

Я-471

9-2007-35

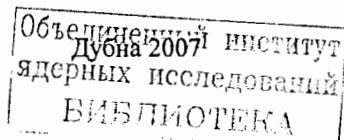
На правах рукописи
УДК 621.384.633

ЯКОВЕНКО
Сергей Леонидович

ИМПУЛЬСНЫЙ ИНЖЕКТОР ПОЗИТРОНОВ
НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

И.Н.Мешков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

И.А.Котельников

доктор физико-математических наук

А.В. Агафонов

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Защита диссертации состоится _____ 2007 г. в “_____”
часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном
институте ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

Автореферат разослан “_____” _____ 2007 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Ю.А.Батугов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В 1998 г. в ОИЯИ была начата разработка и сооружение накопителя позитронов низкой энергии Лепта (LEPTA – Low Energy Particle Toroidal Accumulator). В 2004 г. был осуществлен физический пуск этого накопителя с циркулирующим электронным пучком. Основной целью установки ЛЕПТА является генерация остронаправленных потоков ортопозитрония. При постановке экспериментов на таких потоках в вакууме исключается влияние среды, неизбежное при традиционных методах генерации позитрония в мишенях. Генерация парапозитрония при этом также возможна – методом интерференции орто – и парасостояний позитрония. Кроме классических экспериментов с позитронием таких, как прецизионное измерение времени жизни орто- и парасостояний позитрония, определение вероятностей распадов с нарушением закона сохранения момента и зарядовой инвариантности, прецизионное измерение тонкой структуры и лэмбовского сдвига в спектре ортопозитрония [1], возможна постановка экспериментов принципиального характера по поиску легкого аксиона в распадах ортопозитрония и проверке гипотезы Зеркальной Вселенной [2].

Энергия позитронов, циркулирующих в накопителе, определяется условиями постановки экспериментов на потоках атомов позитрония и не превышает 10 кэВ. Следовательно, для инжекции в накопитель требуется импульсный инжектор медленных позитронов. При однооборотной инжекции, используемой в накопителе, длительность импульса инжекции должна быть короче периода обращения частиц, который составляет 300 нс. Период повторения импульсов инжекции определяется временем жизни пучка в накопителе и составляет порядка $10 \div 100$ секунд. Существенной особенностью накопителя Лепта является малая величина продольного акцептанса - $\Delta p/p < 10^{-3}$, что соответственно накладывает жесткие ограничения на разброс позитронов по энергии. Требуемая интенсивность 10^8 позитронов в сгустке.

Пучок медленных позитронов является также уникальным инструментом в атомной физике, физике твердого тела, физике и химии поверхности и тонких пленок, материаловедении. Для изучения свойств конденсированных сред и сверхбыстрых физико-химических процессов, протекающих за времена порядка нескольких пикосекунд, широко применяется метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) [3]. ПАС может быть использована в качестве неразрушающего метода контроля дефектности в технически важных структурах, основанных на кремнии и других полупроводниках. Миниатюризация приборов и устройств требует ясного понимания многостадийных процессов их производства. До сих пор остается много неясного в фундаментальных вопросах образования, эволюции и электронной структуры дефектов в кремнии. Данный метод позволяет исследовать качество поверхностных слоев и покрытий, образование и отжиг дефектов после имплантации легирующих примесей, идентифицировать комплексы возникающих дефектов и получать информацию о распределении внутренних электрических полей.

Для успешного использования метода ПАС необходимы пучки монохроматических позитронов с регулируемой энергией в интервале 10 – 50 кэВ, и малым разбросом по скоростям.

Все сказанное подтверждает актуальность данной работы.

Основные цели работы

Данная работа имела целью

- выбор принципиальной схемы инжектора, разработку его конструкции и сооружение,
- исследование и оптимизацию параметров генерируемого пучка.

Научная новизна

Впервые разработан импульсный инжектор позитронов низкой энергии на основе радиоактивного изотопа ^{22}Na , позволяющий формировать короткие и интенсивные сгустки медленных позитронов. Принцип действия инжектора

основан на замедлении позитронов в твердом теле и накоплении их в электромагнитной ловушке с последующим импульсным извлечением.

Разработан, изготовлен и протестирован оригинальный криогенный источник медленных позитронов, в котором впервые реализована возможность контроля толщины намораживаемого замедлителя (неона). Это позволило впервые измерить зависимость параметров спектра медленных позитронов от толщины замедлителя и достичь рекордной эффективности получения медленных позитронов из широкого спектра позитронов изотопа ^{22}Na .

Разработаны методики тестирования позитронной ловушки и оптимизации ее параметров. Впервые осуществлен быстрый вывод частиц из ловушки.

Практическая ценность работы

Разработан инжектор медленных позитронов для установки, основной целью которой является формирование остронаправленных атомов позитрония в вакууме. Инжектор может быть использован также в качестве генератора непрерывного или импульсного потока монохроматических позитронов для исследований по физике твердого тела.

На защиту выносятся:

1. Схема инжектора позитронов, обеспечивающая необходимые параметры накопителя Лепта.
2. Конструкция криогенного источника медленных позитронов, позволяющая формировать непрерывный поток медленных монохроматических позитронов.
3. Методики и результаты тестирования криогенного источника медленных позитронов.
4. Методики и результаты тестирования позитронной ловушки на электронах.
5. Способ импульсного извлечения частиц из ловушки и результаты его экспериментальной проверки.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на XVII Совещании по ускорителям заряженных частиц (г. Протвино, 2000г.), Европейской конференции по ускорителям EPAC'2002 (г. Париж, 2002 г.), Европейской конференции по ускорителям EPAC'2004 (г. Люцерн, 2004 г.), XVIII Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC'2002 (г. Обнинск, 2002 г.), XIX Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC'2004 (г. Дубна, 2004 г.), XX Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC'2006 (г. Новосибирск, 2006 г.), семинаре памяти Саранцева (г. Дубна 2003г.), семинаре памяти Саранцева (г. Алушта 2005г.), VIII Харитоновских чтениях по проблемам физики высоких плотностей энергии (г. Саров, 2006), неоднократно обсуждались на научных семинарах ОИЯИ (г.Дубна).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 60 наименований. Общий объем: 75 страниц.

Содержание диссертационной работы

Содержание работы изложено во введении и трех главах.

Во **Введении** дается краткое описание установки Лепта и сформулированы требования к пучку позитронов при инжекции в накопитель.

