

3. Bosser J.// CAS CERN 92-01. 1992. № 147.
4. Franke B. et al.// J. Mod. Phys. A 2A. 1993. № 60.
5. Stein H. J., Meshkov I., Sidorin A. et al.// Атомная энергия 2003. № 1. — 24 с.
6. Syresin E., Noda K., Uesugi T., Shibuya S.// HIMAC-071, 2003.
7. Uesugi T., Noda K., Syresin E., Meshkov I., Shibuya S.// NIM A 545. 2005. № 45.
8. Shirai T., Fujimoto S., Noda A., Syresin E. et al.// ICFA HB2006 Workshop, KEK, 2006.
9. Noda K. et al.// APAC, Korea, 2004. № 552.
10. Fujisawa T. et al.// NIM A 506. 2003. № 50.
11. Noda K., Furukawa T., Shibuya S., E. Syresin et al.// EPAC-02, 2002.
12. Syresin E., Noda K., Uesugi T., Shibuya S.// EPAC-06, 2006.
13. Uesugi T., Fujisawa T., Noda K., Syresin E. et al.// PAC, USA, 2005.
14. Sidorin A., Meshkov I., Selesnev I., Smirnov A., Syresin E., Trubnikov G.// NIM A558, 2006. № 325.
15. Reistad D. et al.// CERN 94-03. 1994. № 18.
16. Steck M. et al.// NIM A 441. 2000. № 175.
17. Kamerdzhev V., Detrich J., Meshkov I., Sidorin A. et al.// NIM A532. 2004. № 285.
18. Parhomchuk V., Pestrikov D.// CERN 94-03. 1994. № 327.
19. Пархомчук В. В., Пева В. Б.// ЖЭТФ. 2000. № 91. С. 975.
20. Zenkevich P. R., Bolshakov A. E.// NIM A 441. 2000. № 36.
21. Burov A.// Ibid. 2000. № 23.
22. Syresin E., Noda K.// HIMAC-033, 2001.
23. Syresin E., Noda K., Uesugi T., Meshkov I., Shibuya S.// EPAC04, 2004
24. Korotaev Yu., Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A. et al.// COOL 05, 2005.
25. Zenkevich P., Dolinskii A., Hofmann I.// NIM A 532. 2004. № 454.
26. Noda K., Torikai K., Fujisawa T., Syresin E. et al.// ICFA HB2006 Workshop, KEK. 2006.
27. Bosser J., Meshkov I., Syresin E. et al.// NIM A 391, 1997. № 110.
28. Fujimoto S., Shirai T., Noda A. et al.// Japan journal of applied phys. 2006. № 45. L1307.
29. Bocharov A., Bublely A., Boimelstein Yu. et al.// NIM A532. 2004. № 144.
30. Tranquille G.// NIM A 532. 2004. № 399.
31. Syresin E., Noda K., Fadil H., Noda A., Shirai T.// HIMAC-064, 2003.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Formation and stability of high intensive cooled ion beam in synchrotron at injection energy

E. M. Syresin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

K. Noda

National Institute of Radiological Science, Chiba, Japan

The electron cooling stacking injection is one of most widely used injection method applied for formation of a high intensive cooled ion beams in the synchrotrons. The maximal available ion intensity in the synchrotron at the injection energy is defined by the ion life time and the cooling-stacking efficiency. The formation of the cooled high intensive beams is restricted by their instability leading to strong ion life time reduction. The results of experimental investigations and simulations of the cooling-stacking injection and stability of the high intensive cooled ion beams are discussed.

УДК 621.384.6

Импульсный инжектор позитронов низкой энергии

*В. Ф. Быковский, А. Г. Кобец, Ю. В. Коротаев, И. Н. Мешков,
А. Ю. Рудаков, В. Н. Павлов, А. О. Сидорин, Г. В. Трубников, С. Л. Яковенко*
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия.

