

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М-641

9-95-496

УДК 533.9.07
621.384.639

МИРОНОВ

Владимир Евгеньевич

РАЗВИТИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
И ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВА-
НИЙ ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1995

Работа выполнена в Лаборатории Сверхвысоких Энергий
Объединенного Института Ядерных Исследований

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор Сарапцев В.П.

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Ширков Г.Д.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
старший научный сотрудник Оганесян Р.Ц.


кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Тютюнников С.И.

Ведущая научная организация:
Российский научный центр "Курчатовский Институт"

Защита диссертации состоится " _____ " 19 ____ года
в _____ часов на заседании Диссертационного совета Д-047.01.06
при Лаборатории Сверхвысоких Энергий Объединенного
Института Ядерных Исследований, г. Дубна, Московская обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан " _____ " 19 ____ года

Ученый секретарь Диссертационного совета 
кандидат физико-математических наук Кривохижин В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

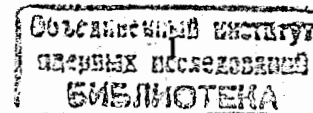
Актуальность. В течение ряда последних лет большое внимание уделяется развитию новых методов ускорения частиц до сверхвысоких (порядка ТэВ) энергий. Это связано с тем, что традиционные методы ускорения практически исчерпали себя, и потребность в увеличении энергии ускорителей может быть удовлетворена лишь при использовании очень высоких темпов ускорения, существенно уменьшающих общую длину установок. Плазменные ускорители рассматриваются среди наиболее перспективных методов. В плазме можно поддерживать высокие (до 10^9 В/см) электрические поля, возникающие при разделении зарядов, и при осуществлении синхронного взаимодействия заряженной частицы с такими полями, ускорить ее до больших энергий. Среди таких методов следует упомянуть схему плазменного ускорителя на лазерной волне биений РВВА¹, ускорителя на плазменной кильватерной волне РВФА². Коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20³, развивавшийся на протяжении последних лет в ОНМУ, ОНМО и ЛСВЭ ОИЯИ, основан на идее ускорения ионов электрическим полем объемного заряда кольца релятивистских электронов - в этом случае происходит ускорение квазиплазменного формирования как целостного объекта.

Существенное влияние на характеристики таких ускорителей оказывают используемые в них плазменные образования. Так, в схемах ¹ и ² плазма используется для возбуждения в ней волн плотности заряда лазерным или электронным пучком, причем при плотности плазмы 10^{15} - 10^{18} см⁻³ и большой (до 1 м) длине очень важны однородность и воспроизводимость ее параметров. Степень компактности и плотность частиц в электронных кольцах КУТИ, динамика их сжатия и устойчивость, зарядовые состояния накопленных ионов определяют возможности коллективного ускорения. Таким образом, для развития новых схем ус-

¹ С.Е. Clayton et al. - Phys. Rev. Lett. 54, 2343 (1985)

² A. Ting, E. Esarey and P. Sprangle - Phys. Fluids B2, 1390 (1990)

³ Александров В.С., Белошицкий П.Ф., Беляев Л.Н. и др. - Сообщение ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983



кореня необходимы измерения основных параметров используемых них плазменных образований.

Данная диссертационная работа посвящена изучению способов создания, разработке диагностических средств и исследованиям плазменных образований, которые находят применение в новых методах ускорения частиц.

Перед автором стояли следующие задачи:

- отработка метода создания протяженной однородной плазмы для изучения процессов в схемах типа плазменного ускорителя на лазерной волне биений РВВА;
- изучение основных характеристик потоков из лазерно-плазменного источника нейтральных частиц для КУТИ-20;
- диагностика кольца релятивистских электронов ускорителя КУТИ-20, модернизированного для использования в качестве источника многозарядных ионов - (проект ERIS).

В ходе выполнения данной работы:

- создана экспериментальная установка для отработки методов получения и последующего изучения плазмы оптического пробоя паров калия с концентрацией 10^{15} - 10^{16} см⁻³ и длиной области взаимодействия с лазерным излучением до 25 см. Проведено численное моделирование происходящих при образовании плазмы процессов.
- создана установка для изучения процессов образования и разлета в вакуум нейтральных частиц эрозивной лазерной плазмы, используемой в лазерном источнике нейтральных частиц КУТИ-20. Получены основные временные и энергетические параметры потоков атомов.
- создана диагностическая система регистрации характеристик электрон-ионных колец ускорителя КУТИ-20 и установки ERIS. Система предназначена для регистрации мягкого характеристического рентгеновского излучения ионов в процессе сжатия и длительного удержания колец.

Научная новизна:

1. Создана установка для изучения воздействия мощного лазерного излучения на пары щелочных металлов, впервые позволяющая провести исследования в диапазоне плотности потока лазер-

ного излучения до 10^{11} Вт/см² и при большой длине области взаимодействия (до 25 см).

2. Проведено численное моделирование процессов оптического пробоя паров калия мощным лазерным излучением в условиях, близких к эксперименту. Результаты расчетов показывают, что возможно создание протяженной однородной плазмы с плотностью электронов 10^{15} - 10^{17} см⁻³, а также указывают на важную роль процессов самодефокусировки излучения в плазме.

3. На созданной установке проведены экспериментальные исследования процессов оптического пробоя паров калия лазерным излучением. Впервые показано, что можно получить полностью понижённую до зарядового состояния попов (+1) протяжённую плазму с высокой однородностью по концентрации частиц. Экспериментально подтверждены теоретические оценки роли процессов самодефокусировки излучения на градиентах плотности частиц при образовании плазмы оптического пробоя паров.

