

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПОЗИТРОНОВ ВБЛИЗИ ПОРОГА

*Д. А. Горлова*¹, *Л. Ю. Овчинникова*¹, *А. Ю. Заворотный*¹,
*А. М. Ланик*², *А. В. Русаков*², *Ю. М. Бурмистров*²,
*К. М. Иванов*¹, *И. Н. Цымбалов*^{1,*}, *В. Г. Недорезов*²,
*А. А. Туринге*², *А. Б. Савельев*¹

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

² Институт ядерных исследований РАН, Москва

Приведены результаты экспериментальных исследований генерации позитронов вблизи порога, выполненных в 2018 г. на фемтосекундном лазерном комплексе МЛЦ МГУ и линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Измерения проводились с помощью трех различных детектирующих методов: с использованием детектора Medipix, люминофорных пленок и видеокамер, а также с помощью сцинтилляционных линеек и кремниевых фотоумножителей.

The results of experimental studies of positron generation near the threshold, carried out in 2018 at the MLC MSU femtosecond laser complex and the linear electron accelerator LUE-8 of the INR RAS, are presented. The measurements were carried out using three different detection methods: using a Medipix detector, phosphor films and video cameras, as well as using scintillation rulers and silicon photomultipliers.

PACS: 79.20.Mb; 29.20.Ej; 07.85.Fv; 29.40.Mc; 85.60.Na

ВВЕДЕНИЕ

Предварительные результаты, полученные в 2017 г. на фемтосекундном лазерном комплексе МЛЦ МГУ, потребовали дополнительных методических усилий для решения задачи по исследованию генерации позитронов вблизи порога. Первые экспериментальные результаты показали, что эти сечения примерно на два порядка ниже, чем предсказывает моделирование по программе GEANT4. Кроме того, при использовании электронных методов регистрации в области малых значений энергии (ниже 10 МэВ) измерения оказались затруднены из-за больших фонов, связанных, по-видимому, со вторичной электронной эмиссией из мишени вблизи порога. Поэтому измерения были продолжены с помощью разных экспериментальных методов, обработка

*E-mail: ivankrupenin2@gmail.com

которых проводилась на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Этот ускоритель обеспечил потоки электронов на три порядка выше, чем на лазере, что позволило не только отработать методы измерений, но и обеспечить получение новых физических данных.

1. РАБОТЫ НА ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Для получения позитронов на тераваттной фемтосекундной лазерной системе прежде всего была разработана методика генерации релятивистских электронов в форме коллимированного пучка. В результате был получен электронный пучок с энергией до 10 МэВ и расходимостью $\sim 0,1$ рад (рис. 1). Этого оказалось достаточно для проведения экспериментов со вторичными мишенями.

Заряд пучка в импульсе измерялся независимо двумя методами. Во-первых, был использован прямой метод измерений с помощью цилиндра Фарадея. Во-вторых, использовался косвенный метод, основанный на измерении выхода фотоядерной реакции $D(\gamma, n)H$. Измеряемое число зарегистрированных нейтронов позволило оценить поток фотонов и электронов по известному сечению указанной реакции. Оба метода дали схожее значение, составляющее 30 пКл, или $3 \cdot 10^8$ электронов в каждом импульсе пучка. Таким образом, при частоте повторения импульсов 10 Гц поток электронов составил $3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$.

Энергетический спектр электронов, измеренный с помощью магнитного спектрометра [1], представлен на рис. 2 вместе с его аппроксимацией с помощью двух экспонент:

$$Y = A1 \exp\left(-\frac{x}{T1}\right) + A2 \exp\left(-\frac{x}{T2}\right), \quad (1)$$

где $T1 = (2,1 \pm 0,5)$ МэВ, $T2 = (0,2 \pm 0,01)$ МэВ.

