

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Б 953

P9-87-365

**Ю.А.Быковский*, В.Г.Виноградов, Ю.П.Козырев*,
А.С.Пасюк, В.Д.Пекленков*, Н.В.Пронин,
С.Г.Стеценко, К.Г.Суворов***

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНОГО БАРЬЕРА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ**

*** Московский инженерно-физический институт**

1987

ВВЕДЕНИЕ

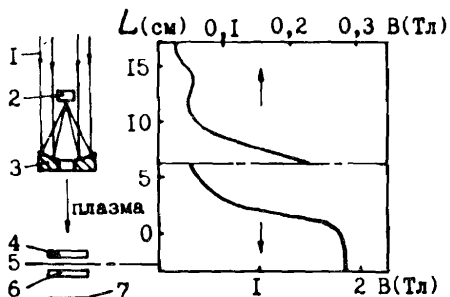
Работа посвящена изучению возможности использования магнитного барьера для повышения эффективности извлечения ионов из плазмы в лазерном источнике многозарядных ионов. Проведенные к настоящему времени исследования /1-3/ показали, что в процесс ускорения удается вводить не более 1% от общего числа ионов в плазме. Основной причиной низкой эффективности ввода ионов в процесс ускорения является малая длительность импульса ионов в области эмиссионной щели вследствие высокой скорости разлета лазерной плазмы $\sim 10^7$ см/с. Одним из способов торможения ионов лазерной плазмы является торможение при прохождении плазмой магнитного барьера из-за диамагнитных свойств плазмы.

Целью настоящей работы явилось изучение особенностей прохождения лазерной плазмы сквозь магнитный барьер, поиск возможного торможения ионного компонента лазерной плазмы и реализация на основе проведенных исследований лазерного источника многозарядных ионов на циклотроне.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на циклотроне У-200 ЛЯР ОИЯИ. Схема эксперимента приведена на рис. 1. В качестве магнитного барьера использовалось неоднородное магнитное поле при переходе из вертикального канала циклотрона в межполюсное пространство. Распределение магнитного поля в вертикальном канале также показано на рис. 1. Мишень устанавливалась в вертикальном канале электромагнита цикло-

Рис. 1. Схема эксперимента и распределение магнитного поля на оси вертикального канала циклотрона. 1 - лазерный луч; 2 - мишень; 3 - сферическое зеркало; 4, 7 - зонды для измерения скорости плазмы (изображены на рис. 3б, 3в соответственно); 5 - медианная плоскость циклотрона; 6 - зонды для пространственно-временных и количественных измерений (изображены на рис. 3а).



трона на различных расстояниях L от верхней границы однородного поля в межполюсном зазоре. Лазерное излучение вводилось по вертикальному каналу и фокусировалось на мишень сферическим зеркалом. В центре зеркала имелось отверстие диаметром 5 мм для прохода плазмы. Нормаль к поверхности мишени в точке фокусировки лазерного излучения совпадала с осью вертикального канала, диаметр которого составлял 20 мм. В эксперименте применялись сферические зеркала с фокусным расстоянием $f = 2$ и $f = 5$ см. При использовании этих двух видов зеркал плотность потока лазерного излучения на поверхности мишени отличалась не более чем в 1,5 раза при одинаковой энергии и форме лазерного импульса. Из-за конструктивных особенностей установки при изучении количественных характеристик плотности и скорости плазмы, а также длительности и формы импульса ионов плазмы применялось сферическое зеркало с $f = 5$ см, а при определении количества ионов, проходящих около эмиссионной щели, использовалось зеркало с $f = 2$ см. В работе использовался CO_2 -лазер, позволяющий получать плотность потока лазерного излучения на поверхности мишени из углерода $\sim 10^9$ Вт/см². Энергия лазерного импульса ≈ 2 Дж. Форма импульса лазерного излучения приведена на рис. 2. Анализ пространственно-временных и количественных характеристик ионного компонента лазерной плазмы, прошедшей сквозь магнитный барьер, проводился с помощью плоских электрических зондов. Были использованы два зонда, имеющие форму колец, и один зонд в форме круга (рис. 3а), которые устанавливались в одной плоскости циклотрона (рис. 1). Центр зондов совпадал с осью вертикального канала циклотрона. Скоростные характеристики ионов лазерной плазмы измерялись с помощью двух зондов, имеющих форму секторов круга диаметром 18 мм (рис. 3б,в), которые устанавливались в межполюсном зазоре в области однородного магнитного поля на оси канала на расстоянии 4,5 см друг от друга (рис. 1). Зонды работали в режиме ионного тока насыщения.