Проведено тестирование криогенного источника позитронов с тестовым изотопом ^{22}Na , активностью 0,8 МБк. Получен пучок медленных позитронов интенсивностью $5,8 \cdot 10^3$ частиц в секунду со средней энергией 1,2 эВ при ширине спектра 1 эВ. Доля замедленных позитронов составила 1 % от полного потока. Проведено исследование процесса накопления частиц в ловушке на электронах. В результате оптимизации параметров ловушки достигнуто время жизни накопленных электронов $\tau_{life} \geq 80$ с, а эффективность захва-

та $\varepsilon \sim 0,4$, что соответствует наилучшим результатам, полученным в ловушках подобного типа. При этом максимальное число накопленных частиц составило $N_{\text{exper}} = 2 \cdot 10^8$ при первоначальном потоке $5 \cdot 10^6$ электрон/с.

В ОИЯИ создан импульсный инжектор позитронов для накопителя частиц низкой энергии ЛЕРТА [1—3]. В нем используется однооборотная инжекция. При энергии позитронов, циркулирующих в накопителе, равной 10 кВ, длительность импульса инжекции составляет 300 нс. Период повторения импульсов инжекции определяется временем жизни пучка в накопителе и составляет порядка 10÷100 с. Существенной особенностью накопителя ЛЕРТА является малая величина продольного акцептанса — $\Delta p/p < 10^{-3}$, что накладывает жесткие ограничения на разброс позитронов по энергии. Требуемая интенсивность — 10^8 позитронов в сгустке. Ни один из источников медленных позитронов не обеспечивает требуемой интенсивности в одиночном сгустке. Для увеличения импульсной интенсивности медленных позитронов используется электромагнитная ловушка, в которой медленные позитроны накапливаются до требуемой интенсивности, затем импульсно извлекаются. Прототипом позитронной ловушки послужила ловушка, применяемая в экспериментах по получению антиводорода ATHENA CERN (в настоящее время эксперимент ALFA) [4]. Количество накапливаемых в ней позитронов составляет около 10^8 частиц [5], что и требуется для инжекции в накопитель ЛЕРТА.

Созданный импульсный инжектор медленных монохроматических позитронов на базе радиоактивного изотопа (рис. 1) [6] состоит из двух основных элементов: криогенного источника медленных монохроматических позитронов (КРИММП) [7] и позитронной ловушки.

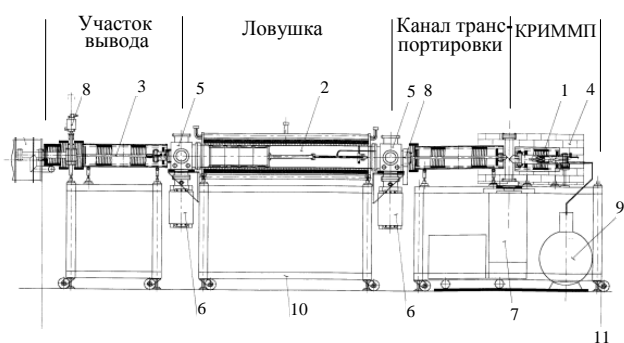


Рис. 1. Импульсный инжектор:

- 1 — источник позитронов; 2 — позитронная ловушка;
- 3 — участок инжекции позитронов в накопитель; 4 — радиационная защита; 5 — вакуумный пост; 6 — магниторазрядный насос; 7 — турбомолекулярный насос; 8 — шибер;
- 9 — сосуд Дьюара; 10 — опора; 11 — проходной изолятор

В КРИММП формируется непрерывный пучок монохроматических позитронов низкой энергии.

Источником позитронов служит таблетка β^+ -активного изотопа ^{22}Na . Позитроны с энергией до 0,54 МэВ замедляются до тепловых скоростей в замедлителе. В качестве последнего используется неон, который намораживается на коническую подложку, охлажденную до температуры несколько градусов Кельвина. Такая технология позволила достичь 1 % эффективности преобразования высокоэнергичных позитронов в тепловые [7]. Сформированный непрерывный пучок позитронов через канал транспортировки попадает в ловушку, где накапливается и сгусток импульсно инжектируется в накопитель. Проходя участок вывода, позитроны ускоряются до энергии 10 кэВ. Параметры инжектора приведены ниже.