4. Разработаны новые методики измерения основных параметров потоков низкоэнергетичных атомов, входящих в состав эрозивной лазерной плазмы лазерных источников атомов для КУТИ-20 и установки ERIS. Впервые получено, что в условиях, характерных для работы лазерных источников, на начальной стадии образования плазмы при плотности потока лазерного излучения $2 \cdot 10^8$ - $2 \cdot 10^9$ Вт/см² существует стадия термического равновесия сгустка. Проведены исследования потоков частиц, возникающих при попадании атомов из лазерных источников на поверхность металлического экрана, что моделирует реальную ситуацию работы источников в камере адгезатора (компрессора электронных колец) Исследованы процессы газовой выделенности при работе лазерных источников.

5. Определены основные характеристики работы электронно-кольцевого понизатора ERIS. Впервые показано, что время жизни образующихся при этом электрон-ионных колец может быть доведено до 80 мсек, а их радиус может быть уменьшен до 2-3 см.

6. Определены основные характеристики мягкого рентгеновского излучения ионов и атомов криптона, находящихся в составе кольца при постоянной его загрузке из остаточного газа. Впервые в условиях длительного удержания электрон-ионных колец показано, что определяющий вклад в эмиссию рентгеновского излучения дают атомы и низкозарядные ионы криптона.

Практическая ценность работы:

1. Создана установка для исследований процессов оптического пробоя паров щелочных металлов позволила промоделировать процессы образования плазмы в полномасштабных экспериментах по схеме плазменного ускорителя на биениях лазерной волны PBWA и ускорителя на кильватерной волне PWFA. Выявлены процессы, которые могут приводить к уменьшению длины образующейся плазмы.

2. Создан двухволновый задающий генератор на иттрий-алюминиевом гранате $YAG:Nd^{3+}$, который может быть использован в экспериментах по PBWA и в экспериментах по нелинейному взаимодействию излучения с веществом⁴.

3. Создан и исследован источник паров щелочных металлов, который может быть использован в экспериментах по PBWA, в спектрометрических исследованиях⁵, в исследованиях по нелинейному взаимодействию излучения с веществом, и при изучении взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом⁶.

4. Созданная компьютерная программа позволяет численно исследовать процессы образования плазмы под действием мощного лазерного излучения, а также изучать процессы распространения излучения в плазме в широком диапазоне плотности плазмы и интенсивности излучения.

5. Исследованы потоки атомов из лазерных источников для КУТИ-20 и ERIS. Оценено влияние на их работу атомов, отраженных от поверхности стенок вакуумной камеры ускорителя, а также молекул, образованных при газовой выделении из мишени источника. Полученные результаты имеют значение с точки зрения применения источников атомов, изучения фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом. Разработанные методики регистрации атомов с низкой энергией могут быть использованы для анализа эрозивной лазерной плазмы, процессов при ионном распылении материалов и в ряде других областей.

⁴ Kenzo Miyazaki- Phys. Rev. A, 23, n.3, 1350 (1981)

⁵ O.L. Landen and R.J. Winfield- Phys. Rev. A, 32, n.5, 2972 (1985)

⁶ P. Sprangle and E. Esarey- Phys. Fluids B4(7), 2241 (1992)

6. Исследована работа адгезатора (компрессора электронных колец) ускорителя КУТИ-20 и ионизатора ERIS. Экспериментально зарегистрированы предсказанные теоретически предельные значения времени жизни и радиуса кольца релятивистских электронов в спадающем по времени магнитном поле. Это позволяет определить физические пределы возможностей коллективного метода ускорения ионов и ионизатора с релятивистскими электронными кольцами. Предложенные и реализованные методики измерения мягкого рентгеновского излучения атомов и ионов криптона, находящихся в объеме кольца, позволяют детально исследовать динамику сжатия/удержания и оптимизировать работу установки, определить условия получения многозарядных ионов.

К защите представляются следующие тезисы:

1. Установка по исследованию оптического пробоя паров щелочных металлов, которая позволяет проводить эксперименты по лазерно-плазменным взаимодействиям при развитии новых схем ускорения. Метод получения протяженной однородной плазмы с плотностью $10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}$ и длиной до 25 см.

2. Компьютерная программа, позволяющая численно моделировать процессы оптического пробоя паров атомов и распространения лазерного излучения в образующейся плазме.

3. Задающий двухволновый генератор на $YAG:Nd^{3+}$, работающий одновременно на длинах волн 1.0641 и 1.0615 мкм с длительностью импульса 15 и 1 нсек.

4. Новые методики регистрации потоков атомов с низкими энергиями. Полученные характеристики разлета нейтральной компоненты эрозивной лазерной плазмы в вакуум, указывающие на существование стадии термического равновесия на начальной стадии образования плазмы.

5. Результаты по определяющему вкладу упруго отраженных атомов в состав потоков, образующихся при воздействии атомов из лазерных источников для КУТИ-20 и установки ERIS на поверхность металлической мишени. Определен коэффициент отражения атомов и выявлено их влияние на работу источников.

6. Результаты определения масс-состава атомов газообразных элементов, образующихся при работе лазерных источников ато-

мов для КУТИ-20 и установки ERIS. Новые методы уменьшения их влияния на работу источников.

7. Методика контроля основных параметров установки ERIS при использовании двух этапов сжатия/удержания колец. Показано, что удастся довести время жизни колец до 80 мсек, а радиус уменьшить до 2-3 см. Достигнутые предельные значения времени жизни электрон-ионных колец и их радиуса, позволяющие определить принципиальные возможности коллективного метода ускорения, использовать компрессор электронных колец как источник ионов и источник синхротронного излучения в инфракрасном диапазоне.

8. Основные параметры мягкого рентгеновского излучения атомов и ионов криптона, находящихся в объеме кольца. Показано, что основной вклад в эмиссию дают атомы и низкозарядные ионы.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались на Рабочем совещании по новым методам ускорения (Бакуриани, 1989), Всесоюзном совещании по плазменному ускорению (Киев, 1990), Международном совещании по новым методам ускорения (Дубна, 1990), XIII совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1992), 6 Международном симпозиуме по электронно-лучевым источникам ионов (Стокгольм, 1994), а также на семинарах ЛСВЭ (ОНМУ, ОНМО) ОИЯИ.

