

P9-2007-2

И. Н. Мешков, В. Н. Павлов, А. О. Сидорин, С. Л. Яковенко

**КРИОГЕННЫЙ ИСТОЧНИК МЕДЛЕННЫХ
МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПОЗИТРОНОВ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Мешков И. Н., Павлов В. Н., Сидорин А. О., Яковенко С. Л. P9-2007-2
Криогенный источник медленных монохроматических позитронов

Криогенный источник медленных монохроматических позитронов (КРИММП) на основе радиоактивного изотопа ^{22}Na разработан и создан в ОИЯИ. Для формирования монохроматического пучка из непрерывного β^+ -спектра с энергией 0–0,5 МэВ используется замедлитель — твердый неон, намораживаемый на специальную подложку, которая охлаждается до температуры 5–7 К. Эффективность конденсации неона на подложку составила более 99,8%. На тестовом источнике изотопа ^{22}Na получен пучок медленных позитронов интенсивностью $5,8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ со средней энергией 1,2 эВ при ширине спектра 1 эВ. Доля замедленных позитронов составила 1% от полного потока.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Meshkov I. N., Pavlov V. N., Sidorin A. O., Yakovenko S. L. P9-2007-2
The Cryogenic Source of Slow Monochromatic Positrons

The cryogenic source of slow monochromatic positrons based on the ^{22}Na isotope has been designed and constructed at JINR. Positrons emitted from radioactive source ^{22}Na have a very broad energy spectrum up to 0.5 MeV. To generate monochromatic beam of slow positrons the solid neon is used as a moderator. The solid neon allows forming slow positron beam of the energy of 1.2 eV at the spectrum width of 1 eV. The efficiency of moderation is 1% of total positron flux.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к источникам медленных монохроматических позитронов возник довольно давно в связи с задачами аннигиляционной спектроскопии в физике твердого тела [1]. В последнее десятилетие такие источники стали востребованы также в экспериментах по генерации атомов антиводорода [2] и позитрония [3].

Возможность замедления позитронов впервые была предложена Мадански и Разетти еще в 1950 г. [4], но первый удачный результат получен Черри в 1958 г. [5]. Он наблюдал позитроны с энергией менее 10 эВ, эмитируемые из источника ^{22}Na через слюду, покрытую тонким слоем хрома. Эффективность преобразования спектра ε — отношение числа медленных позитронов из замедлителя к числу быстрых до замедления — была очень низкой, $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-8}$. В 1972 г. Костелло и др. [6] экспериментально подтвердили возможность термализации позитронов в твердом теле, наблюдая эмиссию позитронов с энергетическим пиком между 0,75 и 2,90 эВ из замедлителя, покрытого золотом толщиной 0,02 мкм. Первый эффективный замедлитель был разработан в 1979 г. Миллсом и Пфайфером [7]. В качестве замедлителя использовался кристалл меди (111), помещенный вместе с радиоактивным изотопом в камеру со сверхвысоким вакуумом. Эффективность замедления составила $1 \cdot 10^{-3}$. В настоящее время эту величину удалось увеличить почти на порядок, и сейчас эффективность замедления в современных источниках достигает $\varepsilon \sim 1 \cdot 10^{-2}$.

Созданный в ОИЯИ криогенный источник медленных монохроматических позитронов (КРИММП) является ключевым элементом инжектора позитронов низкой энергии [8] накопителя ЛЕРТА [9], предназначенного для получения остронаправленных потоков позитрония и генерации антиводорода [10]. При создании источника позитронов была выбрана схема с радиоактивным изотопом ^{22}Na в качестве эмиттера позитронов. Высокоэнергичные позитроны, испускаемые при распаде этого изотопа, попадают в замедлитель и за счет ионизационных потерь замедляются до тепловых скоростей. В качестве замедлителя выбран твердый неон [11].

В работе описывается конструкция КРИММП, методика и результаты его тестирования.

1. ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА МЕДЛЕННЫХ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПОЗИТРОНОВ ОТ ПОЗИТРОННО-АКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Из радионуклидов, используемых в исследованиях в качестве источников позитронов (табл. 1), наиболее эффективным и удобным является изотоп ^{22}Na [12]. Его период полураспада составляет 2,6 лет, что достаточно для проведения длительных экспериментов. Хорошо отработана технология его изготовления (что в конечном счете отражается на цене изотопа).

Таблица 1. Характеристики наиболее часто используемых позитронно-активных радионуклидов

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия позитронов, МэВ	Доля распадов, %
^{22}Na	2,603 лет	0,545	90,50
^{44}Tl	47,3 лет	1,467	98
^{48}V	15,974 сут	0,696	50,7
^{55}Co	17,54 ч	1,50	60
^{56}Co	78,76 сут	0,421	1,03
^{57}Ni	36 ч	0,85	50,0
^{58}Co	0,79 сут	0,475	15,05
^{64}Cu	12,703 ч	0,652	17,9
^{65}Zn	243,9 сут	0,329	1,45
^{68}Ge	288 сут	1,899	87,52
^{90}Nb	14,6 ч	1,50	54

Позитроны, эмитируемые радиоактивным источником ^{22}Na , имеют широкий энергетический спектр с максимумом при энергии около 200 кэВ (рис. 1). Для формирования из этого спектра монохроматического пучка позитронов

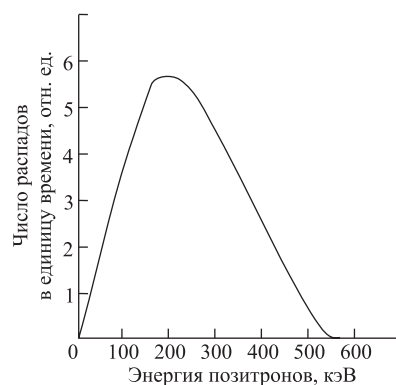


Рис. 1. Спектр позитронов, эмитируемых ^{22}Na [13]

тронов низкой энергии используется замедлитель, который характеризуется эффективностью замедления ε (см. выше) и шириной спектра медленных позитронов.

Позитроны в твердом теле замедляются вначале за счет ионизационных потерь, а ниже порога ионизации — через создание пары электрон–дырка и возбуждение экситонов и фононов. После замедления до тепловых скоростей позитрон может диффундировать на поверхность и покинуть вещество или «застрять» в веществе и аннигилировать с одним из электронов напрямую или с образованием позитрония (преимущественно в парасостоянии — p-Ps) (рис. 2). Твердое тело характеризуется «рабочей функцией» выхода позитрона с поверхности φ_+ , равной разности значений потенциальной энергии частицы внутри твердого тела ($\sim 1 \text{ \AA}$ от поверхности) и вне его. Абсолютная величина рабочей функции составляет порядка одного электронвольта, и при $\varphi_+ > 0$ на переходе поверхность–вакуум образуется потенциальный барьер, препятствующий выходу тепловых позитронов [14].

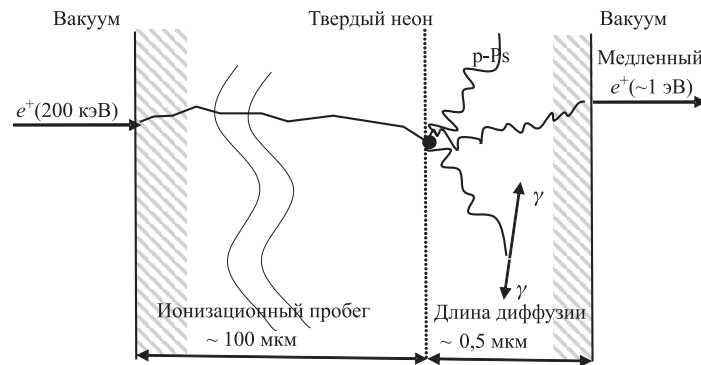


Рис. 2. Процесс замедления позитрона в твердом неоне

Самым эффективным замедлителем является твердый неон (табл. 2.).

