

Динамика заряженных частиц в магнитном поле стеллатронного типа

*Е. В. Болтушкин, В. Ф. Быковский, А. Г. Кобец,
Ю. В. Коротаев, В. И. Лохматов, В. Н. Малахов, И. Н. Мешков,
Р. В. Пивин, А. Ю. Рудаков, И. А. Селезнев, А. О. Сидорин,
А. В. Смирнов, Г. В. Трубников, С. Л. Яковенко*
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В сентябре 2004 г. был осуществлен пуск накопителя LEPTA с циркулирующим электронным пучком. Фокусировка циркулирующего пучка в этом накопителе осуществляется продольным магнитным полем и дополнительным спиральным квадрупольным (стеллараторным) полем, что приводит к связи колебаний по поперечным координатам. Накопитель оборудован системой электронного охлаждения позитронов. В секции охлаждения осуществляется генерация позитрония.

Медленные позитроны и атомы позитрония — один из перспективных инструментов в изучении физики твердого тела и физики поверхности. Позитроний, кроме того, 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 с^{-1} в диапазоне энергий 1—50 кэВ и потока атомов позитрония с энергией 10 кэВ интенсивностью до 10^4 с^{-1} [1—3]. Установка (рис. 1) состоит из инжектора позитронов и накопительного кольца. Инжектор включает в себя источник позитронов (изотоп ^{22}Na) и ловушку пенинговского 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 атомов позитрония. Накопитель такого типа в случае его совмещения с накопителем антипротонов может быть использован для получения потока атомов антиводорода.

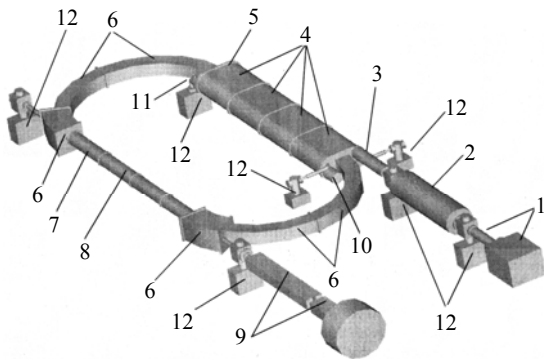


Рис. 1. Схема установки LEPTA:

- 1 — источник позитронов; 2 — позитронная ловушка;
- 3 — транспортировочный канал; 4 — септумный соленоид;
- 5 — кикер, расположенный внутри септумного соленоида;
- 6 — тороидальные соленоиды; 7 — спиральный квадруполь, расположенный внутри прямолинейной секции; 8 — прямолинейная сек-

- ция; 9 — экспериментальный канал; 10 — электронная пушка; 11 — коллектор электронов системы электронного охлаждения; 12 — вакуумные насосы

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 — значительное время жизни. В присутствии продольного магнитного поля инжекция позитронного пучка на равновесную орбиту, а также 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. В первом приближении оно может быть представлено как суперпозиция двух независимых вращений: быстрого ларморовского вокруг силовой линии магнитного поля и медленного вращения пучка как целого вокруг оси. Проектирование накопителя осуществлялось с помощью специально разработанного программного кода BETATRON [4].

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 происходит за счет центробежного дрейфа электронов в тороидальных секциях.

При движении заряженной частицы в тороидальном соленоиде возникает центробежный дрейф. Дрейфовая скорость V_d равна

$$V_d = \frac{pcV}{eB_0R} \left[\frac{\vec{B}_0 \times \vec{R}}{B_0R} \right],$$

а ее направление определяется векторным произведением $[\vec{B}_0 \times \vec{R}]$ с учетом знака заряда e .

Здесь p — импульс частицы;
 e — заряд;
 V — продольная скорость;
 c — скорость света;
 R — радиус кривизны орбиты в торах;
 B_0 — значение продольного магнитного поля.

Величина вертикального смещения частицы в тороидальном соленоиде Δ , вызванного центробежным дрейфом, не зависит от радиуса поворота и определяется выражением

$$\Delta = \varphi \rho_L,$$

где φ — угол поворота, а направление дрейфа определяется знаком заряда частицы;

ρ_L — радиус ларморовского вращения.

