

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



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

Исследование свойств детектора  
отраженных электронов (ASPD)  
как перспективного детектора  
для установки «Троицк ню-масс»  
в диапазоне энергий 5–30 кэВ

препринт  
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1441/2019  
ИЮЛЬ 2019

МОСКВА 2019 MOSCOW

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



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

Исследование свойств детектора  
отраженных электронов (ASPD)  
как перспективного детектора  
для установки «Троицк ню-масс»  
в диапазоне энергий 5–30 кэВ

препринт  
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1441/2019  
ИЮЛЬ 2019

МОСКВА 2019 MOSCOW

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



П.Н. Аруев<sup>2</sup>, А.И. Берлёв<sup>1</sup>, В.В. Забродский<sup>2</sup>, С.В. Задорожный<sup>1</sup>,  
А.В. Николаев<sup>2</sup>, Н.А. Титов<sup>1</sup>, Е.В. Шерстнев<sup>2</sup>

Исследование свойств детектора  
отраженных электронов (ASPD)  
как перспективного детектора  
для установки «Троицк ню-масс»  
в диапазоне энергий 5–30 кэВ

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН, 117312, Проспект 60-летия Октября, 7а, Москва, РФ

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, РФ

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1441/2019

ИЮЛЬ 2019

МОСКВА

2019

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences  
60-th October Anniversary prospect 7a,  
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
проспект 60-летия Октября, 7а  
Москва, 117312

УДК 539.1.074

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

Исследование свойств детектора  
отраженных электронов (ASPD)  
как перспективного детектора  
для установки «Троицк ню-масс»  
в диапазоне энергий 5–30 кэВ

Представленная работа связана с подбором нового типа детектора для регистрации электронов от бета-распада трития в экспериментах по поиску сигнала стерильных нейтрино. По совокупности параметров новые детекторы ASPD (avalanche silicon precision detector) представляются авторам одними из наиболее перспективных в данном направлении.

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

Исследование свойств детектора  
отраженных электронов (ASPD)  
как перспективного детектора  
для установки «Троицк ню-масс»  
в диапазоне энергий 5–30 кэВ

Препринт 1441/2019

Июль 2019

Подписано в печать 27.06.2019

Ф-т 60х84/8. Уч.-изд.л. 1,2. Зак.22445 Тираж 50 экз.  
Бесплатно

Печать цифровая

Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт ядерных исследований Российской  
академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-331-4

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук, 2019  
Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences, 2019

## 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  $\sim 1 \text{ эВ}/c^2$  до нескольких  $\text{кэВ}/c^2$ .

Первое направление исследований нацелено на решение фундаментальной проблемы измерения абсолютной величины массы нейтрино. Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся 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  $0.1 \text{ эВ}$ , все типы нейтрино имеют одинаковую массу (см. рис. 1) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

Второе направление исследований состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от  $\sim 1 \text{ эВ}/c^2$  до нескольких  $\text{кэВ}/c^2$  [2]. 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, естественно предположить существование небольшой примеси стерильных состояний в активных нейтрино. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых

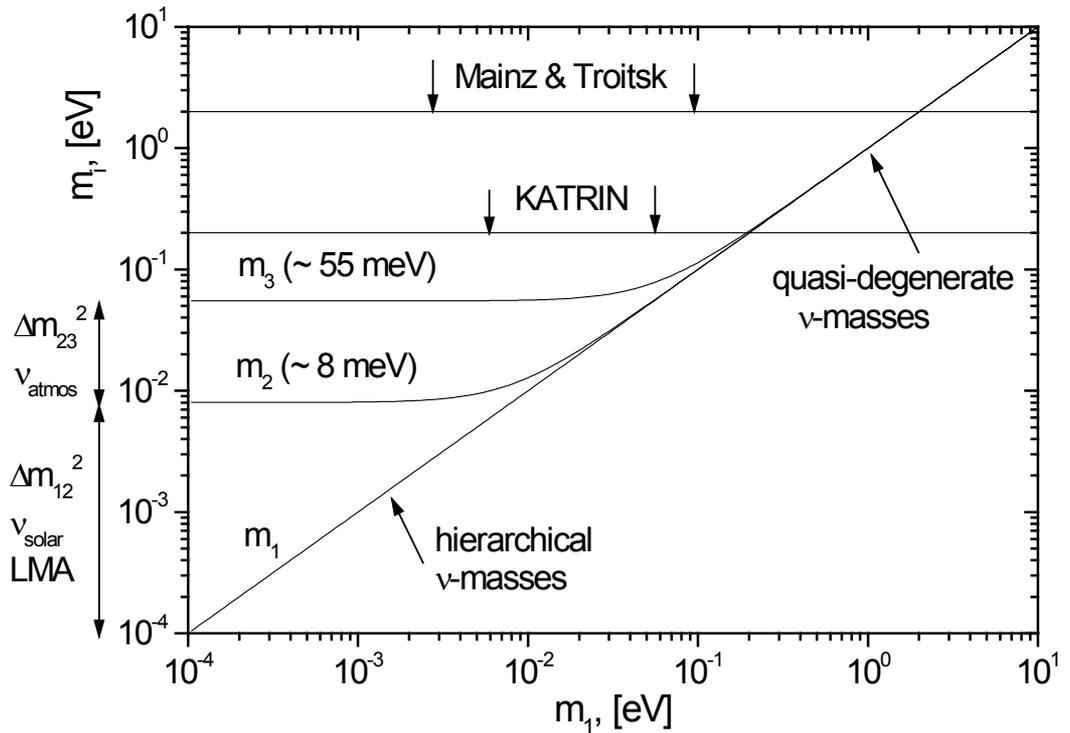


Рис.1. Сумма массовых состояний нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия).