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, приведенных в списке литературы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем составляет 93 страницы, включая 52 иллюстрации, список литературы насчитывает 93 наименования. Главы предваряются краткими введениями и заканчиваются выводами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы задачи, стоявшие перед автором работы, кратко изложено содержание всех глав, описаны

научная новизна, практическая ценность работы и приведены тезисы, представляемые к защите.

В первой главе описываются экспериментальная установка для получения протяженной однородной плазмы оптического пробоя паров калия, а также результаты численного моделирования происходящих при этом процессов [6]. В первом параграфе описана актуальность поставленной задачи - плазма такого типа позволяет моделировать ситуацию полномасштабного эксперимента по возбуждению релятивистских плазменных волн биениями мощного лазерного излучения (т.п. PBWA эксперименты). В этой схеме релятивистская плазменная волна возбуждается двумя коллинеарными интенсивными лазерными пучками с немного различающейся длиной волны. Этот процесс является резонансным: плазменная частота колебаний электронов в плазме ω_p близка к разности частот лазерных лучей $\delta\omega$. Плазменная волна при этом образуется из-за пространственного градиента интенсивности огибающей волны биений лазерного излучения, направленного вдоль оси распространения электромагнитных волн и создающим периодическую поперечную силу, действующую на электроны плазмы.

По оценкам, при полномасштабном эксперименте по ускорению электронов допустимая величина степени неоднородности плазмы $\delta N_e/N_e$ порядка $\approx 10^{-3}$ на длине ускорения ≈ 1 м при плотности плазмы $10^{15}-10^{18}$ см⁻³ [7]. Традиционные методы создания плазмы (например, z-пинч) не могут обеспечить подобную однородность. Поэтому, практически во всех экспериментах по схеме PBWA используется плазма оптического пробоя газа (обычно водорода или дейтерия), причем плазма образуется с использованием драйверного лазерного пучка. Основным механизмом получения ионов является многофотонная ионизация атомов буферного газа, характерные времена происходящих процессов при длительности импульса лазерного излучения ≤ 10 нсек много меньше времен газодинамического расширения плазменных образований. В этой ситуации однородность плазмы опреде-

⁷ R.R. Salomaa and S.J. Carttunen - in: New Developments in Particle Accelerator Techniques (Orsay, 1987) CERN 87-11

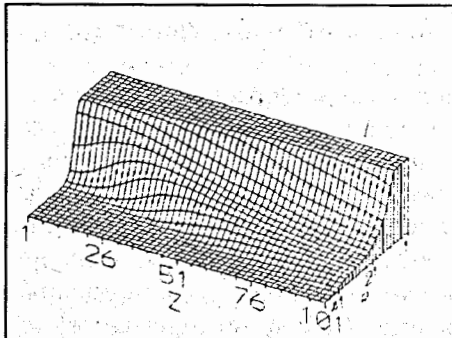


Рис.1 Пространственное распределение концентрации электронов в конце действия лазерного излучения с полной энергией 2 Дж на пары калия с начальной концентрацией $N_0 = 0.75 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Шаг по Z- 0.25 см, по R- 20 мкм.

ляется однородностью ионизируемого газа и достижимой степенью ионизации, близкой к единице при плотностях потока лазерного излучения $q \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ и размерах плазмы $\approx 1 \text{ см}$. В полномасштабных РВВА экспериментах необходимо создание плазмы с продольным размером порядка 1 м.

В модельных экспериментах, в качестве ионизируемой среды представляется перспективным использовать газы, состоящие из атомов с низким потенциалом ионизации, например, атомов щелочных металлов. Это позволяет проверить методы созда-

ния и исследовать процессы распространения лазерного пучка в протяженной плазме при относительно низких интенсивностях излучения.

Отметим, что помимо указанной области применения, полученные результаты важны для экспериментов по преобразованию частоты лазерного излучения в нелинейных средах⁸, по реализации способов оптического каналирования лазерного излучения в плазме⁹.

Во втором параграфе описаны алгоритм и результаты численного моделирования взаимодействия лазерного излучения с парами калия. Принимались во внимание процессы многофотонной ионизации атомов лазерным излучением, столкновительной ионизации и ударно-столкновительной рекомбинации ионов. Электронная и ионная температуры определялись с учетом нагрева электронов при тормозном поглощении лазерного излучения, рекомбинационного нагрева, охлаждения при столкно-

вительной ионизации и в результате обмена энергией при столкновениях с ионами. Процессы распространения лазерного излучения в плазме и тормозного поглощения моделировались с помощью программы HEATER¹⁰.

Показано, что в результате многофотонной ионизации возможно получение практически полностью ионизованной (до зарядового состояния +1) плазмы, имеющей значительные продольные и поперечные размеры (до 25 см по оси распространения излучения и 300 мкм по оси r). На Рис.1 показано характерное расчетное пространственное распределение плотности плазмы при начальной концентрации атомов калия $0.75 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Получено, что при таких процессах важно учитывать самодефокусировку лазерного излучения на возникающих градиентах плотности частиц. При достижении плазмой в достаточно большом диапазоне значений r максимально возможного значения n_e , соответствующего 100% ионизации атомов до зарядового состояния (+1), распределение плотности имеет ступенчатый характер. Это приводит к уменьшению влияния процессов самодефокусировки, а также к увеличению интенсивности лазерного излучения на оптической оси за счет дифракции.

Получены оценки электронной и ионной температур плазмы, которые составляют величину порядка 1 эВ при максимальных энергиях в импульсе лазерного излучения. Многофотонная ионизация при таких температурах практически полностью определяла динамику развития пробоя паров излучением.

