

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



**А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный, Н.А. Титов**

**Исследование возможности  
создания детектора электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода**

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1432/2017  
АВГУСТ 2017

препринт  
preprint

МОСКВА 2017 MOSCOW

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный, Н.А. Титов

Исследование возможности  
создания детектора электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1432/2017

АВГУСТ 2017

МОСКВА

2017

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

А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный,  
Н.А. Титов

Исследование возможности  
создания детектора  
электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода

В статье рассмотрена возможность использования нового поколения лавинных фотодиодов от ООО «НПО Дубна-Детекторы» для регистрации больших потоков электронов низких энергий (до нескольких десятков кэВ). Приведено описание стенда для проверки детекторов. Проведенные с экспериментальными образцами детекторов тесты подтвердили возможность регистрации электронов низких энергий, что даёт широкие перспективы для применения подобных детекторов на практике.

А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный,  
Н.А. Титов

Исследование возможности  
создания детектора  
электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода

Препринт 1432/2017

Август 2017

Подписано в печать 26.06.2017

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,5. Зак. 22415 Тираж 55 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 978-5-94274-321-5

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук, 2017  
Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences, 2017

## Введение

Электроны низких энергий возникают в распадах радиоактивных ядер трития, рения-187 и др., являющихся источником фундаментальных сведений о свойствах нейтрино. Детектирование электронов низкой энергии так же представляет интерес в различных областях, от космических исследований [1] и медицинской диагностики [2] до полупроводниковой индустрии [3]. Отдельной проблемой является регистрация загрязнения промышленных и природных объектов тритием (максимальная энергия электронов распада 18,6 кэВ).

Создание детекторов, способных регистрировать большие потоки электронов малых энергий, является необходимым условием проведения экспериментов по поиску тяжелых стерильных нейтрино в бета-распаде трития. Высокий темп счёта позволит набрать необходимую статистику за разумное время.

Проблема регистрации таких электронов состоит в чрезвычайно малом пробеге в материале входного окна детектора, что практически исключает использование приборов с газовым усилением. Так, промышленные дозиметры электронов обычно имеют порог регистрации по энергии не менее 100 кэВ, а полупроводниковые на базе PIN-диодов для снижения собственных шумов в единицы кэВ требуют значительного охлаждения, до уровня температуры жидкого азота и помещения в вакуум. Это сильно затрудняет их практическое применение.

Основной тенденцией последнего времени в области регистрации фотонов в экспериментальной физике является переход от вакуумных приборов к полупроводниковым (твердотельным) и связанное с этим развитие соответствующего производства. Аналогичный переход в регистрации электронов низких энергий от газонаполненных (пропорциональные и ионизационные камеры) и вакуумных (микроканальные пластины) детекторов к твердотельным, работающим при комнатной температуре, является технологическим прорывом. Отдельной проблемой детекторов на PIN-структурах является большое время собирания сигнала (порядка микросекунды), что ограничивает скорость регистрации данных при работе с интенсивными источниками.

Самым очевидным использованием подобного детектора будет являться создание компактных приборов для быстрого обнаружения три-

твиевого загрязнения поверхностей или газового объёма. Возможность регистрации присутствия трития в атмосфере с помощью детектора, работающего при комнатной температуре, позволит создать компактный дешёвый прибор и значительно упростить задачу регистрации загрязнения тритием рабочих помещений и окружающей среды.

Создание детекторов, способных регистрировать потоки электронов низких энергий на уровне  $10^6 \dots 10^7$  в секунду открывает возможность производить экспериментальные исследования на совершенно новом уровне.

Прогресс в регистрации электронов низких энергий может быть достигнут с применением детекторов на основе лавинных фотодиодов (ЛФД), появившихся в начале 90-х годов. Они стали активно применяться для регистрации фотонов и постепенно, с развитием технологии изготовления, стали настолько популярными, что повсеместно заменяют фотоэлектронные умножители в ядерной физике.

Производители и разработчики ЛФД в настоящее время:

- ЦПТА (Москва) /Photnique(Geneva) — В. Головин
- ОИЯИ/ИЯИ (Дубна, Москва) / Zecotek Photonics Inc (Сингапур)— З. Садыгов
- Институт электроники (Минск) — В. Залесский
- МИФИ/Пульсар (Москва) — Б. Долгошеин
- Hamamatsu Photonics (Hamamatsu, Japan)
- SensL(Cork, Ireland)
- RMD (Boston)
- MPI Semiconductor Laboratory (Munich, Germany)
- FBK-irst (Trento, Italy)
- ST-Micro (France/Italy)
- Amplification Technologies Inc. (New York)

Традиционно, лавинные фотодиоды используются для регистрации фотонов, а использованию лавинных фотодиодов в качестве детектора электронов низких энергий мешало наличие технологических особенностей, в частности, толстое входное окно, точнее, толщина первого и второго эпитаксиального слоёв.

Несколько лет назад появились сообщения об экспериментах с лавинными фотодиодами типов 3989 и Z7966 фирмы Hamamatsu Photonics (Япония). Было показано, что при уменьшении толщины входного окна ЛФД, появляется принципиальная возможность регистрации электро-

нов [4]. В тоже время быстроедействие таких фотодиодов оказалось настолько низким, что о широком практическом применении речь тогда не шла.

В России прямым конкурентом фирме Hamamatsu является группа З. Садыгова (ООО «НПО Дубна-Детекторы»), которая изготавливает лавинные фотодиоды на производственной базе сингапурской фирмы Zecotek Photonics Inc.

Одна из последних разработок этой группы — принципиально новый микропиксельный (или микроканальный, терминология ещё не устоялась) лавинный фотодиод МЛФД [5, 6] с высокой плотностью пикселей (порядка  $4 \cdot 10^4$  пикселей/мм<sup>2</sup>). Главное отличие данного типа приборов от предыдущих поколений — это быстрое восстановление параметров, что позволяет использовать их для построения детектирующих систем с высокой скоростью счёта. Причем МЛФД имеют не только короткое время нарастания (единицы наносекунд) по фронту импульса, но и по спаду, что открывает широкие экспериментальные возможности.

Нами было предложено попробовать использовать новый тип МЛФД для регистрации электронов, поскольку теперь темп счёта можно было кардинальным образом увеличить.

### Экспериментальная часть

В ИЯИ РАН от группы З. Садыгова были получены для испытаний технологические образцы новых МЛФД с минимальным слоем защитного покрытия на поверхности полупроводника (рис. 1, 2).

Образцы имеют следующие геометрические параметры:

- фоточувствительная площадь  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>;
- толщины первого и второго эпитаксиального слоя *p*-типа проводимости 3.5 мкм;
- удельные сопротивления обоих эпитаксиальных слоев 7 Ω·см (или концентрация примесей  $1.85 \cdot 10^{15} \pm 5$  % ат/см<sup>3</sup>);
- диаметр пикселей (т.е. *n*+ областей) вдоль поверхности 2 мкм;
- толщина пикселей (*n*+ областей) около 0.8 мкм;
- интервал между пикселями вдоль поверхности 3 мкм;
- поверхностная плотность пикселей  $4 \cdot 10^4$  пикселей/мм<sup>2</sup>;
- защитный слой (SiO<sub>2</sub>) 0.5 мкм.

Стоит заметить, что в данном приборе нет пикселей в обычном понимании. Активная площадь регистрации фотонов близка к 100 %.

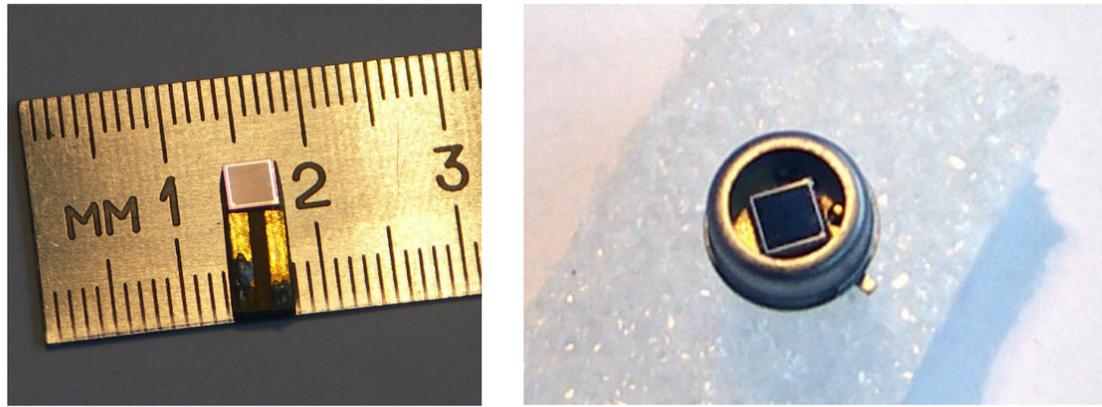


Рис. 1. Технологические образцы микроканальных лавинных фотодиодов, смонтированные для проведения испытаний

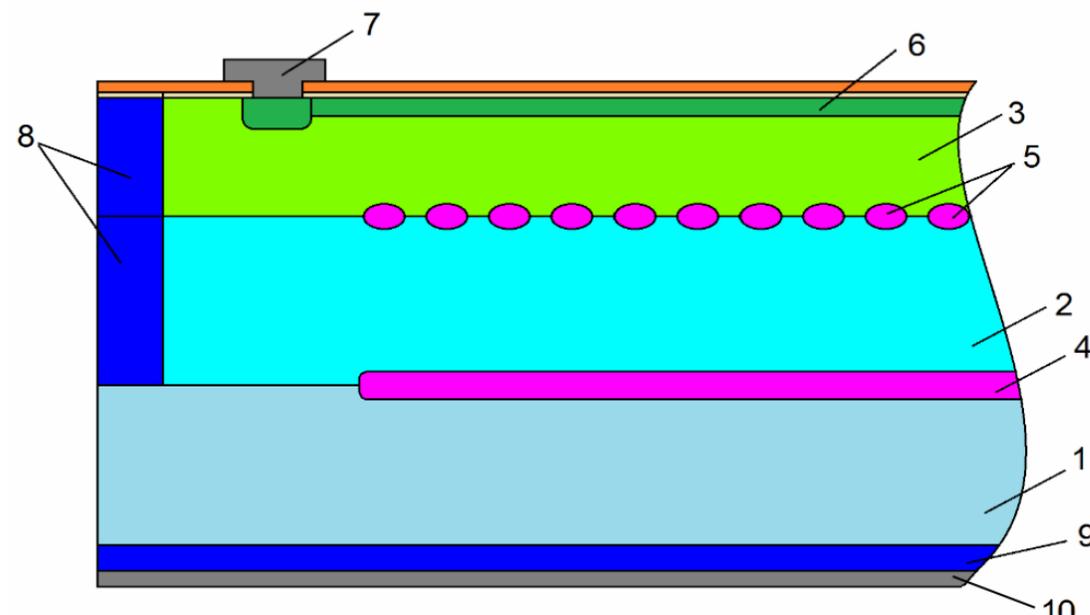


Рис. 2. Общая конструкция разработанного МЛФД (из доклада в ИЯИ РАН Гадира Ахмедова, Институт Радиационных Проблем НАНА, Баку, Азербайджан).

1 — кремниевая подложка n-типа проводимости, 2 — эпитаксиальный слой n-типа проводимости, 3 — эпитаксиальный слой p-типа проводимости, 4 — тонкий слой n-типа проводимости, 5 — матрица высоколегированных областей n-типа проводимости, 6 — высоколегированный слой p-типа проводимости, 7 — металлический контакт, 8 — охранное кольцо n+ типа проводимости, 9 — высоколегированный слой n-типа проводимости для улучшения омического контакта к подложке, 10 — алюминиевая подложка

Первые тесты с источниками электронов, выполненные в ИЯИ РАН, продемонстрировали принципиальную возможность детектирования электронов с низкой энергией при комнатных температурах. Для этого использовался миниатюрный предварительный усилитель конструкции В. И. Головина (АО «Центр перспективных технологий и ап-

паратуры», ЦПТА), схема и внешний вид которого приведены рис. 3). Предварительный усилитель был смонтирован в непосредственной близости от детектора в вакуумном объеме.

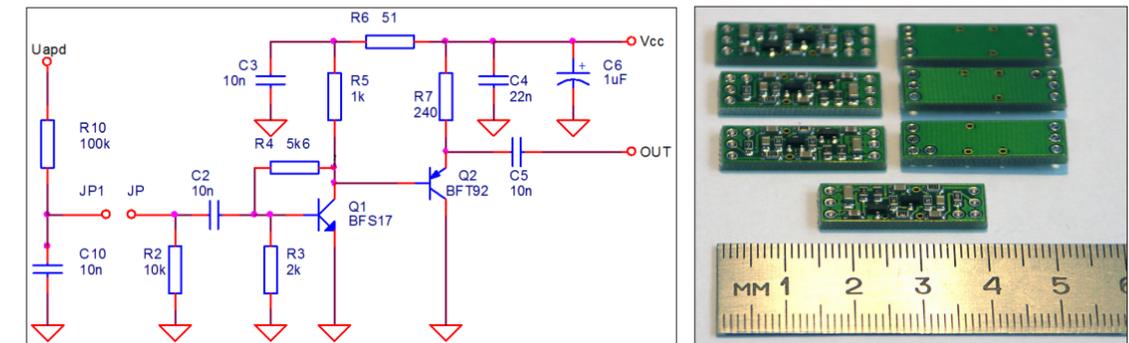


Рис. 3. Предварительный усилитель конструкции В. И. Головина, ЦПТА (РА1)

Основные характеристики усилителя:

- напряжение питания ( $V_{dd}$ ) + 5.0 В
- ток потребления ( $I_{dd}$ ) 8.0 мА
- длит. переднего фронта вых. сигнала имп. усилителя ( $T_r$ ) 3 нс
- амплитуда вых. сигнала имп. усилителя ( $U_{out\ max}$ ) 1.5 В
- сопротивление нагрузки выхода усилителя ( $R_{load}$ ) 50 Ом
- крутизна преобразования ( $S=I_{вх}/U_{вых}$ ) 0.2 мА/В

(параметры приведены с учетом емкости фотодиода размером  $1 \times 1$  мм).