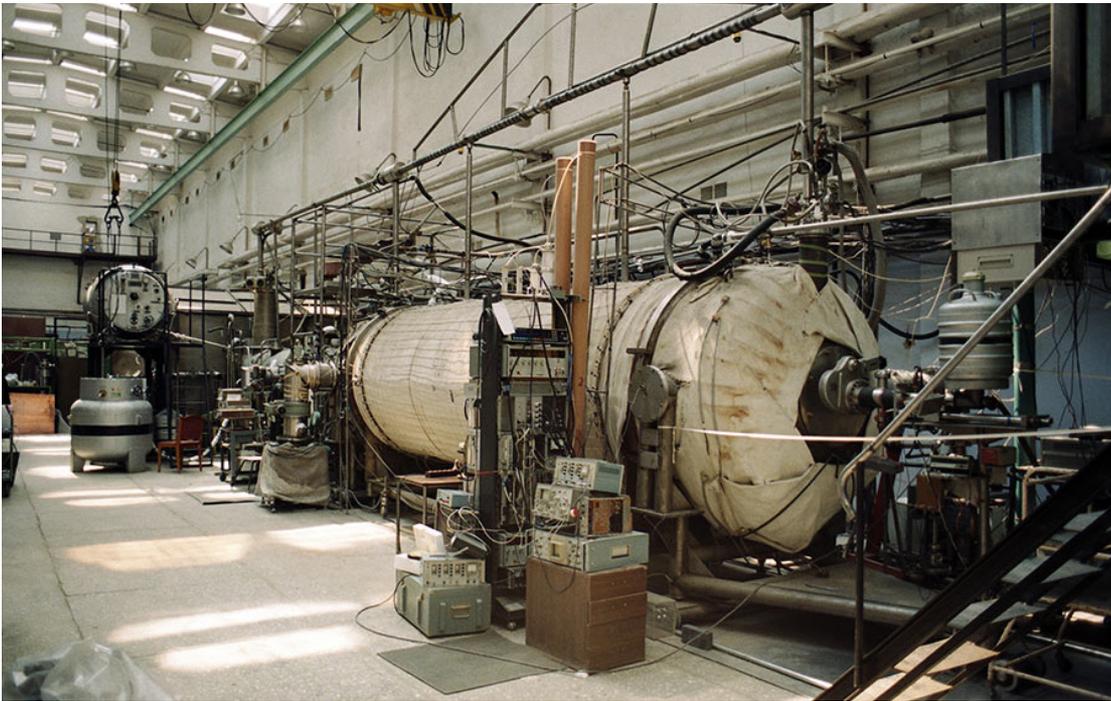
N.A.Titov (for the KATRIN Collaboration) Sensitivity and Systematics of KATRIN Experiment Physics of Atomic Nuclei 67(2004), 1953–1958

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 соответствующие вклады. Так, примесь четвертого массового состояния должна проявляться в изломе  $\beta$ -спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [3].

### Экспериментальные установки

В 1985...1993 гг. в ИЯИ РАН под руководством академика В.М. Лобашева была создана установка «Троицк ню-масс» (рис. 2), на которой с 1994 года проводились эксперименты по поиску массы электронного антинейтрино [4]. Основная часть измерений была завершена к 2005 году и установила предел на массу в 2.05 эВ [5], который до сих пор является лучшим в мире [6].

В 2005–2009 гг. для уточнения результатов [7] была проведена масштабная модернизация установки со значительным увеличением вакуу-



*Рис. 2. Первый вариант установки «Троицк ню-масс», 1999 г.*

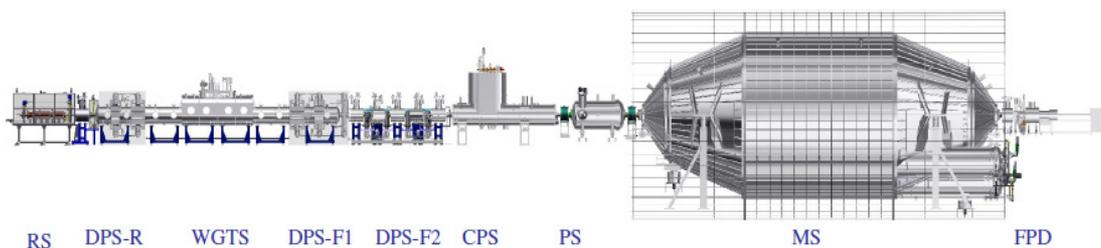


*Рис. 3. Установка «Троицк ню-масс II», 2009 г.*

умного объёма спектрометра (рис.3). Позже установка стала использоваться для поиска стерильных нейтрино.

Данные, полученные на модернизированной установке, «закрыли» новую область в ограничении по массе стерильного нейтрино [8], однако дальнейшее улучшение результатов стало ограничиваться рядом систематических эффектов, которые практически невозможно разрешить без радикального улучшения детекторной части установки.

Параллельно, начиная с 2001 года в Германии, в Технологическом институте Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) был принят совместный с ИЯИ РАН проект КАТРИН по созданию новой установки (рис. 4),



*Рис. 4. Установка КАТРИН.*

RS – задняя стенка, DPS-R – задняя дифференциальная откачная станция, WGTS – безоконный газовый источник трития, DPS-F1 и F2 – передние откачные станции, CPS – криогенная откачная станция, PS – предварительный спектрометр, MS – основной спектрометр, FPD – основной детектор электронов.

которая должна поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне  $0.2 \text{ эВ}/c^2$ . Установка полностью повторяет идеи, заложенные в «Троицк ню-масс», но выполнена на новом технологическом уровне.

Многие параметры новой установки являются рекордными: общая длина 70 м, диаметр спектрометра 10 м и вакуум на уровне  $1 \cdot 10^{-11}$  мбар [9], безоконный источник трития активностью 100 ГБк, канал транспортировки общей длиной 25 м, сформированный цепочкой из 29 сверхпроводящих соленоидов с полем от 3.6 до 5.6 Тл, температура газового источника, поддерживаемая с точностью 25 мК и т. д.

В качестве детектора электронов используется 148-пиксельный детектор фирмы Canberra [10], который имеет предельную скорость счета не более  $3 \cdot 10^3$  электронов в секунду на каждый пиксель.

