

Короткоимпульсный электронный циклотронный резонансный источник многозарядных ионов

© В.А. Скалыга, В.Г. Зорин, И.В. Изотов, А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, С.В. Разин, А.В. Сидоров

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: sval@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 18 марта 2010 г.)

В настоящее время в ЦЕРНе активно ведутся исследования по проекту «Beta Beam», направленные на изучение осцилляций нейтрино. В рамках проекта предполагается создание пучков нейтрино при распаде ядер ${}^6\text{He}$, ускоренных до энергии порядка 100 GeV/nucleon. Для этого будет необходимо создавать короткоимпульсные (30–100 μs) интенсивные пучки многозарядных ионов упомянутого выше изотопа. Использование для этого современных классических источников ионов на основе эффекта электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) нецелесообразно ввиду медленного нарастания плотности плазмы (свыше миллисекунды) по сравнению с необходимой длительностью импульса. Предложена концепция создания короткоимпульсного ЭЦР-источника многозарядных ионов. Проведены эксперименты с накачкой на частотах 37.5 и 75 GHz, в которых была достигнута длительность импульса $\sim 50 \mu\text{s}$. Продемонстрировано хорошее соответствие теоретических расчетов экспериментальным результатам.

Введение

Одним из ключевых элементов проекта европейской программы исследований осцилляций нейтрино «Beta Beam» [1] является короткоимпульсный источник интенсивных пучков многозарядных ионов короткоживущих радиоактивных изотопов ${}^6\text{He}$, для многоступенчатой системы ускорителей (длительность импульса тока от 30 до 100 μs с частотой следования до 30 Hz, величина тока на уровне 10 mA при нормализованном эмиттансе не хуже $0.2\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$). Основные трудности в создании такого источника связаны с требованием высокой эффективности использования частиц, что обусловлено сложной технологией и низкой производительностью систем получения радиоактивных короткоживущих изотопов [2].

В качестве такого источника [3] предложено использовать плазму разряда при электронном циклотронном резонансе (ЭЦР), поддерживаемую мощным импульсным излучением гиротронов с частотой 60 GHz в разрядной камере малого размера (объем разрядной камеры примерно 0.1 л). Это предложение основано на проведенных ранее экспериментальных исследованиях динамики ЭЦР-разряда в открытых осесимметричных магнитных ловушках, поддерживаемого мощным излучением миллиметрового диапазона длин волн [4,5], показавших возможность формирования разряда (достижения плотностью плазмы стационарного значения) за время меньше 50 μs . В этих работах показано, что использование излучения миллиметрового диапазона длин волн позволяет существенно, более чем на порядок, повысить плотность плазмы в ЭЦР-разряде, что приводит к смене режима удержания плазмы — на смену классическому режиму удержания [6] приходит квазигазодинамический [7], время жизни плазмы в котором определяется газодинамическим выносом ионов из ловушки [8].

Исследованию именно этой возможности создания короткоимпульсного источника многозарядных ионов и посвящена настоящая работа.

Описание экспериментальных установок

Экспериментальные исследования проводились с использованием электромагнитного излучения с частотой 37.5 и 75 GHz и осесимметричных магнитных ловушек с различными конфигурациями магнитных полей: пробкотрон и ловушка со встречными магнитными полями — касп.

Эксперименты проводились на стенде SMIS 37, ранее описанном в работах [9,10], схема которого представлена на рис. 1.

В случае использования для создания и поддержания плазмы импульсного СВЧ-излучения гиротрона на ча-

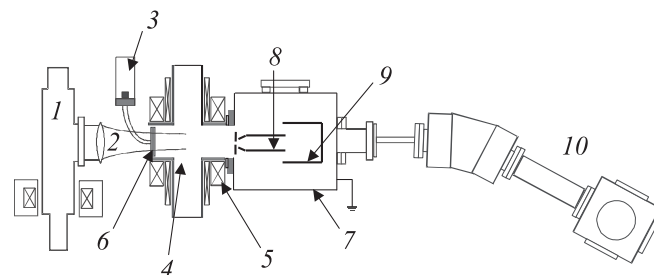


Рис. 1. Схема экспериментального стенда SMIS 37: 1 — гиротрон, 2 — СВЧ-пучок, 3 — импульсный вакуумный клапан, 4 — вакуумная камера, 5 — катушки магнитной ловушки, 6 — кварцевое СВЧ-окно, 7 — диагностическая камера, 8 — экстрактор, 9 — цилиндр Фарадея (на его место может устанавливаться ионная линза), 10 — анализатор ионов.