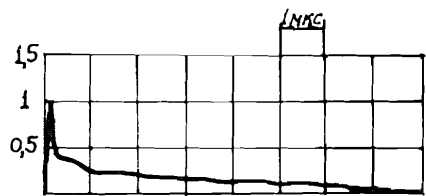


Рис. 2. Форма импульса лазерного излучения.

Центр зондов совпадал с осью вертикального канала циклотрона. Скоростные характеристики ионов лазерной плазмы измерялись с помощью двух зондов, имеющих форму секторов круга диаметром 18 мм (рис. 3б,в), которые устанавливались в межполюсном зазоре в области однородного магнитного поля на оси канала на расстоянии 4,5 см друг от друга (рис. 1). Зонды работали в режиме ионного тока насыщения.

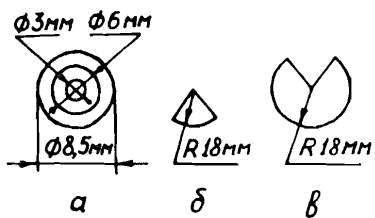


Рис. 3. Форма и размеры электрических зондов: а — зонды для пространственно-временных и количественных измерений; б, в — зонды для измерения скорости плазмы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы сигналов с центрального (кругового) зонда для различных расстояний L в отсутствие и при наложении магнитного поля. Сигнал с кольцевых зондов имел качественно близкую форму. В отсутствие поля форма ионного сигнала с зонда не зависела от L (рис. 4 в,г). В пределах экспериментальной ошибки, которая составляла, 30%, величина ионного тока I с зонда и его длительность τ изменялись как $I \sim L^{-3}$; $\tau \sim L$.