| | |
|---|-------------------|
| Длина, м..... | 6,2 |
| Энергия инжекции, кэВ..... | 10,0 |
| Продольное магнитное поле, Гс..... | 400 |
| Продольное магнитное поле в ловушке, Гс.... | 1500 |
| Давление остаточного газа, Торр..... | $1 \cdot 10^{-9}$ |
| Радиус позитронного пучка, см..... | 0,5 |
| Время накопления, с..... | 100 |
| Длительность импульса инжекции, нс..... | 300 |
| Число позитронов в импульсе..... | $1 \cdot 10^8$ |
| Продольный разброс по импульсу..... | $1 \cdot 10^{-4}$ |

Позитронная ловушка

Позитронная ловушка (рис. 2) выполнена в виде цилиндрической вакуумной камеры длиной 2 м и внутренним диаметром 250 мм, которая расположена внутри соленоида, создающего магнитное поле величиной до 1,5 кГс. Соленоид имеет длину 2 м и средний диаметр двухслойной обмотки 366 мм. Внутри камеры находятся восемь цилиндрических алюминиевых электродов, изолированных друг от друга и от стенок вакуумной камеры (рис. 3).



Рис. 2. Позитронная ловушка

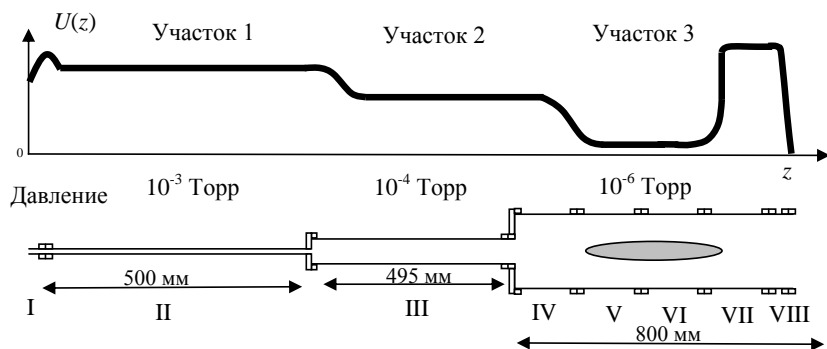


Рис. 3. Схема электродов (I—VIII) и распределение потенциала (для случая накопления позитронов) на оси камеры и давления буферного газа в электродах

Магнитное поле удерживает позитроны в поперечном направлении, а электростатическое поле электродов — в продольном. Геометрия электродов позволяет создать градиент давления буферного газа вдоль оси ловушки. В качестве буферного газа выбран молекулярный азот N_2 , позволяющий получить короткое время термализации позитронов относительно их времени жизни в ловушке. Газ натекает в систему через отверстие в середине электрода II, а его откачка осуществляется магниторазрядными насосами с торцов электродов I и VIII. Для накопления позитронов в ловушке используется трехступенчатая схема захвата, в которой создается перепад давления между участками захвата 1, 2 и участком накопления 3. Позитроны захватываются в ловушку и охлаждаются за счет неупругих столкновений с молекулами азота [8]. Давление подобрано таким образом, чтобы позитрон из источника, пролетая внутри электрода II, в среднем испытывал одно неупругое столкновение. После соударения он уже не может преодолеть потенциал электрода I и покинуть ловушку. Последующие неупругие столкновения приводят к запираанию позитрона на участке 3.

Давление азота и потенциалы на электродах ловушки (которые определяют энергию позитронов) играют критическую роль в эффективности процесса накопления. На участках 1 и 2 высокое давление буферного газа обеспечивает эффективный захват, в то время как низкое давление на участке 3 позволяет получать длительное время жизни позитронов [8].

Сборка электродов внутри камеры устанавливается достаточно свободно, а соосность электрического и магнитного полей обеспечивается наложением поперечного магнитного поля B_{\perp} по всей длине соленоида ловушки. Оно позволяет смещать пучок в горизонтальном и вертикальном направлениях на 2 см. Величина корректирующего поля подбирается по эффективности накопления каждый раз после очередной переборки системы электродов.

