

УДК 537.533.33, 621.384.60-833

## НАКОПИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ LEPTA (СТЕЛЛАТРОН)

*Е. В. Болтушкин, В. Ф. Быковский, А. Г. Кобец, Ю. В. Кортаев,  
В. И. Лохматов, В. Н. Малахов, И. Н. Мешков, В. Н. Павлов,  
Р. В. Пивин, И. А. Селезнев, А. О. Сидорин, А. В. Смирнов,  
Е. М. Сыресин, Г. В. Трубников, С. Л. Яковенко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проект по созданию тороидального накопителя частиц низкой энергии (LEPTA) имеет целью сооружение позитронного накопительного кольца с электронным охлаждением позитронов, циркулирующих в кольце. Такая особенность установки LEPTA автоматически дает возможность использовать ее в качестве генератора атомов позитрония (Ps), которые возникают в процессе рекомбинации позитронов с охлаждающими электронами в секции охлаждения кольца. Проект имеет несколько целей: исследование динамики частиц в модифицированном бетатроне, изучение процесса электронного охлаждения циркулирующим пучком, генерация позитрония на лету, исследование физики позитрония, изучение возможности получения атомов антиводорода на лету. Все ключевые элементы кольца: кикер, система инъекции электронного пучка, спиральный квадруполь, септумный магнит — протестированы и выведены на проектные параметры. Сооружение накопителя завершено, и получен циркулирующий электронный пучок. В статье обсуждаются вопросы динамики частиц в ускорителе, результаты численного моделирования и экспериментальные результаты исследования динамики пучка, измерения бетатронного числа и времени жизни пучка.

The project of Low Energy Particle Toroidal Accumulator (LEPTA) is dedicated to construction of a positron storage ring with electron cooling of positrons circulating in the ring. Such a peculiarity of LEPTA enables it automatically to be a generator of positronium (Ps) atoms, which appear in recombination of positrons with cooling electrons inside the cooling section of the ring. The project has a few goals: dynamics in the modified betatron, electron cooling with circulating beam, electron cooling of positrons, positronium generation in flight, positronium physics, feasibility of antihydrogen generation in flight. All key elements of the ring — kicker, electron beam injection system, helical quadrupole, septum magnet — are tested, and expected design parameters were achieved for those elements. LEPTA construction has been completed, and circulating electron beam has been achieved.

### ВВЕДЕНИЕ

Медленные позитроны и позитроний являются перспективным инструментом в изучении физики твердого тела и физики поверхности, кроме того, позитроний представляет самостоятельный интерес в области фундаментальных исследований. В ОИЯИ разработана установка LEPTA (Low Energy Positron Toroidal Accumulator) для получения потока медленных позитронов с интенсивностью до  $10^6 \text{ с}^{-1}$  в диапазоне энергий от 1 до 50 кэВ и потока атомов позитрония с энергией 10 кэВ и интенсивностью до  $10^4 \text{ с}^{-1}$  [1–3]. Она состоит из инжектора позитронов и накопительного кольца. Инжектор включает в себя источник позитронов (изотоп  $^{22}\text{Na}$ ) и ловушку пеннинговского типа для предварительного накопления позитронов. Накопитель LEPTA с периметром 17,2 м оборудован

системой электронного охлаждения. В секции охлаждения происходит рекомбинация электронов с позитронами и генерация позитрония.

Особенностью накопителя LEPTA является фокусировка продольным магнитным полем, которое присутствует на всем периметре орбиты. Продольное магнитное поле величиной 400 Гс обеспечивает замагниченность циркулирующих позитронов с энергией 10 кэВ и, как результат, большое время жизни. В присутствии продольного магнитного поля инжекция позитронного пучка на равновесную орбиту, ввод и вывод однопролетного электронного пучка требуют специального инжекционного комплекса. Однооборотная инжекция позитронов осуществляется с помощью импульсного электрического кикера. Для получения долговременной устойчивости циркулирующего пучка используется спиральное квадрупольное поле, которое формируется стеллараторной обмоткой, расположенной в прямолинейной секции. Движение в горизонтальной и вертикальной плоскостях в таком накопителе является связанным. Проектирование накопителя осуществлялось с помощью специально разработанного программного кода BETATRON [4].