Таблица 2. Эффективность различных замедляющих материалов

Материал	Состояние	Эффективность
MgO	Поликристаллический порошок	$3 \cdot 10^{-5}$
Cu(111)	Монокристалл	$1 \cdot 10^{-3}$
В	Поликристалл, покрытый углеродом	$\approx 10^{-7}$
W(110)	Монокристалл	$3 \cdot 10^{-3}$
Ne	Твердый неон при 5 К	$7 \cdot 10^{-3}$

Твердый неон — диэлектрик с большой шириной запрещенной зоны и отсутствием свободных электронов. По этой причине у неона $\varphi_+ > 0$, что

препятствует выходу тепловых позитронов. Наличие широкой запрещенной зоны приводит к тому, что многие позитроны не до конца термализуются внутри материала и поэтому имеют большую длину пробега. В результате они имеют достаточный запас энергии, чтобы преодолеть потенциальный барьер «вещество–вакуум» и обладают более широким энергетическим спектром. Для достижения максимального выхода медленных позитронов из замедлителя толщину слоя твердого неона необходимо подобрать примерно равной ионизационной длине пробега позитрона при энергии, соответствующей максимуму спектра позитронов, эмитируемых ^{22}Na (рис. 1).

2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРИММП

В источнике КРИММП используется схема с твердым неоном в качестве замедлителя. Обычно в источниках, использующих в качестве замедлителя твердый неон, процесс «выращивания» замедлителя начинают с охлаждения подложки с изотопом до температуры порядка 5 К, после чего в вакуумную камеру, куда помещен радиоактивный изотоп, напускают газообразный неон, часть которого конденсируется на подложке, формируя твердый замедлитель [11, 15]. Такая схема формирования замедлителя имеет ряд существенных недостатков: неон неравномерно конденсируется по поверхности подложки, нет возможности контролировать толщину замедлителя, а процесс наморозки проходит с изменением вакуумных условий. Предложенная нами схема формирования замедлителя и конструкция КРИММП позволяют преодолеть вышеперечисленные недостатки: 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.

Источник КРИММП расположен в вакуумной камере (рис. 3). Таблетка с радиоактивным изотопом ^{22}Na размещена на медной подложке 1, помещенной внутрь медного цилиндра 2, в конусообразное углубление на торце цилиндра, аналогично конструкции, описанной в работе [16]. Угол раствора конуса составляет 18° . Эти элементы образуют блок эмиттера позитронов (рис. 4), который охлаждается до температуры в несколько кельвин. На поверхности цилиндра находится криогенный теплообменник 3, через который протекает холодный газообразный гелий при температуре несколько выше 4 К, 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 2, 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

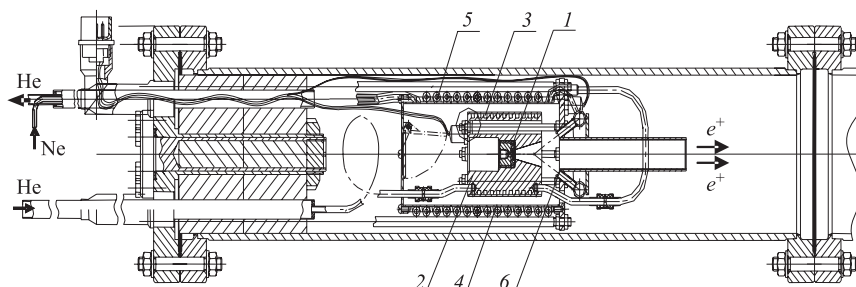


Рис. 3. Криогенный источник медленных монохроматических позитронов: 1 — медная подложка с изотопом ^{22}Na ; 2 — медный цилиндр; 3 — криогенный теплообменник медного цилиндра; 4 — тепловой экран; 5 — криогенный теплообменник теплового экрана; 6 — сопла

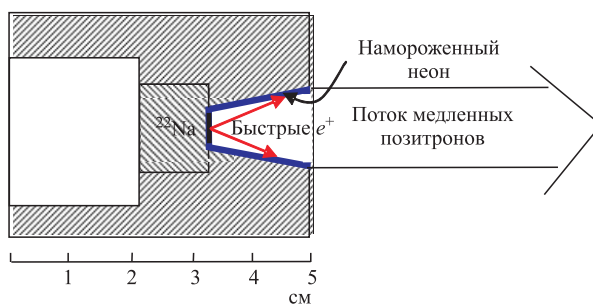


Рис. 4. Блок эмиттера позитронов

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. Прикладывая к нему электростатический потенциал, можно регулировать энергию позитронного пучка в диапазоне от 0 до 1000 В.

