

Детектор для регистрации электронов с энергией 5–30 keV в установке „Троицк ню-масс“

© П.Н. Аруев,¹ А.И. Берлёв,² В.В. Забродский,¹ С.В. Задорожный,³ А.В. Николаев,¹ Н.А. Титов,² Е.В. Шерстнев,¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

²Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия
e-mail: sildet@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 октября 2019 г.
В окончательной редакции 11 октября 2019 г.
Принято к публикации 29 октября 2019 г.

Работа посвящена поиску детектора для регистрации электронов от бета-распада трития в экспериментах по поиску сигнала стерильных нейтрино. По совокупности параметров новый детектор ASPD (avalanche silicon precision detector) является одним из перспективных, так как позволяет обеспечить скорость счета электронов до $2.5 \cdot 10^7$ событий в секунду с активной областью площадью 0.785 mm^2 , при комнатной температуре, с возможностью спектрометрического режима регистрации.

Ключевые слова: кремний, лавинный фотодиод, детектор электронов, масса нейтрино.

DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49097.336-19

Введение

Исследование бета-распада трития идет по двум направлениям: эксперименты по измерению эффективной массы электронного антинейтрино [1] и поиск сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от $\sim 1 \text{ eV}/c^2$ до нескольких keV/c^2 .

Первое направление исследований нацелено на решение фундаментальной проблемы измерения абсолютной величины массы нейтрино. Исследования нейтринных осцилляций продемонстрировали отличие от нуля массы нейтрино и позволили измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остается неизвестной.

Определение абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку позволяет сделать выбор между различными моделями генерации массы, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино определяет динамику эволюции Вселенной.

При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0.1 eV , все типы нейтрино имеют одинаковую массу (рис. 1). Наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

Второе направление исследований состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от $\sim 1 \text{ eV}/c^2$ до нескольких keV/c^2 [3]. В настоящее время в результате обнаружения осцилляций нейтрино считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трех состояний с определенной массой. Кроме того, есть основания предполагать существование

дополнительных состояний, не участвующих во взаимодействиях в рамках Стандартной модели и называемых поэтому „стерильными“.

Эти состояния являются смесью массовых состояний отличных от входящих в состав активных нейтрино. Одновременно с этим естественно предположить существование небольшой примеси стерильных состояний в активных нейтрино. Считается общепринятым, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из этих трех состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответ-

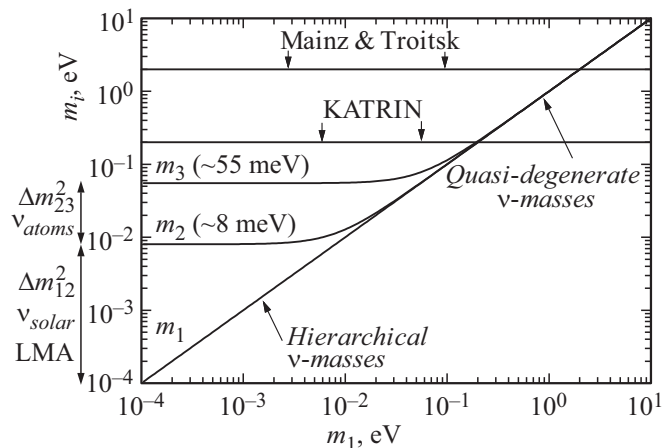


Рис. 1. Сумма массовых состояний нейтрино [2] как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия).



Рис. 2. Установка „Троицк ню-масс II“, 2009 г.

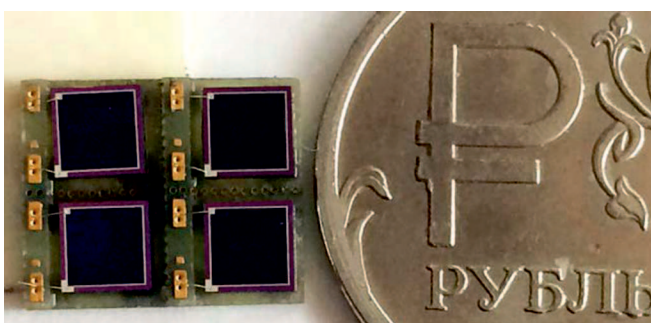


Рис. 3. Сборка из четырех МЛФД MADP-3N (3×3 мм каждый), „НПО Дубна-Детекторы“/Zecotek Photonics Inc (Сингапур).

