

Отчёт о работе в аспирантуре

Харламов Петр

В данном отчёте кратко описана работа, проведённая аспирантом Физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова Харламовым Петром за время обучения в аспирантуре на момент окончания 6-го семестра.

Обучение в аспирантуре подразумевает как учебную работу, так и научные исследования. Поэтому отчёт разделён на смысловые части, большую часть которых составляют отдельные, хоть и связанные друг с другом, исследования.

Учебная работа велась на базе учебных курсов Физического факультета МГУ, а также Научно-Исследовательского Института Ядерной Физики имени Д.В.Скобеляца Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова. Научные исследования проводились на базе оборудования и экспериментальных установок лабораторий Объединённого Института Ядерных Исследований, в частности, Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М. Балдина и Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова. Также хотелось бы отметить участие Лаборатории детекторных систем и электроники Отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ.

Работы выполнены при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований: 18-02-40113 мега и 19-32-90001 Аспиранты.

Учебная работа

В полной мере были освоены общие курсы: «Английский язык», «История и философия науки» и «Основы преподавания физики в высшей школе».

В качестве дисциплин по выбору были освоены следующие курсы: «Избранные вопросы физики взаимодействия частиц и излучений с веществом», «Избранные вопросы квантовой хромодинамики», «Стандартная модель и ее расширения», «Нейтринная астрофизика» и «Методы нейтронографии».

Педагогическая практика проходила в общем физическом практикуме физического факультета МГУ.

Были сданы экзамены кандидатского минимума по английскому языку, философии и специальности, все с оценкой «отлично».

Научная работа

Введение

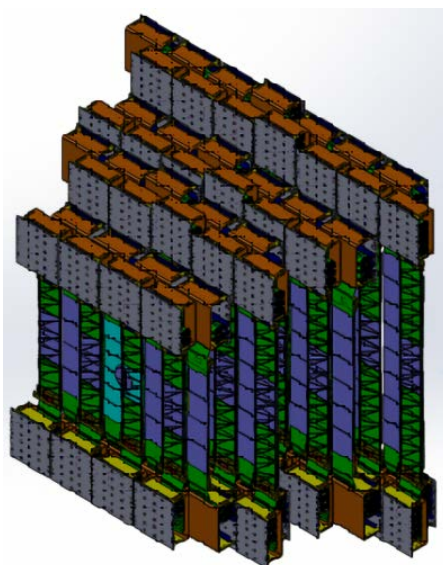
В основе любого современного эксперимента в области физики частиц лежат детекторы, регистрирующие излучения. Одной из важнейших задач в этих экспериментах является точное определение траекторий и импульсов частиц и вершин их взаимодействий. Самым распространённым видом детекторов для целей восстановления треков частиц и вершин их взаимодействий на данный момент являются кремниевые стриповые детекторы.

Кремниевые односторонние стриповые трековые детекторы уже давно и успешно применяются в экспериментах физики высоких энергий, например в экспериментах ATLAS, CMS, ALICE и LHCb Большого адронного коллайдера и D0 и CDF на Tevatron. Тем не менее, новые ускорительные эксперименты физики тяжёлых ионов, такие как BM@N и CBM@FAIR, ставят другие, более строгие условия к трековым системам из-за высоких частоты взаимодействий и множественности этих экспериментов, а также необходимости точного восстановления вторичных вершин взаимодействий, образованных короткоживущими частицами.

В будущем эксперименте по столкновению тяжёлых ионов Barionic Matter at Nuclotron задачу по восстановлению траекторий и импульсов частиц решает Silicon Tracking System (STS) — кремниевая трековая система, которая является частью гибридного трекера. Модули STS состоят из кремниевых сенсоров, считывающей электроники и соединительных кабелей. Были выбраны кремниевые микростриповые двухсторонние сенсоры толщиной 300 мкм, которые обладают 1024 стрипами на каждой стороне с шагом стрипов 58 мкм. Телесный угол между стрипами на двух сторонах составляет 7.5° , что сделано для уменьшения неопределённости при восстановлении треков. Шаг стрипов в 58 мкм ведёт к пространственному разрешению детектора $58\text{мкм} / \sqrt{12} \approx 17\text{мкм}$. Двухсторонние сенсоры могут предоставить в два раза большее количество информации при том же количестве объёма кремния, как в случае односторонних, и условиях нехватки пространства двухсторонние сенсоры являются лучшим решением, несмотря на большую сложность в изготовлении и в считывании информации. В STS будут использоваться сенсоры размерами $6 \times 6 \text{ см}^2$, $6 \times 4 \text{ см}^2$ и, в случае прилегающих к выводу пучка сенсоров, $6 \times 4 \text{ см}^2$ с вырезом.