Для оцифровки сигнала была использована система ADCM собственной разработки: многостоповый амплитудо-время-цифровой преобразователь на 8 каналов), выполненный в стандарте PCI и программное обеспечение под ОС LINUX.

ADCM предназначен для одновременного накопления амплитудных и времяпролетных спектров. В основу системы положен принцип непрерывной оцифровки формы импульсов с определением как временных, так и амплитудных значений (пособытийно). Каналы оцифровки сигналов с детекторов построены по одинаковой схеме, в которую входит управляемый усилитель с полосовым фильтром и аналогово-цифровой преобразователь с шагом измерения 10 нс.

Дополнительный усилитель здесь не использовался (вернее, в тот момент не был найден подходящий с достаточным усилением, быстродействием и временем формирования). Поэтому как основной усилитель использовался встроенный усилитель ADCM с установленным максимальным коэффициентом усиления (+13 дБ, рис.4). Это дало возмож-

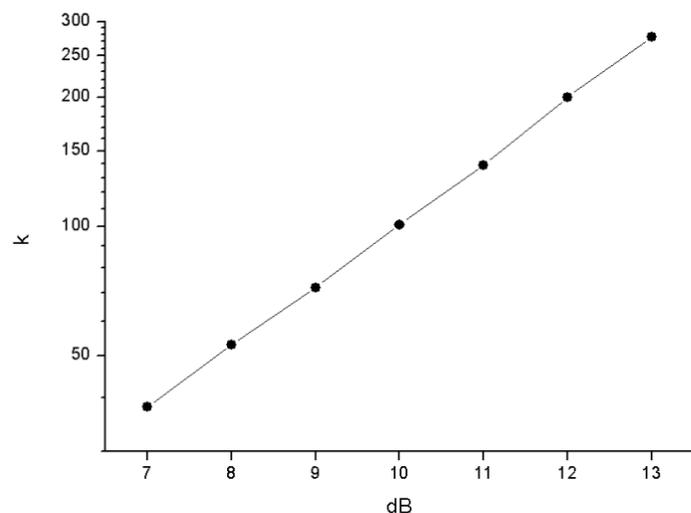


Рис. 4. Реальный коэффициент усиления, преобразователь ADCM

ность набрать самые первые спектры от слабого сигнала с детектора (рис. 5, 6) и показать его принципиальную чувствительность к электронам слабых энергий, однако вся система оказалась крайне уязвимой к внешним наводкам.

В качестве источника электронов здесь использовалась электронная пушка с полупрозрачным золотым напылением на кварцевом окне под высоким напряжением, освещённая УФ-лампой.

Энергетическое разрешение, полученное во время первых тестов, оказалось весьма похожим на опубликованные результаты от Hamamatsu, однако возможный темп счёта оказался гораздо выше.

Парадоксальное на первый взгляд поведение спектра при энергиях выше 18 кэВ легко объясняется при помощи моделирования. Именно начиная с этой энергии электроны начинают проходить насквозь первый и второй эпитаксиальные слои детектора (3.5 мкм) и уходить в подложку. В веществе электроны постепенно теряют энергию за счет неупругого рассеяния. Одновременно, с уменьшением энергии увеличивается вероятность рассеяния на большие углы. Средний угол отклонения от прямолинейного положения с увеличением пройденного пути в веществе возрастает, и затем движение электрона можно рассматривать как диффузию в веществе.

В нашем случае моделирование поведения электронов в кремнии при различных энергиях было произведено с использованием программы Casino v. 2.48 (режим SREM: The Stopping and Range of Electrons in Matter), рис. 7, 8.

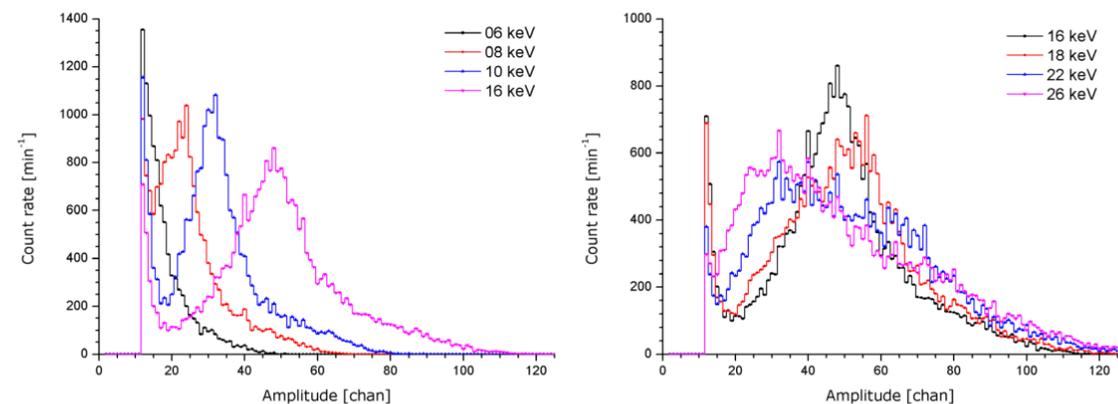


Рис. 5. Первые спектры, полученные с МЛФД от электронов различных энергий в диапазоне от 6 до 26 кэВ

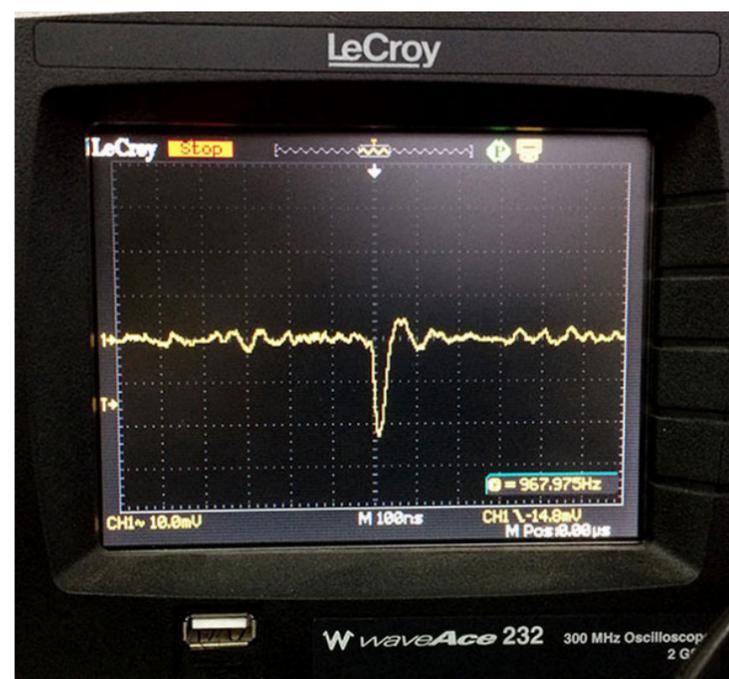


Рис. 6. Одиночный импульс от электрона, снятый с МЛФД на экране осциллографа. Предварительный усилитель PA1

Для эффективной регистрации электронов с большими энергиями необходимо изготовить детектор со слоями большей толщины. Однако для регистрации электронов, рождающихся в бета-распаде трития (до 18.6 кэВ) существующая толщина нашего детектора представляется оптимальной.

Далее были сделаны многочисленные попытки упростить схему подключения детектора, с испытанием четырёх новых типов предварительных усилителей и вынесением их из вакуумного объёма, а так-

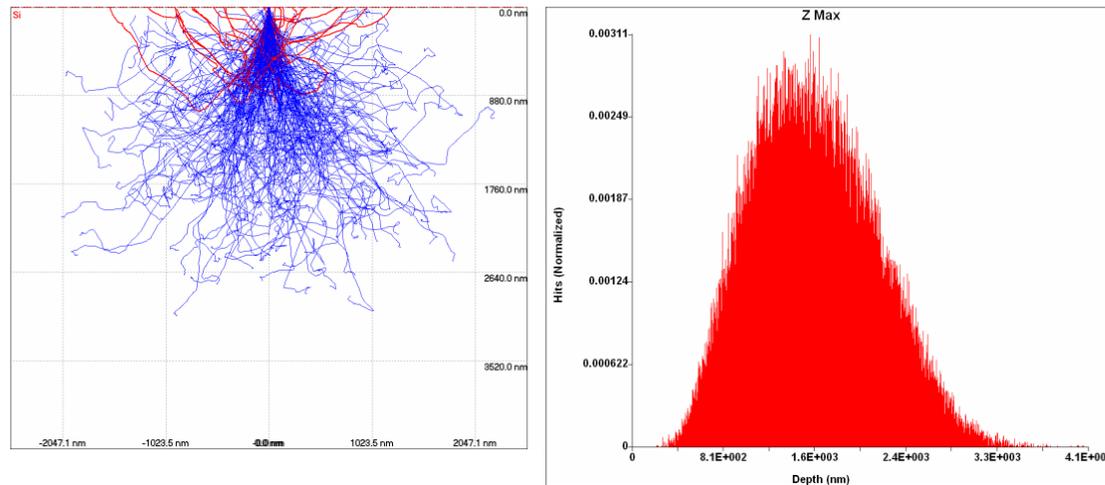


Рис. 7. Моделирование траекторий электронов с энергией 17 кэВ в кремнии и максимальная глубина проникновения в вещество

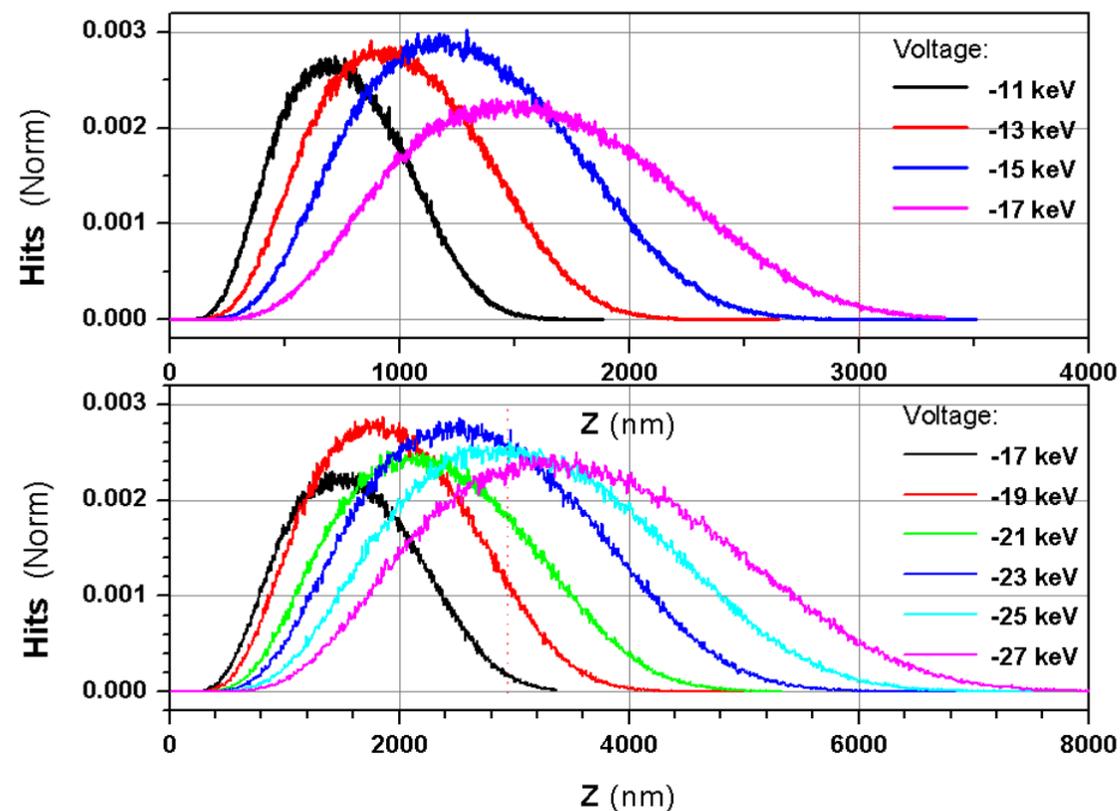


Рис. 8. Глубина проникновения электронов в кремний для электронов различных энергий. Толщина Z для нашего образца детектора 3500 нм. Результаты моделирования

же с использованием серийных коммерческих приборов для оцифровки формы сигнала CAEN DT5720D и DRS4 Evaluation Board (Paul Scherrer Institut). Сразу можно отметить, что оба оцифровщика не годятся для

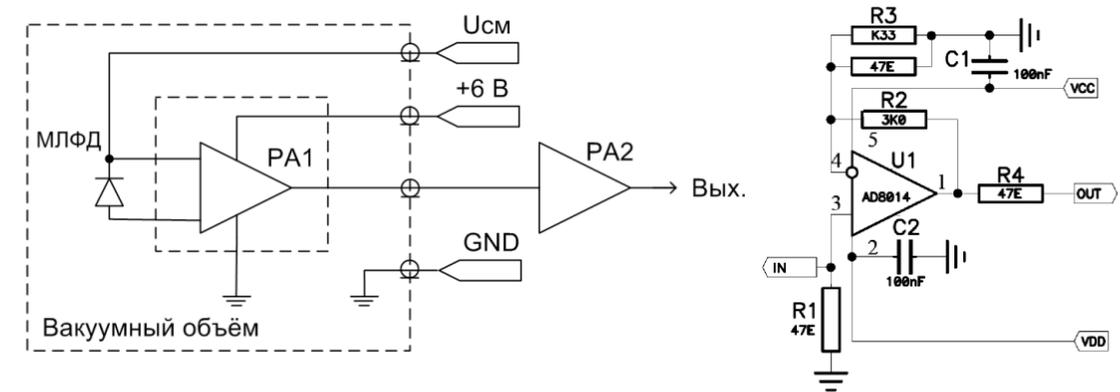


Рис. 9. Блок-схема системы регистрации

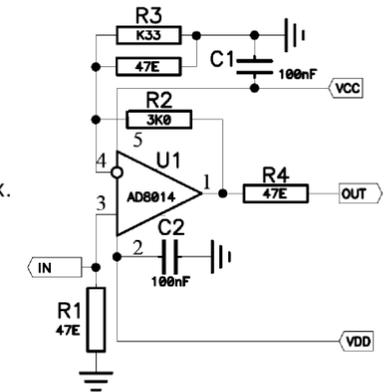


Рис. 10. Основной усилитель на базе ОУ AD8014 (PA2)

непосредственной работы со слабым сигналом сразу с выхода предварительного усилителя PA1. Параллельно велась работа по модернизации электронной пушки.