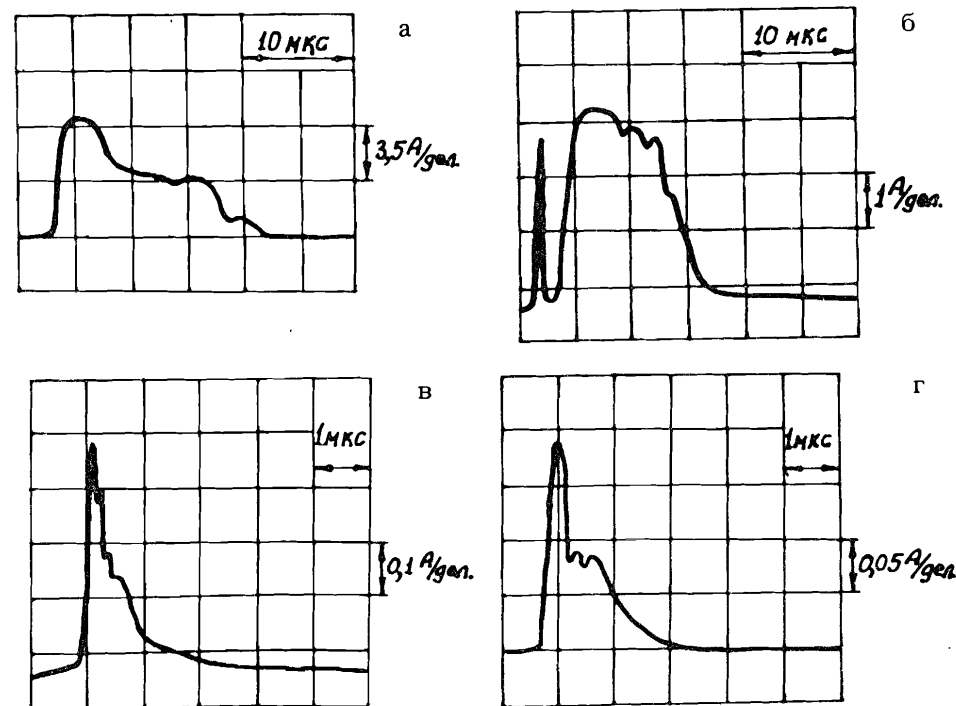


Рис. 4. Характерные осциллограммы сигналов с центрального зонда на различных расстояниях L в отсутствие и при наложении магнитного поля. $H_{\text{макс}}$: а — $L = 2,4$ см; б — $L = 5$ см; $H = 0$: в — $L = 5$ см; г — $L = 9,5$ см.

Анализ сигнала с зондов при прохождении плазмой магнитного барьера показал, что при установке мишени на минимально возможное в эксперименте расстояние ($L = 2,4$ см) сигнал с зондов имел однопиковую структуру (рис. 4а). С увеличением L от 5 до 9,5 см наблюдалась двухпиковая структура плазменного сгустка (рис. 4б), состоящая из высокоэнергетической (узкий пик на рис. 4б) и низкоэнергетической частей, причем высокоэнергетическая часть содержала не более 5%

всех частиц в сгустке. При установке мишени на максимально возможное L для данных экспериментальных условий ($L = 16$ см) сквозь магнитный барьер проходил только один из плазменных сгустков, содержащий высокоэнергетичные ионы.

Двойная структура плазменного сгустка наблюдается и в отсутствие магнитного поля, хотя она менее выражена, чем при наложении поля (рис. 4 в.г). Двойная структура плазменного сгустка может быть следствием формы лазерного импульса ^{4/}, состоящего из гигантского импульса и "хвоста" (рис. 2). Поскольку плотность потока лазерного излучения для гигантского импульса и "хвоста" различна, то параметры плазменных сгустков (плотность, угловые и количественные характеристики и т.п.) также различны. Распад же плазменного сгустка при прохождении сквозь магнитный барьер можно объяснить воздействием магнитного поля на эти два плазменных сгустка.

Исследования скоростных характеристик плазмы подтвердили, что скорость плазмы после прохождения магнитного барьера уменьшается. При увеличении L от 5 до 9,5 см скорость высокоэнергетичной части плазменного сгустка уменьшалась от $8,5 \cdot 10^6$ до $4,5 \cdot 10^6$ см/с. Скорость низкоэнергетичной части плазменного сгустка после прохождения магнитного барьера была существенно ниже высокоэнергетичной и составляла $\sim 10^6$ см/с ($L = 5$ см).

Как показал эксперимент, максимальная плотность лазерной плазмы, прошедшей сквозь магнитный барьер, достигалась на оси вертикального канала в основной (низкоэнергетичной) части плазменного сгустка и монотонно уменьшалась с удалением от его оси. На рис. 5 приведена зависимость плотности лазерной плазмы от расстояния до оси вертикального канала для основной части сгустка при $L = 5$ см. Качественно близкие зависимости плотности были получены и на других расстояниях L .