Другая важная часть трекового модуля — это его считывающая электроника. И основной микросхемой считывающей электроники, в нашем случае, является ASIC STS-XYTER — управляемая данными многоканальная самотриггирующаяся считывающая микросхема. Каждая такая микросхема может считывать 128 каналов, в то время как один сенсор имеет 1024 стрипа на каждой стороне, а соответственно и 2048 каналов считывания. Поэтому на каждую сторону сенсора приходится по 8 микросхем, расположенных на двух управляющих платах Front-End Board (FEB).

Кремниевая трековая система VM@N будет состоять из более чем 600 000 каналов и работать в условиях высоких нагрузок детектора. Система в значительной степени повторяет общие технические решения планируемой трековой системы эксперимента CBM на строящемся ускорительном комплексе FAIR в Дармштадте, Германия, но не идентична



ей (рис. 1).

Рис.1. Внешний вид КТС VM@N.

Двухсторонние микроstriповые детекторы до настоящего времени применялись весьма ограниченно, в связи с чем требуется уточнение и более тщательная проверка характеристик такого рода детекторов. Также,

поскольку детекторный модуль планируется применять в экспериментах с тяжёлыми ионами на фиксированной мишени с высокой частотой взаимодействия и множественностью, то неизбежно использование самотриггерующейся электроники, которая также массово не применялась, поэтому необходимо изучение её параметров и их влияние на работу детекторной системы. Побочным эффектом такой электроники, в частности, является выделение большого количества тепла, которое необходимо отводить из термостата, в который куда помещен детектор, поэтому необходимы дополнительные исследования теплопроводящих материалов.

Научная деятельность в данном отчёте разделена на несколько частей:

1. Пучковые испытания прототипов трековых модулей на ускорителях НУКЛОТРОН и Л-200 ОИЯИ;
2. Прототип системы охлаждения кремниевого трекового модуля эксперимента VM@N;
3. Лазерная установка для проверки качества трековых модулей типа СВМ для эксперимента VM@N.

1. Пучковые испытания прототипов трековых модулей на ускорителях НУКЛОТРОН и Л-200 ОИЯИ

Испытательные стенды основались на тестовых станциях, состоящих из т.н. 14.9×14.9 мм² «baby-сенсоров» с 256 стрипами на каждой стороне и 4 платах Front-End Board со считывающей электроникой STS-XYTER2 (рис. 2).

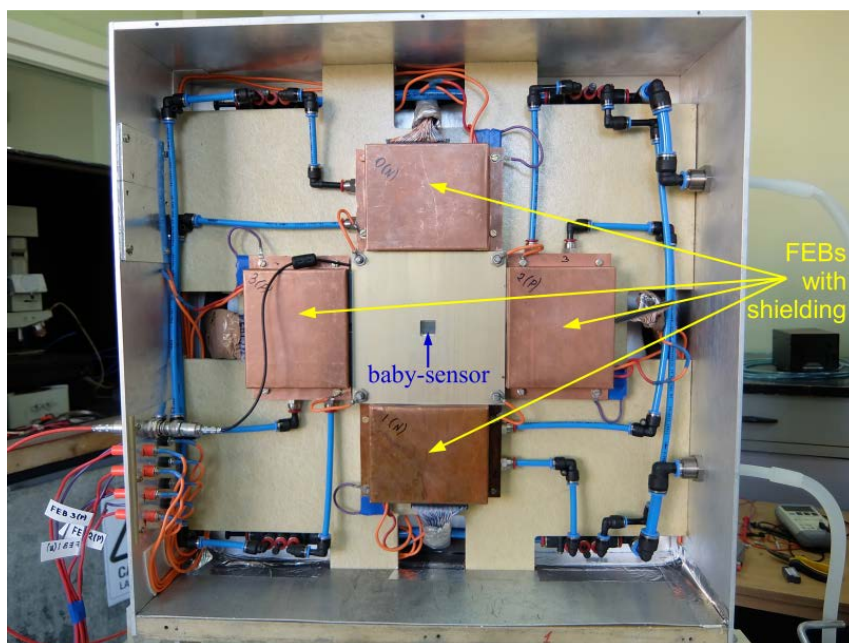


Рис. 2. Тестовая станция с «baby-сенсором» и 4 FEB с защитными экранами.

Целями пучковых испытаний были проверка полной цепи считывания, алгоритмов обработки данных, тестирование различных версий микросхем считывания STS-XYTER, тестирование систем временной синхронизации и сбора данных и сбор данных в двух режимах — потоковом и с временной меткой от триггерного сигнала. Пучковые испытания проводились в разных конфигурациях тестовых стендов и разных режимах работы ускорителей.