Основное назначение установки Лепта – генерация интенсивного потока атомов позитрония. Позитроний образуется в результате рекомбинации позитронов с электронами в секции электронного охлаждения накопителя. Физический пуск накопителя с циркулирующим электронным пучком был осуществлен в 2004 году. В настоящее время производится подготовка накопителя к получению циркулирующего позитронного пучка. В накопителе используется однооборотная инжекция. Длительность импульса инжекции должна быть короче периода обращения частиц в накопителе, который составляет 300 нс. Период

повторения импульсов инжекции определяется временем жизни пучка в накопителе и составляет порядка $10 \div 100$ секунд. Существенной особенностью накопителя Лепта 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.

В данной работе представлены описание принципа работы, конструкция и результаты тестирования инжектора монохроматических позитронов на базе радиоактивного изотопа для накопителя позитронов низкой энергии Лепта. Источником позитронов служит таблетка β^+ - активного изотопа ^{22}Na . Позитроны с энергией до 0.54 МэВ замедляются до тепловых скоростей в замедлителе [4]. Сформированный непрерывный пучок позитронов через канал транспортировки попадает в электромагнитную ловушку [5], где накапливается. После накопления, сгусток позитронов импульсно инжектируется в накопитель по каналу инжекции.

Глава 1 содержит сравнение различных схем получения медленных монохроматических пучков позитронов и описание конструкции и основных узлов инжектора на основе радиоактивного источника ^{22}Na .

Существуют несколько схем получения пучков медленных позитронов с энергией не более 10 КэВ. Медленные позитроны можно генерировать за счет конверсии синхротронного излучения в электрон-позитронные пары [6]. В схеме с линейным электронным ускорителем пучок медленных позитронов формируется при конверсии электронного пучка на мишени [7].

В схеме с β^+ активным эмиттером в качестве источника позитронов служит радиоактивный изотоп ^{22}Na . Позитроны на его выходе замедляются в твердой мишени, и поступают в электромагнитную ловушку (“Ловушка Сурко”) [8]. Там они вновь замедляются в газовой среде до тепловых скоростей и накапливаются в течение, примерно, ста секунд. В первых двух схемах интенсивность пучков медленных позитронов может на несколько порядков превышать интенсивность, полученную от радиоактивного изотопа умеренной активности (порядка 100мКи). Но с другой стороны, первые две схемы громоздки и требуют больших

капитальных затрат. Тогда как схема на радиоактивном изотопе компактна, дешева и не требует специальной защиты.

Разработан инжектор позитронов низкой энергии на базе радиоактивного изотопа ^{22}Na (Рис.1) отвечающий требованиям накопителя Лепта. Прототипом конструкции инжектора послужила позитронная ловушка, применяемая в экспериментах по получению антиводорода ATHENA (в настоящее время эксперимент ALFA) CERN [9].

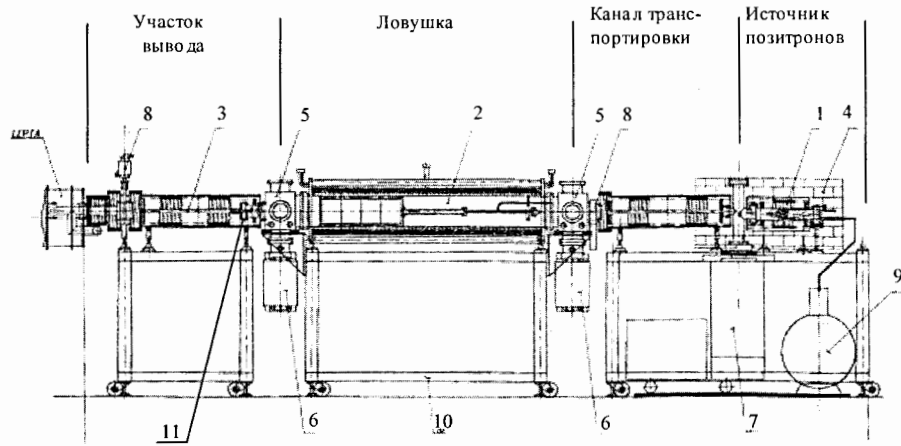


Рис.1 Инжектор позитронов низкой энергии.

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 –шиббер, 9 – сосуд Дьюара, 10 – опора, 11 – проходной изолятор.

Разработанный инжектор позитронов состоит из криогенного источника позитронов низкой энергии, канала транспортировки, ловушки и участка вывода. Все секции инжектора помещаются в продольное магнитное поле, создаваемое системой соленоидов.

Источником позитронов служит таблетка β^+ - активного изотопа ^{22}Na . Позитроны возникают при реакции β^+ распада и эмитируются в непрерывном спектре 0 - 0,5 МэВ с максимумом на энергии около 200 кэВ. Они замедляются до тепловых скоростей в пленке замороженного неона. При активности источника 25 мКи такая технология обеспечивает непрерывный поток до $5 \cdot 10^6$ медленных позитронов в секунду в узком энергетическом диапазоне.

После замедлителя пучок моноэнергетических позитронов, ускоренный до энергии 50 эВ, попадает в канал транспортировки. Малый диаметр вакуумной камеры канала транспортировки препятствует проникновению неона из области источника в ловушку, что увеличивает время жизни позитронов в ней, зависящее от состава остаточного газа. Кроме того, канал транспортировки используется для сепарации позитронов по энергии: оси вакуумных камер источника позитронов и канала транспортировки смещены относительно друг друга по вертикали, а специальная суперпозиция продольного поля соленоидов и дополнительного поперечного магнитного поля обеспечивает попадание в ловушку только медленных позитронов.

Ловушка позитронов предназначена для накопления позитронов, которые удерживаются в ней магнитным полем соленоида и электрическим полем системы электродов, расположенных в вакуумной камере. Процесс накопления длится порядка 100 секунд, при этом позитроны захватываются в ловушку и охлаждаются до комнатной температуры за счет столкновения с молекулами буферного газа (азота). При оптимальном распределении давления буферного газа и электростатического потенциала вдоль ловушки эффективность захвата позитронов в ловушку составляет 30%. Откачка всех узлов инжектора производится безмасляными насосами, так как позитроны активно аннигилируют на молекулах углеводородов. После завершения процесса накопления позитронный пучок вытягивается из ловушки импульсным электрическим полем. Изолированная вакуумная камера инжектора имеет потенциал +10 кВ относительно земли (энергия инжекции позитронов в накопитель Лепта). На участке вывода вакуумная камера инжектора соединяется с камерой накопителя через проходной вакуумный изолятор. Здесь позитроны ускоряются до

необходимой энергии. Инжектор позволяет обеспечивать до 10^8 позитронов за импульс длительностью около 300 нсек при относительном разбросе по энергии менее $2 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 1. Параметры инжектора

Длина, м	6,2
Активность изотопа ^{22}Na , мКю	25
Энергия инжекции, кэВ	2 - 10
Продольное магнитное поле, Гс	400
Продольное магнитное поле в ловушке, Гс	1500
Давление остаточного газа, Тор	$1 \cdot 10^{-9}$
Радиус позитронного пучка, см	0.5
Время накопления, с	100
Длительность импульса инжекции, нс	300
Число позитронов в импульсе	$1 \cdot 10^8$
Относительный разброс по импульсу	$1 \cdot 10^{-3}$

Глава 2 посвящена описанию особенностей конструкции источника медленных позитронов, принципу его действия и экспериментальным исследованиям параметров позитронного пучка.