Оптимальной на сегодняшний день была признана схема, в которой предварительный усилитель (PA1) конструкции ЦПТА (Рис.3) располагается в вакуумном объёме в непосредственной близости от детектора, затем сигнал выводится на герметичный разъём и подаётся на основной усилитель (PA2) с 50-омными входом и выходом и коэффициентом усиления порядка  $\sim 36$  (Рис. 9). Основной усилитель был собран на миниатюрном операционном усилителе AD8014 (Рис. 10). Чистое питание  $\pm 6$  В на него было заведено из крейта NIM. Оцифровка сигналов — система ADCM, внутреннее усиление установлено на +7 dB (рис. 4).

Напряжение смещения  $U_{см}$  для детектора формируется специальным программно-управляемым блоком с диапазоном установки напряжения до 132 В и минимальным шагом 0.01 В. Напряжение подаётся через RC-фильтр, управление осуществляется через интерфейс USB.

Из данной исследовательской работы были сделаны несколько практических выводов:

1. Вакуумные разновидности массово используемых у нас разъёмов типа ШР (многостырьковые разъёмы в сплошной остекловке) не подходят для передачи быстрых и слабых сигналов непосредственно с детектора. Необходима либо коаксиальная конструкция вакуумного разъёма, либо предварительное усиление сигнала внутри вакуумного объёма и дальнейшее усиление с формированием его снаружи. Для одного канала лучше и то, и другое, хотя при масштабировании системы с использованием многоканального детектора сразу встанет вопрос

о вынесении предварительных усилителей из вакуумного объёма. Так что вопрос с оптимальной конструкцией разъёма всё равно нужно будет решить в ходе подготовительных работ.

2. Исходный сигнал с детектора весьма слаб и критически подвержен воздействию внешних наводок. Для того чтобы «вытащить» сигнал, пригодный к оцифровке, приходится проводить целый комплекс мер по уменьшению влияния наводок, как то:

1) установка хороших фильтров по питанию и, особенно, по напряжению смещения.

2) экранирование и заземление практически всех приборов, задействованных в схеме измерения. В нашем случае наибольшие проблемы возникли с наводкой от импульсного источника питания высоковольтного преобразователя электронной пушки, который в конечном итоге пришлось заменить на аналоговый.

3) сложнее всего оказалось отвязаться от нерегулярной сверхвысокочастотной модулированной наводки (по-видимому, от вышек сотовой связи), не ухудшив временные параметры сигнала МЛФД. От неё

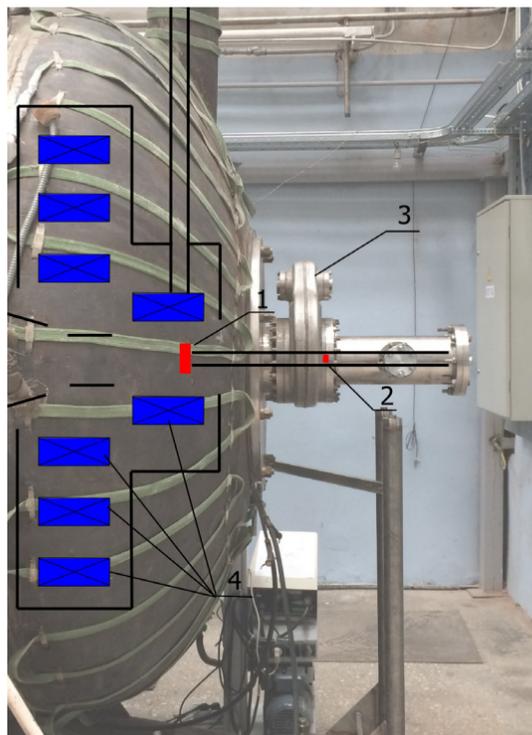


Рис. 11. Место установки детектора МЛФД в спектрометре во время тестов (поз. 2). 1 — место установки основного детектора, 3 — шибер, 4 — сверхпроводящие магниты

удалось избавиться при помощи небольшой СВЧ фильтрации в основном усилителе (интегрирующая RC-цепочка из резистора R2 усилителя РА2 и монтажной ёмкости дорожек печатной платы).

3. После испытаний на тестовом месте детектор был размещен на опорной фторопластовой площадке, закреплённой на крупном фланце, и помещен в вакуумный объём спектрометра установки «Троицк ню-масс». Место расположения МЛФД находилось на оси основного детектора установки, но отнесено на 400 мм дальше по оси, сразу за шибером, используемым для отсечения вакуумного объёма при смене детекторов по время сеансов измерений

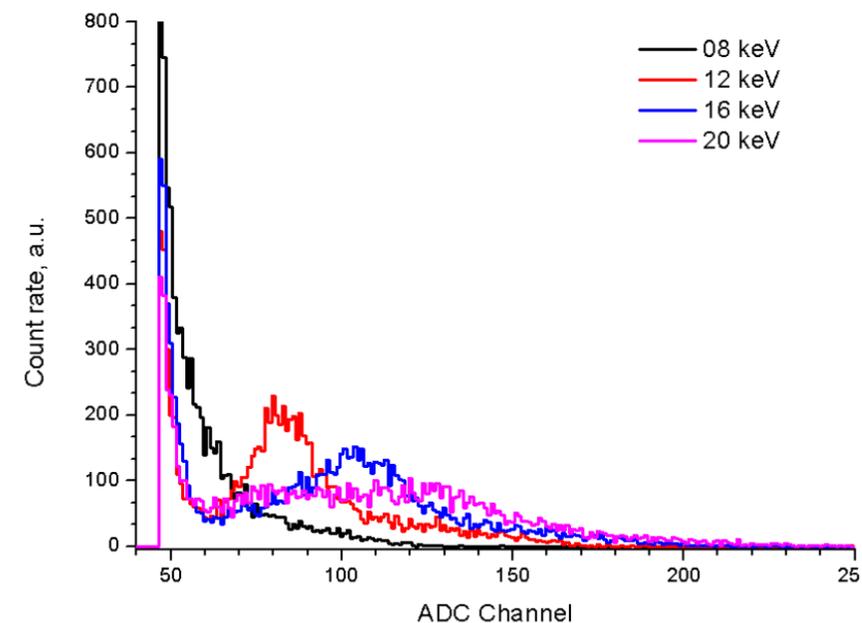


Рис. 12. Спектр от электронов со стенок электрода спектрометра

(рис. 11). Это позволило использовать простую опору для тестовых измерений, без сложной системы ввода детектора в произвольную позицию на оси (возможно, она будет изготовлена позднее).

Во время первых испытаний детектора на спектрометре сигнал неожиданно стал ухудшаться и возник вопрос о том, какая температура установится в районе МЛФД и предварительного усилителя во время измерений, и не понадобится ли им дополнительный нагрев. С одной стороны, неподалёку находится крупный сверхпроводящий магнит при температуре жидкого гелия, а с другой, осуществляется довольно большой теплоприток с внешних стенок корпуса спектрометра. Для ответа на этот вопрос к корпусу детектора был прикреплен миниатюрный платиновый датчик температуры Pt-1000 с контактами, выведенными на свободный разъём на фланце. По факту, температура МЛФД в нашей рабочей точке установилась лишь слегка ниже комнатной и составила +15 °С. Это убрало все подозрения в переохлаждении кремниевых транзисторов предварительного усилителя. В дальнейшем ухудшение сигнала не наблюдалось. Вероятная причина — высокочастотная наводка, которая была убрана дополнительным усилителем с формирователем во время следующих измерений.

Результаты тестовых измерений показаны ниже. На рис.12 представлен спектр сигналов от моноэнергетических электронов со стенок

высоковольтного электрода спектрометра при выключенном магнитном поле в центре спектрометра и с сохранением небольшого тока на детекторном магните для сбора этих электронов на детектор. Результат довольно близок к тому, что мы получили ранее на стенде.

Далее были проведены измерения со штатной тестовой электронной пушкой спектрометра, которая предназначалась для калибровочных измерений с прохождением электронов сквозь газовый источник.

На рис. 13 показан спектр электронов с энергией 16 кэВ от электронной пушки после прохождения через всю магнитную систему спектрометра. На задерживающем электроде спектрометра было установлено напряжение 15,9 кВ для отсека фоновых электронов от остатка трития в источнике. Установлены все типичные рабочие токи (120...150 А) во всех магнитах, кроме детекторного, который был снижен до 83 А. Это было сделано для того, чтобы пучок электронов от пушки слегка «распушился» и гарантированно попал на всю поверхность МЛФД.

Тем не менее, вопросы с точным определением характеристик новых детекторов остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения. Необходимо дальше исследовать спектрометрические свойства детекторов, их однородность по площади, стабильность по времени и под радиационной нагрузкой, зависимость параметров от температуры, под воздействием факторов окружающей среды. Предполагается оценить оптимальные параметры изготовления детекторов.

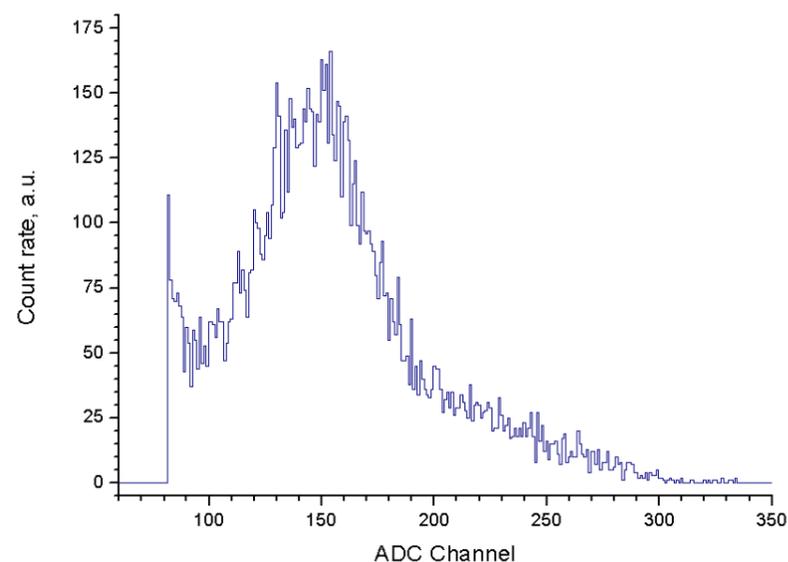


Рис. 13. Спектр от электронной пушки с энергией 16 кэВ.

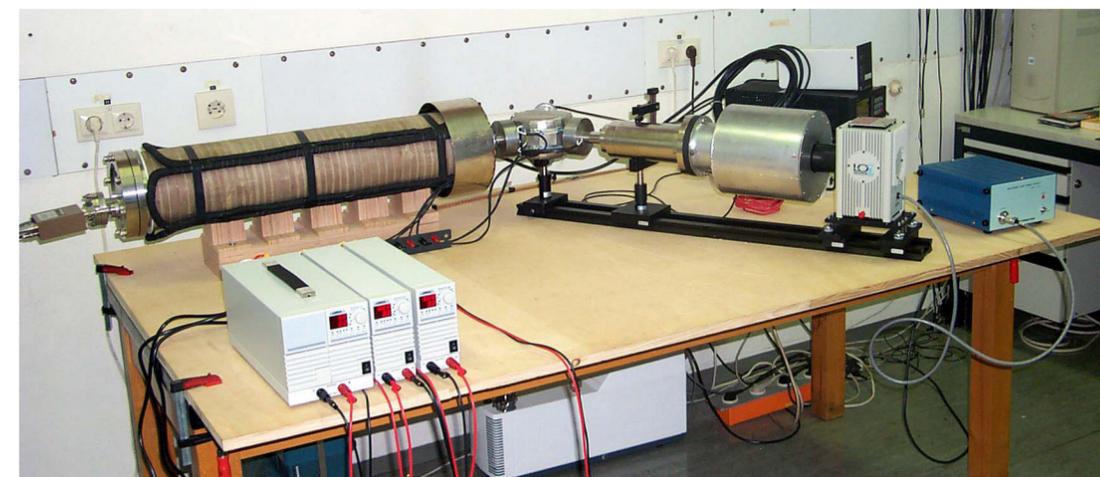


Рис. 14. Стенд для проверки детекторов, изготовленный в ИЯИ РАН для Технологического института Карлсруэ

Развитие этой тематики, подбор оптимальных параметров усиления сигнала, вполне может позволить превзойти существующий мировой уровень.