В третьем параграфе первой главы, состоящем из трех частей, описана экспериментальная установка, созданная для изучения пробоя паров калия излучением неодимового лазера. В первом подпункте описана общая схема установки, состоящей из мощной лазерной системы, источника паров калия и диагностической части (Рис.2).

⁸ Kenzo Miyazaki and Hiroshi Kashiwagi- Phys.Rev.A 18, 635 (1978)

⁹ P.Sprangle and E.Esarey- Phys.Fluids B4(7),2241 (1992)

¹⁰ J.N. McMullin, C.E. Capjack and C.R. James- Computer Physic Communications 23, 31 (1981)

Лазерное излучение с энергией в импульсе до 2 Дж, длительностью ≈ 15 нсек, расходимостью пучка $\theta \approx 3.7 \cdot 10^{-4}$ рад, создаваемое лазерной системой 1, фокусировалось линзой 2 с фокусным расстоянием $L_F = 100$ см в центр вакуумной камеры 4, где помещался источник паров калия 5 с концентрацией частиц $N_0 = (0.2-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Плотность потока лазерного излучения составляла величину $q \leq 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ при радиусе пятна сфокусированного излучения $w_0 \approx L_F \cdot \theta \approx 370$ мкм. Прошедшее через источник излучение диафрагмировалось с помощью диафрагмы 6, ослаблялось набором светофильтров и попадало на детектор 7 (фотодиод ФД-7К). Для контроля энергии и формы импульса часть излучения перед входом в вакуумную камеру отражалась плоскопараллельной стеклянной пластиной 3 на детектор 8 (ФК-26). Та же пластина использовалась для отражения на детектор 9 части рассеянного или отраженного на 180° излучения. После этого отраженное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 100 мм на диафрагму с диаметром $\varnothing 0.1$ мм для выделения детектируемой области плазмы и уменьшения фона. После прохождения диафрагмы излучение попадало на световод и транспортировалось на детектор. Используемая оптическая схема позволяла собирать свет из области плазмы, ограниченной ± 1 см в любой точке источника паров.

В результате процессов многофотонной ионизации при превышении определенной величины плотности потока лазерного излучения в области, занятой парами щелочного металла происходило образование плазмы оптического пробоя.

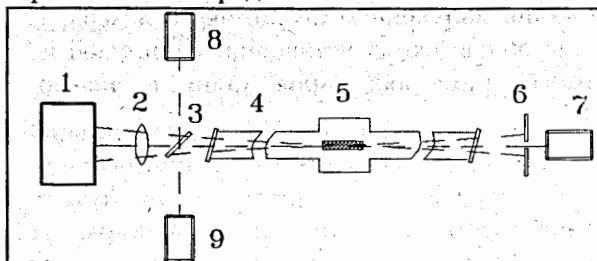


Рис.2 Общая схема экспериментальной установки для исследований пробоя паров калия лазерным излучением.

Лазерная часть установки описана во втором подпункте. Она состоит из двухволнового задающего

генератора на иттрий-алюминиевом гранате YAG:Nd^{3+} [5] и усилительной системы на силикатном неодимовом стекле. Выходная энергия лазерной системы достигала 2 Дж в импульсе 15 нсек. Задающий генератор системы работал в одномодовом режиме, с возможностью генерировать двухволновый импульс (1.0641 и 1.0615 мкм) с длительностью импульса 15 или 1 нсек. Для перехода в двухволновый режим в резонатор генератора помещался интерферометр Фабри-Перо, обладающий селективным поглощением на разных длинах волн генерации.

В третьем подпункте описан источник паров калия, работающий по принципу "тепловой трубы" [6]. Он позволяет создавать однородную область паров калия с концентрацией частиц $10^{15}-10^{16} \text{ см}^{-3}$ и длиной до 25 см. Принцип его работы состоит в следующем: вакуумная камера заполнена буферным газом при определенном давлении, к стенкам камеры плотно прилегает капиллярная структура, центр камеры, где размещается металл, нагревается до высокой температуры; металл испаряется, пары металла достигают области охлаждения камеры, где конденсируются, после чего под действием втягивающих сил возвращаются в область нагрева. Пары металла полностью вытесняют буферный газ, причем их давление равно давлению буферного газа. Отметим, что распределение температуры по оси трубы является однородным, т.к. процессы теплопередачи при этих условиях идут достаточно интенсивно и любые градиенты плотности и температуры эффективно сглаживаются. В параграфе описаны основные черты использованной схемы создания паров калия, приведены рабочие значения достигнутых концентраций атомов. Степень однородности полученной области паров оценивалась по флюоресценции излучения гелий-неонового лазера. Отмечается, что при давлении атомов ≥ 0.7 Торр на краях области паров начинает образовываться область рассеяния излучения, что связано, по-видимому, с появлением зоны объемной пароконденсации атомов калия.

В четвертом параграфе приведены основные полученные экспериментальные результаты. Они состоят в определении условий возникновения плазмы пробоя паров, пространственном распределении интенсивности лазерного излучения, прошедшего через плазму, а также зависимостей интенсивности рассеянного на 180° в плазме лазерного излучения.

Порог образования плазмы составлял ≈ 0.02 Дж по E_1 (плотность потока излучения $\approx 10^9$ Вт/см²). При энергии 1-2 Дж плазма занимала практически всю область паров калия (25 см), а ее поперечный размер составлял ≈ 300 мкм. Образующаяся плазма существенно влияла на пространственное распределение интенсивности лазерного излучения, прошедшего через источник паров калия.

При низких (≈ 0.1 Дж) энергиях E_1 или низких начальных концентрациях атомов N_0 первоначальное гауссово распределение по поперечной координате практически не искажалось. При более высоких E_1 лазерный пучок после прохождения плазмы оптического пробоя имел кольцевую структуру (Рис.3), излучение отклонялось образующейся плазмой от оптической оси. Увеличение начальной концентрации атомов N_0 увеличивало контраст образующейся структуры. Степень симметричности кольца определялась точностью совмещения оптического центра фокусирующей линзы и центра падающего на линзу лазерного пучка; рассогласовка по какой-либо оси на величину ≈ 1 мм меняла интенсивность в соответствующем направлении в 3-4 раза.

