

РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ В ПЛОТНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛАКЕ

Б.И. Иванов, В.И. Бутенко, В.П. Прищепов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: ivanovbi@www.kipt.kharkov.ua

Получение плотного вращающегося электронного облака достигалось путем поперечной инжекции электронного пучка в нарастающее во времени магнитное поле пробочной конфигурации. Параметры электронного облака: энергия электронов до 700 кэВ, концентрация $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, количество $3 \cdot 10^{12}$, плотность тока 1 кА/см^2 , эффективный ток 3 кА, время существования 1...10 мс, реактивная мощность около 2 ГВт, плотность потока электронов $6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. По оценкам в данных условиях возможно получение высокозарядных ионов азота и кислорода в количестве $10^9 \dots 10^{10}$ за импульс.

В настоящее время в ускорительной технике для получения высокозарядных ионов (ВЗИ) чаще всего применяются плазменные магнитные ловушки с электронно-циклотронным нагревом, предложенные и разработанные в [1], и электронно-лучевые ионизаторы, предложенные и разработанные в [2]. В работах ОИЯИ изучалась возможность создания и ускорения ВЗИ в релятивистских ($\gamma \approx 40$) электронных кольцах [3,4]. В американских работах [5-8] также ставился вопрос о получении ВЗИ в торои-

дальной ловушке электронов типа НУРАС [5,6] и в магнитной ловушке пробочной конфигурации [7,8].

В проведенных нами экспериментах (краткое сообщение опубликовано в [9]) получение плотного вращающегося электронного облака достигалось путем поперечной инжекции импульсного электронного пучка (энергия 35 кэВ, ток 0.5 А, длительность 5 мкс) в нарастающее во времени магнитное поле пробочной конфигурации, подобно [7,8]. Схема установки представлена на Рис.1.

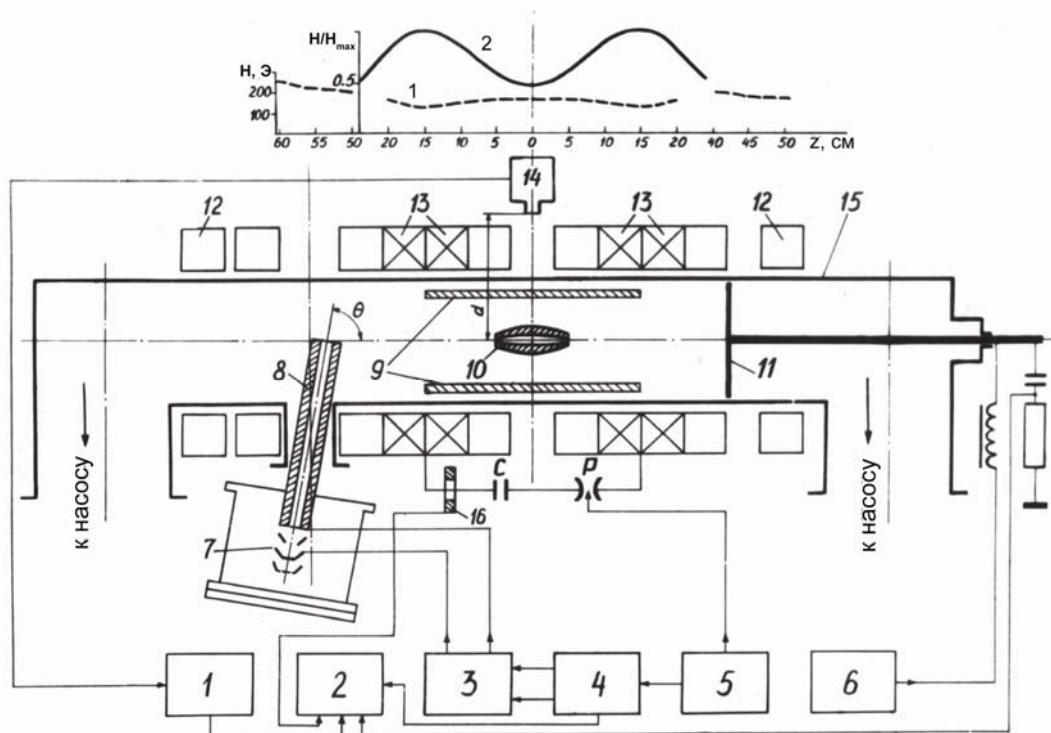


Рис.1. Схема установки:

