

Разработка и изготовление прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД

1. Цели и основные задачи выполнения НИОКР

1.1. Целью выполнения НИОКР является расчет характеристик, разработка конструкций и изготовление прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе лавинного фотодиода (далее – ЛФД).

1.2. Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:

1.2.1. Разработка документации:

- эскизная конструкторская документация на прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД (далее - ЭКД);
- научно-технический отчет;
- программа и методика испытаний прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД;
- протокол испытаний прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД.

1.2.2. Изготовление прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД.

1.2.3. Испытания прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД.

2. Исходные данные и условия, необходимые для выполнения работ

- Интенсивность диагностируемого рентгеновского излучения – до 10^8 фотонов/с.
- Энергетический диапазон диагностируемого рентгеновского излучения – не менее 5 кэВ и не более 30 кэВ.
- Полуширина диагностируемого пучка рентгеновского излучения – не менее 1 мкм и не более 1 мм.

3. Общая характеристика

3.1. Разрабатываемый в ходе выполнения НИОКР прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД предназначен для применения в качестве счётного устройства при измерении интенсивности рентгеновского пучка при проведении физических экспериментов. Прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД состоит из следующих узлов: лавинных фотодиодных приёмников рентгеновского излучения и контроллера-анализатора.

Лавинный фотодиодный приёмник рентгеновского излучения предназначен для прямого преобразования фотонов в электрический сигнал. Лавинный фотодиодный приёмник рентгеновского излучения представляет собой сборную конструкцию из чувствительного элемента - лавинного фотодиода, зарядочувствительного предусилителя, датчика температуры, разъёма для подачи высокого напряжения, разъёма для считывания показаний датчика температуры, разъёма для считывания напряжения на выходе зарядочувствительного предусилителя. Принцип работы лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения основан на физическом эффекте лавинного пробоя. При поглощении фотонов рентгеновского пучка в чувствительной области (обеднённом слое лавинного фотодиода) генерируется электрический заряд. На специализированные электроды ЛФД подаётся высокое напряжение обратного смещения, которое усиливает электрическое поле за пределами

обедненного слоя. Носители заряда дрейфуют в рп-область с сильным электрическим полем, под действием которого приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов, вследствие чего растёт количество носителей заряда. Получаемые импульсы фототока конвертируются зарядочувствительным предусилителем в напряжение, которое считывается со специализированного электрода.

Контроллер-анализатор предназначен для считывания сигнала (напряжения) со специализированных электродов, анализа и обработки сигналов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения, подачи высокого напряжения смещения на специализированный электрод лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения, контроля показаний датчика температуры лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения, передачи данных в автоматизированную систему управления (далее - АСУ) экспериментальной станции.

4. Технические требования к прототипу быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД

4.1. Состав прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД

В результате выполнения НИОКР должна быть разработана документация и изготовлен прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД в следующем в составе:

- прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД, состоящий из лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения концевое типа с размером апертуры 5 мм x 5 мм – 1 шт., лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения концевое типа с размером апертуры 10 мм x 10 мм – 1 шт., лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения пролётного типа с размером апертуры 5 мм x 5 мм – 1 шт. и контроллера-анализатора – 1 шт.;
- эскизная конструкторская документация на прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД;
- паспорт на прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД;
- руководство на прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД;
- научно – технический отчет, включающий:
 - разработку алгоритма и схемы обработки сигналов лавинного фотодиода;
 - подбор датчика температуры чувствительного элемента лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского пучка (лавинного фотодиода);
 - подбор считывающего аналого-цифрового преобразователя (далее - АЦП);
 - подбор и обоснование выбора частоты дискретизации считывания сигнала лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
 - анализ теплофизических характеристик и подбор оптимальных материалов и конструкций лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
 - анализ электрофизических характеристик лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения таких как: диапазон напряжения обратного смещения лавинного фотодиод, фототок лавинного фотодиода;
 - анализ целесообразности принудительного охлаждения или термостабилизации и подбор конфигурации системы охлаждения;

- анализ и подбор диапазонов измеряемых величин сигнальных напряжений;
- анализ и подбор коннекторов, соединений и проводников;
- анализ и подбор значения/диапазона значений обратного напряжения смещения;
- иные исследования и расчёты, необходимые для проведения НИОКР.