В связи с отсутствием источника позитронов достаточной активности все эксперименты по тес-

тированию ловушки и оптимизации ее параметров были проведены на электронах. Для этого была изготовлена и установлена на входе в ловушку тестовая пушка, создающая электронный пучок с энергией 10—50 эВ, с током порядка 0,1—1 пА и разбросом по энергии 3,5 эВ. Число накопленных в ловушке электронов измерялось на коллекторе, расположенном на выходе ловушки. После определенного времени накопления на электроды VII и VIII (см. рис. 3) подавалось импульсное отпирающее напряжение и осуществлялся сброс накопленного сгустка на коллектор.

Зависимость числа накопленных электронов от времени $N(t)$ описывается формулой

$$N(t) = \varepsilon \dot{N} \tau_{life} (1 - e^{-t / \tau_{life}}),$$

где \dot{N} — поток электронов на входе в ловушку;

ε — эффективность захвата в ловушку;

τ_{life} — время жизни электронов в ловушке (рис. 4);

$$N(t) = \begin{cases} \varepsilon \dot{N} t, & \text{при } t \ll \tau_{life} \\ \varepsilon \dot{N} \tau_{life}, & \text{при } t \rightarrow \infty. \end{cases}$$

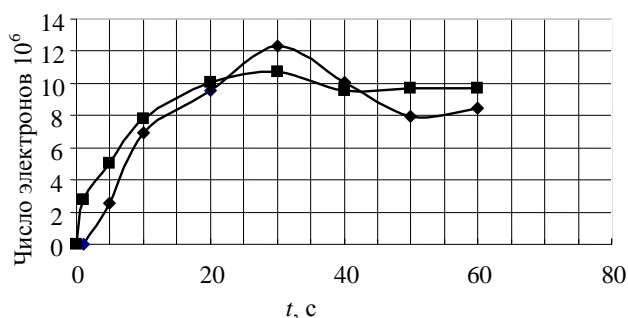


Рис. 4. Типичная зависимость числа накопленных электронов от времени:

—◆— — $P = 3,4 \cdot 10^{-4}$ Па; —■— — $P = 2,4 \cdot 10^{-4}$ Па

По углу наклона начального участка экспериментальной кривой находится эффективность захвата ε , а значение $N(t)$ при насыщении позволяет найти время жизни τ_{life} . Так, для кривых на рис. 4 при значении потока частиц на входе в ловушку $5 \cdot 10^6$ в секунду (что соответствует проектному по-

току медленных позитронов от источника ^{22}Na активностью 25 мКи) получены значения $\varepsilon = 0,2$; $\tau_{\text{life}} = 13$ с. При проведении экспериментов величина магнитного поля $B = 1$ кГс.

Проведено исследование процесса накопления в ловушке электронов с применением вращающегося электрического поля [9]. Один из электродов ловушки состоит из четырех изолированных сегментов (рис. 5). На каждый сегмент подается переменное напряжение в виде синусоиды одинаковой частоты и амплитуды, но сдвинутое по фазе на 90° относительно соседнего сегмента.

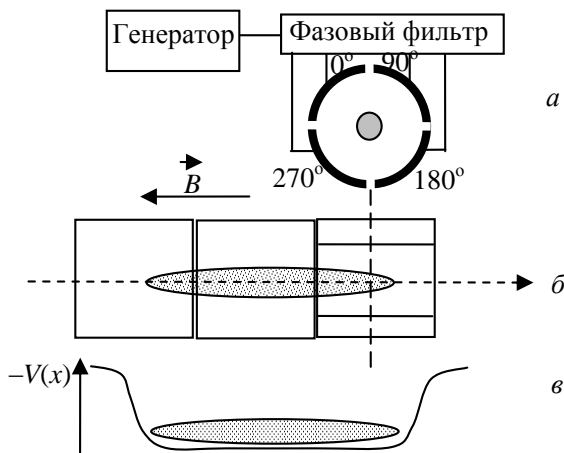


Рис. 5. Электрическое соединение сегментного электрода (а), схема электродов для накопления частиц (б), и распределение потенциалов на оси электродов (в)

Эксперименты по оптимизации режимов накопления показали, что выбор значений поперечного магнитного поля и параметров вращающегося электрического поля существенно влияет на интенсивность сгустка накопленных частиц (рис. 6). Кривая 1 представляет зависимость $N(t)$ после оптимизации распределения давления и напряжения на электродах, кривая 2 — то же, после оптимизации значения B_{\perp} , а 3 — после оптимизации частоты и амплитуды вращающегося электрического поля. Оптимальная частота вращения равняется 650 кГц, амплитуда — 1 В.