1 – спектрометрический импульсный усилитель; 2 – многолучевой осциллограф; 3 – блок питания электронной пушки и фокусирующего соленоида; 4, 5 – запускающее устройство; 6 – источник напряжения (+300 В); 7 – электронная пушка (ток до 2 А, энергия до 70 кэВ); 8 – фокусирующий соленоид; 9, 10 – электронное облако в начале и в конце сжатия; 11 – подвижный зонд-коллектор; 12 – катушки постоянного магнитного поля; 13 – импульсные магнитные катушки; 14 – фотоумножитель; 15 – вакуумная камера из нержавеющей стали (стенка 2 мм); 16 – трансформатор тока. Вверху – распределение магнитного поля вдоль оси системы: постоянное магнитное поле (1), импульсное магнитное поле пробочной конфигурации (2)

Электронный пучок создавался трехэлектродной фокусирующей пушкой 7. Инжекция пучка во внешнее магнитное поле, создаваемое соленоидом 12, производилась под углом 86° . Ввод пучка в магнитное поле осуществлялся посредством магнитного канала 8, состоящего из однослойного ведущего соленоида малого диаметра и магнитного экрана. Двигаясь по спирали вдоль соленоида 12, инжектированные электроны при определенных условиях захватывались в ловушку, создаваемую двумя парами импульсных магнитных катушек 13. Захваченные электроны затем ускорялись в нарастающем во времени магнитном поле до релятивистских энергий в соответствии с соотношением $p_{\perp}^2 / p_{\perp 0}^2 = H / H_0$, где $p_{\perp 0}^2$ и p_{\perp}^2 – поперечный (к магнитному полю) импульс электрона в начале и в конце магнитного сжатия, H_0 и H – соответствующие напряженности магнитного поля. Эксперимент производился в следующей последовательности. Сначала включалось постоянное магнитное поле, затем импульсное магнитное поле. С некоторой задержкой по отношению к импульсному магнитному полю включался электронный пучок. Момент включения электронного пучка подбирался таким образом, чтобы обеспечить оптимальные условия захвата электронов пучка в ловушку. При этом захватывались электроны, которые проходили первую пробку с достаточно малой продольной скоростью. За время дрейфа этих электронов от первой пробки до второй и обратно напряженность магнитного поля в пробках и поперечная энергия электронов возрастали настолько, что обеспечивался захват электронов. Типичные условия эксперимента: инжектируемый ток 0.5 А, энергия электронов 35 кэВ, длительность импульса тока 5 мкс, радиус инжекции 4 см, постоянное магнитное поле в области инжекции $H_0=200$ Э. Параметры импульсного магнитного поля: пробочное отношение 2:1, расстояние между пробками 30 см, время нарастания 1.1 мс, максимальное значение магнитного поля в пробках 13 кЭ, постоянная времени проникновения импульсного магнитного поля в камеру из нержавеющей стали ~ 100 мкс. Давление остаточного газа $\approx 10^{-6}$ Торр.

Параметры облака нами измерялись по производимому им тормозному излучению. Регистрация и количественные измерения тормозного излучения производились с помощью фотоумножителя (ФЭУ) с кристаллом NaI(Tl) в режиме пропорционального счетчика и в интегральном режиме. С помощью эталонного источника (цезий-137) регистрирующая схема была прокалибрована по энергиям гамма-квантов в режиме пропорционального счетчика и по интенсивности гамма-излучения в интегральном режиме. Размеры электронного облака были определены той же регистрирующей схемой в сочетании со свинцовым коллиматором: продольный размер электронного облака составил около 5 см, поперечный размер – около 1.3 см.

На Рис.2 представлены результаты измерений в спектротрическом режиме.