С точки зрения использования лазерной плазмы для задач ускорения важно знать количество ионов, которые проходят около эмиссионной щели источника с поперечным размером несколько миллиметров и частично вводятся в цикл ускорения. В условиях нашего эксперимента эти ионы регистрировались зондом

в форме круга с диаметром 3 мм, располагавшимся перпендикулярно оси вертикального канала, причем центр зонда был смещен на 1 мм от оси вертикального канала. Зонд располагался на 8 мм ниже медианной плоскости циклотрона. На рис. 6 представлена зависимость количества

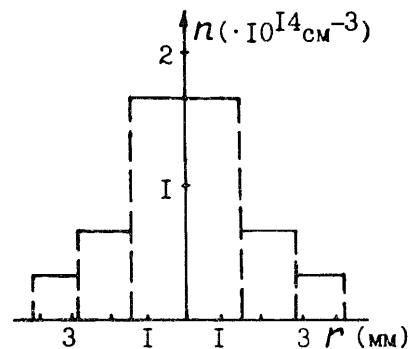
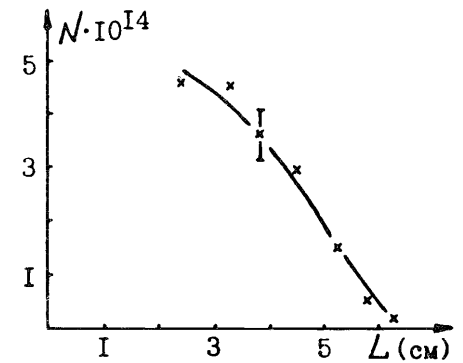


Рис. 5. Зависимость плотности лазерной плазмы от расстояния до оси вертикального канала для основной части плазменного сгустка.

Рис. 6. Зависимость количества ионов N , проходящих около эмиссионной щели и регистрируемых зондом диаметром 3 мм, от расстояния L .



ионов, пришедших на этот зонд, от расстояния L . Из рис. 6 видно, что с позиций ускорительной техники количество ионов достаточно для ввода в цикл ускорения. Уменьшение количества ионов, пришедших на зонд, с увеличением L является следствием не только увеличения диаметра плазменного столба

из-за уменьшения магнитного поля в области формирования плазменного сгустка, но и отражения части ионов при прохождении магнитного барьера плазменным сгустком. Так, при увеличении L от 3,3 ($B = 7,0$ кГс) до 6,3 см ($B = 2,4$ кГс) количество ионов, пришедших на зонд, уменьшается приблизительно в 20 раз (рис. 6), при этом согласно результатам ^{2/} диаметр плазменного столба в данных магнитных полях увеличивается примерно в 2 раза, что должно приводить лишь к четырехкратному уменьшению количества регистрируемых ионов.

Таким образом, результаты этой части исследований показали:

- лазерная плазма способна проходить сквозь магнитный барьер с величиной $B_0/B_L \leq 60$ ($B_0 = 18,5$ кГс);
- после прохождения барьера скорость разлета плазмы можно уменьшить не менее чем в 2 раза;
- пространственная структура и количественные характеристики ионов плазменного факела приемлемы для ввода ионов в процесс ускорения.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ У-200

На основании выполненных исследований был реализован лазерный источник ионов для циклотрона У-200 с установкой мишени в вертикальном канале полюса циклотрона и проведены его испытания.

Схема лазерного источника ионов приведена на рис. 7. В источнике использовалось сферическое зеркало с фокусным расстоянием $f = 2$ см. Транспортировка лазерной плазмы от мишени к эмиссионной щели производилась через отверстие в зеркале вдоль вертикального канала. Расстояние от нормали к поверхности мишени в точке фокусировки лазерного излучения до эмиссионной щели по радиусу циклотрона составляло 3 мм. Размер эмиссионной щели источника составлял $3 \times$

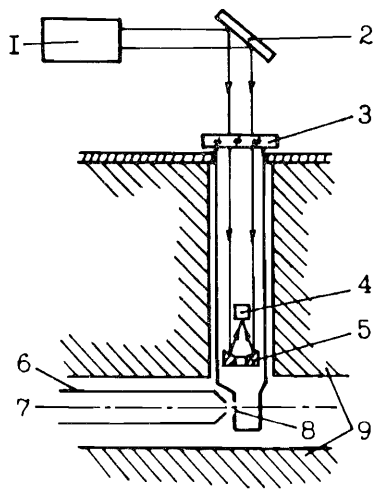


Рис. 7. Схема лазерного источника ионов для циклотрона. 1 - CO_2 -лазер; 2 - поворотное зеркало; 3 - окно в штоке источника; 4 - мишень; 5 - сферическое зеркало с отверстием для прохода плазмы; 6 - дуант с извлекающим электродом; 7 - медианная плоскость циклотрона; 8 - эмиссионная щель в камере источника; 9 - полюсы циклотрона.