## 1. СХЕМА СОВМЕЩЕНИЯ И РАЗВЕДЕНИЯ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПОЗИТРОННОГО И ОДНОПРОЛЕТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКОВ

Для генерации потока атомов позитрония необходимо совместить однооборотный охлаждающий пучок электронов с циркулирующим позитронным. В накопителе с продольным магнитным полем из-за равенства масс позитрона и электрона совмещение и разведение пучков является достаточно сложной проблемой. Сведение и разведение пучков электронов и позитронов в вертикальном направлении осуществляется за счет центробежного дрейфа электронов в тороидальных секциях. В торах для компенсации дрейфа циркулирующего на равновесной орбите пучка прикладывается дополнительное дипольное магнитное поле, оно удваивает вертикальное смещение электронного пучка, и при угле поворота, равном  $\pi$ , величина смещения составляет  $2\pi\rho_L$ , где  $\rho_L$  — ларморовский радиус.

Сложность инжекции пучка в накопитель с продольным магнитным полем связана с тем, что «замагниченные» электронный и позитронный пучки транспортируются ко входу накопителя с помощью отдельных соленоидов, и для приведения обоих пучков на равновесную орбиту их необходимо сместить в направлении, перпендикулярном продольному полю, на расстояние порядка диаметра соленоида. Такое смещение, без ухудшения качества пучка, осуществляется септумными обмотками. Они выполнены в виде двух соленоидов прямоугольного сечения, которые формируют дополнительное горизонтальное магнитное поле, направленное перпендикулярно к продольному полю септумного соленоида. В результате суперпозиции магнитных полей септумных обмоток и поля септумного соленоида силовая линия суммарного магнитного поля имеет тот же угол наклона к продольной оси, что и вакуумные камеры для ввода и вывода пучков. В верхней обмотке силовая линия направлена от внешней стороны соленоида септума к его оси, в нижней плоскости — в противоположном направлении. В результате после прохождения септумных обмоток пучок позитронов оказывается над равновесной орбитой накопителя и смещается на орбиту кикером, а пучок электронов из электронной пушки — под равновесной орбитой.

## 2. СПИРАЛЬНЫЙ КВАДРУПОЛЬ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Долговременную устойчивость циркулирующего пучка обеспечивает спиральный квадруполь (стеллараторная обмотка) (рис. 1), который осуществляет вращение циркулирующего пучка относительно своей оси. Перед установкой в накопитель спиральный квадруполь был протестирован импульсным однопролетным электронным пучком с энергией 3 кэВ на специальном стенде [5].



Рис. 1. Спиральный квадруполь. Длина линзы равна двум шагам спирали

Угол поворота пучка в квадруполе  $\varphi$  в первом приближении составляет [6]

$$\varphi = \frac{G^2}{kB^2}s, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/h$ ,  $G$  — градиент магнитного поля, который пропорционален току квадрупольного поля;  $B$  — продольное магнитное поле;  $h$  — шаг спирали квадрупольного поля. Измеренная экспериментальная зависимость угла поворота от тока квадрупольного поля находится в хорошем соответствии с теоретической зависимостью.

## 3. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПУЧКА

Физический пуск накопителя был осуществлен в сентябре 2004 г. с электронным пучком, в качестве инжектора использовалась пушка системы электронного охлаждения. Настройка замкнутой орбиты осуществлялась корректорами, расположенными на входе и выходе тороидальных секций. Циркулирующий пучок наблюдался двумя пикап-станциями, расположенными на входе и выходе прямолинейной секции. При выключенном квадрупольном поле наблюдался сигнал от нескольких оборотов, устойчивая циркуляция отсутствовала. При токе квадрупольного поля, близком к расчетному, была получена устойчивая циркуляция электронного пучка.

Сразу после инжекции наблюдался сигнал от отдельных оборотов с частотой обращения, позже он затухал (это связано с тем, что инжектированный пучок расплывался и заполнял весь периметр накопителя) и наблюдался сигнал с меньшей частотой. Сигналы с меньшей частотой, с противоположных пластин пикап-станции находились в противоположной фазе, что говорит о вращении пучка как целого относительно оси. Измерение этой медленной частоты позволило определить бетатронное число, соответствующее моде медленных колебаний (см. рис. 2, а).