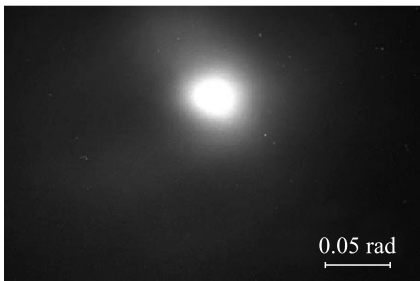


Рис. 1. Пространственный профиль электронного пучка на экране LANEX

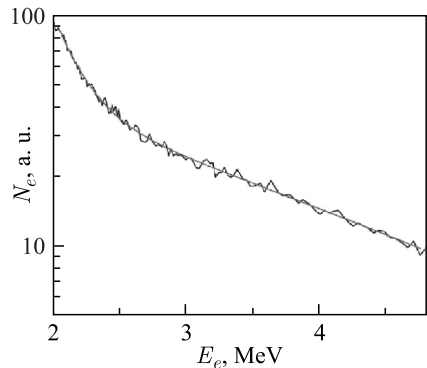


Рис. 2. Спектр электронов, измеренный на лазерной установке магнитным спектрометром

Поскольку спектр непрерывный, то для обозначения энергии электронов удобнее пользоваться термином «температура», определяющим наклон экспоненты.

Затем на основе экспериментально измеренных параметров пучка с помощью программы GEANT4 было проведено дополнительное моделирование предполагаемой схемы генерации позитронов на лазерной системе. Схема эксперимента показана на рис. 3.

В качестве e^-e^+ -конвертера использовались пластины из вольфрама различной толщины (0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 мм), чтобы определить оптималь-

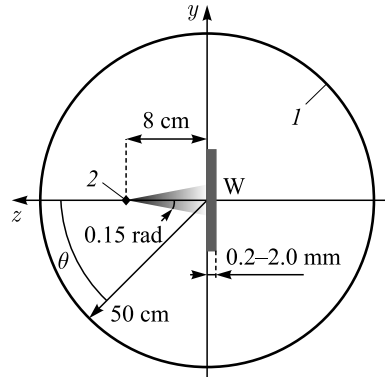


Рис. 3. Схема эксперимента на лазерной установке: I — идеальный сферический детектор; 2 — точечный источник электронов ($N_{e1} = 10^9$) с экспоненциальным энергетическим спектром

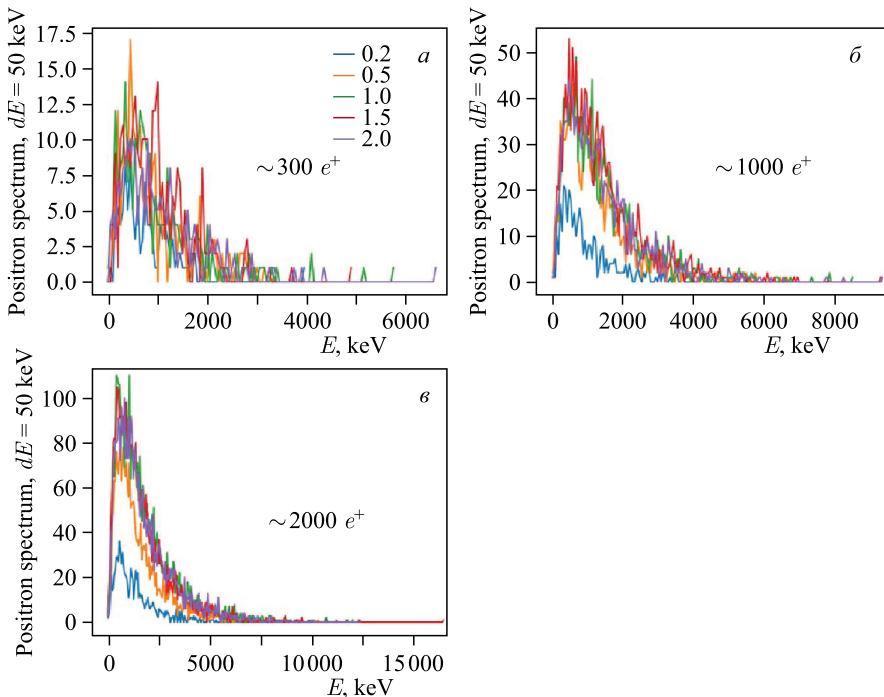


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Расчетные спектры позитронов для различных толщин мишени-конвертера (обозначено разным цветом) и различных температур электронного пучка