стоте 37.5 GHz его мощность могла достигать 100 kW при длительности импульса до 1.5 ms. Магнитное поле создавалось с помощью импульсных соленоидов. В большей части экспериментов поле в магнитных пробках системы составляло 1.7 T (величина резонансного магнитного поля для частоты 37.5 GHz составляет 1.34 T).

При нагреве плазмы СВЧ-излучением гиротрона с частотой 75 GHz мощность, вводимая в разрядную камеру, могла достигать 200 kW при длительности импульса до 100 μ s. Плазма создавалась и удерживалась в осесимметричной магнитной ловушке, максимальное магнитное поле в пробке которой могло достигать 5 T. Резонансная напряженность магнитного поля для частоты СВЧ-излучения 75 GHz составляет 2.7 T.

Напуск рабочего газа в ловушку осуществлялся по оси магнитной системы через кварцевую трубку длиной около 20 см и внутренним диаметром 5 mm, впаянную по центру входного кварцевого СВЧ-окна разрядной камеры.

Экстракция ионов и формирование ионного пучка в экспериментах с частотой излучения 37.5 GHz осуществлялись с помощью двухэлектродной одноапертурной системы экстракции, а в случае 75 GHz — с помощью двухэлектродной сеточной системы. Для измерения полного ионного тока на оси магнитной ловушки устанавливался цилиндр Фарадея, перехватывающий весь ионный пучок, выходящий из системы экстракции. Для спектрального анализа экстрагируемого пучка положительных ионов использовались магнитостигматический и времяпролетный анализаторы ионов.

Результаты экспериментов

Целью экспериментов, как уже отмечалось, является возможность исследовать временные характеристики и эффективность образования ионов при высокой плотности плазмы, в условиях, когда реализуются квазигазодинамический режим удержания плазмы в магнитной ловушке, что обеспечивает эффективную генерацию многозарядных ионов при малом времени жизни.

С целью достижения минимального времени развития разряда со степенью ионизации больше единицы (все нейтральные частицы ионизованы, плазма содержит многозарядные ионы) проводилась оптимизация по следующим параметрам: мощность СВЧ-излучения, скорость напуска и давление нейтрального газа в ловушке перед пробоем, величина магнитного поля ловушки. Все экспериментальные исследования возможности быстрого формирования плазмы ЭЦР-разряда, описанные в данной работе, проводились при использовании гелия в качестве рабочего газа. В результате оптимизации условий эксперимента удалось достичь времени развития разряда менее 15 μ s.

На рис. 2 приведены примеры осциллограмм тока коллектора цилиндра Фарадея, полученные на различных установках с использованием излучения с частотами 37.5 и 75 GHz при длительности импульса излучения 50 μ s. Остальные параметры измерений и расчетов, представленных на рис. 2, *a*: мощность 100 kW,