При дальнейшем повышении энергии лазерного излучения контрастность получаемого кольца уменьшалась и при $E_1 \approx 2$ Дж "провал" в центре пучка практически исчезал. Степень однородности распределения из-

лучения по радиусу пучка по сравнению с пучком, проходящим через холодную камеру с $N_0 = 0$, уменьшалась, размер пучка оставался почти тем же. Эти качественные наблюдения были подтверждены при измерениях энергии лазерного излучения, прошедшего плазму, при вырезании диафрагмой небольшой области вблизи оптической оси. Полученные зависимости показывают, что рефракция излучения на образующихся градиентах плотно-

сти частиц существенно изменяет параметры лазерного пучка, в соответствии с расчетными данными п.2. Тем не менее, при достаточно больших интенсивностях лазерного излучения, самодефокусировка становится менее заметной, и при полной энергии 2 Дж практически исчезает.

Зависимости энергии излучения E_b , рассеянного назад из области, занятой образующейся плазмой, от полной энергии в импульсе E_1 и от начальной концентрации атомов калия, показывают:

1. При небольших E_1 и при сборе рассеянного излучения из области, близкой к краям тепловой трубы наблюдается заметное превышение E_b над фоновыми значениями, зависимость $E_b(E_1)$ имеет линейный характер, коэффициент которой зависит от начальной концентрации атомов;
 2. При энергиях $E_1 \geq 0.2$ Дж, по-видимому, происходит разрушение зоны рассеяния излучения на краях области паров калия, что выражается в резком уменьшении коэффициента пропорциональности рассеянной энергии от полной энергии в импульсе;
 3. При сборе регистрируемого излучения из области наиболее острой фокусировки лазерного излучения и при энергиях $E_1 \geq 1$ Дж фиксируется превышение фонового излучения \approx в 5 раз (уровень фона составлял $\approx 10^{-8}$ от полной энергии излучения). При меньших энергиях E_b не превышает фона.
- Характерные зависимости $E_b(E_1)$ показаны на Рис.4 и 5:

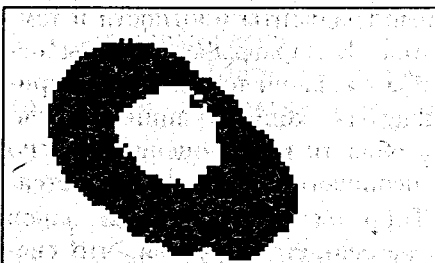


Рис.3 Пространственное распределение полной энергии лазерного излучения на большом (135 см) расстоянии от области паров калия с начальной концентрацией $0.75 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Полная энергия в импульсе 0.5 Дж.

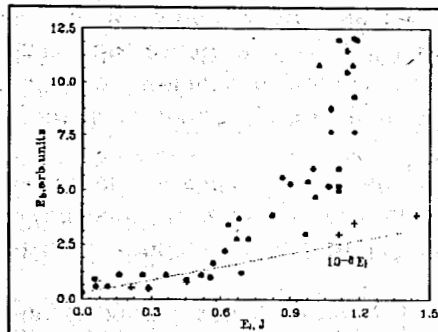


Рис.4 Зависимость полной энергии излучения, рассеянного на 180° из области, близкой к точке наиболее острой фокусировки, от полной энергии в импульсе.

$N_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

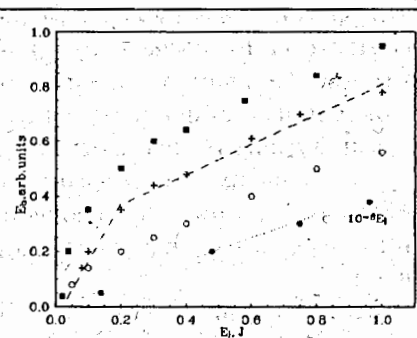


Рис.5 Зависимость энергии излучения, рассеянного на 180° из области плазмы, близкой к краю зоны паров калия, от полной энергии в импульсе E_l .

$N_0 = 0$ (●), $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (○), $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (+), $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (■). $\sigma = 25\%$

В последнем, пятом параграфе проводится обсуждение полученных результатов. Проводится анализ условий возникновения плазмы при оптическом пробое паров калия и их сравнение с расчетными значениями. Показано, что рассеянное на 180° излучение может быть связано с процессами вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна ВРМБ, что говорит о высокой степени однородности образующейся плазмы. При ВРМБ взаимодействуют основное лазерное излучение, излучение, рассеянное на ионно-звуковой волне в плазме, и сама волна. Угловое распределение рассеянного излучения имеет пик при угле рассеяния 180° ; волновой вектор ионно-звуковой волны $k_s = 2k_l$, где k_l - волновой вектор лазерного излучения.

Инкремент затухания ионно-звуковой волны оценивался по формуле¹¹:

$$\gamma_1 = (\pi/8)^{1/2} (M_i/m_e) \omega_s^4 / k_s^3 V_{Te}^3 [1 + (M_i/m_e)^{1/2} T_e/T_i]^{3/2} \exp(-\omega_s^2 / 2k_s^2 V_{Ti}^2);$$

где ω_s - частота плазменной волны, $\omega_s = \omega_{pi} k_s r_d / (1 + k_s r_d)^{1/2}$;

ω_{pi} - ионная плазменная частота, $\omega_{pi} = 4\pi e^2 N_i / M_i$; и $\omega_s = 1.27 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ при $\omega_{pi} = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$; $V_{Te} = (T_e/m_e)^{1/2} = 5 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$, $V_{Ti} = (T_i/M_i)^{1/2} = 1 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ - тепловые скорости электронов и ионов, соответственно, а $M_i/m_e = 7.1 \cdot 10^4$ - соотношение масс электрона и иона для калия. В итоге, $\gamma_1 = 4.5 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ и $\omega_s/\gamma_1 \approx 30$.