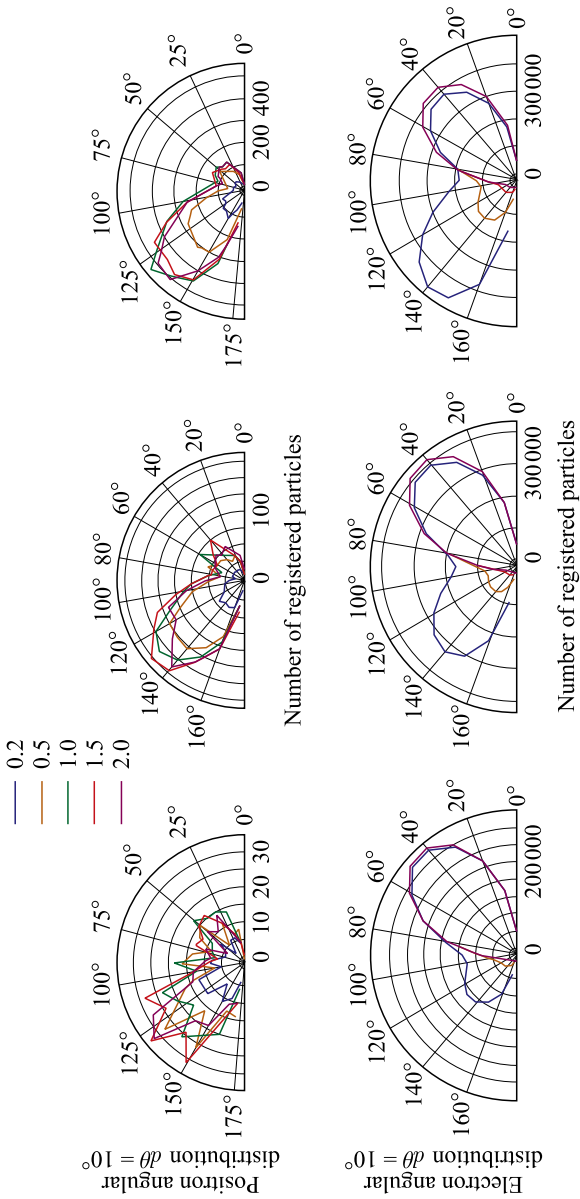


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Угловые зависимости для позитронов и электронов после взаимодействия с мишенью-конвертером

ную с точки зрения выхода позитронов вторичную мишень. Также рассматривались три значения температуры экспоненциального спектра электронов (1,0, 1,5, 2,0 МэВ), так как в реальном эксперименте спектр электронов нестабилен и может сильно меняться от выстрела к выстрелу. На рис. 4 представлены результаты моделирования спектра позитронов, вылетающих из мишени. Количество генерируемых позитронов составляет величину порядка 10^3 , что говорит о принципиальной возможности их детектирования на лазерной установке. При этом коэффициент e^-e^+ -конверсии меняется от $1 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ при изменении температуры электронов от 1 до 2 МэВ.

Также были построены угловые распределения электронов и позитронов после взаимодействия с мишенью (рис. 5). Разные цвета кривых соответствуют разной толщине мишеней. Угол θ соответствует обозначению, показанному на рис. 3.

Видно, что позитроны в основном генерируются по направлению исходного пучка. Электроны же при использовании достаточно толстой вторичной мишени (1 мм W и более) в основном поглощаются или отражаются от нее назад. Поэтому можно сделать вывод, что правильный выбор вторичной мишени может сильно упростить регистрацию позитронов в реальном эксперименте.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА MEDIPX

Поскольку выход позитронов на лазерной установке относительно мал, потребовался трековый тип детектора, позволяющий определять энергию позитрона для каждой отдельной частицы. При этом измерения были выполнены как на лазерной установке, так и на ускорителе электронов ЛУЭ-8 ИЯИ РАН.