В торах для компенсации дрейфа, циркулирующего на равновесной орбите пучка, прикладывается дополнительное дипольное магнитное поле, значение которого B_{bend} равно

$$B_{bend} = \frac{pc}{eR} \quad \text{или} \quad B_{bend} = \frac{\rho_L}{R} B_0.$$

Дополнительное поворотное поле, компенсирующее дрейф позитронов, удваивает вертикальное смещение электронного пучка, и при угле поворота, равном π , величина смещения составляет $2\pi\rho_L$. При энергии электронов и позитронов $E = 10$ кэВ требуемое смещение электронного пучка по вертикали на тороидальном участке обеспечивается при продольном магнитном поле $B_0 = 400$ Гс.

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.

Спиральный квадруполь в продольном магнитном поле

Долговременную устойчивость циркулирующего пучка обеспечивает спиральный квадруполь (stellatronная обмотка) (рис. 2), который осуществляет вращение циркулирующего пучка относительно своей оси. Перед установкой на накопитель спиральный квадруполь был протестирован импульсным однопролетным электронным пучком с энергией 3 кэВ на специальном стенде [5].



Рис. 2. Спиральный квадруполь.
 Геометрическая длина квадруполя равна двум шагам спирали

Угол поворота пучка в квадруполе φ в первом приближении равен [6]

$$\varphi = \frac{G^2}{kB^2} S,$$

где $k = \frac{2\pi}{h}$;

G — градиент магнитного поля, который пропорционален току квадруполя;

B — продольное магнитное поле;

h — шаг спирали квадруполя.

Измеренная зависимость угла поворота от тока квадруполя находится в хорошем соответствии с теоретической зависимостью (рис. 3).

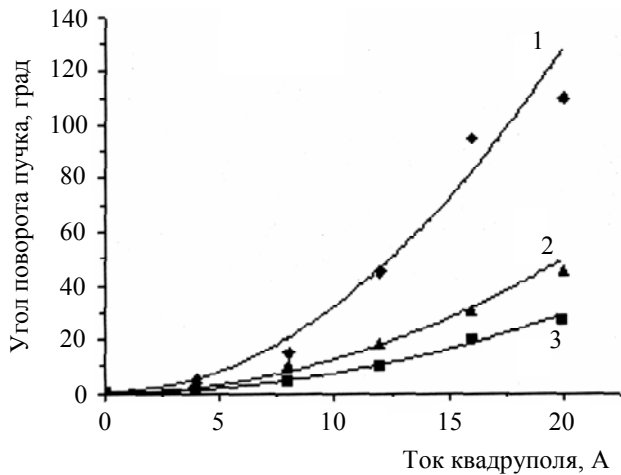


Рис. 3. Зависимость угла поворота пучка для различных значений продольного магнитного поля: 1 — 267 Гс; 2 — 400 Гс; 3 — 533 Гс

Первые результаты исследований динамики циркулирующего пучка

Физический пуск накопителя с электронным пучком был осуществлен в сентябре 2004 г. 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 (см. рис. 1). При выключенном квадруполе наблюдался сигнал от нескольких оборотов (рис. 4), устойчивая циркуляция отсутствовала.

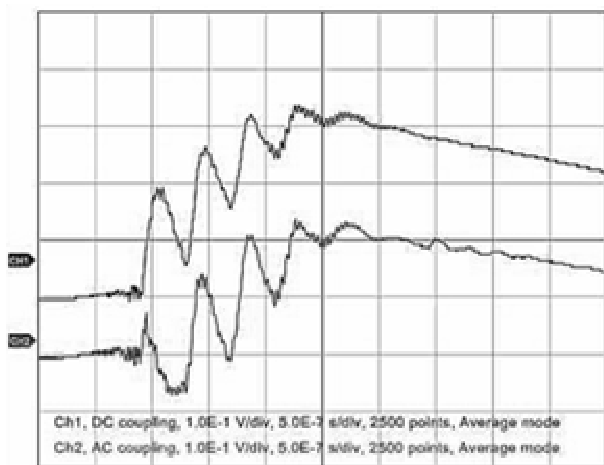


Рис. 4. Сигнал с двух пластин вертикальной пикап-станции от нескольких оборотов циркулирующего пучка. Квадруполь выключен. Развертка 0,5 мкс на деление

При токе квадруполя, близком к расчетному, была получена устойчивая циркуляция электронного пучка (рис. 5).