При малых энергиях электронов их движение является адиабатическим и может быть описано в дрейфовом приближении. При этом анализируются движения центра «ларморовского кружка» в разных элементах накопителя. Преобразование центра «ларморовского кружка» в таком накопителе может быть описано матрицей размерностью 2 на 2, и бетатронное число, соответствующее медленной моде колебаний, определяется как в обычных накопителях с жесткой фокусировкой:

$$Q_{\text{slow}} = \arccos \left( \frac{1}{2} \text{Sp} \right) \frac{1}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $\text{Sp}$  — след матрицы кольца. Результаты измерения бетатронного числа на основании фурье-анализа сигналов с пикап-станции находятся в хорошем согласии с зависимостью, рассчитанной в дрейфовом приближении в соответствии с (2) (см. рис 2, б).

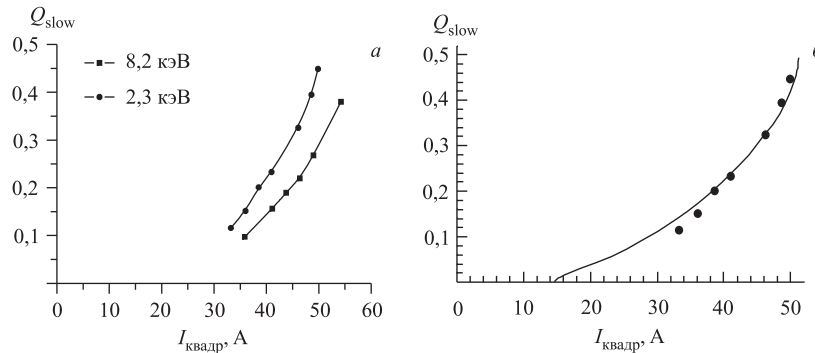


Рис. 2. а) Результаты измерения «медленного» бетатронного числа в зависимости от тока квадруполя для энергии циркулирующего пучка 2,3 и 8,2 кэВ. б) Сравнение результатов измерений медленного бетатронного числа (энергия 2,3 кэВ) с теоретической зависимостью

Бетатронное число измерялось также методом возбуждения резонанса медленной моды колебаний. Для этого к пластинам пикап-станции прикладывался синусоидальный сигнал от внешнего источника, и определялась частота этого сигнала, при которой время жизни пучка существенно уменьшалось. Из рис. 2 видно, что существуют значения тока квадруполя, при которых движение в накопителе неустойчиво. Ширина областей неустойчивости определяется отличием эффективной длины квадруполя от целого числа шагов спирали. Отличие эффективной длины квадруполя от физической объясняется изменением количества витков на его краях (см. рис. 1), что было сделано для обеспечения адиабатичности движения частиц на входе и выходе квадруполя.

#### 4. ВРЕМЯ ЖИЗНИ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПУЧКА

Применение продольного магнитного поля для фокусировки циркулирующего пучка обеспечивает заметный выигрыш во времени жизни по сравнению с обычной жесткой фокусировкой в области низких энергий. В присутствии продольного магнитного поля рассеяние на атомах остаточного газа даже на угол  $90^\circ$  не приводит к уходу частицы

из апертуры. Максимальная интенсивность потока атомов позитрония достигается при времени жизни, примерно равном времени накопления позитронов в ловушке (100 с).

Для измерения времени жизни пучка в заданный момент времени он смещался кикером на угол, равный апертуре. При этом с пикап-станций наблюдался сигнал, пропорциональный току циркулирующего пучка в этот момент.

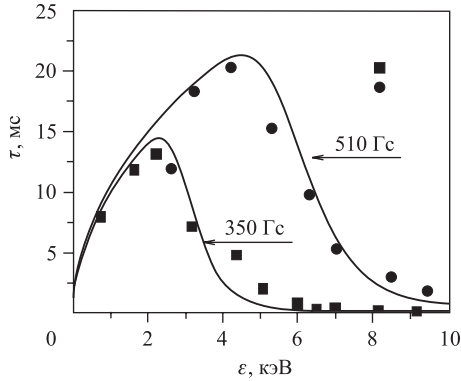


Рис. 3. Результаты измерения времени жизни для двух значений продольного магнитного поля и их фитирование теоретической зависимостью. Давление остаточного газа 30 нТорр

Измерения времени жизни были проведены в интервале энергий от 1 до 10 кэВ (рис. 3).