В результате значение эффективности захвата увеличено в два раза от уровня кривой 1 и близко к наилучшим результатам, полученным в ловушках подобного типа, а значение времени жизни увеличено в три раза. После увеличения величины магнитного поля в 1,2 раза (до $B = 1,2$ кГс) и улучшения вакуумных условий время жизни частиц в ловушке составило $\tau_{\text{life}} \geq 80$ с. При этом было накоплено максимальное количество электронов, равное $N_{\text{exper}} = 1,5 \cdot 10^8$ при первоначальном потоке $5 \cdot 10^6$ е $^-$ /с.

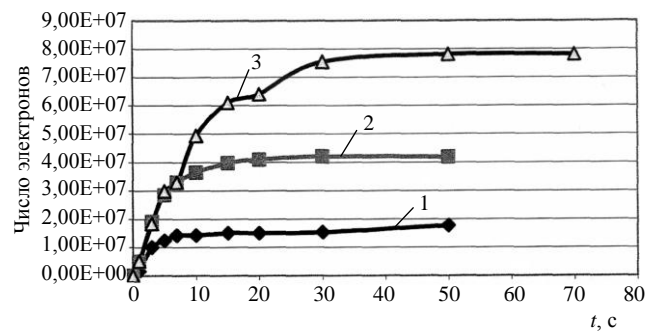


Рис. 6. Зависимость числа накопленных электронов от времени накопления: —♦— — 1; —■— — 2; —△— — 3

Механизм ограничения числа накопленных частиц в ловушках подобного типа [10] достаточно прозрачен: по мере роста числа частиц в сгустке электрическое поле его пространственного заряда понижает потенциал на участке накопления (см. рис. 3, участки IV—VI) до тех пор, пока он не сравняется с потенциалом электрода III и ловушка не “откроется”. С этого момента частицы могут проникать внутрь электрода III, где время их жизни падает пропорционально квадрату радиуса электрода, и уходить на стенки электрода. Соответственно, можно оценить предельное число электронов в сгустке

$$N_{\text{max}} = \frac{\Delta UL}{e \left(1 + 2 \ln \frac{R_w}{R_p} \right)}, \quad (1)$$

где $R_p \approx 0,5$ см — радиус накопленного сгустка; $R_w = 10$ см — внутренний радиус электрода; $L \approx 30$ см — длина накопленного сгустка; $\Delta U = 10$ В — глубина потенциальной ямы.

Формула (1) для этих значений дает $N_{\text{calc}} = 3 \cdot 10^8$, что хорошо согласуется с экспериментальным результатом $N_{\text{exper}} = 1,5 \cdot 10^8$ (максимальное количество электронов, накопленных в ловушке).

В режиме накопления был обнаружен ток утечки на электрод III. На остальных электродах токи утечки ниже уровня шумового сигнала, соответствующего 0,5 пА. Результаты являются прямым подтверждением механизма ограничения числа накопленных частиц эффектом пространственного заряда, описанного выше (формула (1)).

Вторым подтверждением этого механизма является эксперимент, в котором для увеличения числа накапливаемых частиц была предложена методика динамического увеличения глубины потенциальной ямы в процессе накопления [11]. По мере накопления электронов принудительно увеличивалась глубина потенциальной ямы. Оптимизируя скорость изменения глубины потенциальной

ямы и момент начала ее увеличения, удалось накопить $N_{\text{exper}}^* = 2 \cdot 10^8$. Это значение в 1,3 раза превышает максимальное число накопленных частиц без применения данной методики.