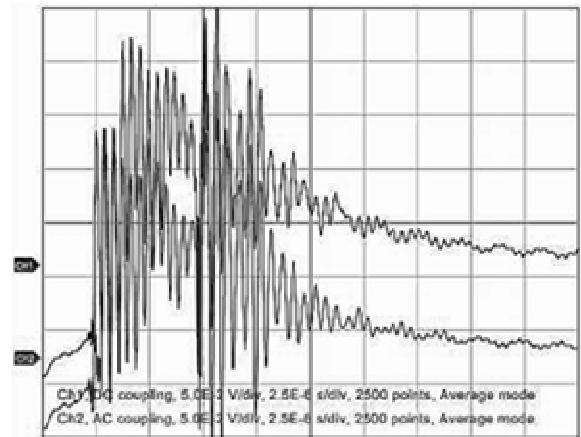


Рис. 5. Циркулирующий пучок. Сигналы с двух пластин вертикальной пикап-станции. Квадруполь включен. Развертка 2,5 мкс на деление

Сразу после инжекции наблюдается сигнал от отдельных оборотов с частотой обращения, позже он затухает (это связано с тем, что инжектированный пучок расплывается и заполняет весь периметр накопителя) и наблюдается сигнал с меньшей частотой. Сигналы с меньшей частотой с противоположных пластин пикап-станции находятся в противоположной фазе, что говорит о вращении пучка как целого относительно оси.

Измерение этой медленной частоты позволяет определить бетатронное число, соответствующее моде медленных колебаний

$$Q_{slow} = \frac{f_{slow}}{f_{revolution}}$$

Пример результатов измерения значения бетатронного числа при разных токах квадруполя и различных энергиях электронного пучка представлен на рис. 6.

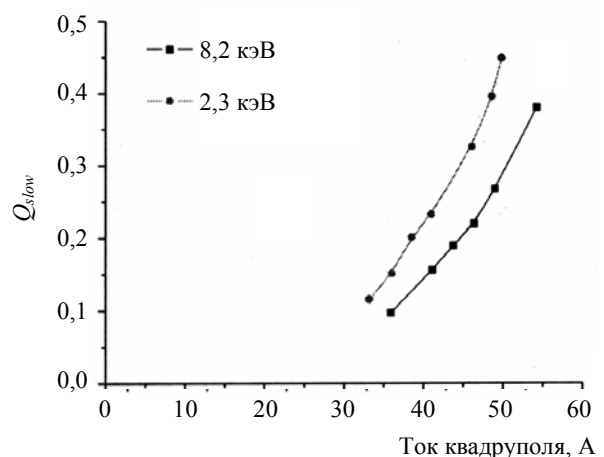


Рис. 6. Результаты измерения "медленного" бетатронного числа в зависимости от тока квадруполя для энергии циркулирующего пучка 2,3 и 8,2 кэВ

При малых энергиях электронов их движение является адиабатическим и может быть описано в дрейфо-

вом приближении. При этом анализируется движение центра "Ларморовского кружка" в разных элементах накопителя. Преобразование центра "Ларморовского кружка" в таком накопителе может быть описано матрицей размерностью 2×2 , и бетатронное число, соответствующее медленной моде колебаний, определяется как в обычных накопителях с жесткой фокусировкой

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

где Sp — шпур 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 (1) (рис. 7).

Бетатронное число измерялось также и 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 (рис. 8).

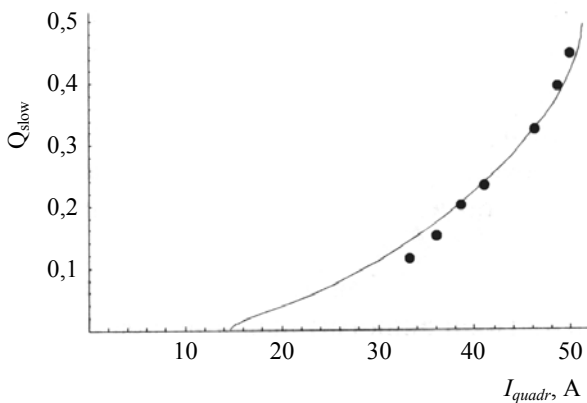


Рис. 7. Сравнение результатов измерений медленного бетатронного числа (энергия 2,3 кэВ) с теоретической зависимостью

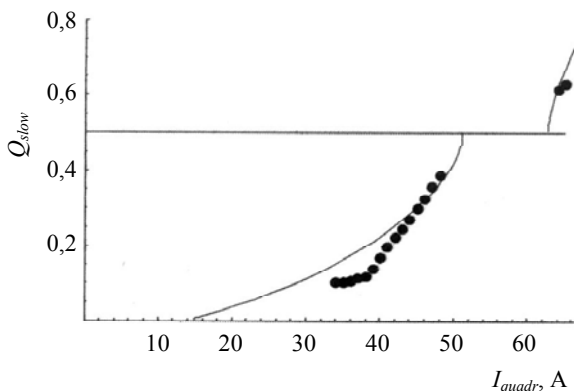


Рис. 8. Результаты измерения Q_{slow} методом возбуждения резонанса медленной моды колебаний (точки); сплошная линия — зависимость, рассчитанная в дрейфовом приближении

Из рис. 8 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. На рис. 9 в качестве примера приведены зависимости $1/2$ шпура матрицы накопителя от тока квадруполя для двух значений эффективной длины последнего.