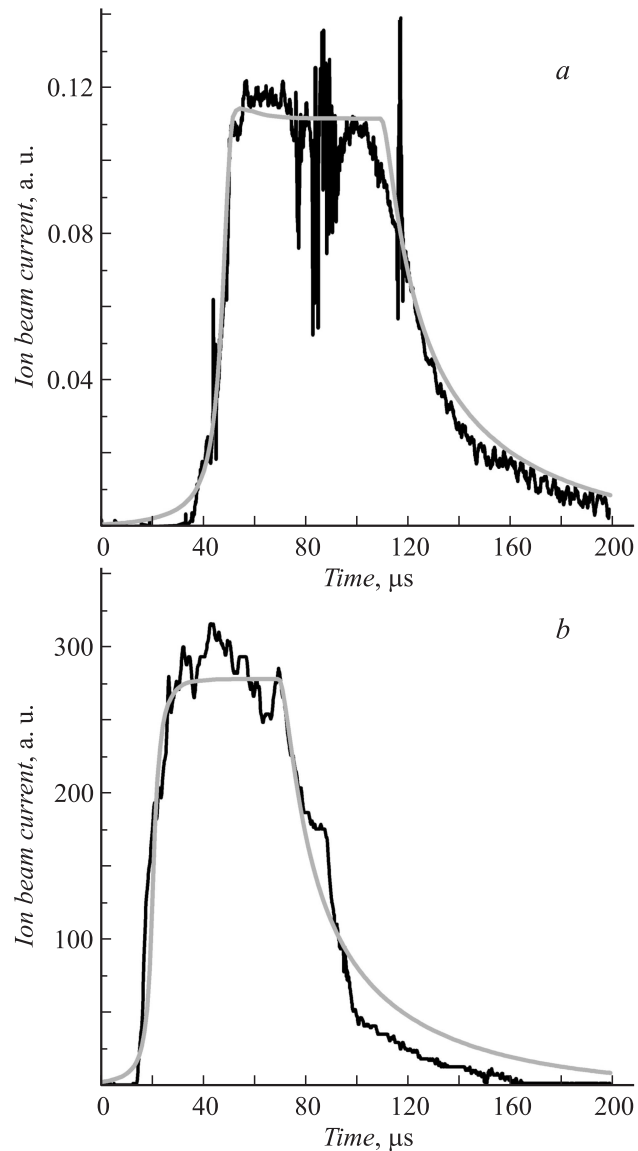


Рис. 2. Ток ионного пучка. Осциллограммы получены при частоте излучения, GHz: *a* — 37.5, *b* — 75. Жирная кривая — ток, измеренный с помощью цилиндра Фарадея; светлая кривая — расчет при параметрах, указанных в тексте.

плазма удерживалась в ловушке со встречными полями с эффективной длиной¹ 28 см, давление газа 10^{-4} Torr, магнитное поле в пробке 1.7 T. На рис. 2, *b*: мощность 150 kW, плазма удерживалась в ловушке простой

¹ Для удобства рассмотрения результатов, полученных при использовании различных конфигураций магнитных ловушек, введем понятие эффективной длины ловушки. С помощью данного параметра будем определять продольное время жизни плазмы при квазигазодинамическом режиме ее удержания как отношение эффективной длины к ионной звуковой скорости в пробке ловушки. Формально этот параметр определяется как отношение объема силовой трубки, ограниченной магнитными пробками ловушки, к суммарной площади поперечных сечений, ограничивающих данный объем силовой трубки. Для ловушек простой пробочной конфигурации с длинной однородной частью эффективная длина является аналогом величины $RL/2$, где R — пробочное отношение, а L — продольная длина ловушки.