ствующие вклады. Так, примесь четвертого массового состояния должна проявляться в изломе β -спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [4].

Экспериментальные установки

В 1985–1993 гг. в ИЯИ РАН под руководством академика В.М. Лобашева была создана установка „Троицк ню-масс“, на которой с 1994 г. проводились эксперименты по поиску массы электронного антинейтрино [5]. Основная часть измерений была завершена к 2005 г. и установила предел на массу в 2.05 eV [6,7]. В 2005–2009 гг. для уточнения результатов [8] была проведена масштабная модернизация установки со значительным увеличением вакуумного объема спектрометра (рис. 2). Позже установка стала использоваться для поиска стерильных нейтрино. Данные, полученные на модернизированной установке, „закрыли“ новую область в ограничении по массе стерильного нейтрино [9], однако дальнейшее улучшение результатов практически невозможно разрешить без радикального улучшения детекторной части установки.

Параллельно, начиная с 2001 г. в Германии в Технологическом институте Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany),

был принят совместный с ИЯИ РАН проект КАТРИН по созданию новой установки, которая должна поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне $0.2 \text{ eV}/c^2$. Установка КАТРИН использует схему, реализованную в „Троицк ню-масс“, но выполнена на новом технологическом уровне и позволяет работать с активностью источника в 100 раз больше. Установка имеет следующие параметры: общая длина 70 м, диаметр спектрометра 10 м и вакуум на уровне 10^{-9} Pa [10], беззаконный источник трития активностью 100 GBq , канал транспортировки общей длиной 25 м, сформированный цепочкой из 29 сверхпроводящих соленоидов с полем от 3.6 до 5.6 Т, температура газового источника, поддерживаемая с точностью 25 мК. В качестве детектора электронов используется 148-пиксельный детектор фирмы Canberra [11], который имеет предельную скорость счета не более 3.103 электронов в секунду на каждый пиксель. Установка КАТРИН была запущена в 2018 г. и в 2019 приступила к набору статистики. В сентябре 2019 г. опубликовано новое ограничение на массу электронного антинейтрино до уровня $1.0 \text{ eV}/c^2$. Выйти на изначально запланированный предел ожидается через 3 года набора статистики, после чего встанет вопрос о дальнейшей эксплуатации установки, прежде всего в поиске стерильных нейтрино. КАТРИН имеет возможность вести поиск вклада стерильных нейтрино с массой несколько keV на уровне, не исключенном существующими астрофизическими наблюдениями. Эта установка предоставляет для поиска стерильных нейтрино, прежде всего беззаконный источник газообразного трития активностью 100 GBq (примерно 3 Ci). В то же время ее система регистрации электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена, чтобы регистрировать до 10^8 электронов в секунду по площади детектора диаметром 10 см.

Таким образом, существует запрос на создание нового быстродействующего детектора электронов с энергией от единиц keV до 30–35 keV. Верхняя цифра определяется линиями 17.8, 30.5 и 32.1 keV криптона ^{83m}Kr , которые используются при калибровке высоковольтных систем обоих спектрометров [12].