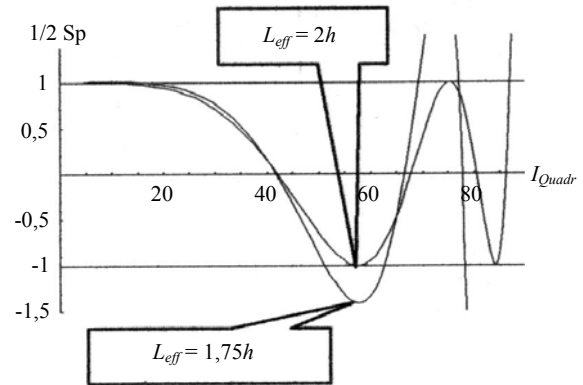


Рис. 9. Зависимость $1/2$ Шпур-матрицы накопителя для двух различных эффективных длин квадруполя: $L_{eff} = 2h$ и $L_{eff} = 1,75h$, где h — шаг спирали квадруполя, геометрическая длина равна $2h$

Отличие эффективной длины квадруполя от геометрической объясняется изменением количества витков на его краях (см. рис. 2), что было сделано для обеспечения адиабатичности движения частиц на входе и выходе квадруполя.

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° не приводит к уходу частицы на апертуру. 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 смещается кикером на апертуру. При этом с пикап-станций наблюдался сигнал, пропорциональный току циркулирующего пучка в этот момент. Измерения времени жизни были проведены в интервале энергий от 1 до 10 кэВ (рис. 10).

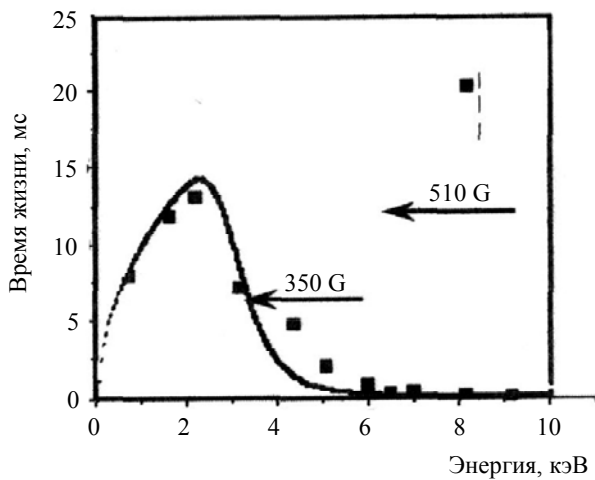


Рис. 10. Результаты измерения времени жизни для двух значений продольного магнитного поля и их фитирование теоретической зависимостью. Давление остаточного газа 30 нТорр

На рис. 10 видно существование двух областей: в первой время жизни растет с энергией, во второй — падает с ростом энергии. Такое поведение зависимости времени жизни от энергии может быть объяснено особенностью фокусирующей системы накопителя LEPTA. 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, приводящий к увеличению угла к силовой линии, 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 при прохождении области возмущения. Такой механизм подобен диффузии и может быть описан следующим образом [7]:

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

- 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;
- ε — энергия электронов.

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

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

- где P — давление остаточного газа;
 - K — численный коэффициент.
- Полное время жизни есть

$$\tau_{total} = \left(\frac{1}{\tau_{vacuum}} + \frac{1}{\tau_B}\right)^{-1}.$$

Результаты измерения времени жизни находятся в хорошем согласии с этой аналитической оценкой в случае, когда количество участков с неоднородным магнитным полем равно числу стыков соленоидов с разной геометрией и неоднородность поля на стыках достигает 20% (см. рис. 10), что близко к результатам магнитных измерений. Система коррекций магнитного поля для увеличения времени жизни разрабатывается.