Для точного определения характеристик нам потребуются модернизация стенда для проверки детекторов на современном технологическом уровне с максимальным использованием стандартных промышленных узлов.

У нас уже есть опыт создания подобного стенда, который в настоящее время используется для проверки образцов детекторов в Институте ядерной физики Технологического института Карлсруэ [7], рис. 14.

#### Краткое описание стенда

Для измерения функции прохождения электронов через источник была разработана система, состоящая из электронной пушки и магнитно-фокусирующей системы (Рис. 15).

Электроны возникают в пушке в результате фотоэффекта на золоте напылении, при облучении его ультрафиолетовым излучением. Затем электроны ускоряются электрическим полем до необходимой энергии (испытания проводились до 40 кэВ).

Канал транспортировки электронов от наконечника пушки (3) к детектору (1) состоит из двух фокусирующих линз (8), поворотного магнита (9), и транспортного соленоида (6) и отклоняющих магнитов (7), с помощью которых осуществляется сканирование пучком по площади детектора.

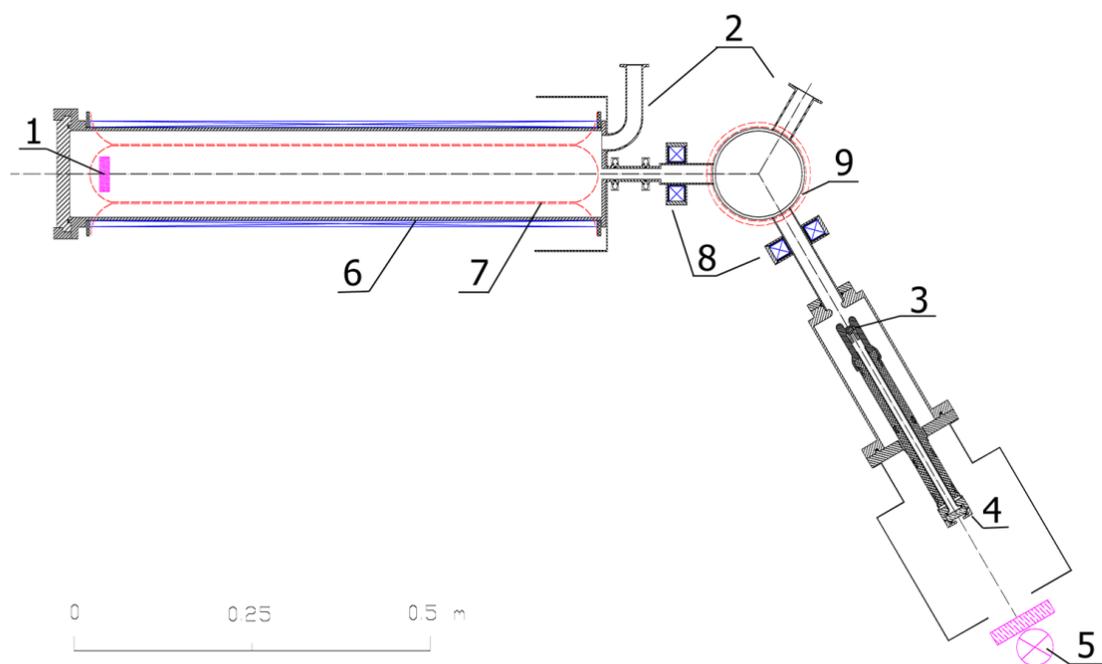


Рис. 15. Схема стенда для проверки детекторов.

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

Расстояние от наконечника электронной пушки до центра первой линзы равно расстоянию от центра второй линзы до фокуса и равно половине расстояния между линзами. Если линзы одинаковые и последовательно запитаны от одного источника тока, то при определённом значении тока в них дублет линз осуществляет в линейном приближении минус единичное преобразование координат электронов от электронной пушки до фокуса второй линзы.

Расчёты показывают, что для компенсации искажений, вносимых в матрицу преобразований координат канала транспортировки поворотным магнитом, достаточно уменьшить расстояние от центра второй линзы до фокуса на  $\sim 15\%$  и на несколько процентов уменьшить ток в линзах. Конструктивно линзы выполнены как бронированные короткие соленоиды, а поворотный магнит отклоняет электроны на  $30^\circ$  и представляет собой пару коаксиальных катушек, помещённых внутри цилиндрического магнитопровода из пермаллоя толщиной 2 мм. Пучок электронов из электронной пушки фокусируется экранированным каналом транспортировки на вход транспортного соленоида, а затем адиабатически транспортируется магнитным полем.

Поворотная конструкция канала транспортировки позволяет избежать попадания отраженных от детектора электронов на пушку — они отклоняются поворотным магнитом в противоположную пушке сторону. При отсутствии такой поворотной системы может происходить следующий эффект: часть электронов от пушки отражается от детектора и возвращается к пушке. Отражаясь от потенциала на пушке, они вновь начинают двигаться к детектору.

Аналогичную схему с электронной пушкой, только без возможности сканирования по площади, мы используем для калибровки установки «Троицк ню-масс» [8], рис. 16.

Испытания электронных пушек нашей конструкции, проведённые на спектрометре высокого разрешения в Институте ядерных исследований в Ржеже (Чешская республика), показали уникальную монохроматичность (лучше 0.5 эВ) этой конструкции по сравнению с серийными промышленными образцами.

Созданный стенд может использоваться и в дальнейшем для более качественной проверки различных типов детекторов. Предусматривается возможность для схемы охлаждения детекторов и предварительных каскадов малошумящих усилителей.

Существующий сейчас в ИЯИ РАН стенд (рис. 17) позволяет делать проверки детекторов с помощью радиоактивных источников и засветку детектора широким пучком электронов, однако фокусировка и точное сканирование пучком электронов в данной конструкции не предусмотрено, а сам стенд требует значительной модернизации.

При создании нового стенда планируется выполнить следующие задачи:

- Улучшение оптики пучка, получение размера пятна 1,0 ... 1,5 мм
- Создание автоматизированной системы сбора данных и управления положением пучка электронов
- Подбор параметров предварительного усилителя.
- Исследование спектрометрических свойств детектора:
  - зависимость амплитуды сигнала от энергии электрона;
  - форма функции отклика;
  - временные параметры сигнала;
- Сравнение измеренных параметров с модельными расчетами
- Исследование пространственного распределения характеристик
- Исследование ресурса детектора



Рис. 16. Установка Троицк ню-масс.

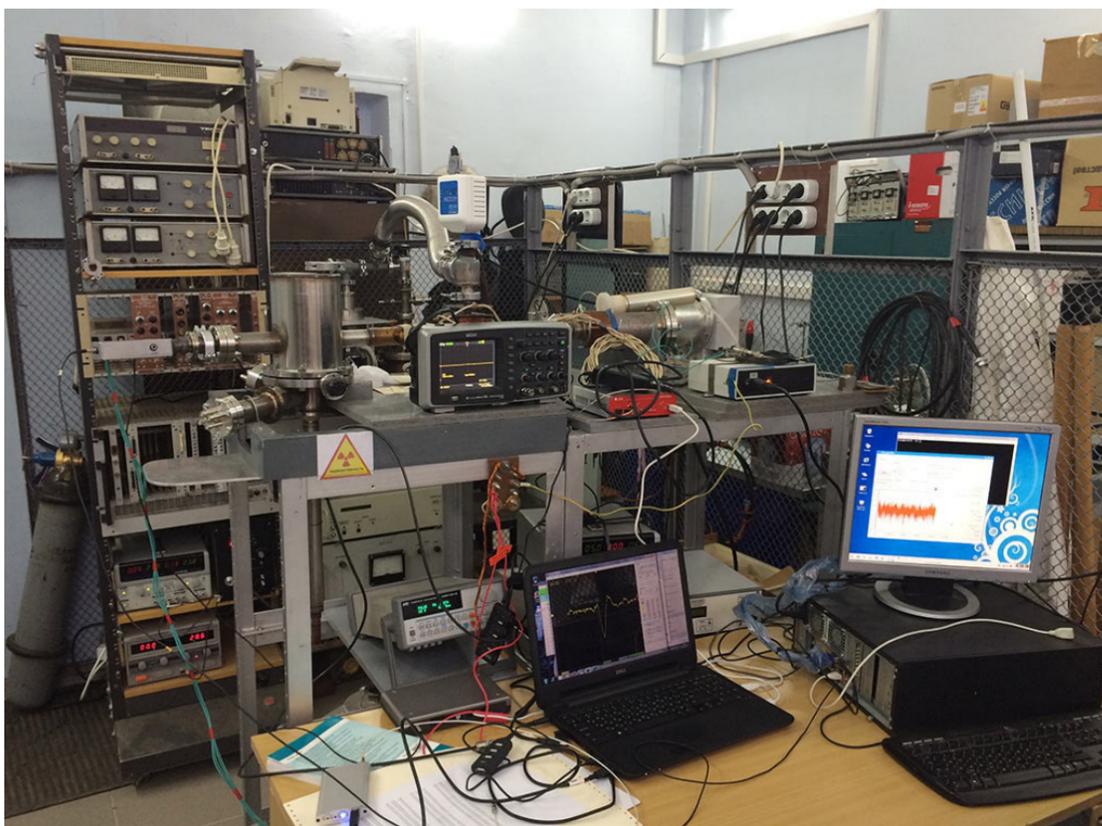


Рис. 17. Существующий стенд для проверки детекторов.

- Исследование радиационной стойкости детектора
- Исследование влияния атмосферы на работоспособность детектора
- Оптимизация параметров/технологии изготовления детектора (совместно с группой Э. Садыгова).

## Выводы

Детектор на основе микроканальных лавинных фотодиодов разработки группы Э. Садыгова может быть использован не только по прямому назначению, для регистрации фотонов, но вполне пригоден и для работы с электронами. На базе существующих образцов МЛФД уже можно сделать прототип детектора для экспериментов по поиску стерильных нейтрино в экспериментах «Троицк ню-масс» [9] и «КАТРИН» [10, 11]. После детального исследования свойств (особенно в плане стабильности характеристик при длительном использовании) может быть сделано предложение по использованию микроканальных лавинных фотодиодов в дозиметрической аппаратуре (например, регистрация загрязнения тритием).

Продолжение работы по этой тематике потребует глубокой модернизации существующей электронной пушки, либо повторения конструкции, изготовленной для Технологического института Карлсруэ, но на новом техническом уровне.

## Благодарности

Авторы признательны Э. Садыгову, ОИЯИ, Дубна, за предоставленные образцы детекторов, Г. С. Ахмедову, Институт Радиационных Проблем НАНА, Баку, Азербайджан, за обсуждение тонких моментов, касающихся работы детектора, Решетину А.И за консультации, Д. Н. Абдурашитову, ИЯИ РАН, за плодотворное обсуждение в процессе работы, В. С. Пантуеву, ИЯИ РАН, за оказанную помощь и поддержку в работе, В. Н. Асееву за первоначальный расчет магнитной системы электронной пушки.

Описанная работа была осуществлена при финансовой поддержке грантов РФФИ 14-22-03069, РФФИ 14-02-00570, Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) 436RUS17/122/02.

## Список использованной литературы

1. Ritzau SM, Funsten HO, Borovsky JE. Solid state detection of low energy ions and electrons for constellation missions // Science closure and enabling technologies for constellation class missions. 1998. P. 131–5.
2. Kataoka J, Saito T, Kuramoto Y, Ikagawa T, Yatsu Y, Kotoku J, et al. Recent progress of avalanche photodiodes in high-resolution X-rays and c-rays detection // Nucl Instrum Methods Phys Res Sec A 2005; 541(1–2): 398–404.

3. Silver CS, Spallas JP, Muray LP. Silicon photodiodes for low-voltage electron detection in scanning electron microscopy and electron beam lithography // *J Vacuum Sci Technol B* 2006;24(6):2951–5.
4. Ogasawara K. et al. The Effect of Depletion Layer Thickness in Avalanche Photodiodes for Measurement of Low-energy Electrons // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 566 (2006) 575–583.
5. Микроканальный лавинный фотодиод с широким диапазоном линейности // *Письма в ЖТФ*, 2010, том 36, вып. 11.
6. Садыгов З. и др. Микроканальный лавинный фотодиод с быстрым временем восстановления параметров // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, вып. 11.
7. Wustling S., Armbrust T., Steidl M., Zadorozhny S. A large, 64-pixel PIN-diode detector for low-energy beta-electrons // *Nucl.Instrum.Meth. A*568 (2006) 382-387.
8. Aseev V.N. et al. Upper limit on the electron antineutrino mass from the Troitsk experiment // *Phys. Rev. D* 84, 112003, 2011.
9. Abdurashitov D.N. 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
10. Riis A.S., Hannestad S. Detecting sterile neutrinos with KATRIN like experiment // *JCAP* 1102 (2011) 011.
11. Mertens S. et al. Sensitivity of Next-Generation Tritium Beta-Decay Experiments for keV-Scale Sterile Neutrinos // *JCAP*, Vol. 2015, Feb. 2015.



Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



**А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный, Н.А. Титов**

**Исследование возможности  
создания детектора электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода**

препринт  
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1432/2017  
АВГУСТ 2017

МОСКВА 2017 MOSCOW

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный, Н.А. Титов

Исследование возможности  
создания детектора электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1432/2017

АВГУСТ 2017

МОСКВА

2017

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

А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный,  
Н.А. Титов

Исследование возможности  
создания детектора  
электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода

В статье рассмотрена возможность использования нового поколения лавинных фотодиодов от ООО «НПО Дубна-Детекторы» для регистрации больших потоков электронов низких энергий (до нескольких десятков кэВ). Приведено описание стенда для проверки детекторов. Проведенные с экспериментальными образцами детекторов тесты подтвердили возможность регистрации электронов низких энергий, что даёт широкие перспективы для применения подобных детекторов на практике.

ISBN 978-5-94274-321-5

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук, 2017  
Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences, 2017

А.И. Берлев, А.А. Голубев, С.В. Задорожный,  
Н.А. Титов

Исследование возможности  
создания детектора  
электронов низких энергий  
на основе микропиксельного  
лавинного фотодиода

Препринт 1432/2017

Август 2017

Подписано в печать 26.06.2017

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,5. Зак. 22415 Тираж 55 экз.  
Бесплатно

Печать цифровая  
Издательский отдел

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

---

---

## Введение

Электроны низких энергий возникают в распадах радиоактивных ядер трития, рения-187 и др., являющихся источником фундаментальных сведений о свойствах нейтрино. Детектирование электронов низкой энергии так же представляет интерес в различных областях, от космических исследований [1] и медицинской диагностики [2] до полупроводниковой индустрии [3]. Отдельной проблемой является регистрация загрязнения промышленных и природных объектов тритием (максимальная энергия электронов распада 18,6 кэВ).

Создание детекторов, способных регистрировать большие потоки электронов малых энергий, является необходимым условием проведения экспериментов по поиску тяжелых стерильных нейтрино в бета-распаде трития. Высокий темп счёта позволит набрать необходимую статистику за разумное время.

Проблема регистрации таких электронов состоит в чрезвычайно малом пробеге в материале входного окна детектора, что практически исключает использование приборов с газовым усилением. Так, промышленные дозиметры электронов обычно имеют порог регистрации по энергии не менее 100 кэВ, а полупроводниковые на базе PIN-диодов для снижения собственных шумов в единицы кэВ требуют значительного охлаждения, до уровня температуры жидкого азота и помещения в вакуум. Это сильно затрудняет их практическое применение.

Основной тенденцией последнего времени в области регистрации фотонов в экспериментальной физике является переход от вакуумных приборов к полупроводниковым (твердотельным) и связанное с этим развитие соответствующего производства. Аналогичный переход в регистрации электронов низких энергий от газонаполненных (пропорциональные и ионизационные камеры) и вакуумных (микроканальные пластины) детекторов к твердотельным, работающим при комнатной температуре, является технологическим прорывом. Отдельной проблемой детекторов на PIN-структурах является большое время собирания сигнала (порядка микросекунды), что ограничивает скорость регистрации данных при работе с интенсивными источниками.

Самым очевидным использованием подобного детектора будет являться создание компактных приборов для быстрого обнаружения три-

тieveго загрязнения поверхностей или газового объёма. Возможность регистрации присутствия трития в атмосфере с помощью детектора, работающего при комнатной температуре, позволит создать компактный дешёвый прибор и значительно упростить задачу регистрации загрязнения тритием рабочих помещений и окружающей среды.

Создание детекторов, способных регистрировать потоки электронов низких энергий на уровне  $10^6 \dots 10^7$  в секунду открывает возможность производить экспериментальные исследования на совершенно новом уровне.

Прогресс в регистрации электронов низких энергий может быть достигнут с применением детекторов на основе лавинных фотодиодов (ЛФД), появившихся в начале 90-х годов. Они стали активно применяться для регистрации фотонов и постепенно, с развитием технологии изготовления, стали настолько популярными, что повсеместно заменяют фотоэлектронные умножители в ядерной физике.

Производители и разработчики ЛФД в настоящее время:

- ЦПТА (Москва )/Photnique(Geneva) — В. Головин
- ОИЯИ/ИЯИ (Дубна, Москва)/ Zecotek Photonics Inc (Сингапур)— З. Садыгов
- Институт электроники (Минск) — В. Залеский
- МИФИ/Пульсар (Москва) — Б. Долгошеин
- Hamamatsu Photonics (Hamamatsu, Japan)
- SensL(Cork, Ireland)
- RMD (Boston)
- MPI Semiconductor Laboratory (Munich, Germany)
- FBK-irst (Trento, Italy)
- ST-Micro (France/Italy)
- Amplification Technologies Inc. (New York)

Традиционно, лавинные фотодиоды используются для регистрации фотонов, а использованию лавинных фотодиодов в качестве детектора электронов низких энергий мешало наличие технологических особенностей, в частности, толстое входное окно, точнее, толщина первого и второго эпитаксиального слоёв.

Несколько лет назад появились сообщения об экспериментах с лавинными фотодиодами типов 3989 и Z7966 фирмы Hamamatsu Photonics (Япония). Было показано, что при уменьшении толщины входного окна ЛФД, появляется принципиальная возможность регистрации электро-

нов [4]. В тоже время быстродействие таких фотодиодов оказалось настолько низким, что о широком практическом применении речь тогда не шла.

В России прямым конкурентом фирме Hamamatsu является группа З. Садыгова (ООО «НПО Дубна-Детекторы»), которая изготавливает лавинные фотодиоды на производственной базе сингапурской фирмы Zecotek Photonics Inc.

Одна из последних разработок этой группы — принципиально новый микропиксельный (или микроканальный, терминология ещё не устоялась) лавинный фотодиод МЛФД [5, 6] с высокой плотностью пикселей (порядка  $4 \cdot 10^4$  пикселей/мм<sup>2</sup>). Главное отличие данного типа приборов от предыдущих поколений — это быстрое восстановление параметров, что позволяет использовать их для построения детектирующих систем с высокой скоростью счета. Причем МЛФД имеют не только короткое время нарастания (единицы наносекунд) по фронту импульса, но и по спаду, что открывает широкие экспериментальные возможности.

Нами было предложено попробовать использовать новый тип МЛФД для регистрации электронов, поскольку теперь темп счёта можно было кардинальным образом увеличить.

### Экспериментальная часть

В ИЯИ РАН от группы З. Садыгова были получены для испытаний технологические образцы новых МЛФД с минимальным слоем защитного покрытия на поверхности полупроводника (рис. 1, 2).

Образцы имеют следующие геометрические параметры:

- фоточувствительная площадь  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>;
- толщины первого и второго эпитаксиального слоя *p*-типа проводимости 3.5 мкм;
- удельные сопротивления обоих эпитаксиальных слоев 7 Ω·см (или концентрация примесей  $1.85 \cdot 10^{15} \pm 5\%$  ат/см<sup>3</sup>);
- диаметр пикселей (т.е. *n*+ областей) вдоль поверхности 2 мкм;
- толщина пикселей (*n*+ областей) около 0.8 мкм;
- интервал между пикселями вдоль поверхности 3 мкм;
- поверхностная плотность пикселей  $4 \cdot 10^4$  пикселей/мм<sup>2</sup>;
- защитный слой (SiO<sub>2</sub>) 0.5 мкм.

Стоит заметить, что в данном приборе нет пикселей в обычном понимании. Активная площадь регистрации фотонов близка к 100 %.

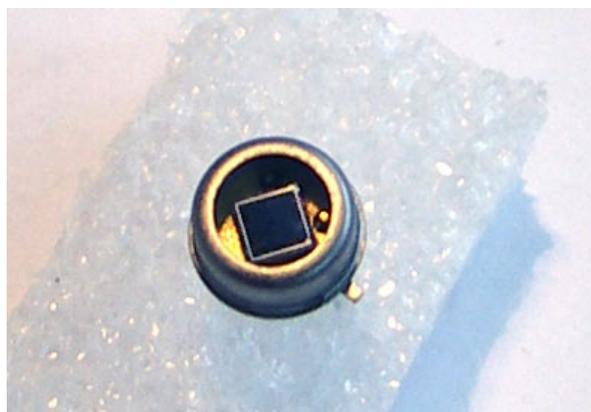
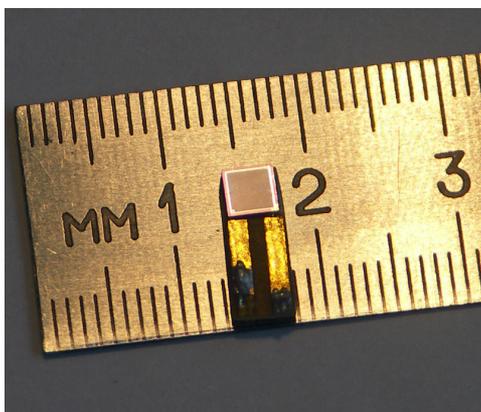


Рис. 1. Технологические образцы микроканальных лавинных фотодиодов, смонтированные для проведения испытаний

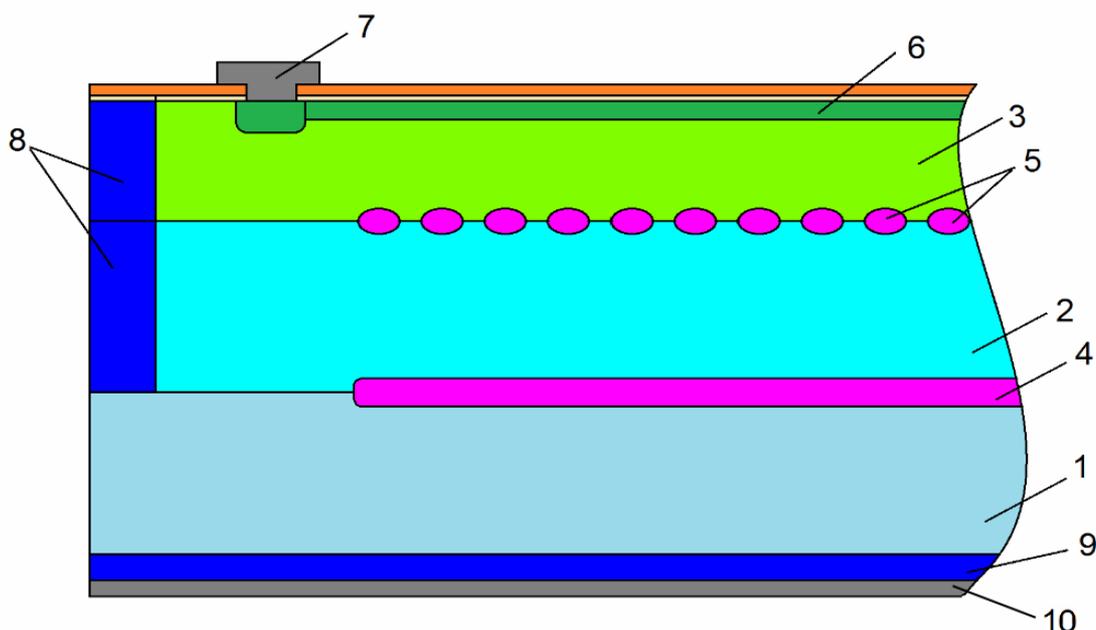


Рис. 2. Общая конструкция разработанного МЛФД (из доклада в ИЯИ РАН Гадира Ахмедова, Институт Радиационных Проблем НАНА, Баку, Азербайджан).

1 — кремниевая подложка n-типа проводимости, 2 — эпитаксиальный слой n-типа проводимости, 3 — эпитаксиальный слой p-типа проводимости, 4 — тонкий слой n-типа проводимости, 5 — матрица высоколегированных областей n-типа проводимости, 6 — высоколегированный слой p-типа проводимости, 7 — металлический контакт, 8 — охранное кольцо n+ типа проводимости, 9 — высоколегированный слой n-типа проводимости для улучшения омического контакта к подложке, 10 — алюминиевая подложка

Первые тесты с источниками электронов, выполненные в ИЯИ РАН, продемонстрировали принципиальную возможность детектирования электронов с низкой энергией при комнатных температурах. Для этого использовался миниатюрный предварительный усилитель конструкции В. И. Головина (АО «Центр перспективных технологий и ап-

паратуры», ЦПТА), схема и внешний вид которого приведены рис. 3). Предварительный усилитель был смонтирован в непосредственной близости от детектора в вакуумном объёме.

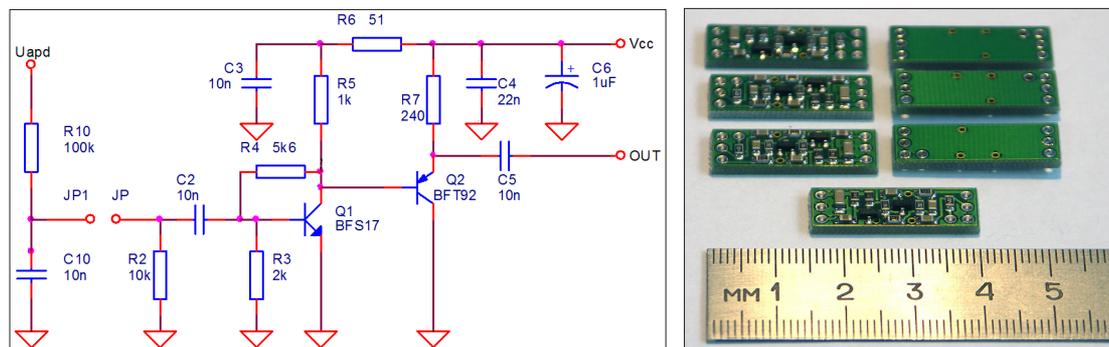


Рис. 3. Предварительный усилитель конструкции В. И. Головина, ЦПТА (РА1)

Основные характеристики усилителя:

- напряжение питания ( $V_{dd}$ ) + 5.0 В
- ток потребления ( $I_{dd}$ ) 8.0 мА
- длит. переднего фронта вых. сигнала имп. усилителя ( $T_r$ ) 3 нс
- амплитуда вых. сигнала имп. усилителя ( $U_{out\ max}$ ) 1.5 В
- сопротивление нагрузки выхода усилителя ( $R_{load}$ ) 50 Ом
- крутизна преобразования ( $S=I_{вх}/U_{вых}$ ) 0.2 мА/В

(параметры приведены с учетом емкости фотодиода размером  $1 \times 1$  мм).