Для инкремента роста ВРМБ волны напишем¹²:

$$\gamma_0 = 1/2 (V_0/c) [\omega_0/\omega_s]^{1/2} \omega_{pi},$$

где V_0 - скорость колебаний электрона в поле лазерного излучения, $V_0/c \approx 9 \cdot 10^{-10} q^{1/2}$ при $\lambda = 1.064 \text{ мкм}$, ω_0 - частота лазерного излучения, $\omega_0 = 1.77 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}$; и $\gamma_0 = 1.1 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ при абсолютной неустойчивости ВРМБ, т.е. в условиях, когда характерные длины изменения концентрации плазмы и ее температуры много больше длины плазмы. Отношение инкремента роста волны к инкременту ее затухания $\gamma_0/\gamma_1 \approx 2$ и, следовательно, заметного роста ВРМБ волны не должно быть. Для мощности рассеянного излучения можно записать¹²:

$P_b = P_n \exp(2\gamma_0 L_p / \gamma_1 c)$, где L_p - длина плазмы, $\approx 10 \text{ см}$; P_n - мощность затравочного излучения, и в итоге получаем: $P_b/P_n \approx 6$, что близко к величине Рис.4.

Глава завершается выводами, среди основных - вывод о возможности и перспективности использования подобных плазменных образований для экспериментов по РВВА.

Во второй главе описываются результаты исследований эрозивной лазерной плазмы, используемой в лазерном источнике нейтральных частиц для коллективного ускорителя КУТИ-20 и установки ERIS¹³. Краткое введение описывает актуальность поставленной задачи. Описан принцип работы лазерного источника и схемы его размещения в вакуумной камере ускорителя, приводятся параметры используемого лазера - энергия в импульсе до 60 мДж, длительность импульса $\tau = 15 \text{ нсек}$, что позволяет получать плотность потока лазерного излучения на поверхность твердотельной мишени источников $q \leq 2 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$.

¹² А.А.Offenberger et al.- J.Appl.Phys. 47,1451 (1976)

¹³ Ю.А.Быковский и др.-ЖТФ 54,с.527 (1984)

¹¹ Пятницкий Л.Н. Лазерная диагностика плазмы. М.: Мир, с.39 (1976)

Отмечается, что для успешной эксплуатации источников необходимо детальное изучение поведения лазерной плазмы при ее образовании и разлете в вакуум.

Первый параграф главы, состоящий из двух подпунктов, посвящен описанию методик измерения временных характеристик потоков нейтральных частиц с небольшими энергиями, дающими основной вклад в эмиссию частиц при работе лазерных источников атомов. После небольшого введения в параграф, в первом подпункте описана методика регистрации атомов с использованием лазерного источника ионов [4]. При этом для определения концентрации атомов на определенном расстоянии от точки

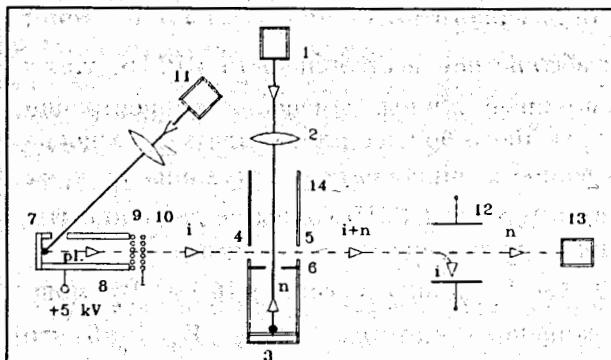


Рис. 6 Общая схема экспериментальной установки для определения временных характеристик разлета нейтральных частиц эрозионной лазерной плазмы в вакуум с использованием процессов перезарядки ионов.

образования плазмы потоки зондируются специально сформированным пучком ионов из лазерного источника с энергией 3-5 кэВ; в результате процессов резонансной перезарядки часть ионов нейтрализуется при столкновении с атомами, и затем быстрые нейтралы попадают на детектор (вторично-электронный умножитель ВЭУ) и регистрируются им. Описывается экспериментальная установка, созданная для применения данной методики с целью анализа работы лазерного источника. Ее общий вид приведен на Рис. 6. Лазерный источник ионов - (7-10), источник атомов - (1-6, 14), плоский конденсатор, служащий для удаления заряженных частиц из потоков - 12, детектор - 13. Используются YAG:Nd³⁺ лазеры (1, 11) с энергией ≤ 0.06 Дж и длительностью импульса 15 нсек.

Во втором подпункте первого параграфа описана методика регистрации атомов с использованием лазерного источника электронов [2].

Используется метод частичной ионизации исследуемых атомов при прохождении потоков сквозь плазму с низкой плотностью, создаваемую лазерным источником электронов. Образующиеся ионы регистрируются ВЭУ, поток регистрируемых ионов пропорционален потоку исследуемых атомов в область ионизации. Описана схема созданной экспериментальной установки и способы обработки получаемых результатов.

Рис. 7 Зависимость концентрации атомов (на расстоянии 5 см от точки образования плазмы) от времени, нормированного на пролетное расстояние. Мишень из цинка Zn. Плотность потока излучения на мишень q : $1.2 \cdot 10^9$ Вт/см² (●), $0.7 \cdot 10^9$ (Δ), $0.5 \cdot 10^9$ (■)

Во втором параграфе, после краткого обзора связанной с темой параграфа литературы, приводятся основные результаты, полученные с помощью первой (ионной) методики [4]. Они состоят во временных зависимостях плотности атомов при использовании мишеней из С, Al, Zn, In и Pb и плотностях потока лазерного излучения в диапазоне $5 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^9$ Вт/см². Зависимости аппроксимировались распределением Максвелла-Больцмана, и получено удовлетворительное согласие между аппроксимирующими и экспериментальными кривыми. Приводятся зависимости полученных при аппроксимации температур сгустков и чисел Маха. Характерное временное распределение концентрации нейтральных частиц приведено на Рис. 7.