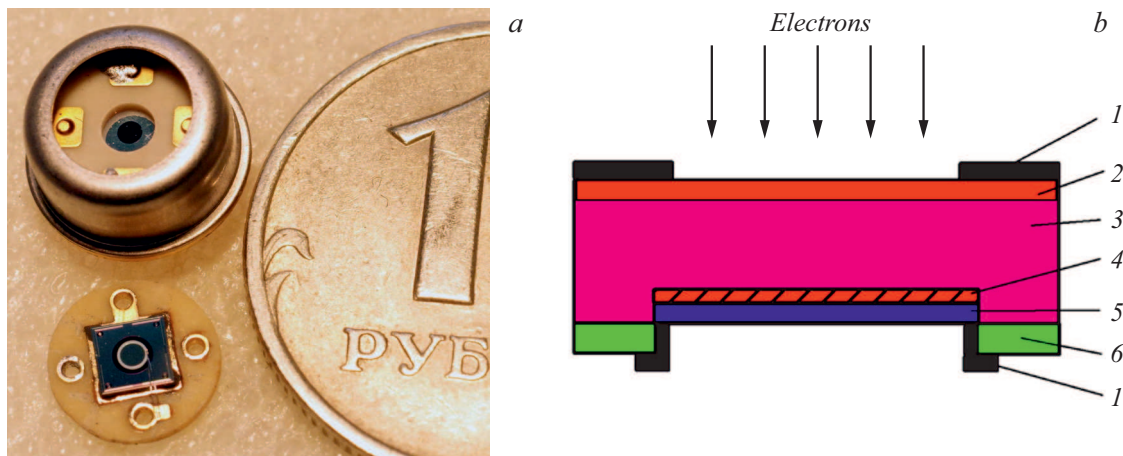


Рис. 4. *a* — ASPD на плате и смонтированный в корпусе TO-5 для работы в режиме „back-illuminated“, *b* — структура ASPD (не в масштабе): 1 — металлический контакт, 2 — p^{++} -слой толщиной 30 nm, 3 — слой p -типа толщиной 320 μm , 4 — p^+ -слой лавинного умножения толщиной 11 μm , 5 — n^{++} -слой толщиной 0.5 μm , 6 — диоксид кремния.

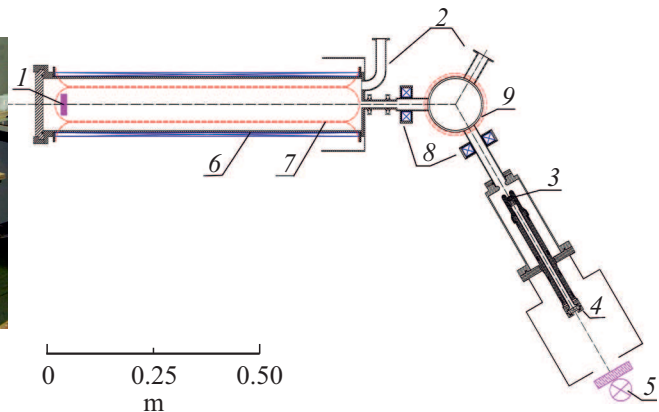
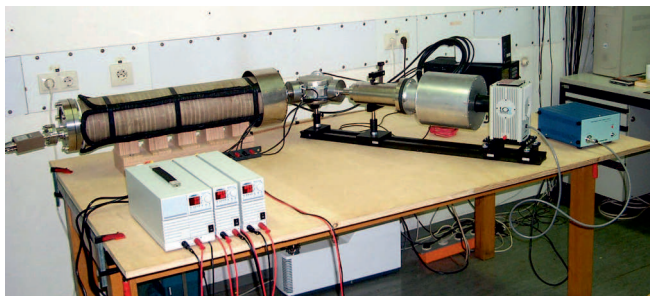


Рис. 5. Фотография и схема стенда: 1 — место расположения детектора, 2 — патрубки для откачки, 3 — наконечник фотопушки, 4 — кварцевое окно, 5 — УФ-лампа с фильтром в защитном кожухе (схематично), 6 — транспортный соленоид, 7 — отклоняющие магниты для сканирования активной области детектора, 8 — фокусирующие магниты, 9 — поворотный магнит.

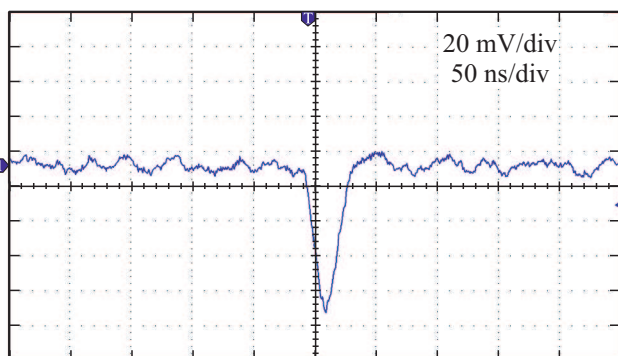


Рис. 6. Отклик пары ASPD-TIA на электрон с энергией 15 keV.

Обзор рассмотренных ранее детекторов

Изначально в качестве детектора установки „Троицко-масс“ предполагалось использовать газонаполнен-

ный счетчик с тонким входным окном [13], однако он был заменен на полупроводниковые детекторы, более подходящие для работы в условиях сильного магнитного поля и высокого вакуума. На этих полупроводниковых детекторах были получены все экспериментальные данные из работы [14]. В основном это были изготовленные в ПИЯФ (Гатчина) планарные Si(Li)-детекторы с диаметром чувствительной области 17 mm, емкостью примерно 15 pF со слоем золота (позже — палладия) 20 mkg/cm^2 , охлаждаемые до температуры жидкого азота.