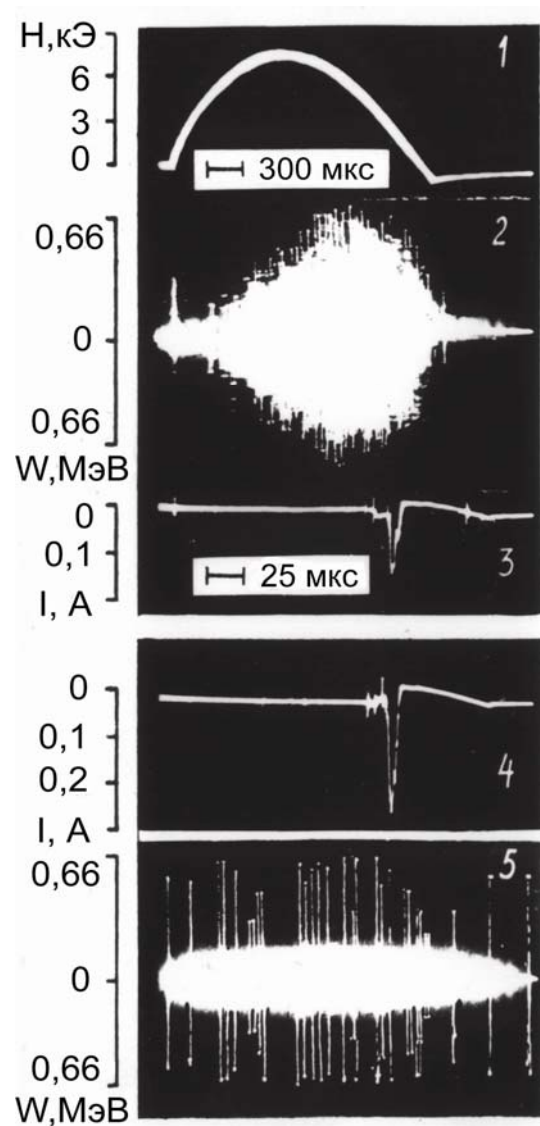


Рис.2. Результаты эксперимента, осциллограммы: 1 – ток через импульсные катушки, пересчитанный на напряженность магнитного поля в центре ловушки; 2 – сигнал с ФЭУ после прохождения спектротрического усилителя, работающего в режиме пропорционального счетчика γ -квантов тормозного излучения из объема, занятого облаком; 5 – то же, в случае эталонного источника Cs-137 (энергия квантов 0,662 МэВ, интенсивность $7,61 \cdot 10^4$ квантов/с); 3 – ток первичного электронного пучка на осевой коллектор при оптимальной задержке момента его инжекции относительно момента включения магнитного поля ($\Delta t = 36$ мкс, $J=0,15$ А); 4 – то же, при нулевой задержке ($J=0,3$ А)

Из сравнения осциллограмм 3 и 4 можно определить количество захваченных электронов: $N_e = 0.5 \cdot \Delta J \cdot t \cdot 6 \cdot 10^{18} = 2.7 \cdot 10^{12}$ (здесь $\Delta J = 0,15$ А – захваченный ток; $t = 6$ мкс – длительность импульса тока по основанию).

Время существования электронного облака в импульсном магнитном поле около 1 мс, а в режиме захвата тока (кроубар) около 10 мс (Рис.3).

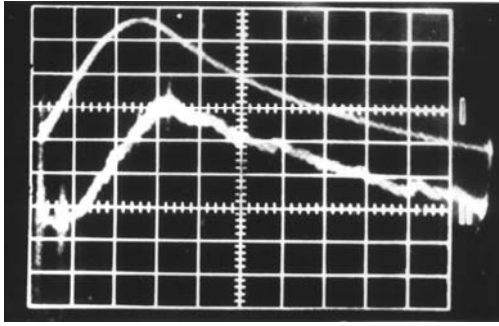


Рис.3. Осциллограммы: ток через импульсный соленоид, образующий магнитную ловушку (верхний луч), сигнал тормозного излучения с ФЭУ в интегральном режиме (нижний луч). Масштаб развертки 1 мс/дел.

Из осциллограммы Рис.2(2) найдено, что наибольшая энергия электронов в максимуме сжатия достигала 0.7 МэВ, что соответствует соотношению $p_{\perp}^2 / p_{\perp 0}^2 = H / H_0$. Из осциллограммы Рис.3 было определено полное число релятивистских электронов следующим образом. Связь между интенсивностью тормозного излучения I_R и количеством электронов N_e в облаке устанавливается соотношением:

$$I_R = n_0 N_e W_e v_e \phi_{\text{rad}}, \quad \phi_{\text{rad}} = 5.5 z^2 \frac{e^2}{\hbar c} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2,$$

где n_0 – концентрация нейтралов (или ионов); W_e и v_e – энергия и скорость электронов; $\phi_{\text{rad}} = 3,1 z^2 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ – эффективное сечение тормозного излучения при $W_e \leq 0,7 \text{ МэВ}$; z – заряд ядра [10]. Поскольку электронное облако длительное время удерживается вдали от стенок, мы полагаем, что в объеме отсутствуют тяжелые примеси и тормозное излучение обусловлено рассеянием электронов на атомах и ионах остаточного газа ($z^2 \approx 50$; $n_0 \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$).