Установка КАТРИН была запущена в конце 2018 года и проходит процедуру отработки рабочих параметров. По планам, к концу 2019 года ожидается набор статистики, достаточный для снижения ограничения на массу электронного антинейтрино до уровня  $1.0 \text{ эВ}/c^2$ . Выйти на изначально запланированный предел ожидается через 3 года набора статистики и дальше встанет вопрос о дальнейшей эксплуатации установки, прежде всего в поиске стерильных нейтрино. КАТРИН имеет возможность вести поиск вклада стерильных нейтрино с массой несколько кэВ на уровне, не исключённом существующими астрофизическими наблюдениями.

Эта установка предоставляет для поиска стерильных нейтрино прежде всего уникальный безоконный источник газообразного трития активностью 100 ГБк (примерно 3 Ки). В тоже время, её система регистра-

ции электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена, чтобы регистрировать до  $10^8$  электронов в секунду по площади детектора диаметром 10 см.

Итак, со стороны двух больших физических установок есть запрос на создание нового быстродействующего детектора электронов с энергией от единиц кэВ до 30–35 кэВ. Верхняя цифра определяется линиями 17.8, 30.5 и 32.1 кэВ криптона  $^{83m}\text{Kr}$ , которые используются при калибровке высоковольтных систем обоих спектрометров [11].

### Обзор перспективных кандидатов на роль детектора

Изначально в качестве детектора установки «Троицк ню-масс» предполагалось использовать газонаполненный счётчик с тонким входным окном [12] однако затем он был заменён на более подходящий для работы в условиях сильного магнитного поля и высокого вакуума полупроводниковый детектор, на котором были набраны все экспериментальные данные [13]. В основном это были изготовленные в ПИЯФ (Гатчина) по нашему заказу плоские Si(Li) детекторы с диаметром чувствительной области 17 мм, ёмкостью порядка 15 пФ со слоем золота (позже — палладия)  $20 \text{ мкг/см}^2$ , охлаждаемые до температуры жидкого азота.

Данные детекторы вполне удовлетворяли требованиям, предъявляемым при поиске массы нейтрино (диапазон энергий 18 ... 18.6 кэВ и темп счёта до 3...5 кГц), но для поиска стерильных нейтрино потребовалось снижать регистрируемую энергию как минимум, до 12 кэВ, а то и ниже. Темп счёта при измерении бета-спектра при уменьшении энергии возрастает квадратично, а в случае нашего интегрального спектрометра как кубическая функция. Соответственно, потребовался новый детектор, эффективно работающий 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 [14]. Но микроканальные пластины могут использоваться только в счётном режиме, что сильно ограничивает их применение, и рассматриваются в качестве «аварийного» варианта.

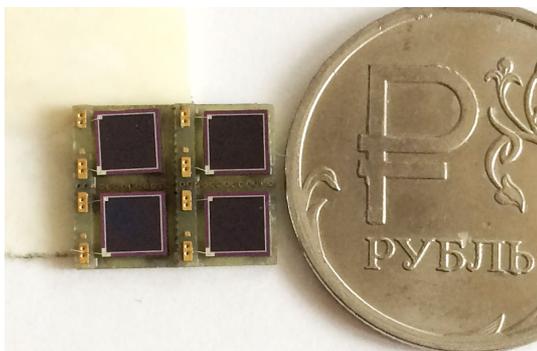


Рис. 5. Сборка из четырёх подобранных по параметрам МЛФД MADP-3N (3×3 мм каждый), сделанная по нашему заказу.

«НПО Дубна-Детекторы» / Zecotek Photonics Inc  
(Сингапур)

не мешать регистрации низкоэнергетичных электронов). К особенностям МЛФД можно отнести резкое увеличение коэффициента усиления при незначительном изменении напряжения смещения или при изменении температуры [16]. Подбор близких по усилению детекторов для многосекционной сборки (рис. 5) возможен, но несколько затруднён из-за разброса параметров отдельных детекторов в пределах одной пластины.

Разумеется, при данной конструкции расположение контактов для вывода сигнала существенно увеличивает нечувствительную зону, что уменьшает суммарную эффективность детектора.

Поиск возможных кандидатов на роль будущего детектора привёл к другим полупроводниковым приборам. Они представляют собой кремниевые фотодиоды с мелкозалегающим  $p-n$  переходом [17], названные авторами ASPD (avalanche silicon precision detector). Эти детекторы изначально были разработаны для применения в электронных микроскопах [18] для регистрации отраженных электронов.

Принцип работы кремниевого детектора электронов основан на поглощении электронов в приповерхностной области детектора, генерации этими электронами неосновных носителей заряда в кремнии, с последующей регистрацией токового сигнала трансимпедансным (transimpedance amplifier, TIA) или зарядочувствительным (charge-sensitive preamplifier, CSP) усилителями.

Следует отметить, что МЛФД по своей природе являются массивом пар фотодиод — гасящий резистор, работающих в режиме триг-

гера при напряжениях больше пробоя и в случае прямой регистрации электрона. МЛФД не обеспечивают пропорциональность выходного сигнала от энергии регистрируемого электрона. В то же время фотодиодные структуры, работающие до пробойных напряжений, обладают способностью генерировать сигнал пропорциональный энергии поглощённого электрона или кванта, что является необходимым условием для спектрометрии.

Порог энергетической чувствительности полупроводниковых детекторов электронов обусловлен толщиной «мёртвого слоя» на облучаемой поверхности детектора. Термин «мёртвый слой» подразумевает, что речь идёт о слое, в котором регистрируемые частицы или кванты рассеиваются, теряя энергию. Сгенерированные в «мёртвом слое» неосновные носители не выходят из него по причине отсутствия условий необходимых для их эффективного дрейфа из зоны генерации. Характерные величины толщины мертвых слоёв современных кремниевых детекторов лежат в диапазоне от единиц, до нескольких десятков нм [19, 20]. Эти слои обычно состоят из аморфизованных слоёв, диэлектриков, металлов или монокристалла полупроводника в котором вектор напряжённости приповерхностного поля заставляет неосновные носители двигаться в сторону противоположную металлургической границе  $p-n$  перехода.