Данные детекторы вполне удовлетворяли требованиям, предъявляемым при поиске массы нейтрино (диапазон энергий 18–18.6 keV и темп счета до 3–5 kHz), но для поиска стерильных нейтрино потребовалось снизить регистрируемую энергию как минимум до 12 keV. Темп счета при измерении бета-спектра с помощью интегрального спектрометра с уменьшением анализируемой энергии возрастает как кубическая функция. Соответственно потребовался новый детектор, эффективно работающий

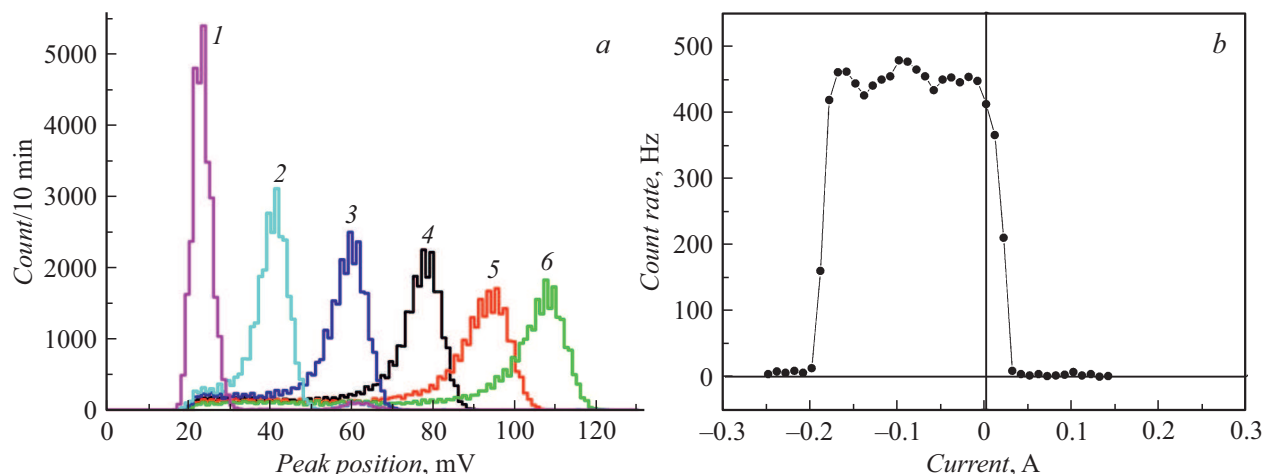


Рис. 7. Результаты исследований в КИТ: *a* — спектры электронов с энергиями: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20, 5 — 25, 6 — 30 keV; *b* — отклик пары ASPD-TIA при поперечном сканировании поверхности детектора пучком электронов.

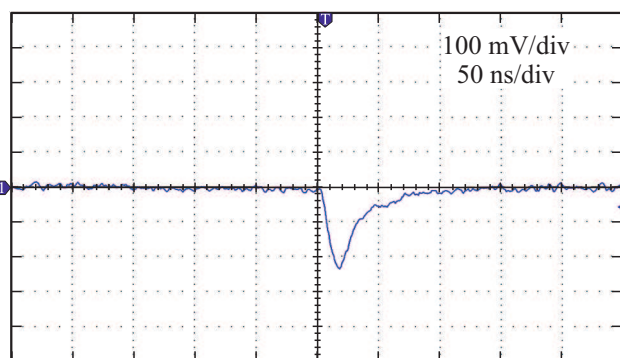


Рис. 8. Отклик пары ASPD-TIA на электрон с энергией 6 keV.

в области низких энергий и обладающий большим быстродействием.

В качестве возможных кандидатов на роль нового детектора рассматривались микроканальные пластины и экспериментальные образцы микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) без защитного покрытия с очень тонким входным окном [15]. Но микроканальные пластины не могут обеспечить отклик на воздействие электроном пропорциональный энергии электрона, т.е. нет возможности проводить спектрометрические измерения.