Эффективность регистрации гамма-квантов с энергией до 0.7 МэВ около 0.7. Пользуясь указанными соотношениями, калибруя регистрирующую схему по гамма-источнику с известной интенсивностью и энергией, а также учитывая геометрию эксперимента, можно найти N_e . В данном случае получено $N_e \approx 3 \cdot 10^{12}$, $n_e \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с данными работ [7,8], где n_e определялось по синхротронному излучению. Исходя из приведенных данных, эффективная средняя плотность тока и полный ток захваченных электронов в максимуме сжатия составляют 1 кА/см² и 3 кА, соответственно.

В аналогичных работах, сделанных в Мэрилэнд (США) [7,8], было получено электронное облако с плотностью до 10^{12} см^{-3} , временем существования (кروبбар) до 150 мс, без признаков неустойчивости. В работах на установке другого типа (НУРАС) [5,6], было получено электронное облако с плотностью до 10^{10} см^{-3} , энергией электронов $\sim 10 \text{ кэВ}$, временем существования около 1 мс, после чего развивались неустойчивости. Экспериментальных данных относительно получения ВЗИ в [5-8] не приводится. В дальнейшем группа из Мэрилэнд переключилась на создание мощного безжелезного бетатрона, а работы по получению ВЗИ на НУРАС после 1970 года прекратились.

Оценка ионизационных возможностей полученного электронного облака производилась нами с использованием, в основном, источников [1,3,4] и указанных там некоторых ссылок.

Исходные параметры: плотность электронов $n_e \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, энергия электронов $W_e = 0.7 \text{ МэВ}$, скорость электронов $v_e = 2.7 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$, время ионизации $\tau = 10 \text{ мс}$. Как указано в [1], вакуум желательно иметь как можно лучше, во избежание преждевременной компенсации пространственного заряда электронного облака ионами водорода. Следует, однако, отметить, что указанная опасность в данном случае значительно снижается благодаря тому, что вторичные электроны остаются в магнитной ловушке. Предварительно можно начинать с $p = 10^{-7} \dots 10^{-6} \text{ Торр}$, то есть при таком же вакууме, как и в ускорителе, к которому должен быть подсоединен инжектор ВЗИ. Другое преимущество заключается в том, что реактивная мощность вращающихся электронов (часть которой идет на создание ВЗИ) составляет около 2 ГВт, в то время как импульсная мощность первичного электронного пучка – около 40 кВт.

Для оценки сечения однократной ионизации иона релятивистским электроном с изменением заряда иона с k на $k+1$ применима формула [11]:

$$\sigma_{k \rightarrow k+1} = \pi n r_e^2 (m c^2 / I_k) \ln(W_e / I_k),$$

где n – число электронов на данной (внешней) оболочке иона; m и $r_e = e^2 / m_0 c^2$ – масса и классический радиус электрона; I_k – энергия (потенциал) ионизации; W_e – энергия налетающего электрона.

Условие близкой к 100% вероятности ионизации:

$$n_e v_e \tau \sigma_{k \rightarrow k+1} \approx 1.$$

При глубокой ионизации атомов – до гелиеподобных ионов и до ядер – определяющую роль играют сечения $\sigma_{z-3 \rightarrow z-2}$ и $\sigma_{z-1 \rightarrow z}$, соответственно (z – заряд ядра). В частности, для азота эти сечения равны:

$$\sigma_i^{5+} = 1.3 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2, \quad \sigma_i^{7+} = 1.4 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2.$$

В таком случае для имеющихся параметров установок $n_e v_e \tau \sigma_i^{5+} = 1.05$; $n_e v_e \tau \sigma_i^{7+} = 0.11$.

Аналогичные результаты получены для углерода и кислорода. Следовательно, на данной установке имеются условия для получения высокозарядных (гелиеподобных) легких ионов с двумя электронами на К-оболочке.

При количестве электронов в облаке $N_e \approx 3 \cdot 10^{12}$ возможно получение ВЗИ порядка 10^{10} за цикл.

Следует отметить, что при создании означенной установки цель получения ВЗИ непосредственно не ставилась. Имеются дополнительные средства оптимизации ее параметров в данном направлении и просматривается, в частности, возможность получения ядер неона и аргона.