Расположение Криогенного Источника Медленных Монохроматических Позитронов (КРИММП) в вакуумной камере приведено на рис. 2а, 2б, а внешний вид источника в собранном виде на рис. 3. Таблетка с радиоактивным изотопом ^{22}Na размещена на медной подложке (1, рис. 2а), помещенной внутри медного цилиндра (2), в конусообразном углублении на торце цилиндра, аналогично конструкции, описанной в работе [10]. Угол раствора конуса составляет 18° . Эти элементы образуют блок эмиттера позитронов (Рис.2б), который охлаждается до температуры в несколько Кельвин. На поверхности цилиндра находится криогенный теплообменник (3), через который протекает холодный газообразный гелий при температуре несколько выше 4К, охлаждающий блок эмиттера. Медный

цилиндр (2) размещается внутри медного кожуха (4), который служит тепловым экраном. На внешней поверхности кожуха располагается второй теплообменник (5). Пройдя теплообменник (3), гелий поступает в теплообменник кожуха (5), охлаждая тепловой экран. Газообразный неон поступает в источник позитронов через теплообменник кожуха (4) где предварительно охлаждается и истекает на поверхность конусообразного углубления и на торец медной подложки с изотопом через четыре сопла (6). На медном цилиндре (2) и на кожухе (4) расположены температурные датчики, позволяющие контролировать температуру блока эмиттера и теплового экрана. Блок эмиттера позитронов электрически изолирован от теплового экрана и вакуумной камеры. Прикладывая к нему электростатический потенциал, можно регулировать энергию позитронного пучка в диапазоне от 0 до 1000 В.

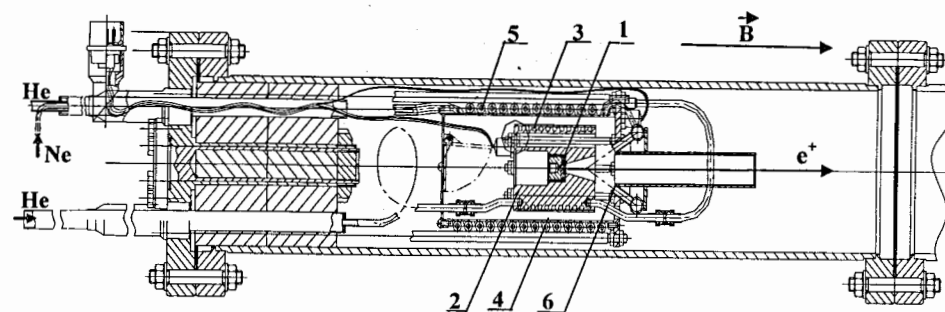


Рис. 2а. Схема расположения КРИММП в вакуумной камере. 1- медная подложка с изотопом ^{22}Na , 2 - медный цилиндр, 3 – криогенный теплообменник медного цилиндра, 4 - тепловой экран, 5 – криогенный теплообменник теплового экрана, 6 – сопла.

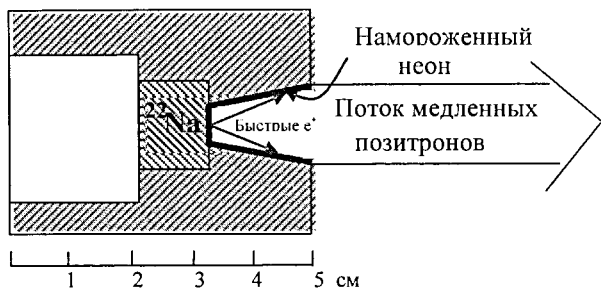


Рис.26. Блок эмиттера позитронов

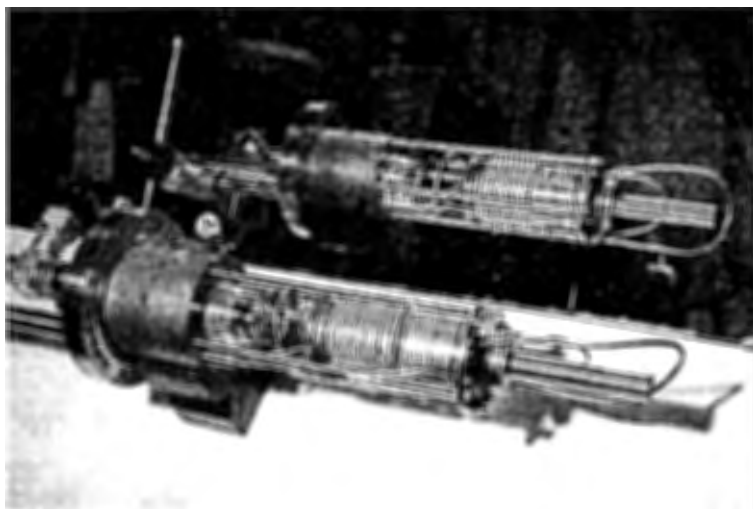


Рис.3. Криогенный источник медленных монохроматических позитронов

Процесс наморозки неоновго замедлителя начинается после того, как в охлажденной подложке устанавливается стационарная температура. Основными элементами линии напуска неона, позволяющими контролировать толщину слоя намороженного неона, являются (Рис.4) мерный объем и дроссель с большим вакуумным импедансом Z .

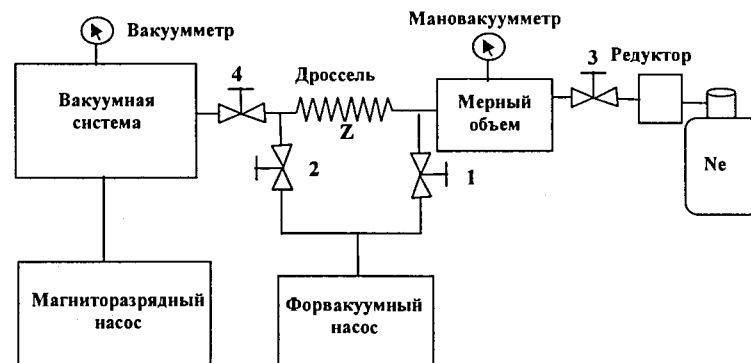


Рис.4. Линия напуска неона в систему. 1, 2, 3, 4 – вакуумные вентили.