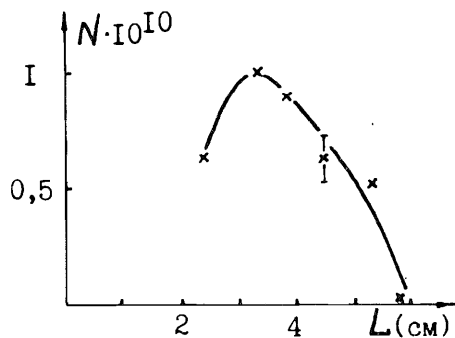


Рис. 8. Зависимость среднего количества N ускоренных ионов C_{12}^{3+} за один импульс лазера от расстояния L .

х 8 мм. Измерение интенсивности ускоряемых ионов проводилось на внутренних радиусах циклотрона с помощью пробника. Остальные элементы конструкции были аналогичны описанному в п.1.

На рис. 8. приведена экспериментальная зависимость средней интенсивности ускоряемых ионов C_{12}^{3+} от расстояния L . Для $L > 6$ см количество ускоренных ионов C_{12}^{3+} за один импульс лазера было ниже порога чувствительности регистрирующей аппаратуры, который составлял $\sim 10^8$ частиц/импульс. Как видно из приведенных результатов, наиболее оптимальной с точки зрения получения максимальной интенсивности ускоренных ионов является величина $L \approx 3$ см. На рис. 9 приведена осциллограмма ускоренного ионного тока для $L = 3,3$ см. При этой величине L максимальное количество ускоренных ионов составило $1,8 \cdot 10^{10}$ част./имп., что в два раза выше ранее полученных результатов для лазерных источников ионов на циклотроне. Этому соответствует и максимальная длительность им-

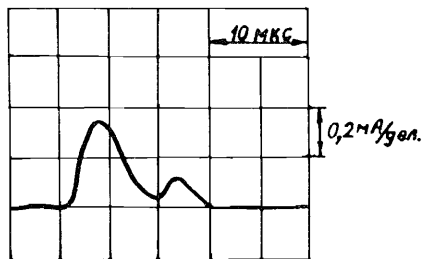


Рис. 9. Осциллограмма ускоренного тока ионов C_{12}^{3+} для расстояния $L = 3,3$ см.

пульса ускоренных ионов (14 мкс) вместо нескольких микросекунд в предшествующих вариантах источника. Увеличение ускоренного ионного тока при увеличении L для $L \lesssim 3$ см является следствием повышения эффективности извлечения ионов из плазмы после прохождения плазмы через магнитный барьер. Уменьшение количества ускоренных ионов C_{12}^{3+} при увеличении L для $L > 3$ см (рис. 8) происходит быстрее, чем уменьшение полного количества ионов, проходящих около эмиссионной щели (рис. 6). Согласно результатам работы^{/3/} одной из причин такого расхождения является уменьшение магнитного поля в области формирования плазменного сгустка, приводящее к уменьшению относительного содержания многозарядных ионов в плазме.

В работе также были проведены исследования влияния кратера на поверхности мишени на величину ускоренного ионного тока (рис. 10). Из рис. 10 видно, что в пределах первых ~ 100 импульсов лазера наблюдается увеличение количества ускоряемых ионов, что является следствием "кумулятивного" эффекта^{/5/}. Количество ускоренных ионов при этом увеличивается приблизительно в 1,5 раза от начального. В дальнейшем с увеличением числа импульсов лазера наблюдается монотонный спад количества ускоряемых ионов из-за деформации кратера. Видимо, при эксплуатации источника в условиях, подобных условиям нашего эксперимента, следует производить не более 100 выстрелов по одной точке мишени.