Параллельно изучается вопрос, как подобное устройство реально приспособить в качестве инжектора для линейных ускорителей дейтронов типа «МЛЮД» (описание такого ускорителя см., например, в [12]) с целью ускорения ВЗИ (N^{+5} , O^{+6} , Ne^{+8} , Ar^{+16}) до энергий в несколько мегаэлектронвольт на нуклон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.Д. Донец. Электронно-лучевой метод глубокой ионизации атомов // *ЭЧАЯ*. 1982, т.13, в.5, с.942-981.
2. R. Geller // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1976, v.23, p.904.
3. В.П. Саранцев, Э.А. Перельштейн. *Коллективное ускорение ионов электронными кольцами*. М.: «Атомиздат». 1979, с.77-87.
4. Э.А. Перельштейн, Г.Д. Ширков. Динамика процессов накопления ионов в электронных пучках и кольцах // *ЭЧАЯ*. 1987, т.18, в.1, с.154-195.
5. G.S. Janes, R.H. Levy, H.A. Bethe, B.T. Feld. New type of accelerator for heavy ions // *Phys. Rev.* 1966, v.145, p.925.
6. J.D. Daugherty, J.E. Eninger, G.S. Janes, R.H. Levy. The "HIPAC" as a source of highly stripped heavy ions // www.JACoW.org/PAC1969/0051.pdf
7. С.А. Капетанакос, Р.Е. Печачек, Д.М. Сперо, А.В. Тривелпиче. Trapping and confinement of nonneutral hot electrons clouds in a magnetic mirror // *Phys. Fluids*. 1971, v.14, p.1555.
8. С.Р. DeNeef, Р.Е. Pechacek, А.В. Trivelpiece. Comparison of the hot electron plasmas produced using the different plasma sources in a magnetic mirror compression experiment // *Phys. Fluids*. 1973, v.16, p.509.
9. Д.В. Горожанин, Б.И. Иванов, В.А. Мирошниченко, В.П. Прищепов. Получение и исследование облака релятивистских электронов в магнитной ловушке // *Письма в ЖТФ*. 1976, т.1, в.15, с.685-689.
10. В.Гайтлер. *Квантовая теория излучения*. М.: «МИР», 1956.
11. М. Gryzinsky. Classical theory of atomic collisions. I. Theory of inelastic collisions // *Phys. Rev. A*. 1965, v.138, p.336-358.
12. С.А. Вдовин, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, Н.Г. Шулика. Линейный ускоритель дейтронов для элементного анализа // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»* (53). 2010, №2, с.29-33.

Статья поступила в редакцию 10.09.2009 г.

CONSIDERATION OF ABILITY OF DEEP IONIZATION OF ATOMS IN A DENSE ROTATING ELECTRON CLOUD

B.I. Ivanov, V.I. Butenko, V.P. Prishchepov

In the experiments conducted by us obtaining of a dense rotating electron cloud was achieved by transverse injection of pulsed electron beam into the rising over time magnetic field of a trap configuration. The electron cloud parameters: energy of electrons was up to 700 keV, concentration $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, number $3 \cdot 10^{12}$, current density 1 kA/cm^2 , effective current 3 kA, duration 1...10 ms, reactive power 2 GW, density of electron flow $6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. According to preliminary estimates, it should expect to obtain of high-charged ions of nitrogen and oxygen, in the number of $10^9 \dots 10^{10}$ for one pulse.

РОЗГЛЯДАННЯ МОЖЛИВОСТІ ГЛИБОКОЇ ІОНІЗАЦІЇ АТОМІВ У ЩІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОННІЙ ХМАРІ, ЩО КРУТИТЬСЯ

B.I. Ivanov, V.I. Butenko, V.P. Prishchepov

Отримання щільної електронної хмари, що крутиться, досягалося шляхом поперечної інжекції електронного пучка в магнітне поле пробкової конфігурації, що збільшується у часі. Параметри електронної хмари: енергія електронів до 700 кеВ, концентрація $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, кількість $3 \cdot 10^{12}$, густина струму 1 кА/см^2 , ефективний струм 3 кА, час існування 1...10 мс, реактивна потужність близько 2 ГВт, щільність потоку електронів $6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. За оцінками в цих умовах можливо отримання високозарядних іонів типу азоту й кисню у кількості $10^9 \dots 10^{10}$ за імпульс.