Процесс наморозки замедлителя начинается после того, как в охлажденной подложке устанавливается стационарная температура. Основными элементами линии напуска (рис. 5), позволяющими контролировать толщину слоя замороженного неона, являются мерный объем и дроссель с большим импедансом Z .

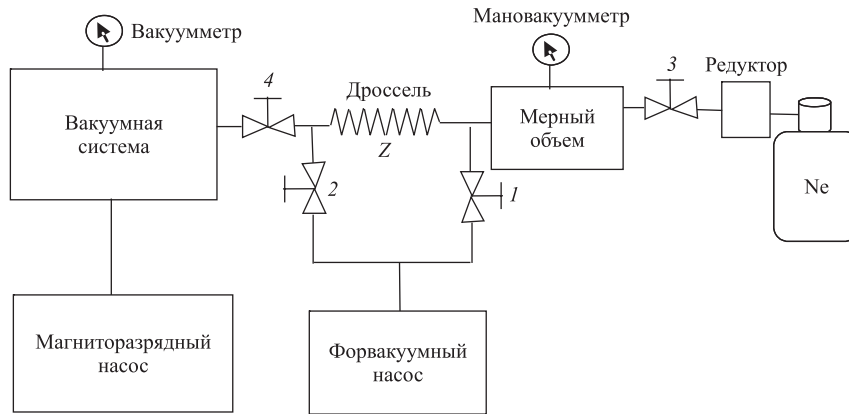


Рис. 5. Схема линии напуска неона в систему. 1, 2, 3, 4 — вакуумные вентили

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

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

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 и коэффициент сжатия неона при переходе в твердую фазу:

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

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:

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

где $\dot{n}_{\text{Ne}} = \frac{V_{\text{Ne}} P_{\text{atm}}}{\Delta t}$ — количество неона, поступающего в систему в единицу времени при напуске; Δt — время напуска газа в систему; $\dot{n}'_{\text{Ne}} = \Delta P_0 \cdot U$ — 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 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 измеряемого при атмосферном давлении, равен

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

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

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

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

3. ТЕСТИРОВАНИЕ КРИММП

Для проведения экспериментов с источником позитронов был сооружен стенд «Источник позитронов» (рис. 6, 7) [17]. Медленные позитроны из КРИММП транспортируются через вакуумную камеру в продольном магнитном поле порядка 100 Гс. Безмасляная откачка камеры магниторазрядным насосом с производительностью по азоту 100 л/с поддерживает давление на уровне $4 \cdot 10^{-8}$ торр. Стенд оборудован линиями подачи неона и протока жидкого гелия.

Температура блока эмиттера позитронов регулируется изменением расхода жидкого гелия. Минимальная достигнутая температура составила 5,73 К при расходе жидкого гелия 0,6 л/ч. После достижения стационарной температуры блока эмиттера позитронов на его торец через систему сопел подается неон.

При испытании системы наморозки напуск неона осуществлялся в течение 3,5 мин. Величина мерного объема составляет 75 см^3 . Показания мановакуумметра в процессе напуска изменились на 0,2 атм. Это соответствует поступлению в систему $1,5 \text{ см}^3$ неона при нормальных условиях и формированию на подложке площадью $6,5 \text{ см}^2$ слоя замедлителя толщиной 10 мкм. Во время напуска давление в системе изменилось до $6,5 \cdot 10^{-8}$ торр. Используя это значение для нижней оценки эффективности наморозки по формуле (3),



Рис. 6. Стенд «Источник позитронов»

