

Накопитель низкоэнергичных позитронов (электронов) с продольным магнитным полем

И.Н. Мешков, А.О Сидорин, Е.М. Сыресин, А.В. Смирнов
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Приводятся основные параметры накопителя низкоэнергичных позитронов предназначенного для генерации узконаправленных потоков позитрония. Аналогичный по конструкции накопитель для электронов с энергией несколько МэВ может быть использован в системе электронного охлаждения с циркулирующим электронным пучком.

Введение

Прецизионные измерения характеристик орто- и парапозитрония относятся к фундаментальным задачам современной квантовой электродинамики. Предложенный в [1] метод генерации позитрония основан на использовании накопителя низкоэнергичных позитронов, снабженного системой электронного охлаждения. На одном из прямолинейных участков накопителя однопролетный электронный и циркулирующий позитронный пучки совмещаются, и происходит охлаждение позитронов и рекомбинация электронов и позитронов с образованием позитрония. Для исследований в области физики позитрония наибольший интерес представляют потоки позитрония с энергией 5–30 кэВ. В этом диапазоне энергий применение продольного магнитного поля для фокусировки позитронов представляется наиболее перспективным. Для обеспечения долговременной устойчивости дрейфового движения позитронов в накопителе может быть использована дополнительная спиральная квадрупольная обмотка. Интенсивность потока позитрония при такой схеме генерации ограничена интенсивностью источников низкоэнергичных позитронов и может достигать величины порядка 10^4 атомов в секунду [1, 2].

В настоящее время в ОИЯИ начато сооружение такого накопителя позитронов — ЛЕПТА (Low Energy Positron Toroidal Accumulator). На первом этапе экспериментов планируется использовать инжектор низкоэнергичных позитронов на базе β^+ активных изотопов. В дальнейшем для инъекции будет использоваться линейный ускоритель электронов, что позволит повысить интенсивность потока позитрония. Необходимо отметить, что аналогичный накопитель позитронов совместно с небольшим накопителем антипротонов может быть использован для генерации интенсивных потоков атомов антиводорода.

Аналогичный по конструкции накопитель для электронов с энергией несколько МэВ может быть использован в системе электронного охлаждения с циркулирующим электронным пучком [3], что позволяет обойти некоторые проблемы систем электронного охлаждения со стандартной конфигурацией в области энергий ионов в несколько ГэВ. Для этой цели ионный накопитель оборудуется дополнительным накопительным кольцом для электронов. Циркулирующий электронный пучок охлаждает ионы и по мере нагрева заменяется новой порцией холодных электронов. Интенсивность электронного пучка при такой схеме ограничена развитием продольной когерентной неустойчивости.

1. ЛЕПТА

Накопитель позитронов (рис. 1) состоит из двух прямолинейных и двух тороидальных соленоидов соединенных в рейстрек. Внутри одного из прямолинейных соленоидов располагается специальная септумная обмотка, используемая для совмещения охлаждающего

электронного и циркулирующего позитронного пучков в горизонтальном направлении. Совмещение и разведение пучков в вертикальном направлении достигается за счет центростремительного дрейфа электронов в тороидальных соленоидах.

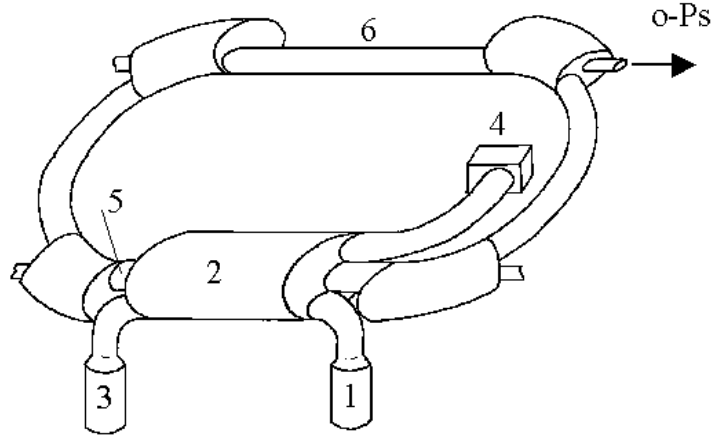


Рис. 1: Схематичное изображение накопителя ЛЕПТА: 1 – пушка системы электронного охлаждения, 2 – септум, 3 – коллектор электронов, 4 – инжектор позитронов, 5 – кикер, 6 – секция охлаждения.

При инъекции позитронов система электронного охлаждения выключена. Позитронный пучок из инжектора направляется в септумную обмотку, где он дрейфует по направлению к равновесной орбите в горизонтальной плоскости. После этого он смещается на равновесную орбиту импульсной кикерной обмоткой. После заполнения всей окружности накопителя кикерная обмотка выключается и включается система электронного охлаждения. Септумная обмотка устроена таким образом, что ее поле не воздействует на частицы на равновесной орбите. Спиральная квадрупольная обмотка навивается на вакуумную камеру циркулирующего пучка внутри септума. Градиент этой обмотки определяется с помощью численного моделирования динамики позитронов в накопителе [4].