Толщина слоя намороженного замедлителя δ рассчитывается из объема неона при атмосферном давлении V_{Ne} , поступившего в вакуумную систему:

$$V_{Ne} = \frac{\Delta P}{P_{atm}} V, \quad (1)$$

где ΔP – разность показаний мановакуумметра в начале и в конце напуска неона, P_{atm} – атмосферное давление, V – величина мерного объема. При этом необходимо учитывать эффективность конденсации χ :

$$\delta = \frac{V_{Ne}}{K \times S} \chi, \quad (2)$$

где K – коэффициент сжатия неона при переходе в твердую фазу, S – площадь подложки. При атмосферном давлении $K \approx 1200$.

Эффективность конденсации замедлителя на подложку может быть определена по изменению давления в вакуумной системе в процессе напуска:

$$\chi = \left(1 - \frac{\dot{n}'_{Ne}}{\dot{n}_{Ne}}\right) 100\%, \quad (3)$$

где $\dot{n}_{Ne} = \frac{V_{Ne} P_{atm}}{\Delta t}$ – количество неона, поступающего в систему в единицу времени

при напуске, Δt – время напуска газа в систему, $\dot{n}'_{Ne} = \Delta P_0 \cdot U$ – количество неона

теряемое из струи при конденсации в единицу времени, ΔP_0 – разность давлений в объеме до напуска неона и в процессе напуска, U – скорость откачки газа в системе.

После прекращения напуска неона в системе устанавливается некоторое равновесное давление. Если это давление выше давления насыщенных паров неона при температуре подложки, то остаточный газ конденсируется на поверхности замороженного слоя замедлителя. В этом случае для того, чтобы поверхностная пленка замедлителя не загрязнялась со временем, необходимо увеличить температуру подложки так, чтобы давление насыщенных паров неона незначительно превысило установившееся давление в системе. При этом медленное испарение поверхностной пленки замедлителя препятствует осаждению на ней остаточного газа. Объем неона, испаряемого в единицу времени \dot{V}_{Ne} и измеренный при атмосферном давлении, равен

$$\dot{V}_{Ne} = \frac{\dot{n}_{Ne}''}{P_{atm}}, \quad (4)$$

Здесь \dot{n}_{Ne}'' - количество неона, испаряемого в единицу времени рассчитываемое по формуле:

$$\dot{n}_{Ne}'' = \delta P U, \quad (5)$$

где δP - разность давлений насыщенного пара неона при заданной температуре подложки и давления в системе до подогрева подложки.

Для проведения экспериментов с источником позитронов был сооружен стенд с вакуумной камерой, в которой размещены КРИММП и устройства для диагностики, соленоидами и корректирующими обмотками, создающими магнитные поля. Откачка камеры производится магниторазрядным насосом, который поддерживает давление в системе на уровне $4 \cdot 10^{-8}$ Торр. Стенд включает также линию подачи неона и линию протока гелия (Рис. 5). В качестве источника позитронов использовался тестовый изотоп ^{22}Na активностью 100 мкКи. Между КРИММП и детектором позитронов на основе микроканальной пластины (МКП) установлена заслонка, предотвращающая прямое попадание позитронов в МКП.

До и после заслонки располагаются катушки, создающие поперечное магнитное поле. Они формируют траекторию медленных позитронов, огибающую заслонку. Перед МКП расположен электростатический энергоанализатор – цилиндр, на который подается анализирующий потенциал. Кроме того, снаружи вакуумной камеры расположен гамма-детектор, регистрирующий гамма-кванты от аннигиляции позитронов.

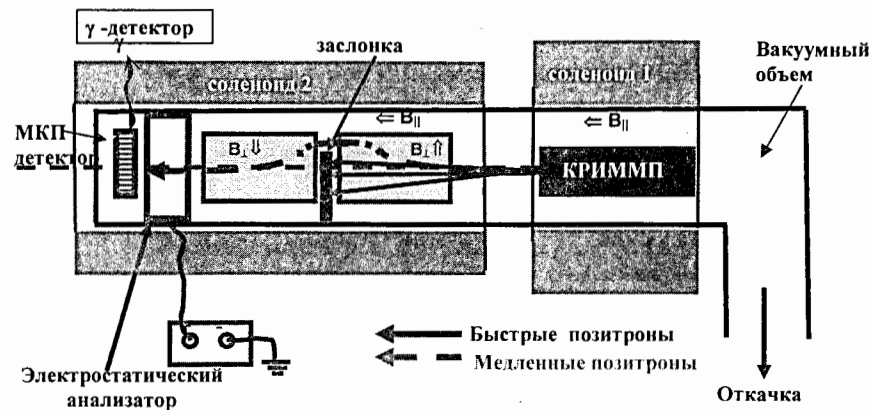


Рис.5. Схема стенда для проведения экспериментов с источником позитронов.

В ходе экспериментов была измерена зависимость выхода медленных позитронов от толщины замедлителя (рис. 6). С ростом толщины замедлителя происходит рост выхода медленных позитронов, максимум которого соответствует толщине 130 мкм. Дальнейший рост толщины замедлителя приводит к уменьшению выхода.

Впервые для данного типа источников была измерена зависимость формы спектра медленных позитронов от толщины замороженного слоя (Рис.7). Формирование спектра начинается при толщине замедлителя 10 мкм.

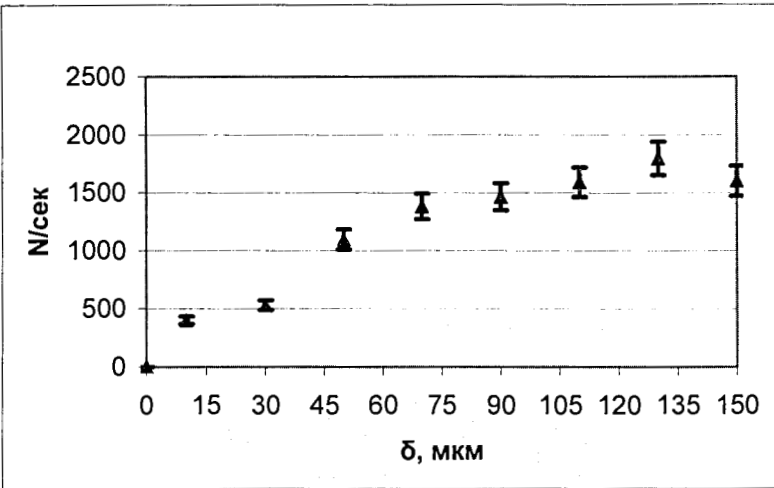


Рис. 6. Зависимость счета позитронов от толщины намороженного замедлителя.