Однооборотная инжекция позитронного пучка в накопителе накладывает ограничение на длительность импульса инжекции, которая составляет около 300 нс при энергии позитронного пучка 10 кэВ, соответственно, выбирается время вывода сгустка из ловушки. Время вывода определялось по фронту нарастания заряда на коллекторе. Оно не превысило 500 нс при длительности переднего фронта отпирающего импульса 200 нс. Достигнутое значение времени вывода сгустка из ловушки позволяет захватить в накопитель 60 % накопленных частиц, что при полученном числе накопленных частиц обеспечивает достижение проектных параметров.

Заключение

Разработан инжектор позитронов низкой энергии на базе радиоактивного изотопа ^{22}Na активностью 25 мКи, обеспечивающий необходимую интенсивность сгустка позитронов до 10^8 частиц за импульс при проектной периодичности инжекции в накопителе менее 100 с.

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-16320, грантом Президента РФ для поддержки молодых российских ученых, кандидатов наук и ведущих научных школ (МК-3948.2007.2).

Литература

1. Meshkov I. N., Sidorin A. O. // NIM A 391. 1997 V. 391. P. 216.
2. Meshkov I., Seleznev I., Sidorin A., Smirnov A., Trubnikov G., Yakovenko S. // NIM B. 2004. V. 214. P. 186.
3. Болтушкин Е. В., Кобец А. Г., Коротаев Ю. В. и др. // Атомная энергия. 2005. № 98. С. 225.
4. Jørgensen L. V., van der Werf D. P., Watson T. L., Charlton M., Collier M. J. T., Doser M., Funakoshi R. // Appl. Surf. Sci., 2002. V. 194. P. 312.
5. Jørgensen L. V., van der Werf D. P., Watson T. L., Charlton M., Collier M. J. T. // Nonneutral Plasma Physics IV/Edited by F. Anderegg, L. Schweikhard, C. F. Driscoll. — New York: American Institute of Physics. 2002. V. 606. P. 35.
6. Быковский В. Ф., Кобец А. Г., Болтушкин Е. В. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Вып. 7. С. 63.
7. Мешков И. Н., Павлов В. Н., Сидорин А. О., Яковенко С. Л.: Препринт/ОИЯИ, Р9-2007-2.
8. Murphy T. J., Surko C. M. // Phys. Rev. A. 1992. V. 46. P. 696.
9. Murphy T. J., Shurko C. M. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. P. 1878.
10. Driscoll C. F. // In Low Energy Antimatter/ Edited by D. B. Cline. — Singapore: World Scientific. 1986. P. 184.
11. Surko C. M., Gilbert S. J., Greaves R. G. // AIP Conf. Proc. № 498. — New York, 1999. P. 3.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

The pulse injector of the low energy positrons

V. F. Bykovsky, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, I. N. Meshkov, A. Yu. Rudakov,
V. N. Pavlov, A. O. Sidorin, G. V. Trubnikov, S. L. Yakovenko
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

The cryogenic source of slow positrons has been tested with a test isotope ^{22}Na of the initial activity of 80 MBq. The continuous slow positron beam with average energy of 1.2 eV, width of a spectrum 1 eV has been obtained. The achieved moderator efficiency is about 1 %. The accumulation process in the positron trap was investigated with electron flux. The life time of the electrons in the trap, $\tau_{\text{life}} \geq 80$ s and capture efficiency $\varepsilon \sim 0.4$ have been obtained. The maximum number of the accumulated particle was $N_{\text{exper}} = 2 \cdot 10^8$ at the initial flux of $5 \cdot 10^6$ electrons per sec.

УДК 537.533.3

Протонный сканирующий микрозонд с интегрированной зондоформирующей системой

А. Г. Пономарев, В. А. Ребров, Н. А. Сайко, А. Б. Дудник, П. А. Павленко,
А. А. Дрозденко, В. И. Мирошниченко, В. Е. Сторижко

Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, г. Сумы, Украина

На новом протонном сканирующем микрозонде на базе электростатического ускорителя "Сокол" с максимальным напряжением 2 МВ начаты эксперименты в целях определе-