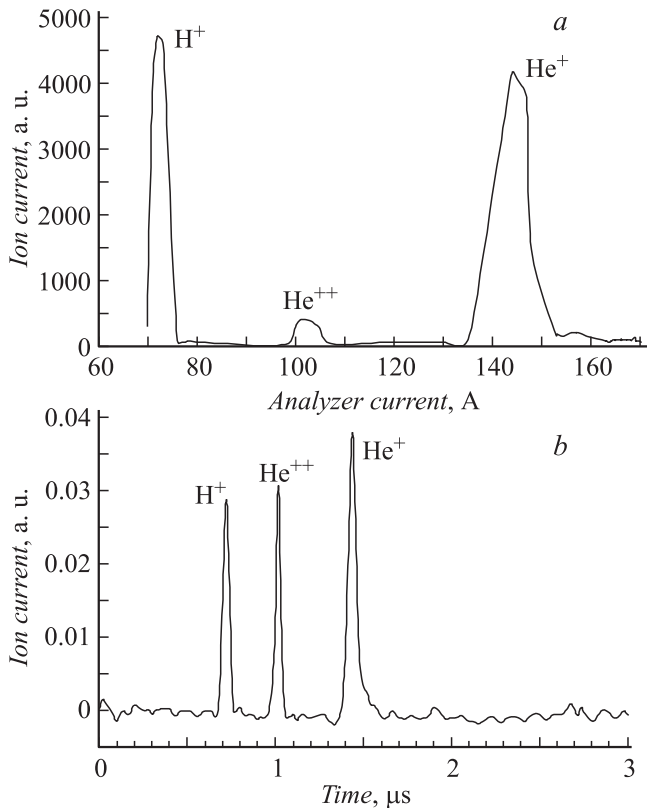


Рис. 3. Распределение ионов гелия по кратностям ионизации: *a* — распределение получено при частоте излучения 37.5 GHz, мощности 100 kW, плазма удерживалась в ловушке со встречными полями с эффективной длиной 28 см, давление газа 10^{-4} Torr, магнитное поле в пробке 1.7 T; *b* — распределение получено при частоте излучения 75 GHz, мощности 150 kW, плазма удерживалась в ловушке простой пробочной конфигурации с длиной 17 см при пробочном отношении 3.5 (эффективная длина 30 см), давление газа $2.5 \cdot 10^{-4}$ Torr, магнитное поле в пробке 4 T.

пробочной конфигурации с длиной 17 см при пробочном отношении 3.5 (эффективная длина 30 см), давление газа $2.5 \cdot 10^{-4}$ Torr, магнитное поле в пробке 4 T.

В обоих случаях время развития разряда не превышает $15 \mu\text{s}$, что является достаточным для создания импульсов с длительностью от $30 \mu\text{s}$ и удовлетворяет требованиям проекта «Beta Beam». При этом плотность потока плазмы в пробках ловушек составляла 2 и $8 \text{ A}/\text{cm}^2$ для накачки с частотой 37.5 и 75 GHz соответственно.

На рис. 3 представлены распределения ионов гелия по кратностям ионизации, которые были получены при тех же условиях работы установок, что и осциллограммы на рис. 2.

Видно, что при использовании СВЧ-накачки с частотой 75 GHz удалось существенно повысить средний заряд ионов, что связано с увеличением параметра удержания плазмы за счет увеличения ее концентрации.²

² На основании результатов экспериментов с другими газами можно утверждать, что составляющая молекулярного водорода в этом совпадающем пике не превосходит 10%.

Проведенные эксперименты демонстрируют возможность получения необходимой длительности импульса тока ионов, что позволяет проводить дальнейшие исследования путей достижения высокой эффективности использования радиоактивного газа.

Анализ экспериментальных данных

Представленные выше результаты экспериментов могут быть объяснены с единой точки зрения несмотря на существенное различие в конфигурациях, использовавшихся для удержания плазмы магнитных ловушек.

Процесс развития ЭЦР-разряда в магнитной ловушке источника многозарядных ионов можно условно разделить на две стадии, для которых скорость роста концентрации плазмы определяется разными процессами:

— на первой стадии пока $N_e \ll N_a$ (N_e, N_a — концентрации электронов и атомов), основным процессом является ионизация нейтрального газа при столкновении с горячими электронами, концентрация плазмы экспоненциально нарастает, а потери заряженных частиц незначительны;

— на второй стадии степень ионизации плазмы близка к единице ($N_e \approx N_a$), начинается процесс многократной ионизации, возрастают потери плазмы и поток плазмы из ловушки выходит на стационарное значение. На второй стадии формируется распределение ионов по кратностям ионизации. Время его установления определяется временем жизни плазмы и сокращается с уменьшением последнего.

Отметим, что первая стадия с точки зрения эффективности использования радиоактивных частиц не играет существенной роли, так как в это время поток плазмы из ловушки много меньше, чем в стационаре и данными потерями можно пренебречь. Самым важным является сокращение длительности второй стадии, которой и определяются основные потери частиц.