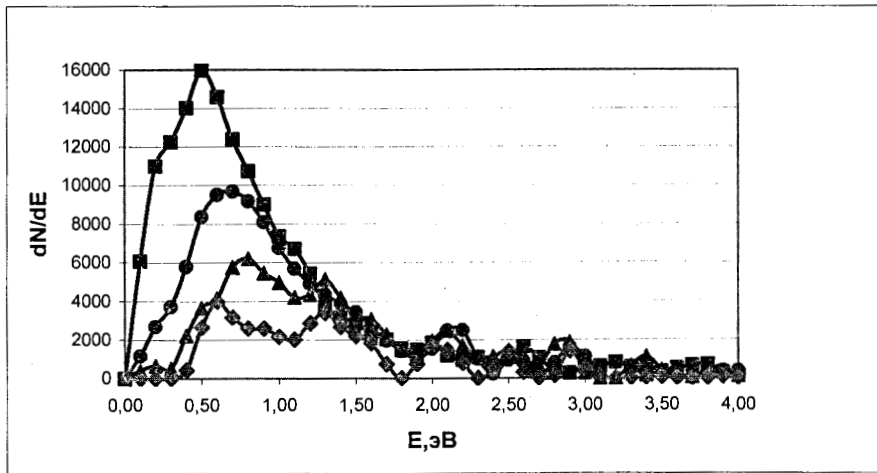


Рис. 7. Зависимость формы спектра позитронов от толщины намороженного замедлителя, мкм: 30 (◆), 50 (▲), 90 (●), 130 (■).

После оптимизации толщины замедлителя и магнитной системы была достигнута максимальная скорость счета. С учетом эффективности МКП (30%) эффективность замедления (отношение числа медленных позитронов к полному

потоку) при этом составила $\epsilon = 1\%$ [10] при ширине спектра 1 эВ и средней энергии позитронов 1.2 эВ.

В третьей главе описаны особенности конструкции позитронной ловушки, принцип ее действия, методики измерения параметров накопленного сгустка. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению времени жизни электронов в ловушке, эффективности захвата, длительности импульса тока на выходе, динамического регулирования потенциальной ямы.

Позитронная ловушка (Рис.8) состоит из цилиндрической вакуумной камеры длиной 2м и внутренним диаметром 250 мм, которая расположена внутри соленоида, создающего магнитное поле величиной до 1.5 кГс. Соленоид имеет длину 2м и средний диаметр двухслойной обмотки 366 мм. Внутри камеры находятся восемь цилиндрических алюминиевых электродов, изолированных друг от друга и от стенок вакуумной камеры (рис.9).



Рис.8. Позитронная ловушка.

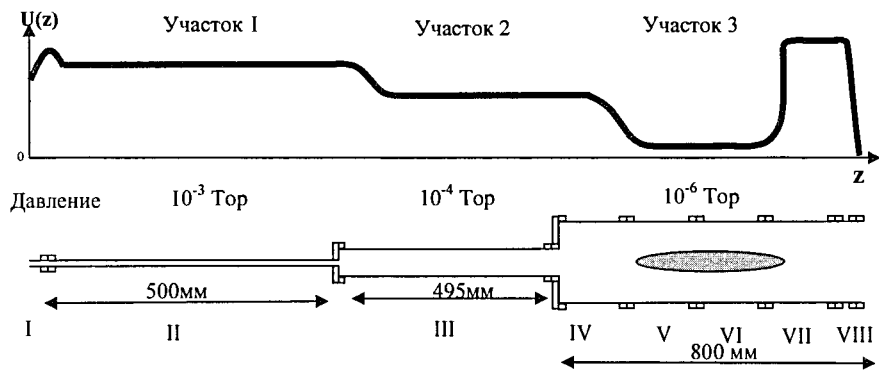


Рис. 9. Схема электродов (I – VIII), и распределение потенциала (для случая накопления позитронов) на оси камеры и давления буферного газа в электродах.

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. 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 запираению позитрона на участке 3.

Энергия позитронов на входе в ловушку и потенциалы электродов подобраны так, что при запираении в области накопления позитроны обладают энергией порядка 1эВ. Далее позитроны теряют энергию небольшими порциями за

счет возбуждения ротационных и вибрационных мод молекул буферного газа и охлаждаются до комнатной температуры (~30 мэВ). Процесс накопления длится до установления равновесия между поступлением позитронов из источника и их аннигиляцией.

Максимальное сечение неупругого взаимодействия позитронов с молекулами азота приходится на энергию 10 эВ, а порог находится при энергии ~7 эВ. Порог формирования позитрония, то есть механизма потери позитронов, лежит несколько выше энергии 8,8 эВ. Этот процесс становится существенным при энергии позитронов около 11 эВ. Таким образом, есть узкая область энергии от 7 эВ до 11 эВ, в которой захват может быть оптимизирован. В этой области доминируют два процесса: потери позитронами энергии за счет возбуждения электронной оболочки атома и формирование позитрония.

Давление азота и потенциалы на электродах ловушки (которые определяют энергию позитронов) играют критическую роль в эффективности процесса накопления. На участках 1-2 высокое давление буферного газа обеспечивает эффективный захват, в то время как низкое давление на участке 3 позволяет получать длительное время жизни позитронов [11].

Чтобы накапливать и удерживать частицы без значительных потерь, относительная неоднородность магнитного поля соленоида в области накопления позитронов не должна превышать 10^{-3} . Такая точность была обеспечена за счет конструкции обмоток соленоида, что было подтверждено измерениями датчиком Холла.