Детекторы электронов используются как в токовом так и в спектрометрическом режимах (электронные микроскопы, рентгенофлуорисцентный анализ). В случае токового режима регистрируется интегральный сигнал от всех поглощённых электронов, в случае спектрометрического режима регистрируются пакеты неосновных носителей заряда от каждого поглощенного электрона. Основное исполнение кремниевых детекторов электронов это диоды без внутреннего усиления, а также их модификация — кремниевый дрейфовый детектор (SDD) [21] с пониженной ёмкостью для минимизации емкостной составляющей шума в системе детектор-предусилитель. Наилучшее энергетическое разрешение обеспечивают системы на основе CSP и SDD. Одним из ограничений таких систем является невозможность работать при нагрузках свыше  $10^6$  эл/с, т.к. сигналы от электронов идут так часто, что накладываются друг на друга в тракте CSP, имеющем характерные времена формирования

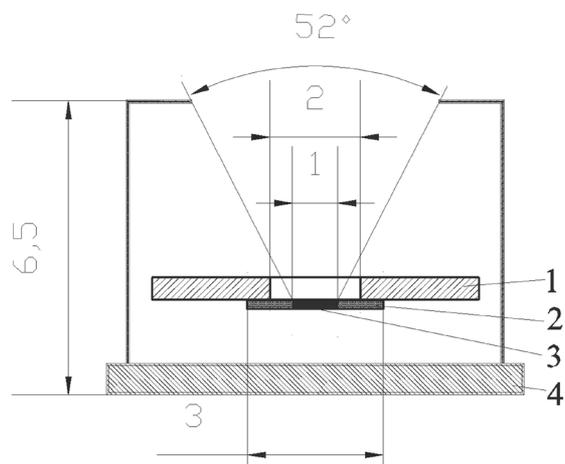
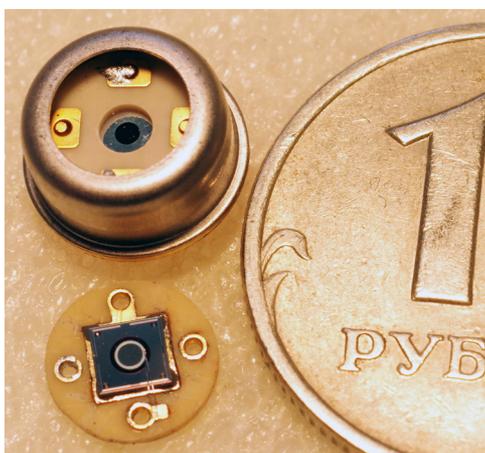


Рис. 6. а) детектор электронов ASPD на подкристалльной плате и смонтированный в корпусе TO-5 для работы в режиме «back-illuminated», б) расположение кристалла лавинного фотодиода в корпусе: 1 — подкристалльная плата, 2 — кристалл детектора, 3 — активная область детектора, 4 — корпус TO-5

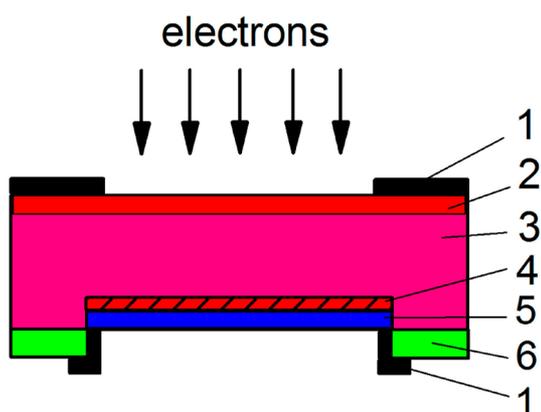


Рис. 7. Структура детектор электронов ASPD:

1 — металлический контакт, 2 — p++ слой толщиной 30 нм, 3 — база p-типа толщиной 320 мкм, 4 — p+ слой формирующий условия для лавинного умножения толщиной 10 мкм, 5 — n++ слой толщиной 0.5 мкм, 6 — диоксид кремния

импульса порядка нескольких микросекунд, что резко ухудшает спектральное разрешение.

При использовании детекторов электронов на основе лавинных кремниевых фотодиодов существует возможность регистрации сигналов в спектрометрическом режиме (от каждого электрона) без использования CSP. В случае детектора электронов на основе ASPD (avalanche silicon precision detector), его внутреннее усиление порядка 100 позволяет

регистрировать сигналы от каждого электрона с помощью ТИА, который примерно в 100 раз быстрее тракта CSP, что позволяет набирать статистику для потоков до  $10^8$  эл/с, но с худшим энергетическим разрешением, чем у систем SDD-CSP.

Из ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург) были получены экспериментальные образцы детекторов электронов на основе кремния ASPD [22] с диаметром активной области 1 мм и внутренним усилением порядка 200.

Внешний вид и структура образца экспериментального детектора электронов ASPD представлена на рис. 6 и 7.

### Результаты тестов

Исследованию свойств МЛФД авторами была посвящена отдельная работа [13] и здесь мы на них подробно останавливаться не будем. Краткий вывод: электроны регистрируются в режиме, близком к счетному. Наблюдается сильная зависимость параметров от напряжения смещения и температуры.

Детектор ASPD был протестирован при помощи электронной пушки, изготовленной в ИЯИ РАН для совместного проекта в Исследовательском центре Карлсруэ (KIT), а также на стенде непосредственно в ИЯИ РАН. Использовался предварительный усилитель собственной разработки на базе операционных усилителей ОРА657 в первом каскаде и ОРА695 во втором. Схема одного из вариантов усилителя приведена на рис. 13. Мы его испытывали как снаружи вакуумной камеры, так и внутри. Естественно, что при коротком расстоянии, когда детектор припаян непосредственно к плате усилителя, соотношение сигнал/шум является максимальным, однако и при выносе усилителя из вакуумного объёма на расстояние до 100...200 мм оно так же остаётся приемлемым. При этом полностью убираются проблемы как вывода лишнего тепла из вакуума, так и ухудшение вакуума за счёт развитой поверхности платы и смонтированных элементов. Предварительный усилитель позволяет работать с любой полярностью напряжения смещения.