Medipix [2] — матрица из теллурида кадмия — содержит 256×256 пикселей размером 55×55 мкм и толщиной 1 мм. В результате взаимодействия электрона с энергией несколько мегаэлектронвольт с веществом детектора образуется трек длиной до нескольких миллиметров, длина которого и размер кластера при одновременном срабатывании нескольких соседних пикселей зависит от энергии электрона. Результаты измерений, выполненных на лазере и ускорителе, показаны на рис. 6. На ускорителе детектор стоял после постоянного магнита, настроенного на регистрацию позитронов [3], перед магнитом помещался радиатор из W толщиной 0,4 мм. Измерения проводились при разных порогах регистрации и разных потоках электронов. Ток электронов на ускорителе был равен 1 мкА, рис. 6, *в* соответствует порог 50 кэВ, остальные получены с минимальным порогом, близким к нулю. Рис. 6, *б* получен с дополнительным очищающим магнитом.

Видно, что на лазере без магнита летят одновременно электроны и рентгеновские кванты. На лазере с магнитом электроны убраны, остался только рентгеновский фон. На ускорителе летит все, и очистить пучок от электро-

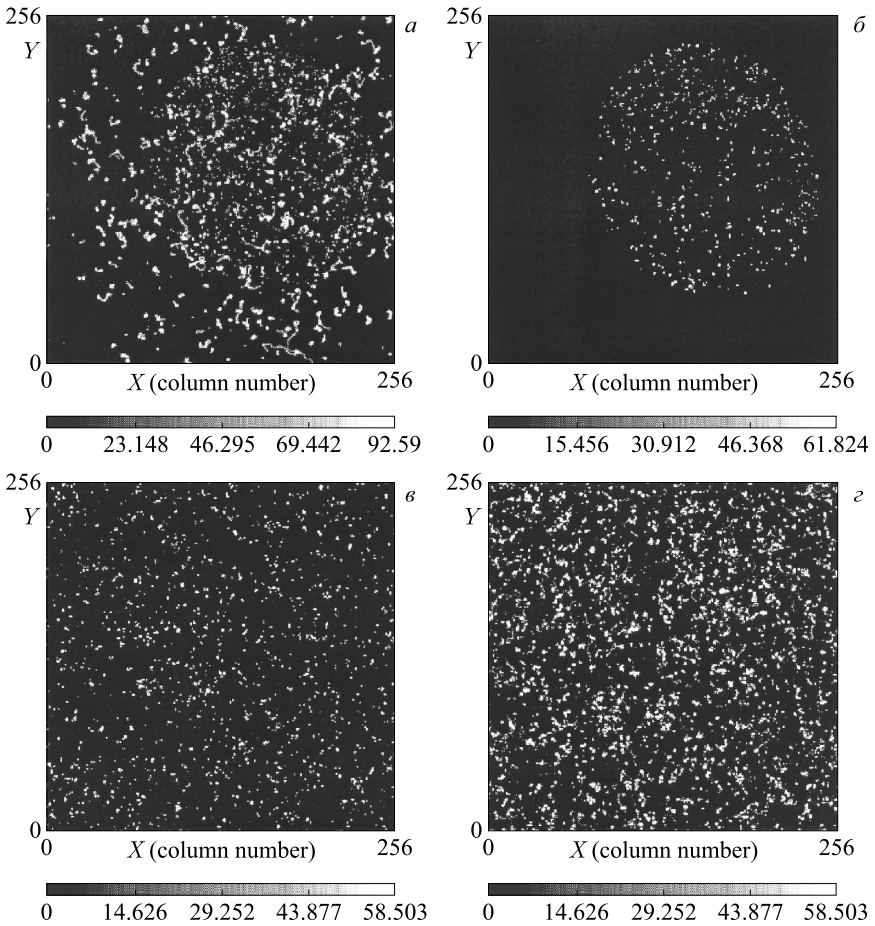


Рис. 6. Снимки с детектора Medipix, полученные на лазере (*a*, *б*) и ускорителе (*в*, *г*). Условия экспериментов описаны в тексте

нов не удастся, потому что магнит настроен на регистрацию позитронов, интенсивность которых очень мала. Для того чтобы разобраться в полученных данных, было проведено дополнительное моделирование по программе GEANT4.