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 2см. 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 тестированию ловушки и оптимизации ее параметров были проведены на электронах. Для этого была изготовлена тестовая пушка, создающая

электронный пучок с энергией от 10 до 50 эВ, с током порядка $0.1 \div 1$ пА и разбросом по энергии 3.5 эВ. В качестве буферного газа использовался химически чистый азот. Азот подается в вакуумную камеру через натекаль, регулирующий поток газа в систему. Величина потока контролируется вакуумметром, расположенным в вакуумной камере. Число накопленных в ловушке электронов измерялось на коллекторе. После определенного времени накопления на электрод VII подавалось импульсное отпирающее напряжение, и осуществлялся сброс накопленного сгустка на коллектор, который расположен за электродом VIII (рис.10). Количество накопленных электронов определялось по формуле

$$N_{e^-} = \frac{U \cdot C}{e \cdot K}, \quad (6)$$

где e - заряд электрона, C - емкость коллектора и подводящего кабеля на землю, U - величина импульса напряжения на выходе усилителя, K - коэффициент усиления.

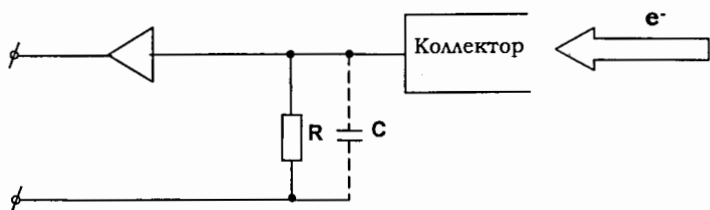


Рис.10. Схема преобразования коллекторного тока в напряжение с последующим усилением.

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

$$N(t) = \dot{N} \tau_{life} (1 - e^{-t/\tau_{life}}), \quad (7)$$

\dot{N} - поток электронов на входе в ловушку, ε - эффективность захвата в ловушку, τ_{life} - время жизни электронов в ловушке (Рис.11).

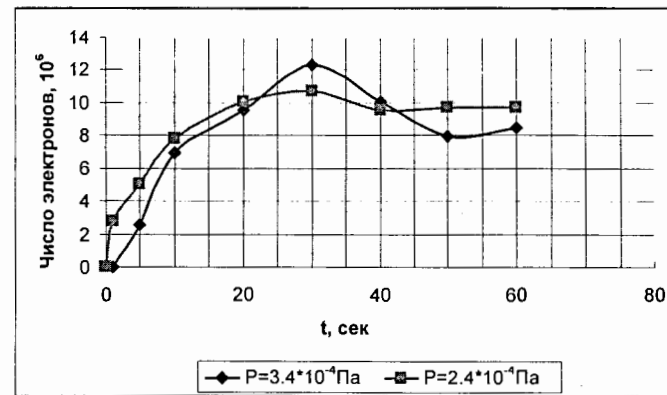


Рис.11. Типичная зависимость числа накопленных электронов от времени накопления.

Функция $N(t)$ имеет две асимптоты

$$N(t) = \begin{cases} \varepsilon \dot{N} t, & \text{при } t \ll \tau_{life} \\ \varepsilon \dot{N} \tau_{life}, & \text{при } t \rightarrow \infty \end{cases} \quad (8)$$

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 рисунке 11 при значении потока частиц на входе в ловушку $5 \cdot 10^6$ в секунду (что соответствует проектному потоку медленных позитронов от источника ^{22}Na активностью 25 мКи). Получены значения $\varepsilon = 0.2$, $\tau_{life} = 13$ сек. При проведении экспериментов величина магнитного поля $B = 1$ кГс.

Проведено исследование процесса накопления в ловушке электронов с применением вращающего электрического поля [12]. Один из электродов ловушки, состоит из четырех изолированных сегментов (рис.12). На каждый сегмент подается переменное напряжение в виде синусоиды одинаковой частоты и амплитуды, но сдвинутое по фазе на 90 градусов относительно соседнего сегмента.

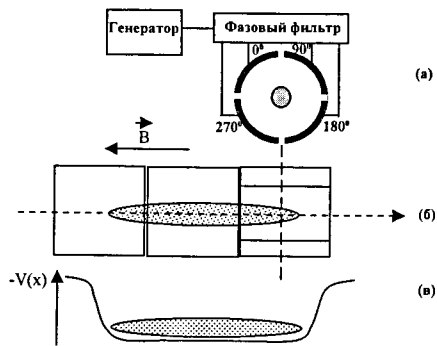


Рис.12. Электрическое соединение сегментного электрода (а), схема электродов для накопления частиц (б), и распределение потенциалов на оси электродов (в).

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.13).

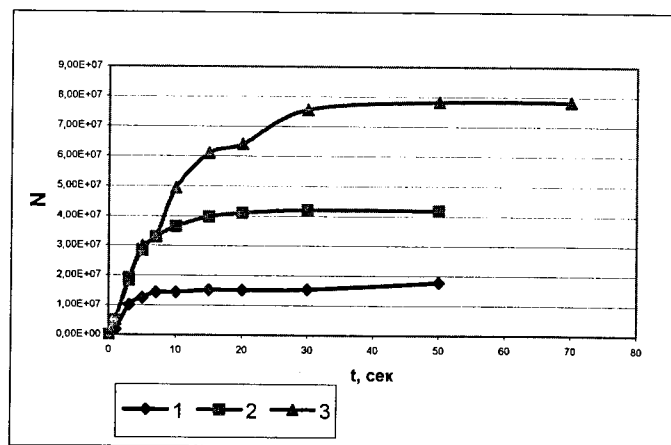


Рис.13. Зависимость числа накопленных электронов от времени накопления.

Кривая 1 представляет зависимость $N(t)$ после оптимизации распределения давления и напряжения на электродах, кривая 2 - то же после оптимизации значения B_{\perp} , а кривая 3 – после оптимизации частоты и амплитуды вращающегося

электрического поля. Оптимальная частота вращения равняется 650 кГц, амплитуда 1В.

В результате значение эффективности захвата и увеличено в 2 раза от уровня кривой 1 и близки к наилучшим результатам, полученным в ловушках подобного типа, а значение времени жизни увеличено в 3 раза.

В результате увеличения величины магнитного поля в 1.2 раза $B = 1.2$ кГс и улучшения вакуумных условий время жизни частиц в ловушке составило $\tau_{life} \geq 80$ секунд (Рис.14). При этом накоплено максимальное количество электронов равное $N_{exper} = 1,5 \cdot 10^8$ при первоначальном потоке $5 \cdot 10^6$ e⁻/сек.

Механизм ограничения числа накопленных частиц в ловушках подобного типа [13] достаточно прозрачен: по мере роста числа частиц в сгустке электрическое поле его пространственного заряда понижает (для электронов) потенциал на участке накопления (участки IV – VI) до тех пор, пока он не сравняется с потенциалом электрода III и ловушка “раскрывается”.