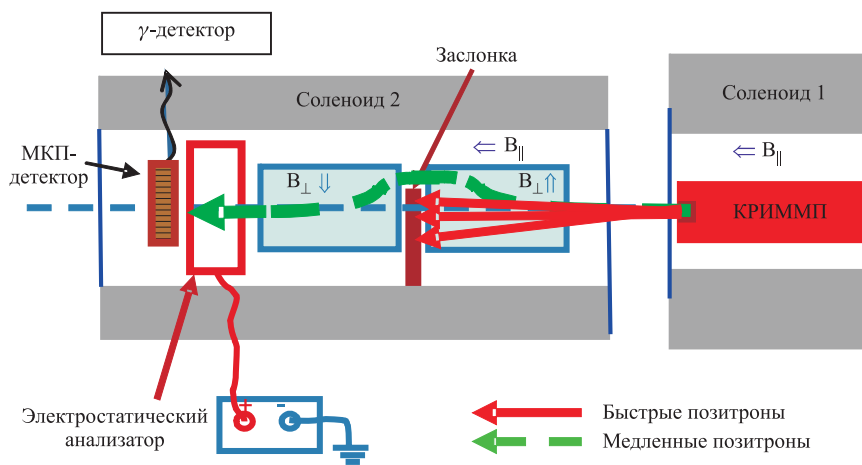


Рис. 7. Схема стенда «Источник позитронов»

получим $\chi = 99,9\%$. Таким образом, можно считать, что практически весь неон намораживается на подложку.

Температура подложки при наморозке составляла 7,08 К. Давление, установившееся в системе после завершения процесса, составило $2,7 \cdot 10^{-8}$ торр.

Давление насыщенных паров неона при такой температуре равно $7 \cdot 10^{-9}$ торр. Для сохранения качества поверхности замедлителя температура подложки была увеличена до 7,5 К. При этом оценка по формуле (4) дает время испарения слоя замедлителя толщиной 10 мкм примерно равное $4 \cdot 10^6$ с, что многократно превышает время проведения эксперимента.

При проведении экспериментов по наморозке замедлителя основной вклад в погрешность определения его толщины вносят неточность в показаниях мановакуумметра и погрешность в определении мерного объема. Давление измеряется с точностью 0,01 атм, а мерный объем известен с точностью 1 см^3 . Погрешность измерения толщины слоя намораживаемого неона составляет 5 %.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА МЕДЛЕННЫХ ПОЗИТРОНОВ

Эксперименты по измерению характеристик потока медленных позитронов источника КРИММП проводились с тестовым радиоактивным изотопом ^{22}Na активностью 0,8 МБк [18]. Для детектирования параметров пучка медленных монохроматических позитронов была собрана и протестирована схема измерения (рис. 7). Внутри вакуумной камеры находится КРИММП и микроканальная пластина (МКП) для регистрации позитронов. Между ними установлена заслонка, предотвращающая прямое попадание позитронов в МКП. Вакуумная камера помещена в продольное магнитное поле. До и после заслонки располагаются катушки, создающие поперечное магнитное поле. Они формируют траекторию медленных позитронов («слалом»), 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.

МКП-детектор калибровался измерением совпадений сигналов $N_{\text{МКП}}$ непосредственно от самой микроканальной пластины и аннигиляционных сигналов N_{γ} , измеренных γ -детектором. Если оба детектора обладают определенной эффективностью регистрации $\varepsilon_{\text{МКП}}$ и ε_{γ} соответственно, то из N позитронов, попавших на МКП, детекторы регистрируют N_{γ} и $N_{\text{МКП}}$ событий соответственно:

$$N_{\gamma} = \varepsilon_{\gamma} N, \quad (6)$$

$$N_{\text{МКП}} = \varepsilon_{\text{МКП}} N.$$

Поскольку события независимы друг от друга, число совпадений есть

$$N_c = \varepsilon_c N = \varepsilon_{\gamma} \varepsilon_{\text{МКП}} N. \quad (7)$$

Из уравнений (6), (7) можно получить полное число позитронов N , поступивших из источника, и значения эффективностей каждого из детекторов. После многократной калибровки детекторов установлено, что

$$\varepsilon_{\text{МКП}} = 0,3 \pm 0,03, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\gamma} = 0,04 \pm 0,008.$$

В ходе экспериментов была измерена зависимость выхода медленных позитронов от толщины замедлителя (рис. 8).