С использованием МЛФД была проведена серия тестовых измерений [16], разработаны и испытаны несколько моделей предусилителей, а также методика вывода быстрого сигнала из вакуумного объема. Однако данный тип детекторов показал недостаточную надежность из-за отсутствия защитного покрытия. Ненадежность выражалась в быстрой деградации параметров МЛФД от прямого воздействия высокоэнергетических квантов и частиц. В результате увеличивались шумы или прекращалась регистрация полезного сигнала. К особенностям МЛФД можно отнести резкое увеличение

коэффициента усиления при незначительном изменении напряжения смещения или при изменении температуры [17]. Подбор близких по усилению детекторов для многосекционной сборки (рис. 3) возможен, но затруднен из-за разброса параметров отдельных детекторов в пределах одной пластины. В использованной конструкции расположение контактов МЛФД для вывода сигнала существенно увеличивает зазоры между ними, что уменьшает суммарную геометрическую эффективность детектора.

Перспективный детектор электронов на основе кремниевого лавинного фотодиода

В качестве кандидата для регистрации единичных электронов в спектрометрическом режиме в настоящей работе рассматриваются недавно разработанные кремниевые лавинные фотодиоды ASPD (avalanche silicon precision detector) на основе способа формирования мелкозалегающего *p-n*-перехода [18], но работающие в режиме „back illuminated“. Ранее разработанные детекторы на основе мелкозалегающих *p-n*-переходов, использовались в режиме „front illuminated“, в том числе для применения в электронных микроскопах для регистрации отраженных электронов [19], но не в счетном, а в токовом режиме. В случае детектора электронов на основе лавинного фотодиода с внутренним усилением 100 и больше раз появляется техническая возможность регистрировать сигнал от каждого электрона (с энергией больше нескольких сотен eV) с помощью ТИА. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург) были изготовлены экспериментальные образцы лавинных фотодиодов ASPD с диаметром активной области 1 мм и внутренним усилением порядка 200. Внешний вид и структура образца ASPD представлены на рис. 4.

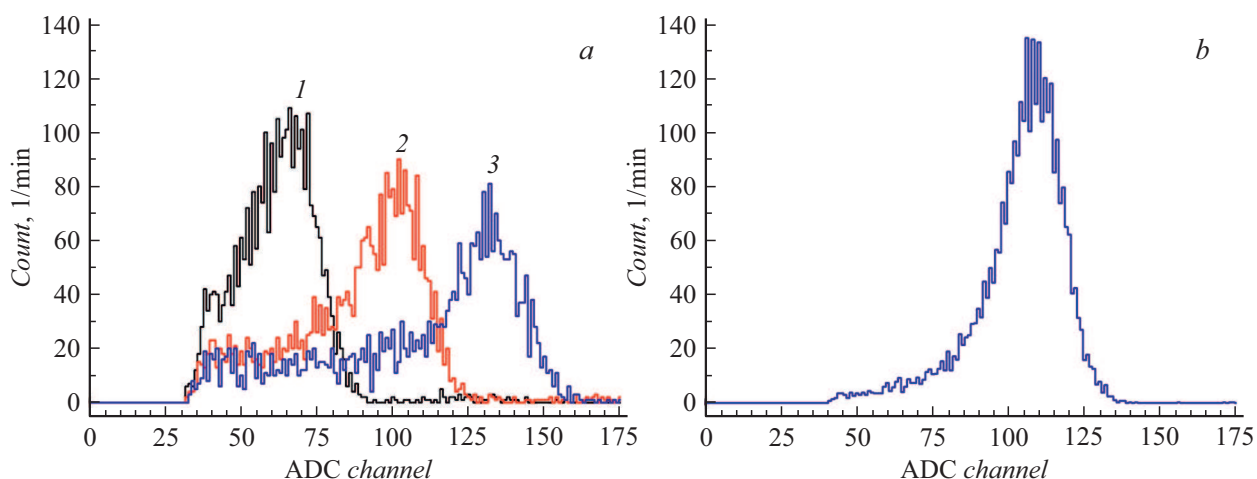


Рис. 9. Спектры от: *a* — электронов разных энергий: 1 — 4, 2 — 6, 3 — 8 keV; *b* — от Fe-55.