В KIT детектор был подключен на расстоянии 20 см от предусилителя и просканирован пучком электронов, сформированным на стенде, состоящем из электронной пушки и магнитно-фокусирующей системы (Рис. 8). Уверенный сигнал на фоне шумов был виден, начиная от 4 кэВ.

Электроны возникают в пушке в результате фотоэффекта на золотом напылении, при облучении его ультрафиолетовым излучением. Затем электроны ускоряются электрическим полем до необходимой энергии (5–30 кэВ).

На рис. 10 показаны спектры от электронов с шагом 5 кэВ.

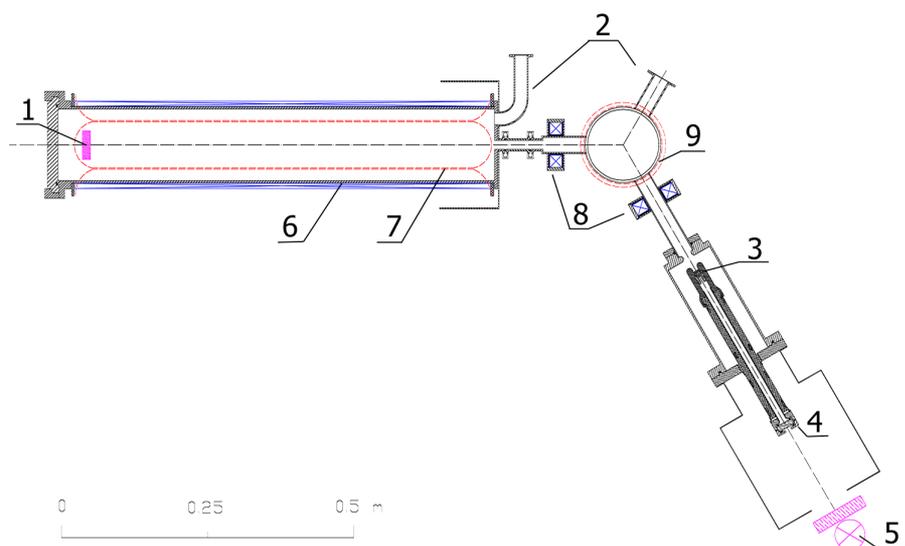
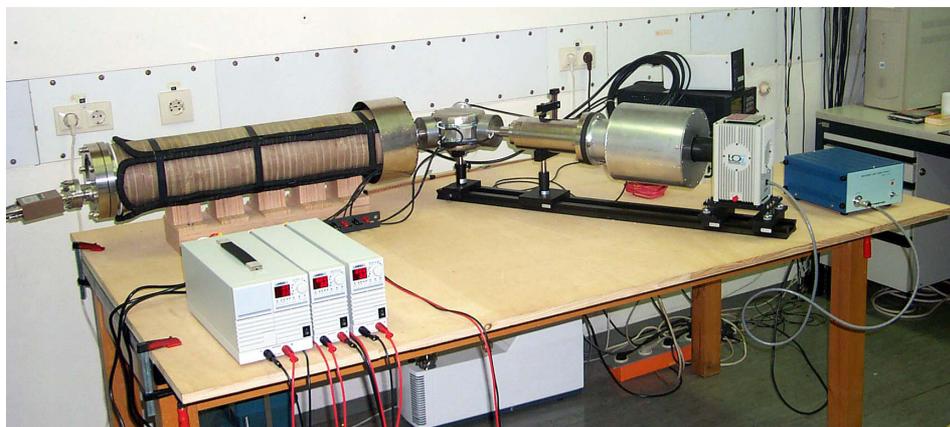


Рис. 8. Схема стенда для проверки детекторов.

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 площади детектора, 8 — фокусирующие магниты, 9 — поворотный магнит

Для проверки параметров детекторов в ИЯИ РАН использовался стенд с вакуумной камерой высотой 250 мм и диаметром 300 мм. Откачка производилась безмасляным вакуумным постом ILMVAC CDK 180 до уровня  $2 \cdot 10^{-5}$  мбар.

Здесь детектор был установлен непосредственно на плату предусилителя, а сам он помещен в вакуумный объём. В такой конфигурации соотношение сигнал/шум заметно улучшилось и уверенный сигнал на фоне шумов был виден, начиная от 1.2–1.3 кэВ. Коэффициент усиления второго каскада так же был увеличен в несколько раз.

Были сняты спектры от радиоактивных источников Am-241, Fe-55 и др.