На рис. 7 показаны дополнительные результаты моделирования для электронов с энергией от 0,5 до 10 МэВ при угле падения 60° . Отличный от нуля угол падения позволяет измерить радиус трека. Энерговыведение обозначено цветом в соответствии с палитрой, приведенной на рис. 7. Максимальному энерговыведению соответствует фиолетовый цвет, минимальному — крас-

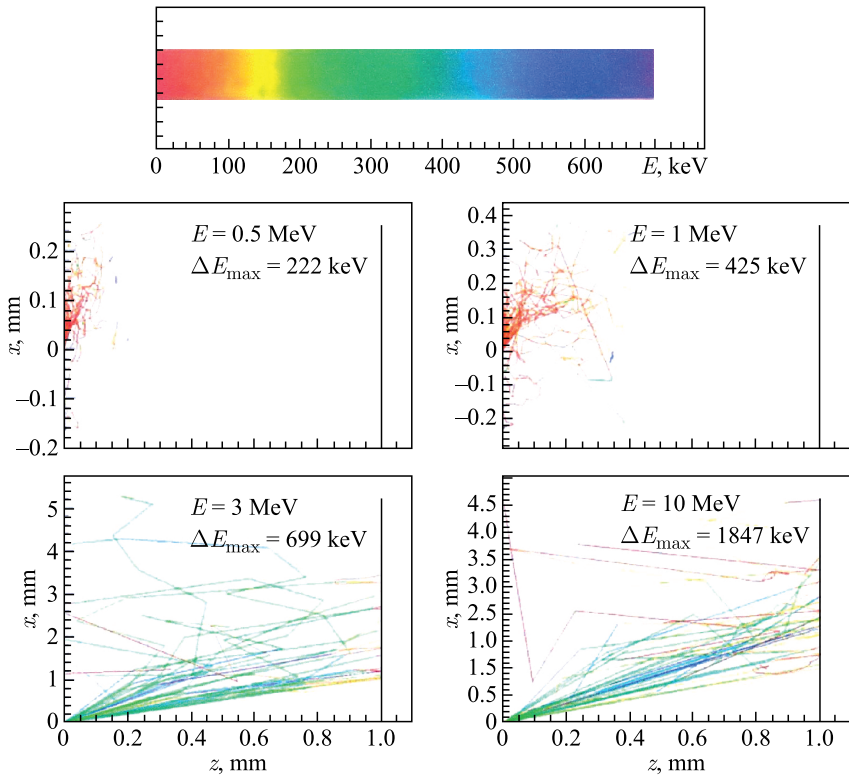


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Треки электронов различных энергий при угле падения 60° . Сверху показана палитра, отражающая обозначение цветом энергии электронов

ный. Промежуточные цвета расположены в соответствии с цветами радуги по линейной шкале. Число цветов 50 соответствует числу оттенков радуги, задаваемых в программе ROOT.

Из рис. 7 видно, что лавина очень широка. Значит, можно под скользящим углом измерять пробег. При пороге 50 кэВ и скользящем падении электроны не должны быть видны.

На основе анализа треков для определения энергии электронов были выбраны следующие четыре измеряемых параметра:

- максимальное энерговыделение в отдельном пикселе;
- максимальный пробег при скользящем падении;
- средний радиус кластера;
- сдвиг центра тяжести в распределении энергетических потерь при скользящем падении.

Согласно моделированию одновременное измерение четырех указанных параметров позволяет определять энергию электрона с точностью около 100 кэВ. В настоящее время обработка полученных данных продолжается.

3. ПЛЕНКА LANEX С ВИДЕОКАМЕРОЙ НА УСКОРИТЕЛЕ

Для отработки метода использовался люминофор, просматриваемый видеокамерой. На рис. 8 показан профиль пучка электронов на радиаторе из W толщиной 0,4 мм перед постоянным магнитом, настроенным на регистрацию позитронов. На выходе из магнита снимка не получилось, потому что интенсивность пучка оказалась слишком мала (на два порядка ниже, чем следует из моделирования).