4.2. Требования назначения

4.2.1. Разрабатываемый прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД предназначен для применения в качестве счётного устройства при измерении интенсивности рентгеновского пучка при проведении физических экспериментов. Разрабатываемый прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД будет использован для всестороннего изучения функциональности устройства, для принятия решения о возможности постановки на производство и (или) использования по назначению разработанного прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД.

4.2.2. Основные технические характеристики прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД.

4.2.2.1 В ходе выполнения НИОКР должны быть разработаны две конструкции корпуса лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения: пролётная и концевая.

Пролётная конструкция корпуса должна обеспечивать возможность последовательной установки нескольких лавинных фотодиодных приёмников рентгеновского излучения пролётного типа таким образом, чтобы рентгеновский пучок взаимодействовал только с чувствительными элементами, а при монтаже чувствительные элементы каждого приёмника находились на одной оси. Электронные схемы должны располагаться на минимально возможном расстоянии от электродов лавинного фотодиода.

Концевая конструкция корпуса не накладывает ограничения на сквозной пролёт рентгеновского пучка сквозь лавинный фотодиодный приёмник рентгеновского излучения. Электронные схемы должны располагаться на минимально возможном расстоянии от электродов лавинного фотодиода.

4.2.2.2. Технические параметры лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения пролётного типа:

- чувствительный элемент датчика – кремниевый лавинный фотодиод;
- размер апертуры (окна пропускания) $5 \times 5 \text{ мм}^2$;
- форма апертуры – квадратная;
- должен иметь специализированный электрод для передачи сигналов лавинного фотодиода;
- должен иметь зарядочувствительный предусилитель для предварительного усиления и конвертации фототока лавинного фотодиода в сигнальное напряжение;
- должен иметь специализированный электрод для подачи обратного напряжения смещения;
- должен иметь защиту лавинного фотодиода от перегрузки по току;
- должен иметь схему фильтрации и/или стабилизации напряжения обратного смещения лавинного фотодиода;
- тип коннекторов – определяется в ходе выполнения работ;
- корпус лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения пролётного типа должен обеспечивать монтаж и механическую защиту

хрупких элементов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;

- корпус лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения пролётного типа должен обеспечивать защиту от пыли (проникающее количество не должно мешать работе устройства);
- должен иметь датчик температуры чувствительного элемента;
- необходимость системы охлаждения или термостабилизации и её исполнение прорабатывается в процессе выполнения НИОКР;
- геометрическое исполнение крепежного элемента прорабатывается в процессе выполнения НИОКР;
- модель лавинного фотодиода согласовывается с заказчиком.

4.2.2.3 Технические параметры лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения концевое типа с размером апертуры 5 мм x 5 мм:

- чувствительный элемент датчика – кремниевый лавинный фотодиод;
- размер апертуры (окна пропускания) – $5 \times 5 \text{ мм}^2$;
- форма апертуры – квадратная;
- должен иметь специализированный электрод для передачи сигналов лавинного фотодиода;
- должен иметь зарядочувствительный предусилитель для предварительного усиления и конвертации фототока лавинного фотодиода в сигнальное напряжение;
- должен иметь специализированный электрод для подачи обратного напряжения смещения;
- должен иметь защиту лавинного фотодиода от перегрузки по току;
- должен иметь схему фильтрации и/или стабилизации напряжения обратного смещения лавинного фотодиода;
- тип коннекторов – определяется в ходе выполнения работ;
- корпус должен обеспечивать монтаж и механическую защиту хрупких элементов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- корпус должен обеспечивать защиту от пыли (проникающее количество не должно мешать работе устройства);
- должен иметь датчик температуры чувствительного элемента;
- необходимость системы охлаждения или термостабилизации и её исполнение прорабатывается в процессе выполнения НИОКР;
- геометрическое исполнение крепежного элемента прорабатывается в процессе выполнения НИОКР;
- модель лавинного фотодиода согласовывается с заказчиком.