Для оцифровки сигнала была использована система ADCM собственной разработки: многостоповый амплитудо-время-цифровой преобразователь на 8 каналов), выполненный в стандарте PCI и программное обеспечение под ОС LINUX.

ADCM предназначен для одновременного накопления амплитудных и времяпролетных спектров. В основу системы положен принцип непрерывной оцифровки формы импульсов с определением как временных, так и амплитудных значений (пособытийно). Каналы оцифровки сигналов с детекторов построены по одинаковой схеме, в которую входит управляемый усилитель с полосовым фильтром и аналогово-цифровой преобразователь с шагом измерения 10 нс.

Дополнительный усилитель здесь не использовался (вернее, в тот момент не был найден подходящий с достаточным усилением, быстродействием и временем формирования). Поэтому как основной усилитель использовался встроенный усилитель ADCM с установленным максимальным коэффициентом усиления (+13 dB, рис.4). Это дало возмож-

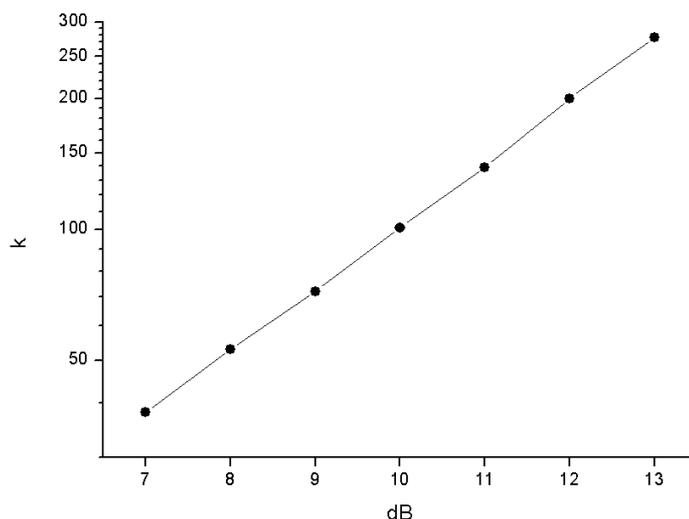


Рис. 4. Реальный коэффициент усиления, преобразователь ADCM

ность набрать самые первые спектры от слабого сигнала с детектора (рис. 5, 6) и показать его принципиальную чувствительность к электронам слабых энергий, однако вся система оказалась крайне уязвимой к внешним наводкам.

В качестве источника электронов здесь использовалась электронная пушка с полупрозрачным золотым напылением на кварцевом окне под высоким напряжением, освещённая УФ-лампой.

Энергетическое разрешение, полученное во время первых тестов, оказалось весьма похожим на опубликованные результаты от Hamamatsu, однако возможный темп счёта оказался гораздо выше.

Парадоксальное на первый взгляд поведение спектра при энергиях выше 18 кэВ легко объясняется при помощи моделирования. Именно начиная с этой энергии электроны начинают проходить насквозь первый и второй эпитаксиальные слои детектора (3.5 мкм) и уходить в подложку. В веществе электроны постепенно теряют энергию за счет неупругого рассеяния. Одновременно, с уменьшением энергии увеличивается вероятность рассеяния на большие углы. Средний угол отклонения от прямолинейного положения с увеличением пройденного пути в веществе возрастает, и затем движение электрона можно рассматривать как диффузию в веществе.

В нашем случае моделирование поведения электронов в кремнии при различных энергиях было произведено с использованием программы Casino v. 2.48 (режим SREM: The Stopping and Range of Electrons in Matter), рис. 7, 8.

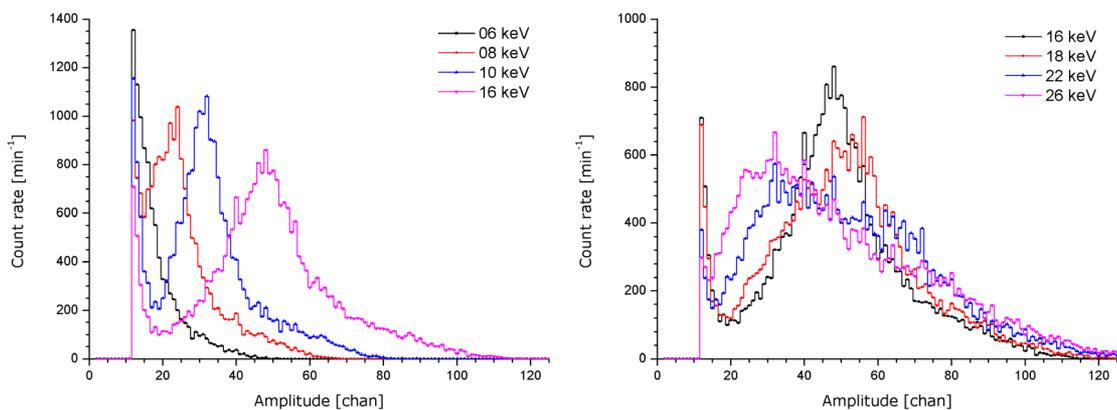


Рис. 5. Первые спектры, полученные с МЛФД от электронов различных энергий в диапазоне от 6 до 26 кэВ

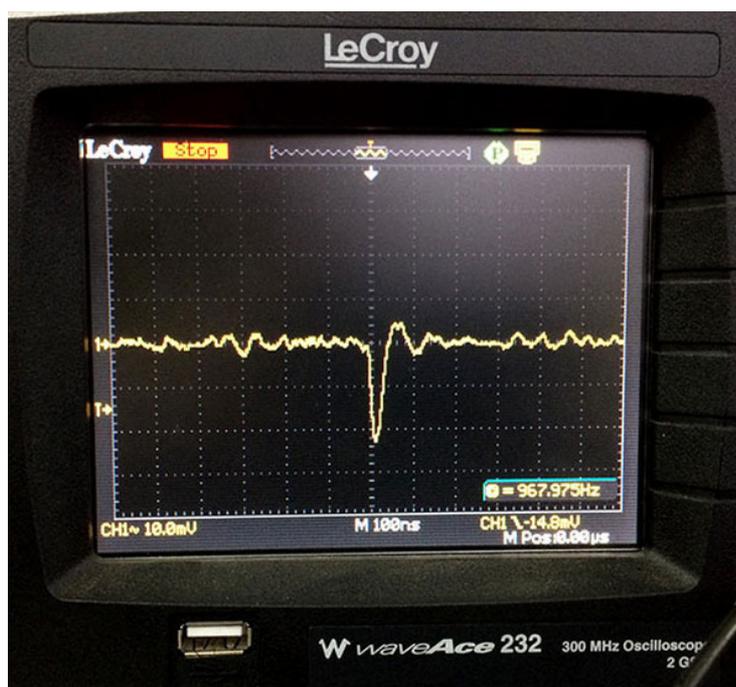


Рис. 6. Одиночный импульс от электрона, снятый с МЛФД на экране осциллографа. Предварительный усилитель РА1

Для эффективной регистрации электронов с большими энергиями необходимо изготовить детектор со слоями большей толщины. Однако для регистрации электронов, рождающихся в бета-распаде трития (до 18.6 кэВ) существующая толщина нашего детектора представляется оптимальной.

Далее были сделаны многочисленные попытки упростить схему подключения детектора, с испытанием четырёх новых типов предварительных усилителей и вынесением их из вакуумного объёма, а так-

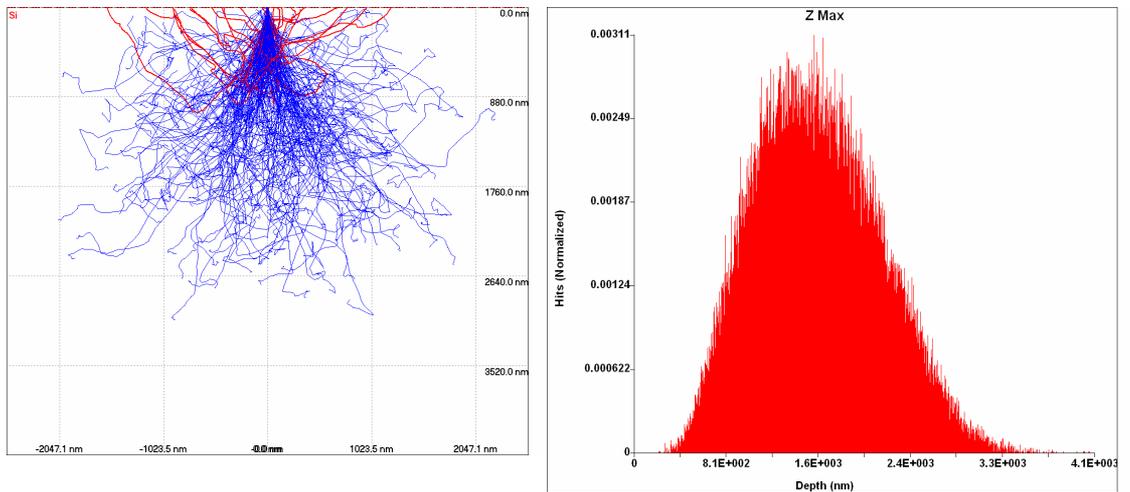


Рис. 7. Моделирование траекторий электронов с энергией 17 кэВ в кремнии и максимальная глубина проникновения в вещество

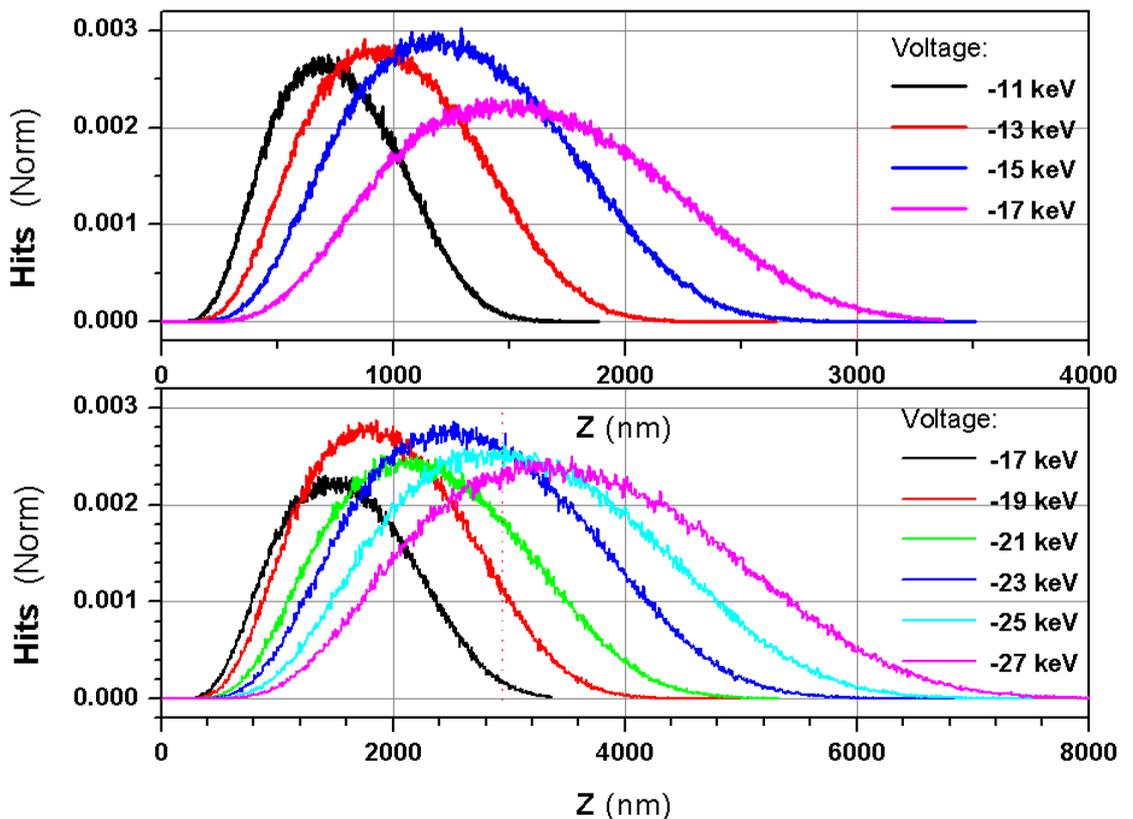


Рис. 8. Глубина проникновения электронов в кремний для электронов различных энергий. Толщина Z для нашего образца детектора 3500 нм. Результаты моделирования

же с использованием серийных коммерческих приборов для оцифровки формы сигнала CAEN DT5720D и DRS4 Evaluation Board (Paul Scherrer Institut). Сразу можно отметить, что оба оцифровщика не годятся для

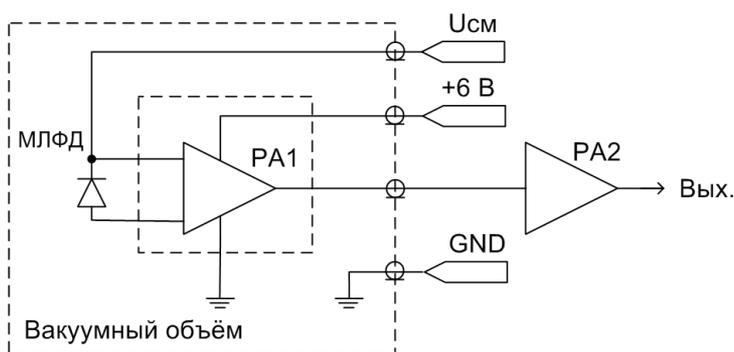


Рис. 9. Блок-схема системы регистрации

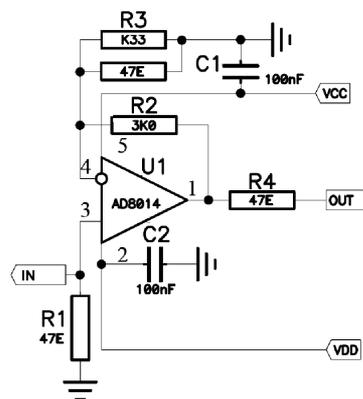


Рис. 10. Основной усилитель на базе ОУ AD8014 (PA2)

непосредственной работы со слабым сигналом сразу с выхода предварительного усилителя PA1. Параллельно велась работа по модернизации электронной пушки.