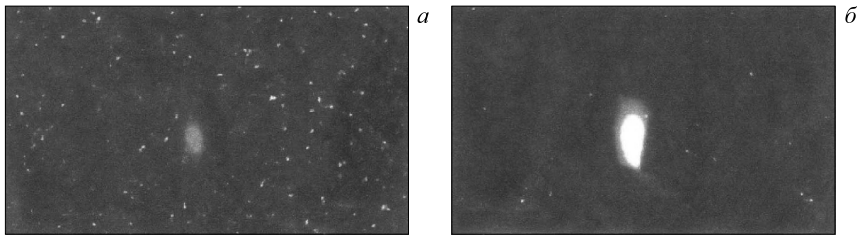


Рис. 8. Профиль пучка электронов на выходе из магнитной системы ускорителя ЛУЭ-8 при энергии 4 (а) и 9 МэВ (б). Ток пучка $I_e = 1$ мкА, диаметр коллиматора 15 мм

Видно, что пучок режется щелью, что указывает на необходимость дополнительной юстировки. После этого надо снова измерить фоновые условия.

4. СЦИНТИЛЯЦИОННАЯ ЛИНЕЙКА С КРЕМНИЕВЫМИ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯМИ

Конструкция линейки показана на рис. 9. Линейка состоит из 16 сцинтилляторов из пластика ВС-404, закрытых черной бумагой. Толщина каждой полоски равна 0,5 мм. С каждой стороны полоски установлен SiPM MicroSC-30035.

Линейка размещалась в фокальной плоскости постоянного магнита, настроенного на позитроны. Измерения проводились с целью проверки эффективности защиты от рентгеновского фона. Энергия электронного пучка $E_e = 7,3-7,5$ МэВ. Длительность пучка 3 мкс, частота повторения 50 с^{-1} . Защита круговая: 4 слоя по 4 мм Pb + кирпичи 50 мм с пяти сторон.

На рис. 10 показана осциллограмма импульсов с линейки при разных токах ускорителя. Внешний запуск осуществлялся синхроимпульсом магне-

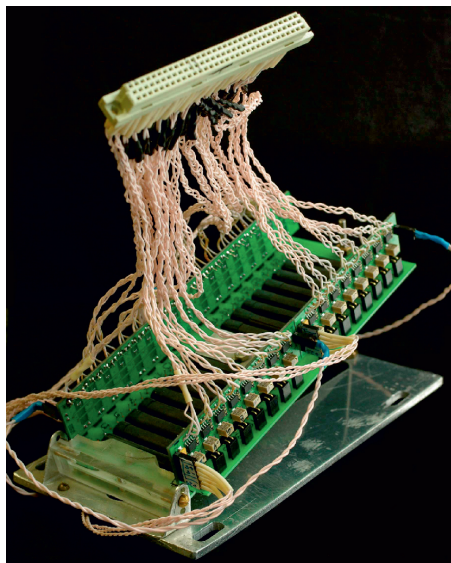


Рис. 9. Конструкция детектирующей линейки

трона ВЧ, верхний луч соответствует сигналу с пластика, нижний луч — с пустого SiPM.

Видно, что электронная наводка во время импульса мала, но фон от пучка довольно велик. Длина одной клетки по оси X равна 1 мкс, что соответствует трем клеткам во время прохождения пучка. Для сравнения и калибровки на рис. 11 показана осциллограмма сигнала от бета-источника $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, масштаб тот же.

Для проверки эффективности регистрации электронов в тонком (0,5 мм) сцинтиляторе были проведены дополнительные измерения с кристаллом BGO размером $100 \times 30 \times 10$ мм, который устанавливался на место пластиковой линейки. Кристалл просматривался тем же самым SiPM AgrarJ-60035-4P размером 4×4 мм, с общим катодом. Средний ток пучка $I_e = 2,1$ мкА. Защита круговая: 4 слоя по 4 мм Pb + кирпичи 50 мм с пяти сторон. На кристалле BGO была видна огибающая пучка с длительностью импульса 6 мкс, длина импульса с контрольного SiPM почти в два раза короче.