4.2.2.4 Технические параметры лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения концевое типа с размером апертуры 10 мм x 10 мм:

- чувствительный элемент датчика – кремниевый лавинный фотодиод;
- размер апертуры (окна пропускания) – $10 \times 10 \text{ мм}^2$;
- форма апертуры – квадратная;
- должен иметь специализированный электрод для передачи сигналов лавинного фотодиода;
- должен иметь зарядочувствительный предусилитель для предварительного усиления и конвертации фототока лавинного фотодиода в сигнальное напряжение;

- должен иметь специализированный электрод для подачи обратного напряжения смещения;
- должен иметь защиту лавинного фотодиода от перегрузки по току;
- должен иметь схему фильтрации и/или стабилизации напряжения обратного смещения лавинного фотодиода;
- тип коннекторов – определяется в ходе выполнения работ;
- корпус должен обеспечивать монтаж и механическую защиту хрупких элементов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- корпус должен обеспечивать защиту от пыли (проникающее количество не должно мешать работе устройства);
- должен иметь датчик температуры чувствительного элемента;
- необходимость системы охлаждения или термостабилизации и её исполнение прорабатывается в процессе выполнения НИОКР;
- геометрическое исполнение крепежного элемента прорабатывается в процессе выполнения НИОКР;
- модель лавинного фотодиода согласовывается с заказчиком.

4.2.2.5 Технические параметры контроллера-анализатора:

- должен иметь вход для считывания сигнального выходного напряжения лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- вход для считывания сигнального выходного напряжения лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения должен иметь импеданс 50 Ом;
- должен определять подключен ли лавинный фотодиодный приёмник рентгеновского излучения к контроллеру-анализатору;
- должен обнаруживать импульсы напряжения сигналов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- должен иметь счётчик мертвого времени (времени, в течении которого контроллер-анализатор интерпретирует текущий уровень сигнала как наличие импульса);
- должен обеспечивать счёт импульсов за время, указанное пользователем;
- должен обеспечивать скорость счёта импульсов до 108 импульсов в секунду для лавинных фотодиодных приёмников рентгеновского излучения с размером апертуры 5 x 5 мм²;
- должен обеспечивать скорость счёта импульсов до 107 импульсов в секунду для лавинных фотодиодных приёмников рентгеновского излучения с размером апертуры 10 x 10 мм²;
- разрядность счётчика импульсов – 32 бита.
- должен иметь аналоговый выход, передающий усиленное сигнальное напряжение лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения для работы с внешними устройствами;
- должен иметь интерфейс для считывания показаний датчика температуры лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- разрешение (шаг) определения температуры лавинного фотодиода – 0,05°C;
- должен иметь коннектор для подачи напряжения обратного смещения на специализированный электрод лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- должен обеспечивать напряжение обратного смещения лавинного фотодиода в диапазоне, определяемом в ходе выполнения НИОКР;