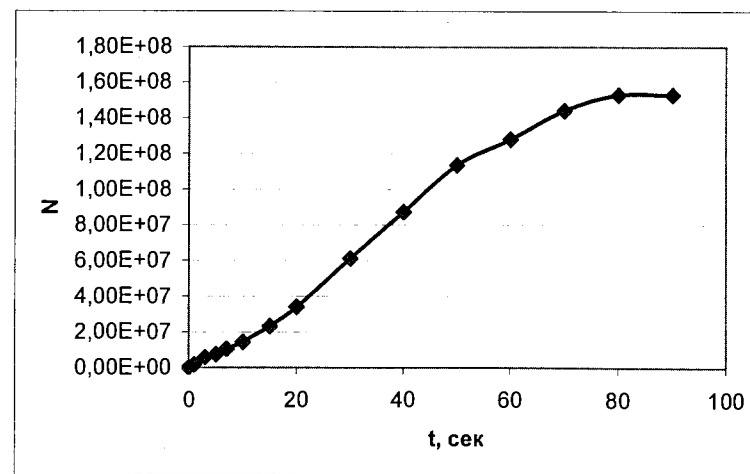


Рис.14. Зависимость числа накопленных электронов от времени накопления.

С этого момента электроны могут проникать внутрь электрода III, где их время жизни меньше – пропорционально квадрату радиуса электрода, и уходить

на стенки электрода. Соответственно можно оценить предельное число электронов в сгустке:

$$N_{max} = \frac{\Delta U \cdot L}{e \cdot \left(1 + 2 \ln \frac{R_w}{R_p}\right)}, \quad (9)$$

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. Подставляя в формулу (9) эти значения, получаем $N_{calc} = 3 \cdot 10^8$, что хорошо согласуется с экспериментальным результатом $N_{exper} = 1,5 \cdot 10^8$ (максимальное количество электронов накопленных в ловушке).

В режиме накопления был обнаружен ток утечки на электроде III. На остальных электродах токи утечки измерить не удалось: они ниже уровня шумового сигнала, соответствующего 0.5 пА. Эти результаты являются прямым подтверждением механизма ограничения числа накопленных частиц эффектом пространственного заряда, описанного выше (формула (9)).

Вторым подтверждением этого механизма является эксперимент, в котором для увеличения числа накапливаемых частиц была проверена методика динамического увеличения глубины потенциальной ямы в процессе накопления [14]. По мере накопления электронов "принудительно" увеличивалась глубина потенциальной ямы. Оптимизируя скорость изменения глубины потенциальной ямы и момент начала ее увеличения, удалось накопить $N_{exper}^* = 2 \cdot 10^8$. Это значение в 1.3 раза превышает максимальное число накопленных частиц без применения данной методики.

Однооборотная инжекция позитронного пучка в накопитель 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 (Рис.15).

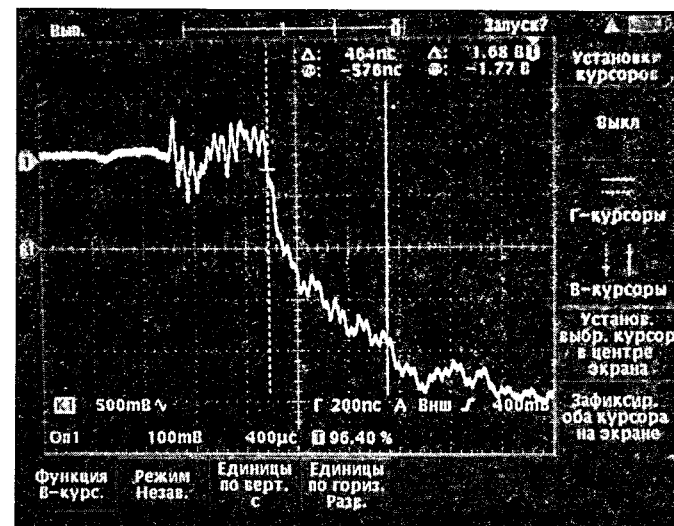


Рис. 15. Интегральный сигнал сброса электронного сгустка на коллектор.

Достигнутое значение времени вывода сгустка из ловушки позволяет захватить в накопитель 60% накопленных частиц, что при полученном числе накопленных частиц обеспечивает достижение проектных параметров.

Выводы

1. Выбранная схема инжекции позитронов низкой энергии на базе радиоактивного изотопа ^{22}Na активностью 25 мКи обеспечивает необходимую интенсивность сгустка позитронов до 10^8 частиц за импульс, инжектируемых в накопитель позитронов с проектной периодичностью инжекции до 100 с.
2. Разработанный позитронный источник оригинальной конструкции позволяет эффективно преобразовывать широкий спектр изотопа ^{22}Na в узкий, шириной около 1 эВ, спектр медленных позитронов со средней энергией 1.2 эВ. Преобразование спектра осуществляется методом замедления позитронов в твердом неоне.

3. Предложенная схема формирования замедлителя и конструкция источника позволяют осуществлять процесс наморозки без изменения вакуумных условий, производить предварительное охлаждение газообразного неона и направлять поток неона через сопла непосредственно на подложку. Достоинством такой схемы является возможность контроля толщины намораживаемого слоя по расходу напускаемого неона.
4. Экспериментально найдена оптимальная толщина замедлителя, равная 130 мкм. Эффективность генерации медленных позитронов составила около 1% от полного потока, что превышает показатели, полученные на криогенных источниках.
5. Разработана и изготовлена ловушка медленных позитронов. Разработаны методики, позволяющие измерять и оптимизировать эффективность захвата частиц в ловушку и их время жизни. Экспериментально исследован режим накопления частиц с применением вращающего электрического поля.
6. В результате оптимизации величины магнитного поля, вакуумных условий и применения вращающегося электрического поля достигнуто время жизни электронов в ловушке $\tau_{life} \geq 80$ секунд, а эффективность захвата $\epsilon \sim 0.4$, что соответствует наилучшим результатам, полученным в ловушках подобного типа. При этом максимальное число накопленных частиц $N_{exper} = 1.5 \cdot 10^8$ при первоначальном потоке $5 \cdot 10^6$ e⁻/сек.
7. Экспериментально подтвержден механизм ограничения интенсивности сгустка частиц накопленных в ловушке. С помощью динамического регулирования глубины потенциальной ямы в процессе накопления интенсивность накопленных частиц была увеличена в 1.3 раза.
8. Впервые разработан и экспериментально исследован способ импульсного вывода частиц из ловушки. Получено время вывода менее 500 нс.
9. Полученные результаты позволяют обеспечить проектные параметры инжектора накопителя ЛЕПТА.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (пп. 1 - 8), трудах конференций (пп. 9 - 14):