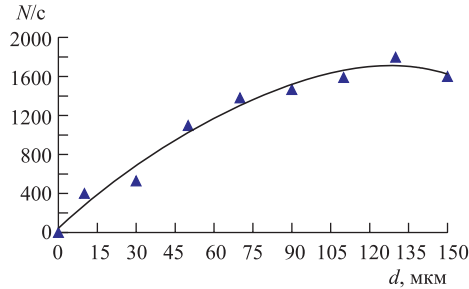


Рис. 8. Зависимость счета позитронов от толщины замороженного замедлителя

С ростом толщины замедлителя происходит рост выхода медленных позитронов. Максимум выхода медленных позитронов соответствует толщине замедлителя 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. Формирование спектра начинается с толщины замедлителя 10 мкм. Но только при толщине 70 мкм спектр приобретает гауссову форму. С увеличением толщины замороженного слоя спектральная плотность в максимуме растет (рис. 9), а ширина спектра уменьшается (рис. 10). При этом уменьшается также средняя энергия вылетающих позитронов (рис. 11).

После прекращения заморозки выход позитронов продолжает расти в течение нескольких часов. При этом число регистрируемых медленных позитронов увеличивается на 12 % (рис. 12).

После оптимизации толщины замедлителя эффективность замедления с учетом эффективности МКП-детектора составила $\varepsilon = 1\%$ (эффективность МКП-детектора принята равной 0,3 см (8)). Ширина спектра составила 1 эВ при средней энергии позитронов 1,2 эВ.

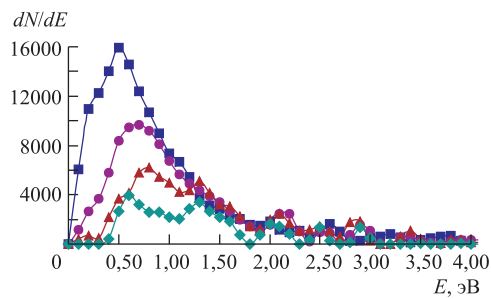


Рис. 9. Зависимость формы спектра позитронов от толщины замороженного замедлителя (мкм): 30 (◆), 50 (▲), 90 (●), 130 (■)

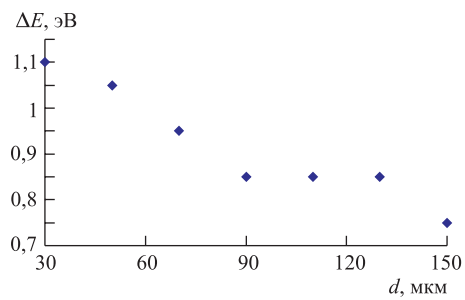


Рис. 10. Зависимость ширины спектра позитронов на полувысоте от толщины замороженного замедлителя

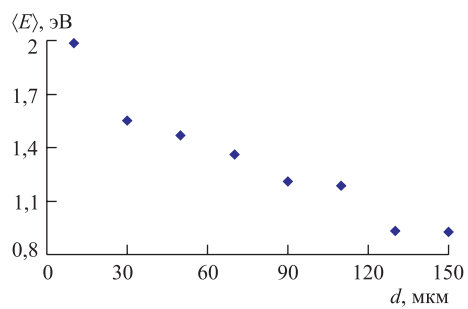


Рис. 11. Зависимость средней энергии позитронов, вылетающих из замедлителя, от толщины замедлителя

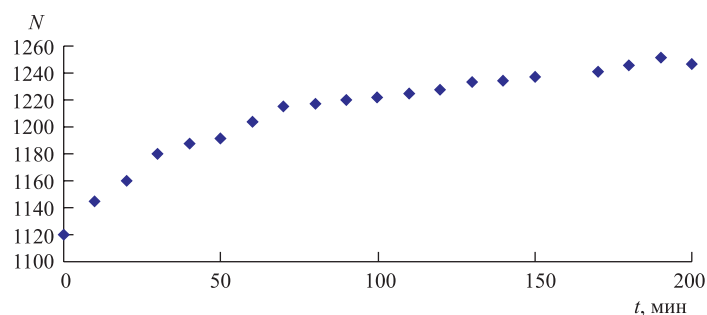


Рис. 12. Пример эволюции выхода медленных позитронов после прекращения наморозки замедлителя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и испытан источник медленных монохроматических позитронов. Метод наморозки уникален и имеет ряд существенных преимуществ: наморозка проводится без изменения вакуумных условий системы и значительно быстрее (в течение часа), чем в существующих аналогах [11, 15]. Одним из важных достоинств конструкции является возможность точного контроля толщины намораживаемого слоя.