В третьем параграфе приводятся результаты исследований потоков атомов, возникающих при попадании первичных потоков источника атомов на поверхность металлического экрана [1]. Описана созданная для этого установка и основные полученные результаты. При этом использовалась "электронная" методика

п.1.2. Показано, что основной вклад во вторичную эмиссию дают атомы, упруго отразившиеся от экрана. Оценивается влияние таких потоков на процессы работы лазерных источников атомов для КУТИ-20 и установки ERIS.

В четвертом параграфе описана методика измерения атомов газообразных элементов, возникающих при работе лазерных источников [3]. Созданная установка работает на принципе масс-анализа образующихся потоков с помощью масс-анализатора МХ-7304. Получены зависимости количества эмиттируемых молекул от плотности потока лазерного излучения на поверхность мишени источника, а также их временные характеристики. Делаются оценки влияния таких атомов на процессы работы источников, а также предлагаются меры по уменьшению такого влияния. В конце главы делаются выводы.

Третья глава посвящена описанию работы ускорителя КУТИ-20, модернизированного для использования в качестве источника многозарядных ионов (проект ERIS [7]). В первом параграфе дано краткое описание актуальности поставленной задачи и концепции ее решения. Подчеркивается, что рентгеновская спектроскопия многозарядных ионов имеет важное значение для определения структуры электронных оболочек ионов. Получение таких ионов важно для решения фундаментальных проблем, в том числе: моделирование, диагностирование и оптимизация плазменных установок для исследований в области управляемого термоядерного синтеза; создание и исследования источников когерентного рентгеновского излучения; разработка и оптимизация интенсивных источников ионов для современных ускорителей тяжелых ионов.

Коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20 позволяет получать компактные кольца релятивистских электронов, являющиеся уникальными по плотности ионизирующих частиц и времени существования квазиплазменными образованиями. Для того чтобы в полной мере использовать имеющиеся ионизационные способности электронных колец, было предложено¹⁴ модернизировать ускоритель так, чтобы существенно уменьшив размеры кольца и увеличив время его жизни, довести ионизационный фактор $j \cdot t$ до величины $\sim 10^{20}-10^{21}$ и тем самым подготовить возможность исследований характерных

стического рентгеновского излучения ионов с зарядом $-30-40$. Добиться этого предлагается путем уменьшения времени спада магнитного поля на стадии разжатия электронного кольца, так, чтобы при уменьшении энергии электронов за счет синхротронного излучения радиус кольца оставался практически постоянным на протяжении 50-100 мсек (т.н. стадия длительного удержания кольца).

Во втором параграфе дано описание экспериментальной установки, причем основное внимание уделяется способам создания долгоживущих электронных колец (со временем жизни до 80 мсек), имеющих радиус 4.5-2.5 см. Для длительного удержания колец используется метод шунтировки токов магнитных катушек, формирующих магнитное поле на конечных стадиях сжатия колец. При экспоненциальном спаде магнитного поля радиус колец остается практически постоянным из-за интенсивного синхротронного излучения электронов. Большое время существования колец позволяет получать многозарядные ионы - средний заряд ионов зависит от времени их ионизации электронным ударом. В параграфе описывается рабочий цикл установки, приводятся расчетные зависимости токов в магнитных катушках системы, радиуса кольца и показателя спада магнитного поля. Описаны электрические схемы питания катушек, позволяющие обеспечить стадию длительного удержания кольца. В третьем пара-

графе приводятся основные черты использованной методики регистрации мягкого рентгеновского излучения ионов кольца и некоторых важных параметров электронно-ионных квазиплазменных образований. Используется пропорциональный счетчик гамма-квантов, обзорный гамма-детектор, а также видеосистема для анализа пространственного распределения синхротронного излучения электронов кольца. Накопление ионов в кольцах проводилось при их

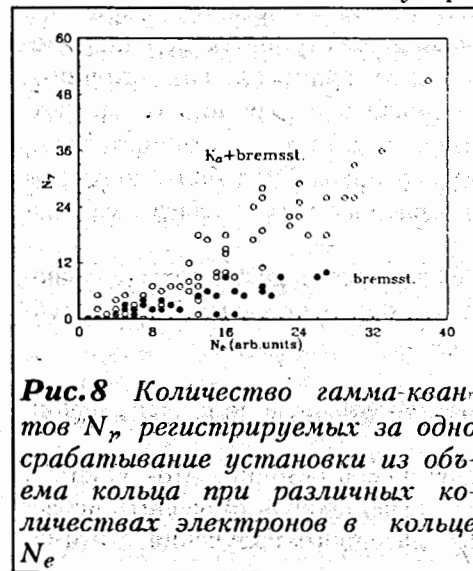


Рис. 8 Количество гамма-квантов N_γ регистрируемых за одно срабатывание установки из объема кольца при различных количествах электронов в кольце N_e

¹⁴ Э.А. Перельштейн, Г.Д. Ширков- Препринт ОИЯИ Е9-85-4, Дубна (1985)

сжатии и удержании в атмосфере криптона Kr. Получены зависимости интенсивности мягкого рентгеновского излучения ионов и атомов криптона (на линии K_{α}) от количества электронов в кольце и давления остаточного газа в вакуумной камере установки. Характерная зависимость такого рода приведена на Рис.8.