Чтобы понять природу фона, были проведены дополнительные измерения на другом выходе магнитной системы ускорителя. Повернутый магнитом на 135° пучок проходил через щель из стали размером 4 мм при длине 25 мм. При этом использовался толстый (30 мм) пластик с обычным ФЭУ-143, $HV = 1300$ В. Средний ток пучка $I_e = 20$ мкА. Никакой защиты вокруг детектора не было. Установлено, что фона вокруг импульса пучка

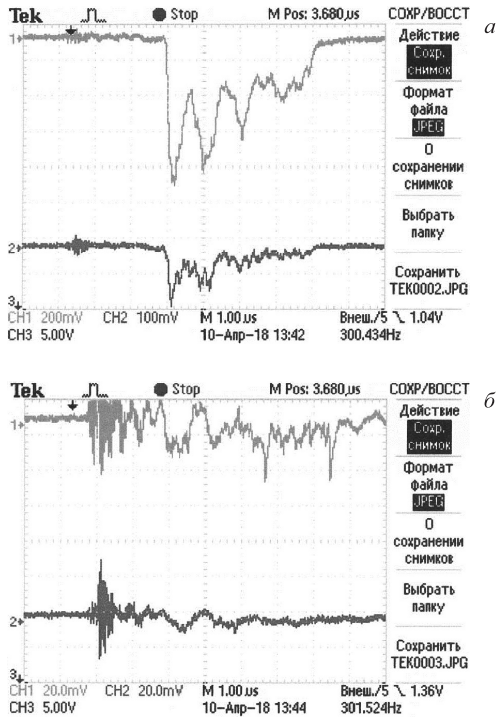


Рис. 10. Амплитуда сигналов с кремниевого фотоумножителя при среднем токе электронов 20 мкА (верхняя осциллограмма) и 2 мкА (нижняя осциллограмма). а) Сигнал с пластика; б) сигнал с контрольного SiPM без пластика

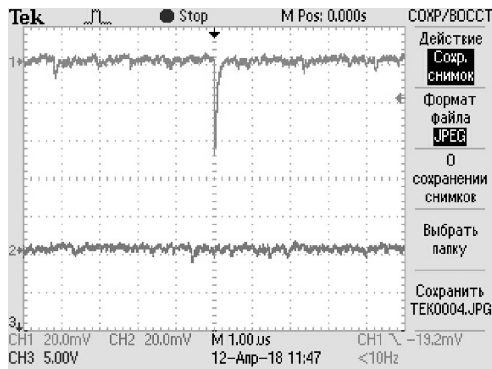


Рис. 11. Осциллограмма сигнала от бета-источника $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

мало. При этом длительность импульса близка к 3 мкс. Поскольку фона вокруг пучка практически нет, можно сделать вывод, что этот фон образуется в основном в ярме постоянного магнита, настроенного на позитроны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На тераваттной лазерной установке МЛЦ МГУ получен направленный пучок электронов с температурой до 2 МэВ, что соответствует экспоненциально спадающему спектру с максимальной энергией около 10 МэВ. Согласно результатам моделирования по программе GEANT4 при этих условиях выход позитронов не превышает 10^4 с^{-1} , а коэффициент конверсии — $6 \cdot 10^{-6}$. Для монохроматической энергии электронов 5 МэВ коэффициент e^-e^+ -конверсии близок 10^{-4} согласно моделированию. Эксперименты на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8 МЭВ ИЯИ РАН при монохроматической энергии пучка $E_e = 8 \text{ МэВ}$ показали, что коэффициент конверсии оказывается существенно (примерно на два порядка) ниже расчетного. Поэтому была разработана методика на основе детектора Medipix, позволяющего оценивать энергию позитронов в отдельном треке. В настоящее время обработка полученных данных продолжается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-02-00213.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русаков А. В., Иванов К. А., Борисов Н. А. и др. // ПТЭ. 2017. Т. 5. С. 1–5.
2. <https://medipix.web.cern.ch/>
3. Овчинникова Л. Ю., Лапик А. М., Русаков А. В. и др. Научно-технический отчет ИЯИ РАН. www.inr.ac.ru/~pnlab. 2017. 18 с.