- должен обеспечивать управление величиной напряжения обратного смещения лавинного фотодиода;
- шаг выбора напряжения обратного смещения лавинного фотодиода – 0,01 В;
- должен иметь возможность отсечки импульсов напряжения сигналов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения с амплитудами меньше установленного порогового значения (амплитудной дискриминации нижнего уровня);
- должен иметь возможность отсечки импульсов напряжения сигналов лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения с амплитудами больше установленного порогового значения (амплитудной дискриминации верхнего уровня);
- должен обеспечивать управление величинами порогов амплитудной дискриминации нижнего и высокого уровня;
- должен иметь возможность выбора интегрального режима работы – режима, при котором происходит счёт только импульсов, прошедших амплитудную дискриминацию низкого уровня;
- должен иметь возможность выбора оконного режима работы - режима, при котором происходит счёт только импульсов, прошедших амплитудную дискриминацию низкого и высокого уровней;
- должен иметь цифровой ТТЛ-совместимый вход для приёма триггерного сигнала;
- должен иметь настройку для выбора режима работы с триггерным цифровым ТТЛ-совместимым входом или без него;
- при включённом режиме работы с триггерным цифровым ТТЛ-совместимым входом при детектировании переднего фронта импульса уровня напряжения логической единицы на входном триггерном цифровом ТТЛ-совместимом входе и при выключенном состоянии счётчика импульсов должен включать счёт импульсов счётчиком импульсов, считываемых с лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- при включённом режиме работы с триггерным цифровым ТТЛ-совместимым входом при детектировании переднего фронта импульса уровня напряжения логической единицы на входном триггерном цифровом ТТЛ-совместимом входе и при включенном состоянии счётчика импульсов должен выключать счёт импульсов счётчиком импульсов, считываемых с лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения;
- должен иметь цифровой ТТЛ-совместимый вход для приёма затворного сигнала;
- должен иметь настройку для выбора режима работы с затворным цифровым ТТЛ-совместимым входом или без него;
- если установлен режим работы с затворным цифровым ТТЛ-совместимым входом, то счёт импульсов должен производиться при установлении уровня напряжения логической единицы на входном затворном цифровом ТТЛ-совместимом входе, и останавливаться/не производиться при установлении уровня напряжения логического нуля на входном затворном цифровом ТТЛ-совместимом входе;
- режим работы с затворным цифровым ТТЛ-совместимым входом и режим работы с триггерным цифровым ТТЛ-совместимым входом – взаимоисключающие;

- должен иметь цифровой TTL-совместимый выход, передающий конвертированное сигнальное напряжение лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения после амплитудной дискриминации высокого и низкого уровней в TTL-сигнал для работы с внешними устройствами;
- отставание фронта нарастания TTL-импульса от времени прихода импульса – не более 100 пс;
- должен обеспечивать управление длительностью импульсов цифрового выходного TTL-сигнала;
- должен иметь цифровой триггерный/затворный TTL-совместимый выход;
- должен иметь возможность выбора режима работы с триггерным/затворным цифровым TTL-совместимым выходом или без него;
- должен иметь возможность выбора триггерного или затворного режима работы триггерного/затворного цифрового TTL-совместимого выхода;
- при затворном режиме работы триггерного/затворного цифрового TTL-совместимого выхода на него должен выводиться уровень напряжения логической единицы при счёте импульсов за указанное пользователем время и уровень напряжения логического нуля вне времени счёта импульсов;
- при триггерном режиме работы триггерного/затворного цифрового TTL-совместимого выхода на него должен выводиться импульс напряжения прямоугольной формы длительностью 1 мкс с амплитудой равной уровню напряжения логической единицы при начале и при окончании счёта импульсов за указанное пользователем время и уровень напряжения логического нуля в остальное время;
- должен иметь систему оповещения пользователя о превышения предельных параметров работы лавинного фотодиодного детектора, таких как:
 - количество детектируемых фотонов за 1 с;
 - температура лавинного фотодиода;
 - ток, протекающий через лавинный фотодиод;
 - другие величины параметров, превышение которых может нарушить работоспособность прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД и определяющиеся в ходе выполнения СЧ НИОКР;
- должен иметь возможность изменения предельных параметров работы прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД;
- диапазон возможных величин предельных параметров работы прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД определяется в ходе выполнения СЧ НИОКР;
- должен иметь возможность выбора предельных параметров работы прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД, предоставляемых пользователю;
- должен иметь возможность экстренного сброса напряжения обратного смещения лавинного фотодиода при превышении предельных параметров работы прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД;
- должен иметь счётчик мертвого времени (времени, в течении которого контроллер-анализатор детектирует импульсы, сгенерированные фотонами или шумовым воздействием);
- должен иметь возможность фиксации момента времени прихода импульса напряжения сигнала лавинного фотодиодного приёмника