Параметры накопителя, полученные при пуске, следующие:

	продольное магнитное поле, 300—
Гс.....	510
энергия циркулирующего пучка, кэВ.....	1—10
ток квадруполя, А.....	32—57
"медленное" бетатронное число.....	0,1—0,43
ток инъекции, мА.....	10,0
коэффициент захвата.....	0,5
число циркулирующих частиц.....	$3 \cdot 10^{10}$
время жизни для энергии 4 кэВ, мс.....	22
давление остаточного газа, Торр.....	3— $7 \cdot 10^{-8}$

Заключение

Осуществлен пуск накопителя LEPTA с электронным пучком. Проверена работоспособность схемы инъекции замагниченного пучка. Ведется настройка инъекционного комплекса для осуществления ввода пучка позитронов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-02-16320 и INTAS № 03-54-5584.

Литература

1. Meshkov I. N., Skrinsky A. N. Antihydrogen beam generation using storage ring// NIM A 379, 1996. С. 41: preprint JINR E9-95-130, Dubna, 1995.
2. Meshkov I. N., Sidorin A. O. Conceptual design of the low energy positron storage ring// NIM A 391, 1997. С. 216.
3. Korotaev Yu. V., Meshkov I. N., Mironov S. V. Sidorin A. O., Syresin E. The low energy positron storage ring for positronium generation: Proc. of EPAC, 1998. P. 853.

4. Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A., Syresin E., Trubnikov G. The computer simulation of the particle dynamics in the storage ring with strong coupling of transverses modes: Proc. of EPAC, 2000.

5. Antropov V., Boltushkin E., Bykovsky V., et al. Particle dynamics in the Low Energy Positron Toroidal Accumulator, first experiments and results: Ibid, 2004.

6. Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A., Syresin E. The particle dynamics in the low energy storage rings with longitudinal magnetic field: Ibid, 1998. P. 1067.

7. Мешков И. Н., Селезнев И. А., Сидорин А. О., Смирнов А. В., Сыресин Е. М., Трубников Г. В. Модифицированный бетатрон // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36. Вып. 5. С. 1071—1133.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Dynamics of charged particles in a magnetic field of the strelatron type

E. V. Boltushkin, V. F. Bykovsky, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, V. I. Lokhmatov,
V. N. Malakhov, I. N. Meshkov, R. V. Pivin, A. Yu. Rudakov, I. A. Seleznev,
A. O. Sidorin, A. V. Smirnov, G. V. Trubnikov, S. L. Yakovenko
Joint Institute for Nuclear Investigation, Dubna, Russia

Commissioning of LEPTA storage ring with circulating electron beam was performed in September of 2004 year. Focusing of the circulating beam in the ring is provided by longitudinal magnetic field and additional helical quadrupole (stellarator) field. In such a focusing system the particle motion in the transverse planes is coupled. The ring is equipped with an electron cooling system. Inside the cooling section the positronium generation will be realized.

УДК 537.533

Вакуумное технологическое оборудование для производства изделий микрофотоэлектроники

A. Н. Козлов, И. С. Гайдукова, А. Г. Уваев, А. В. Щербаков, А. М. Филачев
ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Представлен комплекс электронно-лучевого и ионно-плазменного оборудования для производства изделий микрофотоэлектроники. Установка вакуумного напыления (УВН) позволяет обеспечить в едином вакуумном процессе выполнение операций ионного травления, магнетронного распыления, резистивного испарения, что необходимо для создания многокомпонентного контакта к областям р-типа. Низкая энергия ионов, бомбардирующих подложку, в процессе ионного травления и очистки поверхности позволяет получать низкий уровень радиационных повреждений материала подложки и оберегает от инверсии областей р-типа. Установка ионно-лучевого травления (УИЛТ) предназначена для ионно-лучевого травления полупроводниковых и металлических материалов в среде инертных и реактивных газов в вакууме при изготовлении кремниевых МОП-мультиплексоров. Установка для электронно-лучевой сварки (УЭЛС) корпусов предназначена для сварки электронным лучом вакуумных корпусов матричного фотоприемного устройства (МФПУ).

Вакуумное технологическое оборудование для производства современных приборов микрофотоэлектроники развивается в направлении повышения технологических возможностей — увеличение площади обрабатываемых пластин, обеспечение возможности нанесения и контроля толщины пленок вплоть до нанометрового диапазона, снижение уровня загрязнений и радиационных дефектов создаваемых структур, повышение производительности и расширение функциональных возможностей установок [1—4].

Выпускаемое промышленностью технологическое оборудование для ионного травления и магнетронного напыления общего назначения не позволяет обеспечить требования технологического процесса из-за возможного перегрева и радиационного повреждения обрабатываемых фоточувствительных структур.

Разработан комплекс электронно-лучевого и ионно-плазменного оборудования, предназначенного для укомплектования технологического маршрута для про-