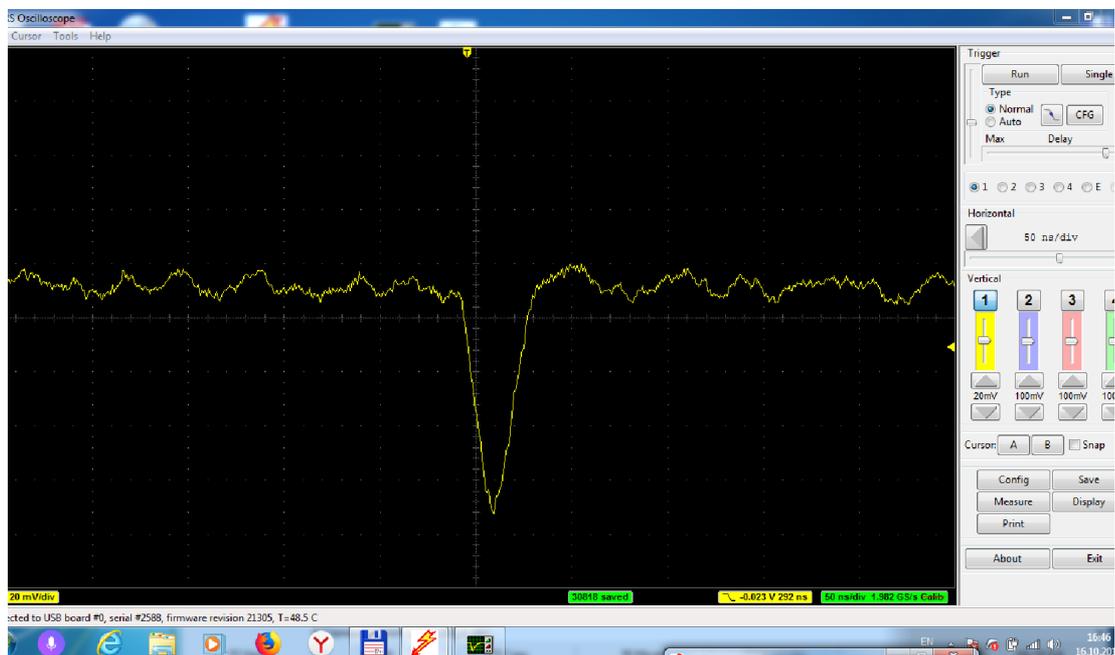


Рис. 9. Сигнал от единичного электрона с энергией 20 кэВ. Предусилитель вынесен из вакуумного объёма на расстояние около 20 см от детектора. Электронная пушка в КИТ.  
Длительность импульса ~40 нс, амплитуда ~60 мВ

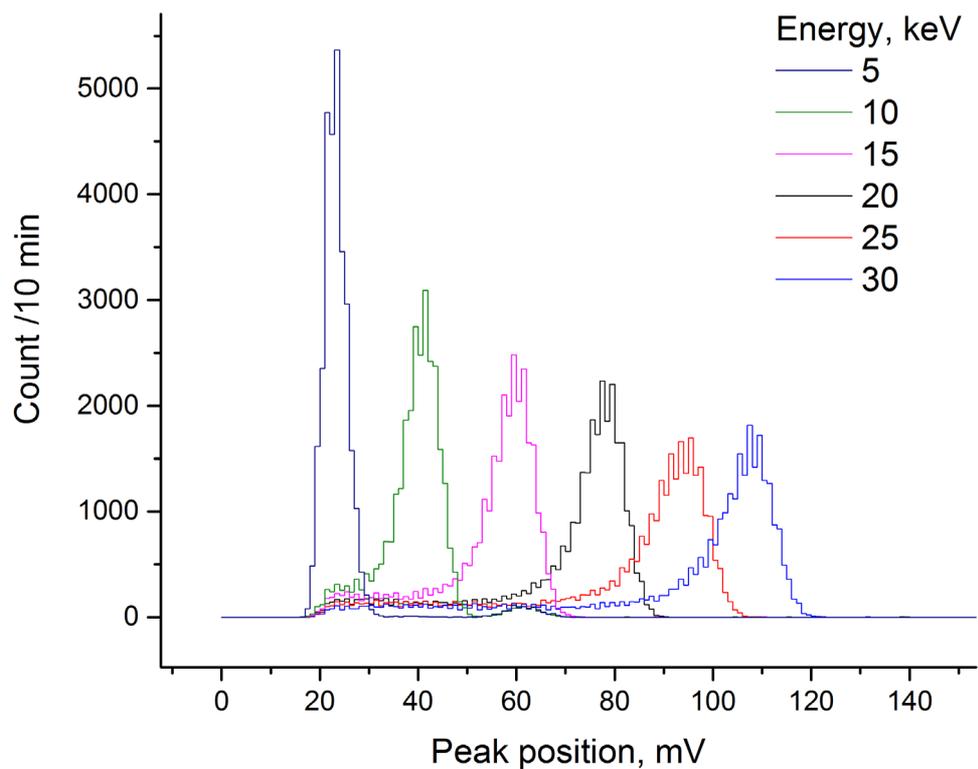


Рис. 10. Спектр от электронов с энергией 5...30 кэВ, полученный на стенде с электронной пушкой в КИТ

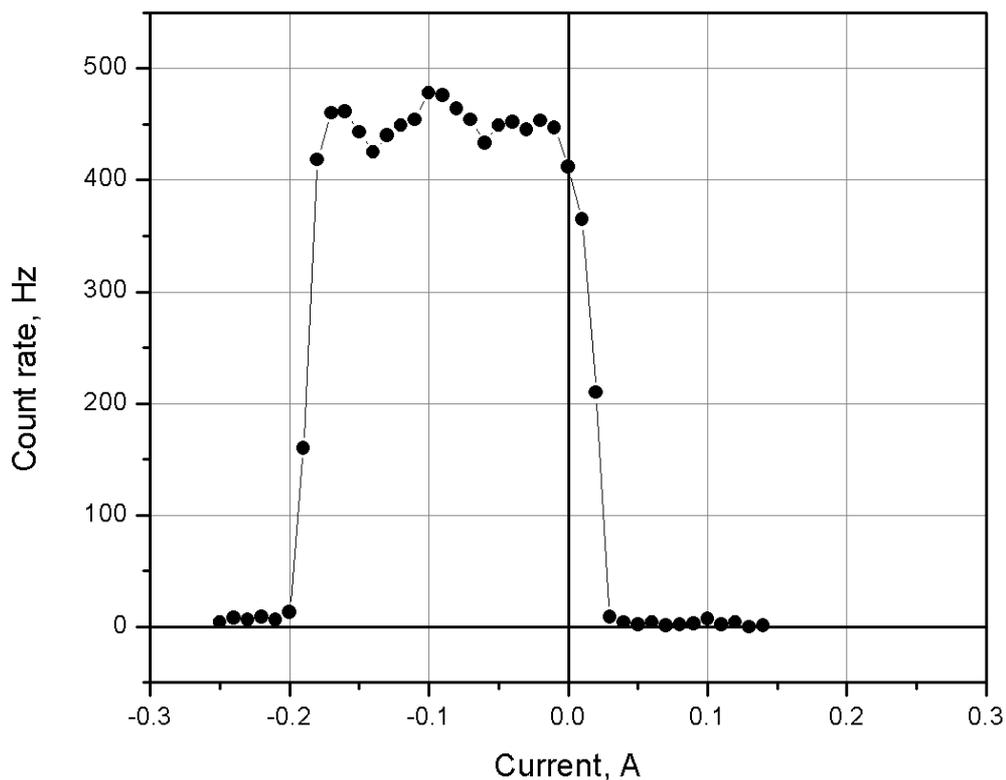


Рис. 11. Поперечное сканирование поверхности детектора пучком электронов на стенде в КИТ. По горизонтали отложено значение тока в отклоняющем магните