Оптимальной на сегодняшний день была признана схема, в которой предварительный усилитель (PA1) конструкции ЦПТА (Рис.3) располагается в вакуумном объёме в непосредственной близости от детектора, затем сигнал выводится на герметичный разъём и подаётся на основной усилитель (PA2) с 50-омными входом и выходом и коэффициентом усиления порядка  $\sim 36$  (Рис. 9). Основной усилитель был собран на миниатюрном операционном усилителе AD8014 (Рис. 10). Чистое питание  $\pm 6$  В на него было заведено из крейта NIM. Оцифровка сигналов — система ADCM, внутреннее усиление установлено на +7 dB (рис. 4).

Напряжение смещения  $U_{см}$  для детектора формируется специальным программно-управляемым блоком с диапазоном установки напряжения до 132 В и минимальным шагом 0.01 В. Напряжение подаётся через RC-фильтр, управление осуществляется через интерфейс USB.

Из данной исследовательской работы были сделаны несколько практических выводов:

1. Вакуумные разновидности массово используемых у нас разъёмов типа ШР (многоштырьковые разъёмы в сплошной остекловке) не подходят для передачи быстрых и слабых сигналов непосредственно с детектора. Необходима либо коаксиальная конструкция вакуумного разъёма, либо предварительное усиление сигнала внутри вакуумного объёма и дальнейшее усиление с формированием его снаружи. Для одного канала лучше и то, и другое, хотя при масштабировании системы с использованием многоканального детектора сразу встанет вопрос

о вынесении предварительных усилителей из вакуумного объёма. Так что вопрос с оптимальной конструкцией разъёма всё равно нужно будет решить в ходе подготовительных работ.

2. Исходный сигнал с детектора весьма слаб и критически подвержен воздействию внешних наводок. Для того чтобы «вытащить» сигнал, пригодный к оцифровке, приходится проводить целый комплекс мер по уменьшению влияния наводок, как то:

1) установка хороших фильтров по питанию и, особенно, по напряжению смещения.

2) экранирование и заземление практически всех приборов, задействованных в схеме измерения. В нашем случае наибольшие проблемы возникли с наводкой от импульсного источника питания высоковольтного преобразователя электронной пушки, который в конечном итоге пришлось заменить на аналоговый.

3) сложнее всего оказалось отвязаться от нерегулярной сверхвысокочастотной модулированной наводки (по-видимому, от вышек сотовой связи), не ухудшив временные параметры сигнала МЛФД. От неё

удалось избавиться при помощи небольшой СВЧ фильтрации в основном усилителе (интегрирующая RC-цепочка из резистора R2 усилителя PA2 и монтажной ёмкости дорожек печатной платы).

3. После испытаний на тестовом месте детектор был размещен на опорной фторопластовой площадке, закреплённой на крупном фланце, и помещен в вакуумный объём спектрометра установки «Троицк ню-масс». Место расположения МЛФД находилось на оси основного детектора установки, но отнесено на 400 мм дальше по оси, сразу за шибером, использующимся для отсечения вакуумного объёма при смене детекторов по время сеансов измерений

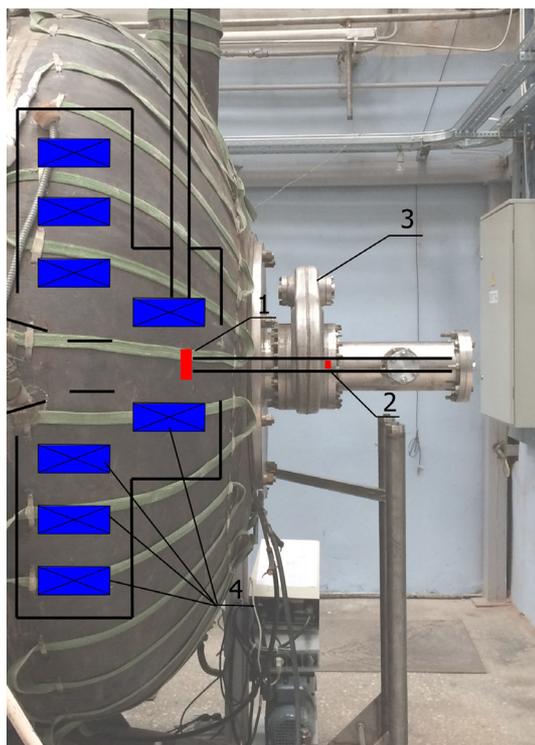


Рис. 11. Место установки детектора МЛФД в спектрометре во время тестов (поз. 2). 1 — место установки основного детектора, 3 — шибер, 4 — сверхпроводящие магниты

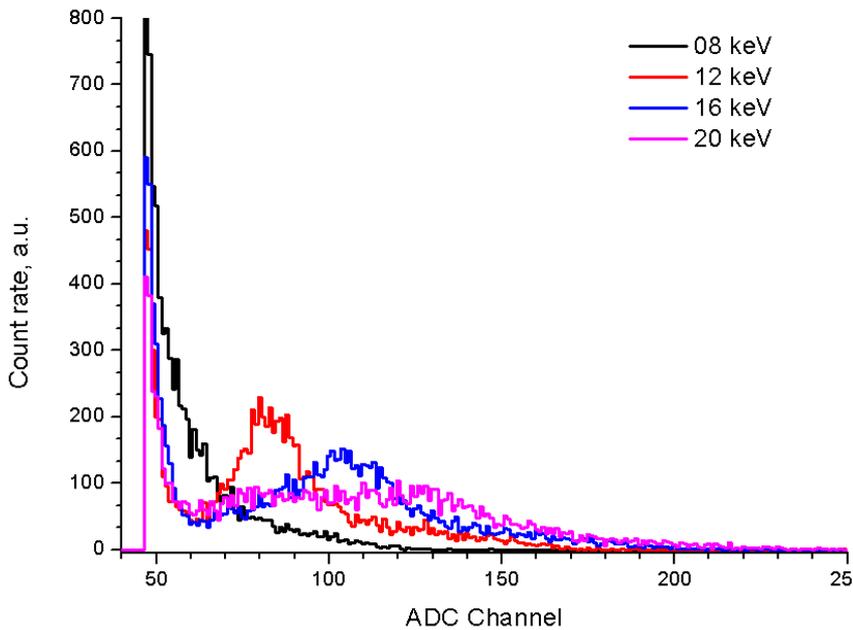


Рис. 12. Спектр от электронов со стенок электрода спектрометра

(рис. 11). Это позволило использовать простую опору для тестовых измерений, без сложной системы ввода детектора в произвольную позицию на оси (возможно, она будет изготовлена позднее).

Во время первых испытаний детектора на спектрометре сигнал неожиданно стал ухудшаться и возник вопрос о том, какая температура установится в районе МЛФД и предварительного усилителя во время измерений, и не понадобится ли им дополнительный нагрев. С одной стороны, неподалёку находится крупный сверхпроводящий магнит при температуре жидкого гелия, а с другой, осуществляется довольно большой теплоприток с внешних стенок корпуса спектрометра. Для ответа на этот вопрос к корпусу детектора был прикреплен миниатюрный платиновый датчик температуры Pt-1000 с контактами, выведенными на свободный разъём на фланце. По факту, температура МЛФД в нашей рабочей точке установилась лишь слегка ниже комнатной и составила  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это убрало все подозрения в переохлаждении кремниевых транзисторов предварительного усилителя. В дальнейшем ухудшение сигнала не наблюдалось. Вероятная причина — высокочастотная наводка, которая была убрана дополнительным усилителем с формирователем во время следующих измерений.

Результаты тестовых измерений показаны ниже. На рис.12 представлен спектр сигналов от моноэнергетических электронов со стенок

высоковольтного электрода спектрометра при выключенном магнитном поле в центре спектрометра и с сохранением небольшого тока на детекторном магните для сбора этих электронов на детектор. Результат довольно близок к тому, что мы получили ранее на стенде.

Далее были проведены измерения со штатной тестовой электронной пушкой спектрометра, которая предназначалась для калибровочных измерений с прохождением электронов сквозь газовый источник.

На рис. 13 показан спектр электронов с энергией 16 кэВ от электронной пушки после прохождения через всю магнитную систему спектрометра. На задерживающем электроде спектрометра было установлено напряжение 15,9 кВ для отсечения фоновых электронов от остатка трития в источнике. Установлены все типичные рабочие токи (120...150 А) во всех магнитах, кроме детекторного, который был снижен до 83 А. Это было сделано для того, чтобы пучок электронов от пушки слегка «распушился» и гарантированно попал на всю поверхность МЛФД.

Тем не менее, вопросы с точным определением характеристик новых детекторов остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения. Необходимо дальше исследовать спектрометрические свойства детекторов, их однородность по площади, стабильность по времени и под радиационной нагрузкой, зависимость параметров от температуры, под воздействием факторов окружающей среды. Предполагается оценить оптимальные параметры изготовления детекторов.

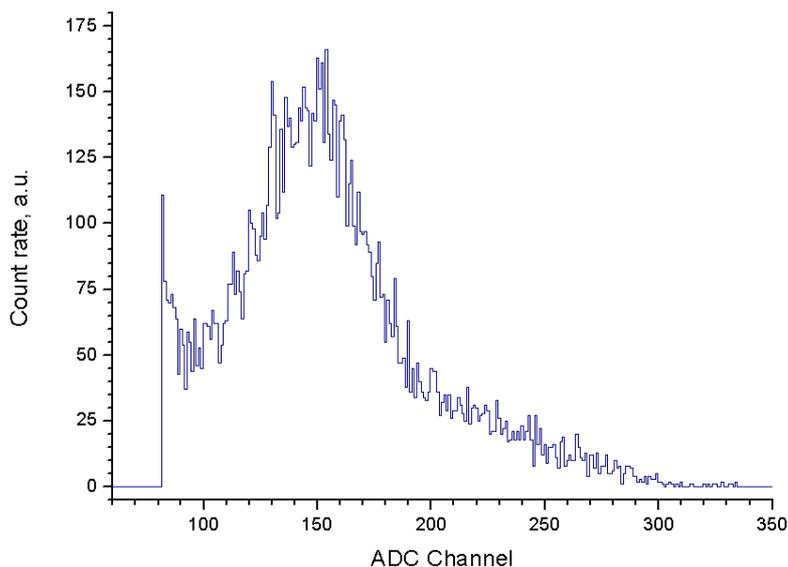


Рис. 13. Спектр от электронной пушки с энергией 16 кэВ.

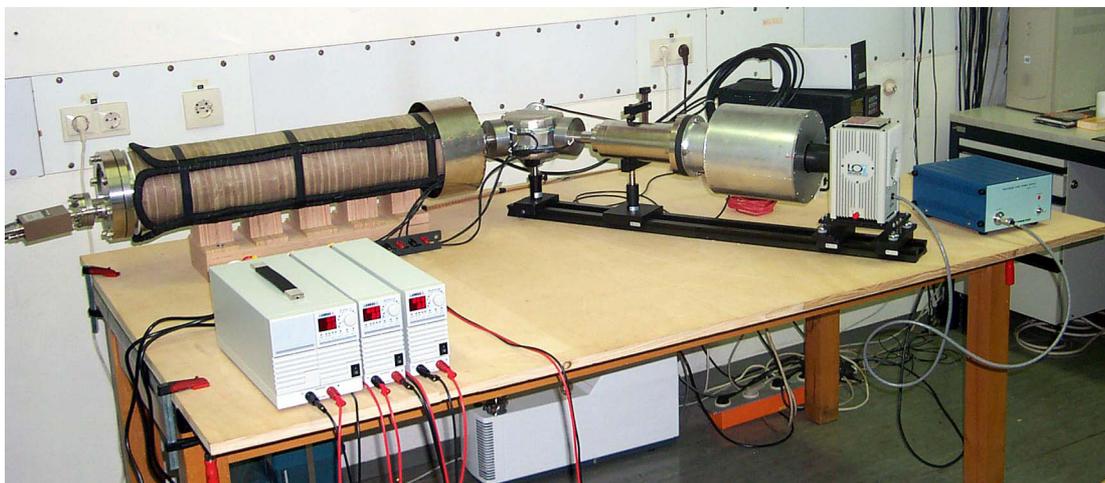


Рис. 14. Стенд для проверки детекторов, изготовленный в ИЯИ РАН для Технологического института Карлсруэ

Развитие этой тематики, подбор оптимальных параметров усиления сигнала, вполне может позволить превзойти существующий мировой уровень.