рентгеновского излучения по переднему (нарастающему) фронту импульса;

- должен обладать временем опроса не более - 10 мс;
- должен обеспечивать передачу данных в АСУ экспериментальной станции;
- тип канального интерфейса для передачи данных в АСУ экспериментальной станции – Ethernet;
- тип физического интерфейса для передачи данных в АСУ экспериментальной станции – RJ-45
- поддержка интерфейса совместимости со средой управления Tango;
- прикладной интерфейс управления (структуры данных Tango) должен быть разработан на этапе проектирования;
- программный интерфейс приложения (API) – Tango;
- программная среда должна обладать упрощённым пользовательским браузерным интерфейсом (BUI);
- программная среда должна обладать интерфейсом командной строки;
- программная среда должна обеспечивать управление параметрами и режимами работы детектора;
- программная среда должна обеспечивать получение пользователем текущих параметров и режимов детектора;
- программная среда должна обеспечивать получение измеренных величин;
- питание от сети переменного тока - $220\pm 20\text{В}$, $50\pm 0,5\text{Гц}$;
- корпус должен обладать минимальными массой и габаритами;
- корпус должен обеспечивать защиту от пыли (проникающее количество не должно мешать работе устройства);
- интерфейсы соединений должны быть разработаны в ходе выполнения НИОКР;
- типы коннекторов должны быть разработаны в ходе выполнения НИОКР;
- протокол передачи данных должен быть разработан в ходе выполнения НИОКР.

4.3. Конструктивные требования

Габаритные размеры и конструкция прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД должны позволять проводить эффективную компоновку экспериментальных станций комплекса исследовательской установки «СИЛА».

Размер лавинного фотодиодного приёмника рентгеновского излучения (Ш × В × Г), не более: 50 мм × 50 мм × 100 мм;

Размер контроллера-анализатора (Ш × В × Г), не более: 500 мм × 200 мм × 300 мм.

4.4. Требования к эксплуатации, хранению, удобству технического обслуживания и ремонта

4.4.1 Требования по стойкости к внешним воздействиям и условиям эксплуатации

Прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД должен сохранять работоспособность при эксплуатации в следующих условиях:

- температура воздуха в диапазоне от 12 до 35°C;
- относительная влажность воздуха в диапазоне от 0 до 70%;

- атмосферное давление в диапазоне от $8,6 \cdot 10^4$ до $10,6 \cdot 10^4$ Па (в диапазоне от 645 до 795 мм рт. ст.).

4.4.2 Требования к эксплуатации, хранению и техническому обслуживанию

Прототип быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД должен сохранять эксплуатационные характеристики при хранении в отапливаемых складских помещениях не менее одного года при температуре в диапазоне от 5°C до 35°C и относительной влажности воздуха до 98 % (за исключением стандартных изделий и расходных материалов, срок хранения которых определяется по их паспортным данным), не допуская выпадения росы.

Техническое обслуживание прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД не предусмотрено.

5. Требования к видам обеспечения

5.1. Требования к нормативно-техническому обеспечению

- конструкторская и эксплуатационная документации должны разрабатываться в соответствии с требованиями ЕСКД (ГОСТ Р 2.610-2019. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения эксплуатационных документов);
- документация автоматизированных систем должна разрабатываться в соответствии с требованиями комплекса стандартов на автоматизированные системы (ГОСТ 34.201-2020. Межгосударственный стандарт. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем);
- научно-технический отчет должен соответствовать ГОСТ 7.32-2017. (Межгосударственный стандарт. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления).

5.2. Требования к метрологическому обеспечению

Требования к метрологическому обеспечению к прототипу быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД не предъявляются.

5.3. Требования к диагностическому обеспечению

- контроль параметров и технического состояния прототипа быстрого рентгеновского детектора на базе ЛФД должен быть автоматизированным и непрерывным в процессе его эксплуатации;
- разработка программы диагностического обеспечения не требуется.

6. Срок гарантии качества на выполненные работы: 12 месяцев.