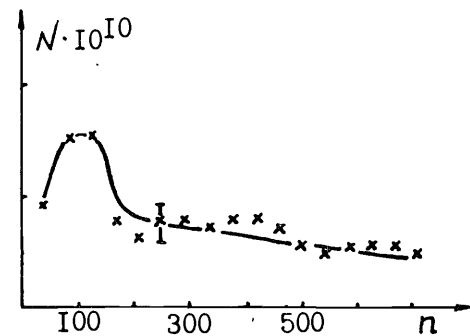


Рис. 10. Зависимость среднего количества N ускоренных ионов C_{12}^{3+} за один импульс лазера от числа выстрелов n по одной точке мишени для $L = 3,3$ см.

С точки зрения использования ионного пучка в физических экспериментах важно знать, насколько существенно сказывается продольная составляющая скорости ионов вдоль магнитного поля, уменьшение которой являлось задачей эксперимента, на вертикальном размере ионного пучка. С этой целью в работе проводилось изучение пространственной структуры пучка ионов C_{12}^{3+} с помощью пластиковых детекторов, помещенных внутрь циклотрона на радиусе $R = 35$ см. Из распределения плотности треков на детекторе получено, что характерным вертикальным размером пучка ионов C_{12}^{3+} на внутренних радиусах циклотрона является величина ≈ 20 мм, что приемлемо для физических экспериментов.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность использования магнитного барьера для повышения эффективности лазерного источника ионов.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность Г.Н.Флерову и Ю.Ц.Оганесяну за постоянное внимание к работам по лазерным источникам ионов, а также Д.А.Узиенко за полезные обсуждения результатов эксперимента и В.И.Горячеву за помощь в подготовке оптических элементов установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьин О.Б. и др. – Письма в ЖТФ, 1983, т.9, с.261.
2. Быковский Ю.А. и др. Сообщение ОИЯИ, P9-86-2, Дубна, 1986.
3. Быковский Ю.А. и др. Сообщение ОИЯИ, P9-86-3, Дубна, 1986.
4. Apostol I. et al. – Rev. Roum. Phys., 1976, 21, No.10, p.1009.
5. Бонч-Осмоловский А.Г., Мончинский В.А. Препринт ОИЯИ, P9-84-251, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 мая 1987 года.

Быковский Ю.А. и др.

P9-87-365

Использование магнитного барьера для повышения эффективности лазерного источника ионов

Представлены результаты исследований количественных и пространственно-временных характеристик ионного компонента лазерной плазмы при ее разлете в неоднородном магнитном поле. Исследования выполнены с целью изучения возможности использования магнитного барьера для повышения эффективности извлечения ионов из плазмы в лазерном источнике ионов для циклотронов. Исследования проводились на циклотроне У-200 с использованием CO₂-лазера. Максимальные величины длительности импульса и количества ускоренных ионов C¹²⁺ составили 14 мкс и $1,8 \cdot 10^{10}$ част./имп. соответственно, что превышает ранее полученные результаты на лазерных источниках ионов для циклотрона У-200.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Bykovskij Yu.A. et al.

P9-87-365

The Application of Magnetic Barrier for Increasing the Efficiency of Ion Laser Source

Some results on the investigation of quantitative and space-time characteristics of laser produced plasma dispersing in the non-uniform magnetic field are presented. The purpose of investigation was to consider a possibility of application of magnetic barrier in a laser ion source in order to rise the efficiency of ion extraction from plasma in this source. Investigations were carried out at the U-200 cyclotron and CO₂-laser was used. The obtained maximum pulse duration and maximum quantity of accelerated ion C¹²⁺ are 14 μs and $1.8 \cdot 10^{10}$ particle/pulse, respectively. These data exceed the results obtained earlier from the laser ion sources at the U-200 cyclotron.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987