Эксперименты с ASPD в КИТ и их результаты

Детектор ASPD использовался для регистрации электронов при обратном смещении по напряжению 340 В. Он был протестирован с использованием электронной пушки, изготовленной в ИЯИ РАН, для Исследовательского центра Карлсруэ (КИТ). Для регистрации с детектора токового сигнала был разработан ТИА с коэффициентом усиления $1 \cdot 10^5$ В/А и полосой пропускания ~ 50 МГц. При испытаниях ТИА размещали снаружи вакуумной камеры на расстоянии 20 см от ASPD. Стенд состоял из электронной пушки и магнитно-фокусирующей системы (рис. 5). Электроны генерировались в пушке в результате фотоэффекта при облучении золотого напыления ультрафиолетовым излучением. Затем электроны ускорялись электрическим полем до необходимой энергии. Сигнал на фоне шумов регистрировался для электронов с энергией более 4 keV. Пример отклика пары ASPD-ТИА на один электрон с энергией 15 keV представлен на рис. 6. Амплитуда импульса ~ 60 мВ, длительность импульса ~ 40 нс. На рис. 7, а показаны спектры от пучков электронов из пушки, полученные от пары ASPD-ТИА. Энергия электронов менялась от 5 до 30 keV с шагом 5 keV. Было проведено сканирование активной области ASPD в счетном режиме пучком электронов с энергией 20 keV. Результат сканирования представлен на рис. 7, б. По горизонтали отложено значение тока в отклоняющем магните.

Эксперименты с ASPD в ИЯИ РАН и их результаты

В ИЯИ РАН исследования параметров ASPD при обратном смещении по напряжению 340 В проводились с использованием стенда с вакуумной камерой высотой 250 мм и диаметром 300 мм. Откачка стенда производилась безмасляным вакуумным постом ILMVAC CDK 180

до уровня $2 \cdot 10^{-3}$ Па. В ходе эксперимента детектор ASPD был установлен непосредственно на плату ТИА. Эта пара была помещена в вакуумный объем. Такая конфигурация улучшила соотношение сигнал/шум за счет минимизации наводок и паразитных емкостей с индуктивностями. Кроме того, был увеличен суммарный коэффициент усиления ТИА до $2 \cdot 10^5$ В/А. Сигнал в счетном режиме на фоне шумов был виден для электронов с энергией более 1.2 keV, что в 3.3 раза лучше, чем при эксперименте в КИТ. На рис. 8 приведен отклик от единичного электрона с энергией 6 keV (получен в ИЯИ РАН). Амплитуда импульса ~ 240 мВ, длительность импульса на полувысоте ~ 30 нс.

Так же в ИЯИ РАН с помощью пары ASPD-ТИА были сняты спектры источника электронов с энергиями 4, 6 и 8 keV. Спектр электромагнитных квантов от радиоактивного источника Fe-55 (основной пик 5.9 и небольшой дополнительный на 6.49 keV) был также снят в ИЯИ РАН для пары ASPD-ТИА. Отнормированные по количеству событий в минуту спектры электронов и квантов представлены на рис. 9, а и б соответственно. Энергия квантов от Fe-55 не совпадает (сдвиг) со шкалой от электронов, так как в отличие от квантов значительная часть энергии электронов теряется в „мертвом“ слое ASPD. Из сравнения спектров видно, что потери составляют около 500 eV, что можно считать минимальным порогом регистрации электронов для данного экземпляра ASPD при идеальном усилителе.

Выводы

Пара ASPD-ТИА работает со скоростью, позволяющей набирать статистику в счетном режиме для потоков $\sim 2.5 \cdot 10^7$ событий в секунду с активной областью площадью 0.785 мм².

Разработанный детектор отраженных электронов с внутренним усилением является перспективным в тех областях, где требуется регистрация большого потока

электронов с энергиями выше 500 eV, в частности, при измерениях бета-спектра трития в широком диапазоне. К преимуществам следует отнести достаточную чувствительность, работу без необходимости охлаждения ниже комнатной температуры.