1. V. Antropov, A. Ivanov, Yu. Korotaev, T. Mamedov, I. Meshkov, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Development of the new method of positronium generation. Abilities and future trends, Canadian Journal of Physics, 80, (2002), 1-7.
2. В.Антропов, А.Иванов, Ю.Коротаев, И.Мешков, В.Павлов И.Селезнев, А.Сидорин, А.Смирнов, Е.Сыресин, Г.Трубников, С.Яковенко, Инжектор позитронов низкой энергии., Атомная энергия, 94, (2003), 68-70.
3. Антропов В.К., Болтушкин Е.В., Иванов А.В., Ивашкевич С.А., Калиниченко В.В., Коротаев Ю.В., Лохматов В.И., Мешков И.Н., Селезнев И.А., Сидорин А.О., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Трубников Г.В., Яковенко С.Л., Накопитель позитронов низкой энергии для генерации направленных потоков позитрония (проект LEPTA), Атомная энергия, 94, (2003), 54-57.
4. I. Meshkov, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Positron storage ring for positronium and antihydrogen generation in flight: The LEPTA project, NIM B, 214, (2004) 186-190.
5. V. Antropov, E. Boltushkin, A. Ivanov, Yu. Korotaev, V. Lohmatov, I. Meshkov, V. Pavlov, R. Pivin, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Positron storage ring LEPTA, NIM A, 532, (2004), 172-176.
6. Е.В. Болтушкин, А.Г. Кобец, Ю.В. Коротаев, В.И. Лохматов, В.Н. Малахов, И.Н. Мешков, Р.В. Пивин, И.А. Селезнев, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников, С.Л. Яковенко, Физический пуск накопителя LEPTA, Атомная энергия, 98, (2005), 225-233.
7. В.К. Антропов, Е.В. Болтушкин, А.В. Иванов, С.А. Ивашкевич, А.Г. Кобец, Ю.В. Коротаев, В.И. Лохматов, 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, Проект LEPTA: первые эксперименты с электронным пучком, Письма в ЭЧАЯ, 3, (2005), 19-23.

8. В.Ф.Быковский, А.Г.Кобец, Е.В.Болтушкин, В.Н.Малахов, И.Н.Мешков, В.Н.Павлов, Р.В.Пивин, И.А.Селезнев, В.Г.Шмаровоз, С.Л.Яковенко, Инжектор позитронов для накопителя LEPTA, Письма в ЭЧАЯ, 7, (2006), 63-67.
9. Антропов В.К., Болтушкин Е.В., Иванов А.В., Ивашкевич С.А., Калининченко В.В., Коротаев Ю.В., Лохматов В.И., Мешков И.Н., Селезнев И.А., Сидорин А.О., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Трубников Г.В., Яковенко С.Л., Накопитель позитронов низкой энергии для генерации направленных потоков позитрония (проект LEPTA), Труды RUPAC'2002, Обнинск, т. 1, 395-400.
10. Антропов В.К., Иванов А.В., Коротаев Ю.В., Мешков И.Н., Павлов В.Н., Селезнев И.А., Сидорин А.О., Смирнов А.В., Трубников Г.В., Яковенко С.Л., Инжектор позитронов низкой энергии, Труды RUPAC'2002, Обнинск, т. 1, 75 - 78.
11. V. Antropov, E. Boltushkin, V. Bykovsky, A. Ivanov, A. Kobets, Yu. Korotaev, V. Lohmatov, I. Meshkov, D. Monahov, V. Pavlov, R. Pivin, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Particle Dynamics in the Low Energy Positron Toroidal Accumulator: first experiments and results, Proc. of EPAC'2004, Lucerne, 1396-1398.
12. V. Bykovskiy, A. Ivanov, A. Kobets, N. Korolev, Yu. Korotaev, I. Meshkov, V. Pavlov, R.Pivin, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, V.Shmarovoz, S. Yakovenko, POSITRON SOURCE FOR THE LEPTA PROJECT, Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004, 450-452.
13. E. Boltushkin, V. Bykovsky, A. Ivanov, A. Kobets, Y. Korotaev, V. Lohmatov, V. Malakhov, I. Meshkov, V. Pavlov, R. Pivin, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, THE LEPTA COMMISSIONING, Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004, p.38-42.
14. V. Bykovsky, A. Kobets, Y. Korotaev, и др., НАКОПИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ФОКУСИРОВКОЙ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ, Сборник докладов VIII-х Харитоновских чтений по проблемам физики высоких плотностей энергии Саров 2006, 42 – 47.

Список цитируемой литературы:

1. Мешков И. Н., Физика элементарных частиц и атомного ядра, 28, (1997) 495.
2. И.Ю. Кобзарев, Л.Б.Окунь, И.Я. Померанчук, Ядерная физика, 3, (1968), 1154.
3. В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев УФН, 1772, (2002), 67-83.
4. A. Ando et al, Synchrotron Rad., 3, 1996, 201-206.
5. F. Ebel et al, Hyperfine Interactions, 44, (1989), 179-183.
6. S. J. Gilbert, C. Kurz, R. G. Greaves, and C. M. Surko, Appl. Phys. Lett. 70 (1997), 1944.
7. P. J. Shultz, K. G. Lynn, Interaction of positron beams with surfaces, thin films, and interfaces, Rev. Mod. Phys. 60, (1988), 701-775.
8. F.J. Wysocki, M. Leventhal, A. Passner and C. M. Surko, Accumulation and Storage of Low Energy Positrons, Hyperfine Interactions, 44, (1988), 185.
9. D. P. van der Werf, L. V. Jørgensen, T. L. Watson, M. Charlton, M. J. T. Collier, M. Doser and R. Funakoshi, Appl. Surf. Sci., 194, (2002), 312.
10. R. Khatri, M. Charlton, P. Sferlazzo, K. G. Lynn, A. P. Mills and L. O. Roellig, Improvement of rare-gas solid moderators by using conical geometry, Appl. Phys. Lett. 57, (1990), 2374-2376.
11. T. J. Murphy and C. M. Surko, Phys. Rev. A, 46, (1992), 5696-705.
12. T.J. Murphy and C.M. Shurko, Phys. Plasmas 8, (2001), 1878.
13. C.F. Driscoll, in Low Energy Antimatter, edited by D.B. Cline, World Scientific, Singapore 1986, 184-195.
14. C. M. Surko, S.J. Gilbert and R.G. Greaves, AIP Conf. Proc. No. 498, (AIP, New York, 1999), pp. 3 – 12.

Получено 13 марта 2007 г.