Как уже говорилось, в условиях проведенных экспериментов (при высокой плотности плазмы) реализовывался квазигазодинамический режим удержания. Время жизни плазмы в этом случае определяется следующим выражением [7]:

$$\tau = \frac{L_{\text{eff}}}{V_s}, \quad (1)$$

где L_{eff} — эффективная длина ловушки, V_s — ионно-звуковая скорость. Видно, что оно не зависит от плотности плазмы и определяется размерами магнитной ловушки и значением V_s . Совпадение времени развития разряда в разных ловушках может быть объяснено близкими значениями времени жизни плазмы в обоих случаях.

Для оценок времени жизни необходимо оценить температуру электронов в разных экспериментах. Температура электронов, а также их концентрация в разряде могут быть оценены с помощью численного моделирования динамики разряда с использованием экспериментальных измерений спектра ионов по кратностям ионизации и

плотности потока плазмы из ловушки. Это оказывается возможным, так как температура и концентрация при заданных параметрах магнитной ловушки и СВЧ-накачки однозначно определяют стационарные параметры источника ионов (плотность потока плазмы и средний заряд ионов).

Расчеты динамики разряда осуществлялись в рамках нульмерной модели [11] на основе уравнений баланса ионизации, описывающих временную динамику температуры электронов и концентраций всех компонент плазмы. Учитывались нагрев электронов СВЧ-излучением, ступенчатая ионизация электронным ударом, вынос плазмы из ловушки, перезарядка ионов на нейтральных частицах, а также потери энергии на ионизацию.

Расчеты показали, что полученные экспериментальные результаты в случае использования частоты накачки 37.5 GHz соответствуют температуре электронов 40 eV и концентрации плазмы 10^{13} cm^{-3} . В случае частоты СВЧ-накачки 75 GHz, по нашим оценкам, эти параметры составили 70 eV и $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Проведенное моделирование процессов развития разряда демонстрирует хорошее совпадение с экспериментом. Так, на рис. 2 совместно с осциллограммами токов цилиндров Фарадея приведены расчетные кривые токов ионного пучка для этих условий. Для частоты СВЧ-накачки 37.5 GHz, по нашим оценкам, время жизни составляло $10 \mu\text{s}$. При более высокой частоте СВЧ-накачки оно составляло $7 \mu\text{s}$. Видно, что значения времени жизни плазмы оказались очень близки, чем и может быть объяснено примерное равенство длительностей передних фронтов в двух рассматриваемых случаях, а также то, что они не зависят от конфигурации магнитной ловушки.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что достижение столь короткого времени выхода на стационар стало возможно благодаря малому времени жизни. Однако следует отметить, что при этом величины параметров удержания (произведение времени жизни и концентрации $N_e \tau$) в наших разных экспериментах различались примерно в 4 раза. В случае частоты накачки 75 GHz параметр удержания был достаточен для генерации многозарядных ионов ($N_e \tau \approx 4 \cdot 10^8 \text{ s/cm}^3$) за счет большой плотности плазмы, что хорошо видно из рис. 3.

Из выражения для времени жизни плазмы видно, что, варьируя магнитное удержание, т.е. изменяя длину и пробочное отношение ловушки, можно изменять время удержания плазмы в ловушке (см. (1)) и, следовательно, изменять время нарастания тока ионного пучка. Но вместе с этим изменяются и условия для образования многозарядных ионов — так, более короткое время удержания ионов приводит к увеличению темпа нарастания тока пучка, но к уменьшению среднего заряда.

Заключение

На основании проведенных исследований можно предложить концепцию создания короткоимпульсного ЭЦР-