Впервые измерена зависимость спектра медленных позитронов от толщины замедлителя. Уже первые эксперименты позволили достичь эффективности замедлителя, соответствующей мировым показателям [16]. На тестовом источнике изотопа ^{22}Na получен пучок медленных позитронов интенсивностью $5,8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ со средней энергией 1,2 эВ при ширине спектра 1 эВ. Эффективность замедления составила $\varepsilon = 1\%$.

Авторы выражают благодарность М. Чарлтону и Л. Йоргенсену за ценные консультации, В. Г. Шмаровозу за предоставление и отладку детектирующей электроники, А. П. Кабаченко за изготовление МКП-детектора, Н. А. Лебедеву, Д. В. Философову, А. Н. Королеву, А. Ф. Новгородову за изготовление источника ^{22}Na и В. Б. Бруданину за эффективную поддержку, позволившую осуществить данную работу.

Работа поддержана РФФИ, грант № 05-02-16320.

ЛИТЕРАТУРА

1. Графутин В. И. и др. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества // УФН. 2002. Т. 172, № 1. С. 67–83.

2. *Amoretti M. et al.* The ATHENA antihydrogen apparatus // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 518. P. 679–711.
3. *Meshkov I. N. et al.* LEPTA project: generation and study of positronium in directed fluxes // Nucl. Instr. Meth. B. 2004. V. 221. P. 168–173.
4. *Madansky L., Rasetti F.* // Phys. Rev. 1950. V. 79. P. 397.
5. *Cherry W. H.* Secondary electron emission produced from surfaces by positron bombardment. Ph. D. Dissertation, Princeton University, 1958.
6. *Costello D. G. et al.* // Phys. Rev. B. 1972. V. 5. P. 1433–1436.
7. *Mills Jr., Pfeifer L.* // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. P. 1961–1964.
8. *Антропов В. и др.* // АЭ. 2003. Т. 94, вып. 1. С. 68–70.
9. *Meshkov I. N. et al.* Positron storage ring LEPTA // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 532. P. 172–176.
10. *Meshkov I. N. et al.* Positron storage ring for positronium and antihydrogen generation in flight: The LEPTA project // Nucl. Instr. Meth. B. 2004. V. 214. P. 186–190.
11. *Mills Jr., Gullikson E. M.* Solid Neon Moderator for Producing Slow Positrons // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. P. 1121.
12. *Ильясов А. З., Фадеев С. Л.* Радионуклидные источники позитронов и их применение. Вып. I(II). М.: ЦНИИатоминформ, 1985. 25 с.
13. *Wenninger H. et al.* The ^{22}Na positron spectrum // Nucl. Phys. A. 1968. V. 109. P. 561–576.
14. *Shultz P. J., Lynn K. G.* Interaction of positron beams with surfaces, thin films, and interfaces // Rev. Mod. Phys. 1988. V. 60. P. 701–775.
15. *Greaves R. G., Surko C. M.* Solid neon moderator for positron trapping experiments // Canadian J. Phys. 1996. V. 74. P. 445–448.
16. *Khatri R. et al.* Improvement of rare-gas solid moderators by using conical geometry // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 2374–2376.
17. *Павлов В. Н. и др.* Инжектор позитронов для накопителя LEPTA // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 136, вып. 7. С. 65–69.
18. *Лебедев Н. А. и др.* Метод изготовления источника позитронов на основе ^{22}Na // Тез. докл. 54-го Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Белгород, 2004. С. 314.

Получено 11 января 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 16.02.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,19. Тираж 270 экз. Заказ № 55670.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/