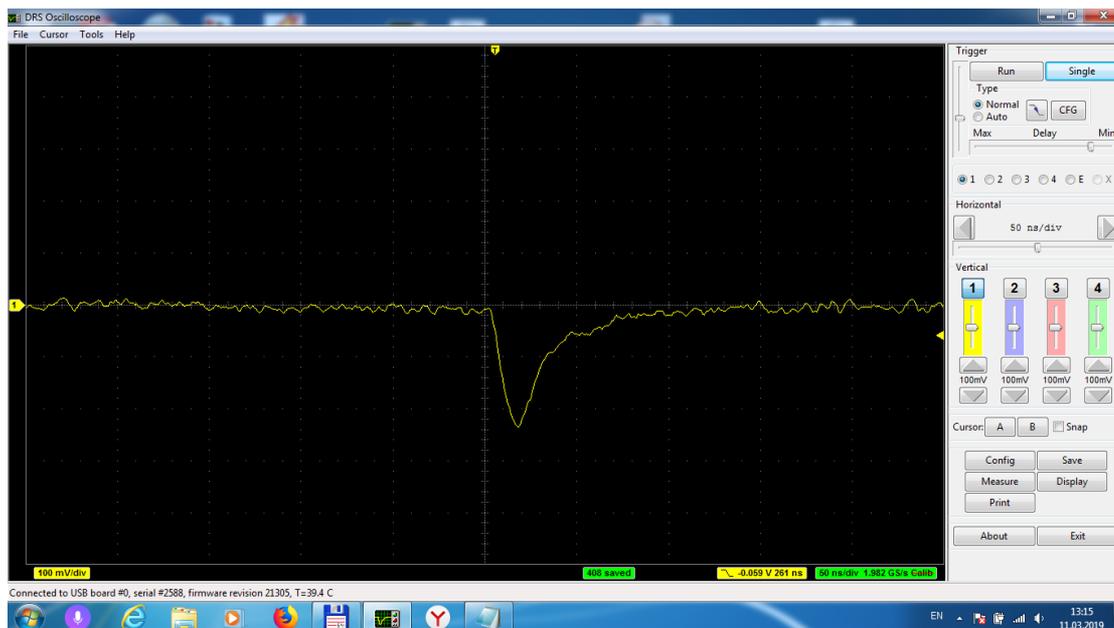


Рис. 12. Сигнал от электронов с энергией 6 кэВ, снят в ИЯИ РАН. Амплитуда 240 мВ, длительность около 30 нс

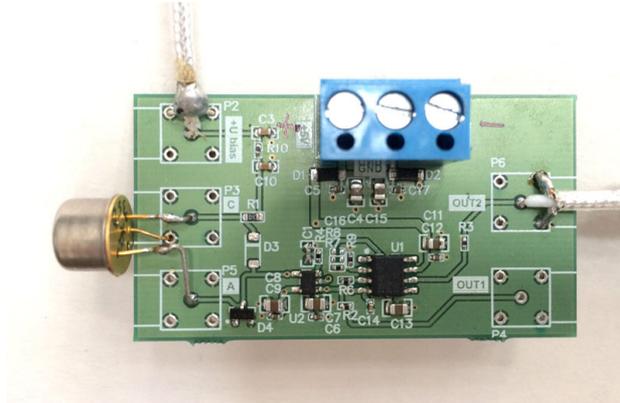
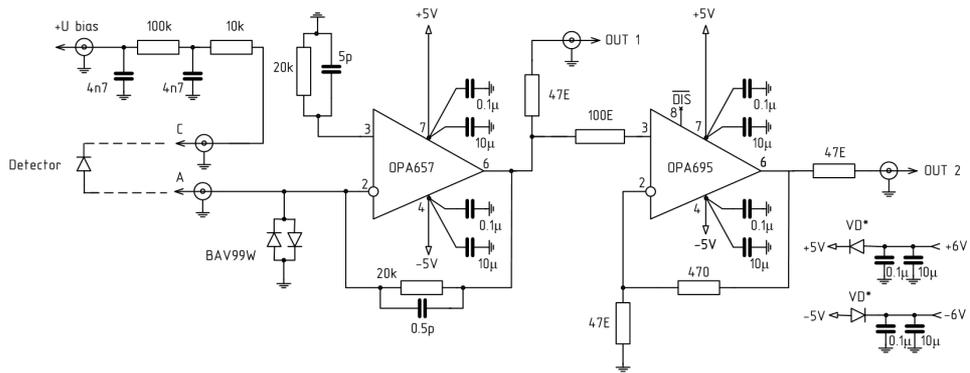


Рис. 13. Усилитель РА-5, вторая версия.

