова Вводный том IV с 262-291 М. «Наука». 2001.
- 38 **И.Д. Костыря, В.Ф. Тарасенко, А.Н. Ткачев, С.И. Яковленко.** Рентгеновское излучение при формировании объемных разрядов наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления *ЖТФ*. Т 76. Вып. 3 С. 64-69 2006
- 39 **V.V. Savel'ev, S.I. Yakovlenko.** Simulation of the Expansion of a Low-Density Laser-Produced Plasma in Electric Field *Laser physics*, 7(2), 437-448 (1997)

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

- 1* **Гундиенков В.А., Яковленко С.И.** Взаимодействие заряженных пылинков в облаках термодинамически равновесных зарядов, *ЖЭТФ*, том 122, вып.5, с.1003-1018, 2002.

- 2* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Использование координат Кассини для расчета силы взаимодействия заряженных пылинок, Краткие сообщения по физике ФИАН №12, с.3-11, 2001
- 3* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Расчет силы взаимодействия заряженных пылинок в координатах Кассини, Письма в ЖТФ, том 28, вып 10, с 46-56
- 4* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Взаимодействие заряженных пылинок в плазме, Письма в ЖТФ, том 28, вып.21, с.81-90, 2002
- 5* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Дебаевская молекула в плазме, Краткие сообщения по физике ФИАН №5, с.3-17, 2002
- 6* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Взаимодействия заряженных пылинок в облаках термодинамически равновесных зарядов, Электронный журнал "Исследовано в России", 192, с.2124-2156, 2002,
<http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2002/192.pdf>
- 7* Gundiенkov V.A., Yakovlenko S.I. Interactions of charged dust particles in clouds of charges, Central European Journal of Physics 2(1), pp 35-66, 2004
- 8* Гундиенков В.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Характерное время вытягивания ионов из плазменного сгустка при лазерном разделении изотопов, Квантовая электроника, 34 (6), 589-595, 2004.
- 9* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Моделирование двумерной волны размножения электронов в плотном гелии, Краткие сообщения по физике ФИАН № 2, с.17-21, 2006
- 10* Гундиенков В.А., Яковленко С.И. Моделирование времени прохождения разрядного промежутка волной размножения электронов фона, ЖТФ, том 76, выпуск 9, с.130-132, 2006.

//

Подписано в печать 30/11 2007 г.
Формат 60x84/16. Заказ № 10 . Тираж/ООЭкз. П.л. 1,25
Отпечатано в Редакционно-издательской и информационной службе
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН с оригинал-макета заказчика.
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 132 51 28