Вопросы долговременной, температурной стабильности, радиационной стойкости и влияния магнитного поля в работе не рассматривались и требуют дальнейшего изучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Weinheimer C., Zuber K. // *Annalen der Physik*. 2013. Vol. 525. N 8–9. P. 565–575.
- [2] Titov N.A. // *Phys. Atom. Nucl.* 2004. Vol. 67. N 11. P. 1953–1958.
- [3] Mertens S., Lasserre T., Groh S., Drexlin G., Glück F., Huber A., Poon A.W.P., Steidl M., Steinbrink N., Weinheimer C. // *J. Cosmology and Astroparticle Phys.* 2015. Vol. 2015. N 2. doi:10.1088/1475-7516/2015/02/020
- [4] Abazajian K.N. et al. „Light Sterile Neutrinos: A White Paper“. nhttps://arxiv.org/abs/1204.5379
- [5] Lobashev V.M., Aseev V.N., Belesev A.I., Berlev A.I., Geraskin E.V., Golubev A.A., Kazachenko O.V., Kuznetsov Yu.E., Ostroumov R.P., Rivkis L.A., Stern B.E., Titov N.A., Zadorozhny S.V., Zakharov Yu.I. // *Phys. Lett.* 1999. Vol. 460. N 1–2. P. 227–235.
- [6] Lobashev V.M. // *Nucl. Phys. A*. 2003. Vol. 719. P. C153–C160. doi:10.1016/S0375-9474(03)00985-0
- [7] Tanabashi M. et al. (Particle Data Group) // *Phys. Rev. D*. 2018. Vol. 98. P. 030001. DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001
- [8] Aseev V.N., Belesev A.I., Berlev A.I., Geraskin E.V., Golubev A.A., Likhovid N.A., Lobashev V.M., Nozik A.A., Pantuev V.S., Parfenov V.I., Skasyrskaya A.K., Tkachov F.V., Zadorozhny S.V. // *Phys. Rev. D*. 2011. Vol. 84. N 11. P. 112003-1–112003-9. doi:10.1103/PhysRevD.84.112003
- [9] Abdurashitov D.N., Belesev A.I., Berlev A.I., Chernov V.G., Geraskin E.V., Golubev A.A., Koroteev G.A., Likhovid N.A., Lokhov A.A., Markin A.I., Nozik A.A., Parfenov V.I., Skasyrskaya A.K., Pantuev V.S., Titov N.A., Tkachev I.I., Tkachov F.V., Zadorozhny S.V. // *J. Instrument.* 2015. Vol. 10. T10005. doi:10.1088/1748-0221/10/10/T10005
- [10] Arenz M. // *J. Instrument.* 2016. Vol. 11. P. 04011. doi:10.1088/1748-0221/11/04/P04011
- [11] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.mirion.com/products/passivated-implanted-planar-silicon-pips-detectorsKATRINexperiment?>, arXiv:1903.06452v2
- [12] Altenmüller K. „High-resolution spectroscopy of gaseous ^{83}mKr conversion electrons with the KATRIN experiment“, arXiv:1903.06452v2
- [13] С.Н. Балашов и др. „Детектор мягких электронов для работы в сильных магнитных полях“. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0616. М. 1989.
- [14] А.И. Берлёв, Задорожный С.В., Казаченко О.В., Лобашев В.М., Пантуев В.С., Титов Н.А. Система сбора данных в эксперименте по поиску массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития на установке „Троицк-ню-масс“. Препринт ИЯИ РАН, Р-1103/2003. М. 2003.
- [15] Sadygov Z., Ariffin A., Akhmedov F., Anfimov N., Bokova T., Dovlatov A., Zheleznykh I., Zerrouk F., Mekhtieva R., Ol'shevskii A., Sadygov A., Titov A., Chalyshev V., Troitskaya M. // *Phys. Particl. Nucl. Lett.* 2013. Vol. 10. N 7. P. 780–782.
- [16] Берлев А.И., Голубев А.А., Задорожный С.В., Титов Н.А. Исследование возможности создания детектора электронов низких энергий на основе микропиксельного лавинного фотодиода. Препринт ИЯИ РАН 1432/2017, Август 2017.
- [17] Ogasawara K., Livi S., McComas D.J. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Research*. 2009. Vol. 611. N 1. P. 93–98.
- [18] Гольдберг Ю.А., Забродский В.В., Оболенский О.И., Петелина Т.В., Суханов В.Л. // *ФТП*. 1999. Т. 33. Вып. 3. С. 344–345.
- [19] Забродский В.В., Зайцев С.В., Караулов В.Ю., Рау Э.И., Смоляр В.А., Шерстнев Е.В. // *Известия РАН. Серия физическая*. 2019. Т. 83. № 11. С. 1488–1496.