2. Параметры пучка позитронов

Параметры позитронного пучка при инъекции определяются соотношением между характеристическими временами физических процессов сопровождающих накопление позитронов. Характеристическое время электронного охлаждения позитронов может быть оценено следующей формулой [1]:

$$\tau_{ee} \approx \frac{\beta^4 \gamma^5}{8\pi c r_e} \frac{m c^3}{e} \frac{1}{\eta_e J_e L_c N_{col}} \theta^3. \quad (1)$$

Здесь J_e — плотность тока электронного пучка; L_c — кулоновский логарифм; θ — угловой разброс позитронного пучка; η_e — отношение длины секции охлаждения к периметру накопителя; $N_{col} \approx 5 - 8$ — эффективное число электрон-позитронных столкновений из-за их вращения в магнитном поле. Характерное время возрастания углового разброса из-за многократного рассеяния позитронов на остаточном газе пропорционально квадрату углового разброса:

$$\tau_{ms} \approx \frac{\beta^3 \gamma^2}{4\pi Z(Z+1)} \frac{\theta^2}{c r_e^2 n_0 L_z}, \quad (2)$$

$L_z = \ln(183Z^{-1/3})$; n_0 — плотность остаточного газа; Z — атомный номер атомов остаточного газа. Многократное рассеяние позитронов на остаточном газе будет подавлено электронным охлаждением в том случае, когда угловой разброс позитронов при инжекции достаточно мал:

$$\theta_{max} \leq \frac{2N_{col}L_c\eta_eJ_e}{\beta\gamma^3\frac{mc^3}{e}Z(Z+1)L_zr_en_0}. \quad (3)$$

Для параметров накопителя (табл. 1) эта величина составляет несколько единиц 10^{-2} , что соответствует температуре позитронного пучка несколько десятков электрон-вольт. Таким образом, для инжекции в накопитель может быть использован только пучок позитронов предварительно термализованный в твердом теле или в газовой среде. Все методы генерации таких пучков обладают невысокой эффективностью [5]. Поэтому принятая схема инжекции в накопитель включает в себя предварительное накопление позитронов в течение 100–300 секунд в промежуточной ловушке, с последующим импульсным их извлечением.

Таблица 1: Основные параметры накопителя ЛЕПТА.

Периметр	м	18.12
Энергия позитронов	кэВ	10
Период обращения	нсек	300
Продольное магнитное поле	Гс	400
Большой радиус тороидов	м	1.45
Поворотное магнитное поле	Гс	1.75
Градиент квадрупольного поля	Гс/см	10 - 20
Радиус позитронного пучка	см	0.5
Количество циркулирующих позитронов		10^9
Давление остаточного газа	нТорр	1
Система электронного охлаждения		
Длина секции охлаждения	м	4.53
Ток пучка электронов	А	0.5
Радиус электронного пучка	см	1

Основным процессом, ограничивающим время жизни позитронов в накопителе, является однократное рассеяние на остаточном газе, на углы приводящие к дрейфу позитронов за пределы охлаждающего электронного пучка. Характерное время этого процесса:

$$\tau_{ss} \approx \frac{\beta^3\gamma^2}{4\pi Z(Z+1)} \frac{(\theta_{max})^2}{cr_e^2n_0}. \quad (4)$$

В диапазоне энергий 5–30 кэВ и давлении остаточного газа 10^{-10} Торр время жизни пучка позитронов составляет около 100 секунд.

Темп генерации позитрония может быть оценен в предположении, что по завершению процесса охлаждения угловые разбросы электронного и позитронного пучков выравниваются. Разброс позитронов по импульсам, определяющий температуру продольной степени свободы пучка, ограничивается снизу развитием продольной когерентной неустойчивости. При количестве циркулирующих позитронов порядка $10^8 - 10^9$, в системе частиц позитронный пучок будет иметь практически однородное распределение по продольным и поперечным скоростям, с характерной температурой 0.1 эВ (температура поперечной степени свободы

электронного пучка, равная температуре катода пушки). Дальнейшее увеличение числа накопленных позитронов ограничено динамической апертурой накопителя по импульсам.

Необходимо отметить, что из-за малого времени жизни длина пробега парасостояния позитрония составляет при энергии 10 кэВ около 1 см, и весь образовавшийся парапозитроний распадается в секции электронного охлаждения. Время жизни ортопозитрония составляет 0.14 мкс, и он может быть выведен из магнитной системы накопителя и использован для физических экспериментов. С учетом распада части ортопозитрония за время пролета секции охлаждения, интенсивность потока ортопозитрония на выходе из магнитной системы накопителя может достигать $10^4 - 10^5$ атомов в секунду. На первом этапе экспериментов эта величина будет ограничена, кроме того, интенсивностью используемого источника медленных позитронов на базе радиоактивных изотопов.

Работа выполнена при поддержке фондов РФФИ (грант № 96-02-17211) и ИНТАС (проект № 96-0966).

Список литературы

- [1] I. Meshkov and A. Skrinsky. Nucl. Instr. Meth. A 379 (1996) 41.
- [2] I. Meshkov. Phys. Part. Nucl. 28(2), March-April 1997, p 198.
- [3] I. Meshkov, A. Sidorin. "Electron cooling system with circulating electron beam". Proceedings of the International workshop on Medium Energy Electron Cooling, Novosibirsk, February 26-28, 1997., p. 183.
- [4] I. Meshkov, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin. The particle dynamics in the low energy storage rings with longitudinal magnetic field, 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, 1998, p. 1067.
- [5] M. Charlton et al. Phys. Rep. 241(2) (1994) 65.