Для точного определения характеристик нам потребуется модернизация стенда для проверки детекторов на современном технологическом уровне с максимальным использованием стандартных промышленных узлов.

У нас уже есть опыт создания подобного стенда, который в настоящее время используется для проверки образцов детекторов в Институте ядерной физики Технологического института Карлсруэ [7], рис. 14.

### Краткое описание стенда

Для измерения функции прохождения электронов через источник была разработана система, состоящая из электронной пушки и магнитно-фокусирующей системы (Рис. 15).

Электроны возникают в пушке в результате фотоэффекта на золотом напылении, при облучении его ультрафиолетовым излучением. Затем электроны ускоряются электрическим полем до необходимой энергии (испытания проводились до 40 кэВ).

Канал транспортировки электронов от наконечника пушки (3) к детектору (1) состоит из двух фокусирующих линз (8), поворотного магнита (9), и транспортного соленоида (6) и отклоняющих магнитов (7), с помощью которых осуществляется сканирование пучком по площади детектора.

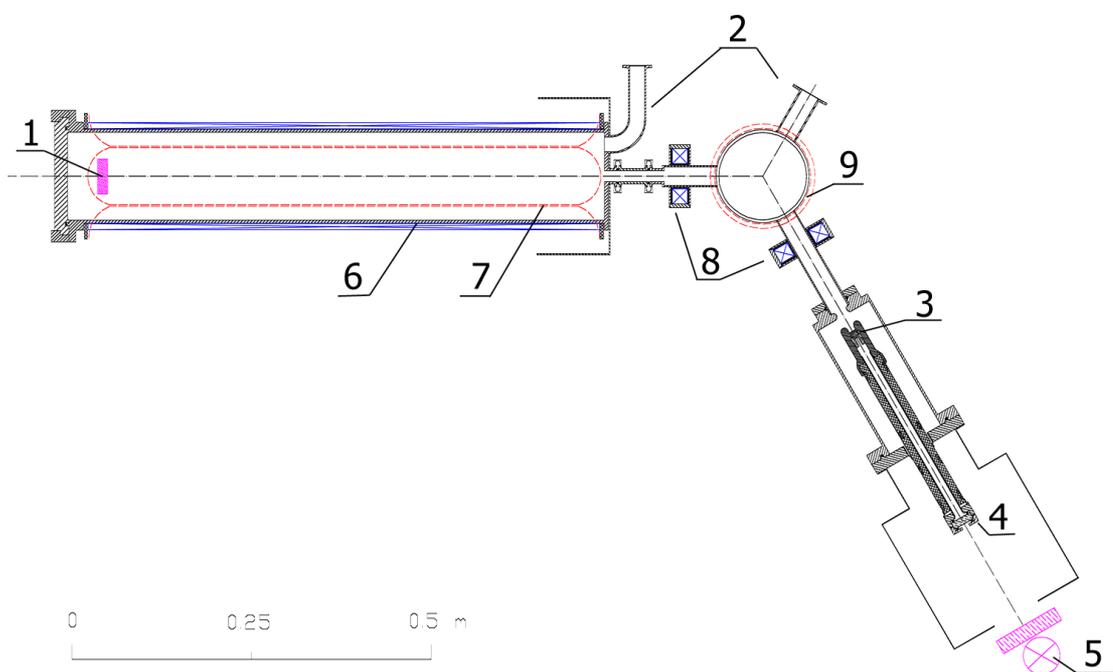


Рис. 15. Схема стенда для проверки детекторов.

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

Расстояние от наконечника электронной пушки до центра первой линзы равно расстоянию от центра второй линзы до фокуса и равно половине расстояния между линзами. Если линзы одинаковые и последовательно запитаны от одного источника тока, то при определённом значении тока в них дублет линз осуществляет в линейном приближении минус единичное преобразование координат электронов от электронной пушки до фокуса второй линзы.

Расчёты показывают, что для компенсации искажений, вносимых в матрицу преобразований координат канала транспортировки поворотным магнитом, достаточно уменьшить расстояние от центра второй линзы до фокуса на  $\sim 15\%$  и на несколько процентов уменьшить ток в линзах. Конструктивно линзы выполнены как бронированные короткие соленоиды, а поворотный магнит отклоняет электроны на  $30^\circ$  и представляет собой пару коаксиальных катушек, помещённых внутри цилиндрического магнитопровода из пермаллоя толщиной 2 мм. Пучок электронов из электронной пушки фокусируется экранированным каналом транспортировки на вход транспортного соленоида, а затем адиабатически транспортируется магнитным полем.

Поворотная конструкция канала транспортировки позволяет избежать попадания отраженных от детектора электронов на пушку — они отклоняются поворотным магнитом в противоположную пушке сторону. При отсутствии такой поворотной системы может происходить следующий эффект: часть электронов от пушки отражается от детектора и возвращается к пушке. Отражаясь от потенциала на пушке, они вновь начинают двигаться к детектору.

Аналогичную схему с электронной пушкой, только без возможности сканирования по площади, мы используем для калибровки установки «Троицк ню-масс» [8], рис. 16.

Испытания электронных пушек нашей конструкции, проведённые на спектрометре высокого разрешения в Институте ядерных исследований в Ржеже (Чешская республика), показали уникальную монохроматичность (лучше 0.5 эВ) этой конструкции по сравнению с серийными промышленными образцами.

Созданный стенд может использоваться и в дальнейшем для более качественной проверки различных типов детекторов. Предусматривается возможность для схемы охлаждения детекторов и предварительных каскадов малошумящих усилителей.

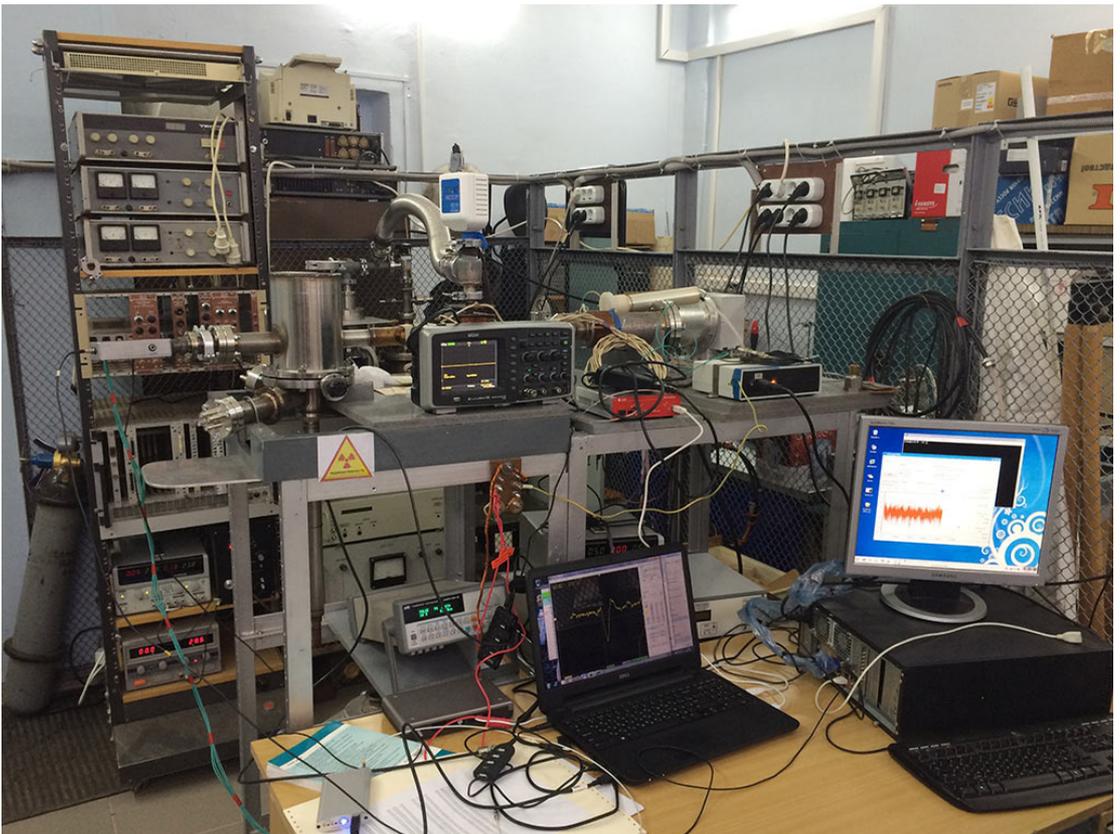
Существующий сейчас в ИЯИ РАН стенд (рис. 17) позволяет делать проверки детекторов с помощью радиоактивных источников и засветку детектора широким пучком электронов, однако фокусировка и точное сканирование пучком электронов в данной конструкции не предусмотрено, а сам стенд требует значительной модернизации.

При создании нового стенда планируется выполнить следующие задачи:

- Улучшение оптики пучка, получение размера пятна 1,0 ... 1,5 мм
- Создание автоматизированной системы сбора данных и управления положением пучка электронов
- Подбор параметров предварительного усилителя.
- Исследование спектрометрических свойств детектора:
  - зависимость амплитуды сигнала от энергии электрона;
  - форма функции отклика;
  - временные параметры сигнала;
- Сравнение измеренных параметров с модельными расчетами
- Исследование пространственного распределения характеристик
- Исследование ресурса детектора



*Рис. 16. Установка Троицк ню-масс.*



*Рис. 17. Существующий стенд для проверки детекторов.*

- Исследование радиационной стойкости детектора
- Исследование влияния атмосферы на работоспособность детектора
- Оптимизация параметров/технологии изготовления детектора (совместно с группой Э. Садыгова).

## Выводы

Детектор на основе микроканальных лавинных фотодиодов разработки группы Э. Садыгова может быть использован не только по прямому назначению, для регистрации фотонов, но вполне пригоден и для работы с электронами. На базе существующих образцов МЛФД уже можно сделать прототип детектора для экспериментов по поиску стерильных нейтрино в экспериментах «Троицк ню-масс» [9] и «КАТРИН» [10, 11]. После детального исследования свойств (особенно в плане стабильности характеристик при длительном использовании) может быть сделано предложение по использованию микроканальных лавинных фотодиодов в дозиметрической аппаратуре (например, регистрация загрязнения тритием).

Продолжение работы по этой тематике потребует глубокой модернизации существующей электронной пушки, либо повторения конструкции, изготовленной для Технологического института Карлсруэ, но на новом техническом уровне.

## Благодарности

Авторы признательны Э. Садыгову, ОИЯИ, Дубна, за предоставленные образцы детекторов, Г. С. Ахмедову, Институт Радиационных Проблем НАНА, Баку, Азербайджан, за обсуждение тонких моментов, касающихся работы детектора, Решетину А.И за консультации, Д. Н. Абдурашитову, ИЯИ РАН, за плодотворное обсуждение в процессе работы, В. С. Пантуеву, ИЯИ РАН, за оказанную помощь и поддержку в работе, В. Н. Асееву за первоначальный расчет магнитной системы электронной пушки.

Описанная работа была осуществлена при финансовой поддержке грантов РФФИ 14-22-03069, РФФИ 14-02-00570, Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) 436RUS17/122/02.

## Список использованной литературы

1. Ritzau SM, Funsten HO, Borovsky JE. Solid state detection of low energy ions and electrons for constellation missions // Science closure and enabling technologies for constellation class missions. 1998. P. 131–5.
2. Kataoka J, Saito T, Kuramoto Y, Ikagawa T, Yatsu Y, Kotoku J, et al. Recent progress of avalanche photodiodes in high-resolution X-rays and c-rays detection // Nucl Instrum Methods Phys Res Sec A 2005; 541(1–2): 398–404.

3. Silver CS, Spallas JP, Muray LP. Silicon photodiodes for low-voltage electron detection in scanning electron microscopy and electron beam lithography // *J Vacuum Sci Technol B* 2006;24(6):2951–5.
4. Ogasawara K. et al. The Effect of Depletion Layer Thickness in Avalanche Photodiodes for Measurement of Low-energy Electrons // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 566 (2006) 575–583.
5. Микроканальный лавинный фотодиод с широким диапазоном линейности // *Письма в ЖТФ*, 2010, том 36, вып. 11.
6. Садыгов З. и др. Микроканальный лавинный фотодиод с быстрым временем восстановления параметров // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, вып. 11.
7. Wustling S., Armbrust T., Steidl M., Zadorozhny S. A large, 64-pixel PIN-diode detector for low-energy beta-electrons // *Nucl.Instrum.Meth. A*568 (2006) 382-387.
8. Aseev V.N. et al. Upper limit on the electron antineutrino mass from the Troitsk experiment // *Phys. Rev. D* 84, 112003, 2011.
9. Abdurashitov D.N. 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
10. Riis A.S., Hannestad S. Detecting sterile neutrinos with KATRIN like experiment // *JCAP* 1102 (2011) 011.
11. Mertens S. et al. Sensitivity of Next-Generation Tritium Beta-Decay Experiments for keV-Scale Sterile Neutrinos // *JCAP*, Vol. 2015, Feb. 2015.