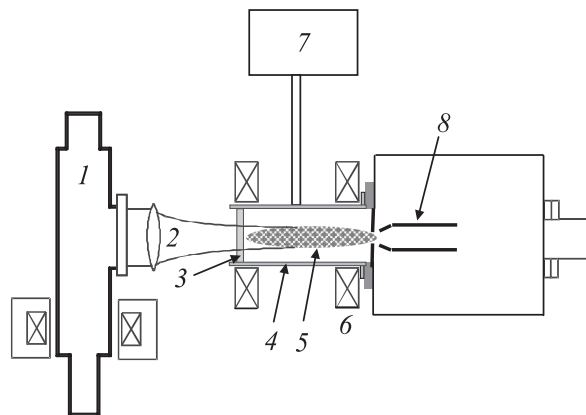


Рис. 4. Схема короткоимпульсного источника многозарядных ионов радиоактивных изотопов: 1 — гиротрон с частотой излучения 60 GHz и мощностью 200 kW, 2 — СВЧ-пучок, 3 — входное СВЧ-окно, 4 — вакуумная камера малого объема (0.11), 5 — плазма с плотностью до 10^{14} cm^{-3} , 6 — катушки, позволяющие создавать магнитное поле до 5 T, 7 — источник короткоживущих радиоактивных изотопов, 8 — экстрактор.

источника многозарядных ионов радиоактивных изотопов с высокой эффективностью использования частиц для проекта «Beta Beam».

Как уже говорилось, очень важным параметром источника является эффективность использования дорогих радиоактивных частиц. При условии фиксированного максимально возможного значения тока экстрагируемого ионного пучка (в основном определяется конструкцией системы экстракции) очевидно, что эффективность можно повысить за счет уменьшения объема разрядной камеры, уменьшая тем самым полное число частиц в ней при заданном давлении. В связи с этим разумно делать разрядную камеру диаметром порядка 1 см. Ограничением по размеру снизу является лишь то, что камера не должна являться закритическим волноводом для используемой длины волны излучения накачки. Схема источника, соответствующего предложенной концепции, представлена на рис. 4.

Проведенные оценки показали, что при использовании гиротрона с частотой 60 GHz, мощностью 200 kW и разрядной камеры с малым объемом (0.11) возможно получение ионного пучка гелия с длительностью импульса $30 \mu\text{s}$, с полным током на уровне 10 A, при этом возможно достижение эффективности источника до уровня 60% [12], что подчеркивает перспективность предложенного прототипа.

Авторы выражают благодарность за техническую поддержку при проведении экспериментов М.Ю. Казакову.

Работа была выполнена при поддержке проектов РФФИ № 08-02-00531-а, 09-02-97076-р_поволяже_a; индивидуального гранта президента РФ МК-4866.2008.2 и проекта EuroNu WP4 212372.

Список литературы

- [1] <<http://beta-beam.web.cern.ch/beta-beam/>>.
- [2] <<http://isolde.web.cern.ch/ISOLDE>>.
- [3] *Sortais P., Bouly J.-L., Curdy J.-C., Lamy T., Sole P., Thuillier T., Vieux-Rochaz J.-L., Voulot D.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. Vol. 75. N 5. P. 1610–1612.
- [4] *Skalyga V., Zorin V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Bohanov A.* // *Plasma Sources Sci. and Technol.* 2006. Vol. 15. P. 727–734.
- [5] *Skalyga V., Zorin V., Izotov V., Sidorov A., Lamy T., Sortais P., Thuillier T.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2006. Vol. 77. N 3. P. 03A325-1–03A325-3.
- [6] *Geller R.* Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. Bristol: Institute of Physics, 1996.
- [7] *Golubev S.V., Razin S.V., Smirnov A.N., Vodopyanov A.V., Zorin V.G.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. Vol. 71. N 2. P. 669–671.
- [8] *Мирунов В.В., Рютов Д.Д.* // *Письма в ЖТФ.* 1979. Т. 5. С. 678.
- [9] *Golubev S.V., Razin V., Vodopyanov A.V., Zorin V.G.* // *Trans. Fusion Technol.* 1999. Vol. 35. P. 288.
- [10] *Golubev S., Izotov S., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A.* // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. B.* 2007. Vol. 256. P. 537–542.
- [11] *Боханов А.Ф., Зорин В.Г., Изотов И.В., Разин С.В., Сидоров А.В., Скалыга В.А.* // *Физика плазмы.* 2007. Т. 33. № 5. С. 385–394.
- [12] *Zorin V.G., Golubev S.V., Izotov I.V., Mansfeld D.A., Razin S.V., Sidorov A.V., Skalyga V.A., Vodopyanov A.V.* // *13th Int. Conf. on Ion Sources ICIS 2009.* USA, September 2009.