Глава заканчивается обсуждением полученных результатов в параграфе 4. Временная диаграмма интегральных потерь электронов, регистрируемая обзорным детектором жесткого рентгена, показывает, что проведенная реконструкция магнитной системы ускорителя КУТИ-20 позволяет значительно повысить время жизни сжатого до 4.5 см на первом и 3 см на втором этапах кольца. Общее время существования образующегося электронно-ионного сгустка составляет 75-80 мсек. Сам факт длительного существования кольца на втором этапе удержания в условиях маленького (≈ 0.1) показателя спада магнитного поля свидетельствует о том, что объемный заряд кольца практически полностью скомпенсирован накопившимися ионами, и фокусировка малых размеров осуществляется из-за сдвига частоты бетатронных колебаний электронов объемным зарядом ионов.

Оценки интенсивности мягкого рентгеновского излучения криптона показывают, вместе с тем, что основной вклад в эмиссию дают нейтральные атомы и малозарядные ионы криптона. Вопрос о среднем заряде и количестве ионов остается открытым. Оценена возможность использования электронных колец, удерживаемых длительное время на малых радиусах, как источника синхротронного излучения в ИК диапазоне. Кроме того, делается оценка максимально достижимых темпов коллективного ускорения ионов при тех зарядностях, которые могут быть получены при достигнутых значениях фактора ионизации. Глава завершается выводами.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в данной работе, а также приведен список публикаций по теме диссертации.

Основные результаты и выводы, полученные при выполнении диссертационной работы:

1. Создана установка, включающая в себя источник атомов калия и лазерную систему на Nd стекле, позволяющая проводить исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с атома-

ми, имеющими низкий потенциал ионизации. Полученные экспериментальные результаты впервые в мире показали, что при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм длительностью импульса 15 нсек и плотностью потока $\leq 10^{11}$ Вт/см² на пары калия с начальной концентрацией атомов $(0.2-2) \cdot 10^{16}$ см⁻³ может быть образована полностью ионизованная, состоящая из однозарядных ионов плазма длиной ≈ 25 см и диаметром ≈ 300 мкм. Использование подобного метода создания плазмы может предоставить ряд преимуществ по сравнению с другими методами (низкий порог образования, большие продольные и поперечные размеры, высокая однородность), при использовании в различных схемах коллективного ускорения электронов, особенно в так называемой РВВА схеме, использующей лазерно-плазменные взаимодействия.

2. Разработана компьютерная программа, позволяющая моделировать процессы оптического пробоя паров мощным лазерным излучением и процессы распространения лазерного излучения в плазме.

3. Создана установка, основанная на зондировании потоков атомов ионами лазерного источника, позволяющая регистрировать импульсные потоки атомов, входящие в состав эрозийной лазерной плазмы на стадии ее инерциального разлета в вакуум. Впервые показано, что в условиях, характерных для работы лазерных источников нейтралов для КУТИ-20 и установки ERIS, временные характеристики разлета нейтралов достаточно хорошо описываются максвелловским распределением, характерные значения температуры T составляют 10-20 эВ при плотности потока лазерного излучения $q \approx (3-5) q_{tr}$ (q_{tr} - пороговое значение плотности потока лазерного излучения на мишень), максимальные скорости разлета $V_{max} \approx 10^6$ см/сек, длительности потока - $(1-5)$ мсек/см.

4. Создана установка по изучению процессов рассеяния потоков атомов на поверхности стенок камеры адгезатора. Проведены масс-спектрометрические исследования процессов десорбции газов при работе лазерных источников. Впервые определено влияние образующихся потоков на работу лазерных источников атомов для КУТИ-20 и установки ERIS и разработаны методы уменьшения такого влияния.

5. Проведенная реконструкция ускорителя КУТИ-20 в установку ERIS позволила увеличить время нахождения электронного

кольца в сжатом состоянии (до 75-80 мсек). Достигнуты рекордные параметры времени жизни и радиуса электрон-ионных колец, плотности электронов. Установка может быть использована в качестве источника инфракрасного излучения большой импульсной мощности для физики конденсированных сред, а также для исследований по физике многозарядных ионов.

6. Впервые измерена интенсивность характеристического излучения ионов криптона при постоянной загрузке кольца ионами из остаточного газа.

Публикации

1. В.Е. Миронов, С.М. Сильнов, Е.А. Сотниченко, Б.А. Шестаков О взаимодействии нейтральной компоненты лазерной плазмы с металлической поверхностью. ОИЯИ, 9-83-536, Дубна, 1983
2. Ю.А. Быковский, В.Е. Миронов, В.П. Саранцев и др. Использование лазерной плазмы для диагностики импульсных потоков атомов. ОИЯИ, 13-83-807, Дубна, 1983
3. В.Е. Миронов, Б.А. Шестаков О газовой выделении при воздействии лазерного излучения на вещество. ОИЯИ, 9-86-304, Дубна, 1986.
4. В.Е. Миронов Определение концентрации нейтральных частиц при разлете эрозионной лазерной плазмы в вакуум. ОИЯИ, 13-88-486, Дубна, 1988
5. Ю.И. Бабиков, Ким Сын Ир, В.Е. Миронов Двухволновый генератор субнаносекундных импульсов излучения на иттрий-алюминиевом гранате. ОИЯИ, 13-88-733, Дубна, 1988; ПТЭ, 1990, No 1, с. 172-173.
6. В.Е. Миронов Некоторые характеристики плазмы оптического пробоя паров калия. ЖТФ, 1992, т. 62, в.4, с.80-88.
7. С.М. Бийский, А.В. Мажулин, В.Е. Миронов и др. Электронно-кольцевой ионизатор ERIS. ОИЯИ, P9-92-431, Дубна, 1992
8. С.М. Бийский, А.В. Мажулин, В.Е. Миронов и др. Электронно-кольцевой ионизатор ERIS. В сб. Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1993, с.115-119
9. В.С. Александров, С.М. Бийский, В.Е. Миронов и др. Electron Ring Ionizer. To be published in: "Proc. of VI International Symposium on Electron Beam Ion Sources", June 1994, Stockholm, Sweden; Physica Scripta

Рукопись поступила в издательский отдел
4 декабря 1995 года.