На рис. 3 видно существование двух областей: первая, где время жизни растет с энергией, и вторая, где время жизни падает с ростом энергии. Такое поведение зависимости времени жизни от энергии может быть объяснено особенностью фокусирующей системы накопителя ЛЕРТА. Электроны, циркулирующие в этом накопителе, замагничены, т.е. они двигаются вдоль силовой линии магнитного поля. В фокусирующей системе существует несколько областей с неоднородным магнитным полем, это области стыков соленоидов с различными поперечными сечениями. Если размер области возмущения магнитного поля сравним или меньше шага ларморовской спирали, то электрон, проходя такую область, может получить

дополнительный поперечный импульс, который приведет к увеличению угла между направлением движения электрона и силовой линией поля, а также некоторое смещение в поперечной плоскости. Величина этого смещения определяется амплитудой и длиной возмущения магнитного поля. При фиксированном значении величины продольного магнитного поля с увеличением энергии растет ларморовский радиус. Это ведет к увеличению смещения частицы при прохождении области возмущения.

Такой механизм подобен диффузии и может быть описан следующим образом [7]:

$$\tau_B = \frac{1}{N_D} \frac{C}{c} \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left(\frac{mc^2}{eBD}\right)^2 \sqrt{\frac{2\varepsilon}{mc^2}} \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^{-2} \exp\left\{\frac{2eBD}{mc^2} \sqrt{\frac{mc^2}{\varepsilon}}\right\}, \quad (3)$$

где  $N_D$  — число областей с возмущениями магнитного поля;  $C$  — периметр кольца;  $c$  — скорость света;  $b$  — радиус апертуры;  $a$  — радиус пучка;  $B$  — величина магнитного поля;  $D$  — длина области возмущения;  $\Delta B/B$  — амплитуда возмущения;  $\varepsilon$  — энергия электронов.

Время жизни, определяемое рассеянием на атомах остаточного газа (вакуумное время жизни), может быть оценено следующей формулой [7]:

$$\tau_{\text{vacuum}} = \frac{K}{P} \sqrt{\frac{\varepsilon}{mc^2}} \left(\frac{eBb}{mc^2}\right)^2, \quad (4)$$

где  $P$  — давление остаточного газа;  $K$  — численный коэффициент. И тогда полное время жизни можно оценить с учетом диффузии и вакуумных условий.

Результаты измерения времени жизни находятся в хорошем согласии с этими аналитическими оценками в случае, когда количество участков с неоднородным магнитным полем равно числу стыков соленоидов с разной геометрией и неоднородность поля на стыках достигает 20 %, что близко к результатам магнитных измерений. Система коррекций магнитного поля, для увеличения времени жизни, в настоящий момент разрабатывается.

Работа поддержана грантом РФФИ №02-02-16911 и грантом INTAS №03-54-5584.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Meshkov I. N., Skrinisky A. N.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 379. P. 41; JINR Preprint E9-95-130. Dubna, 1995.
2. *Meshkov I. N., Sidorin A. O.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 216.
3. *Korotaev Yu. V. et al.* The Low Energy Positron Storage Ring for Positronium Generation // Proc. of EPAC. 1998. P. 853.
4. *Meshkov I. et al.* The Computer Simulation of the Particle Dynamics in the Storage Ring with Strong Coupling of Transverses Modes // Proc. of EPAC. Vienna, 2000.
5. *Antropov V. et al.* Particle Dynamics in the Low Energy Positron Toroidal Accumulator, First Experiments and Results // Proc. of EPAC. Lucerne, 2004. P. 1396.
6. *Meshkov I. et al.* The Particle Dynamics in the Low Energy Storage Rings with Longitudinal Magnetic Field // Proc. of EPAC. Stockholm, 1998. P. 1067.
7. *Мешков И. Н. и др.* Модифицированный бетатрон // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36, вып. 5. С. 1071–1133.