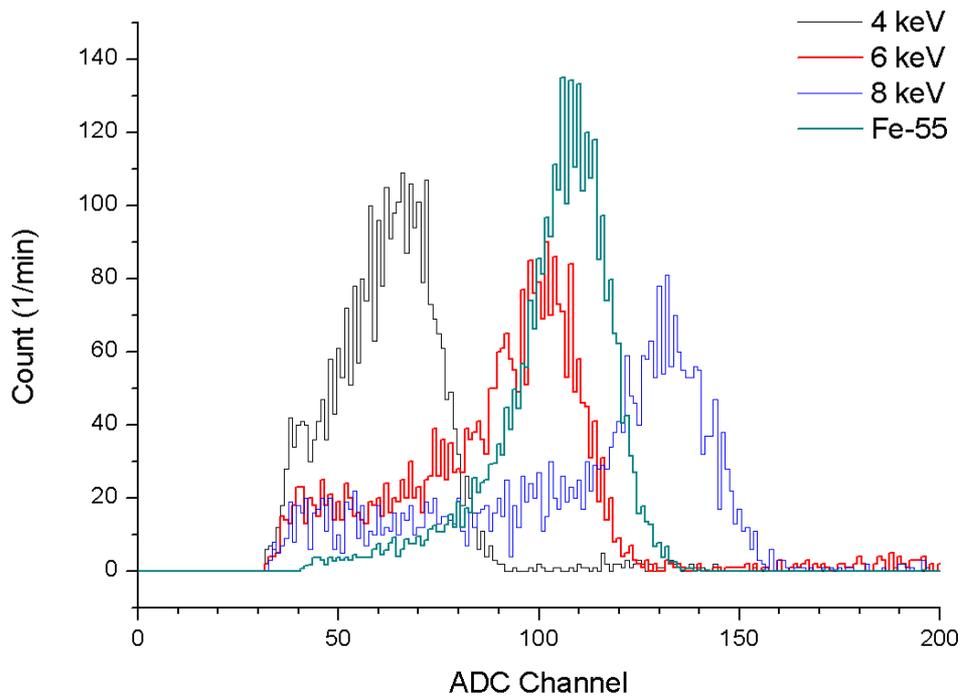


Рис. 14. Спектр от Fe-55 и линии от электронов с энергией 4, 6 и 8 кэВ.

Спектр электронов разной энергии представлен на рис.14. Здесь в качестве источника электронов выступала металлическая пластина под напряжением. На те же спектры наложена гамма-линия от радиоактивного источника Fe-55 (основной пик 5.9 и небольшой дополнительный на 6.49 кэВ), отнормированная по счёту. По понятным причинам энергия не совпадает со шкалой от электронов, т.к. часть энергии электронов теряется во входном окне («мёртвом слое») детектора. Из сравнения спектров видно, что потери составляют около 500 эВ, что можно смело считать минимальным порогом регистрации данного экземпляра детектора при идеальном усилителе.

### **Выводы**

Как показали результаты исследований, представленные в данной работе, разработанные детекторы отраженных электронов с внутренним усилением, являются весьма перспективными и для других видов применений в тех областях, где требуется регистрация большого потока электронов с энергиями больше 500 эВ, в частности, при измерениях бета-спектра трития в широком диапазоне. К преимуществам следует отнести достаточную чувствительность, работу при комнатных температурах, слабую зависимость сигнала от напряжения смещения на детекторе.

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

### **Литература**

1. Christian Weinheimer, Kai Zuber Neutrino Masses. <https://arxiv.org/abs/1307.3518>
2. S. Mertens et al. Sensitivity of Next-Generation Tritium Beta-Decay Experiments for keV-Scale Sterile Neutrinos. <https://arxiv.org/abs/1409.0920>
3. K.N. Abazajian et al. Light Sterile Neutrinos: A White Paper. <https://arxiv.org/abs/1204.5379>
4. V.M. Lobashev et al. Direct search for the mass of neutrino and anomaly in the tritium beta-spectrum. Phys.Lett. B460 (1999) 227–235.

5. V.M. Lobashev. The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN. Nuclear Physics A, Volume 719, 19 May 2003, pp. 153–160.
6. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), 2018 Review of Particle Physics. Phys. Rev. D 98, 030001 (2018).
7. V.N. Aseev et al. Upper limit on the electron antineutrino mass from the Troitsk experiment. Phys. Rev. D 84, 112003, 2011 (Vol.84, No.11).
8. D.N. Abdurashitov et al. The current status of “Troitsk nu-mass” experiment in search for sterile neutrino. JINST 10 (2015) 10, T10005. arXiv:1504.00544v2 [physics.ins-det] 11 Nov 2015.
9. M. Arenz et. al. Commissioning of the vacuum system of the KATRIN Main Spectrometer Journal of Instrumentation 11 P04011 — April 2016.
10. <https://www.mirion.com/products/passivated-implanted-planar-silicon-pips-detectors>
11. K. Altenmüller High-resolution spectroscopy of gaseous  $^{83m}\text{Kr}$  conversion electrons with the KATRIN experiment, arXiv:1903.06452v2.
12. С.Н. Балашов и др. Детектор мягких электронов для работы в сильных магнитных полях. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0616. М., 1989.
13. А.И. Берлёв и др. 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.
14. Z. Sadygov et al., Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes and a Compact Matrix on Their Basis, Phys. Part. Nuclei Lett. 10 (2013) 780.
15. Берлев А.И. и др. Исследование возможности создания детектора электронов низких энергий на основе микропиксельного лавинного фотодиода. Препринт ИЯИ РАН 1432/2017, Август 2017.
16. K. Ogasawara et al. Temperature dependence of the thin dead layer avalanche photodiode for low energy electron measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A611 (2009) 93–98.
17. Yu.A. Goldberg et al. Fiz. Tekh. Poluprovodn. (St. Petersburg). Semiconductors, 1999, 33, 343.
18. А.В. Гостев и др. Характеризация полупроводниковых детекторов монокинетических и отражённых электронов с энергией 1–30 кэВ». Известия РАН. Серия физическая, 2008. Т. 72, № 11. С. 1539–1544.

19. H. O. Funsten, D. M. Suszcynsky, S. M. Ritzau, and R. Korde, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44, 2561 (1997).
20. Šakić et. al, Silicon photodiodes for high-efficiency low-energy electron detection. *Proceedings of IEEE 40th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*, pp. 102-105, ISBN 978-1-4244-6659-7, Sevilla, Spain, September 2010.
21. E. Gatti, P. Rehak, Semiconductor Drift Chamber – An Application of a Novel Charge Transport Scheme, *Nucl. Instr. and Meth. A* 225, 1984, pp. 608–614.
22. V. Zabrodskii et al. SiPM prototype for direct VUV registration. *NIM A* 787 (2015), 348–352.

---

---

Для заметок

---

---

Для заметок