Непосредственная работа включала в себя разработку скрипта обработки данных для новой считывающей электроники STS-XYTER, включающего в себя обработку сырых данных и построения кластера, разработка пакета скриптов slow-control питания детекторов, проведение подготовки, сборка детекторных станций, проведение испытаний детекторных модулей на пучке ускорителя Л-200, разработка пакета скриптов управления питанием детекторных модулей с контролем напряжений, токов и температуры, разработка программы для исследования шумовых характеристик детекторного модуля на базе пакета

Root, обработка данных с испытаний и сравнение результатов с модельными расчётами.

В результате пучковых испытаний протестирована считывающая электроника на основе микросхем STS-XYTER, проверена стабильность и качество систем сбора данных и временной синхронизации на основе плат AFCK FPGA и программы эмулятора GBTx, рассинхронизация не превышает 10 нс, временная синхронизация сохранялась стабильной более 10 часов, проверена работа считывающей электроники в режиме свободного потокового сбора данных, собраны данные для анализа и настройки ускорителя ЛИНАК-200.

Данные результаты подтверждают работоспособность системы считывания, прототипов трековых модулей, алгоритмов сбора и обработки данных. Планируются новые пучковые испытания на ЛИНАК-200 с новыми прототипами трековых модулей, считывающей электроники, и новой цепью считывания, соответствующих финальному варианту, который будет реализовываться в эксперименте VM@N.

2. Прототип системы охлаждения кремниевого трекового модуля эксперимента VM@N

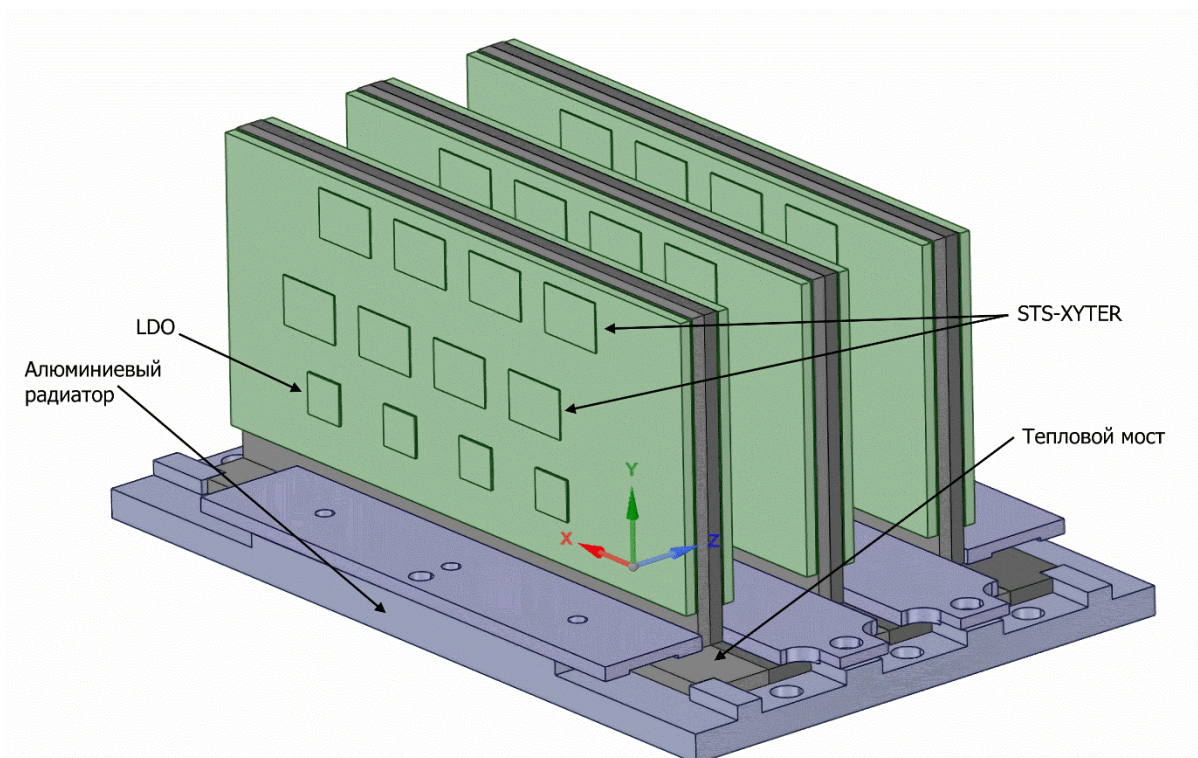
Составными элементами трековых станций являются двухсторонние микроstriповые сенсоры, соединенные с платами считывающей электроники сверхлегкими многослойными алюминиево-полиимидными кабелями. Все это образует так называемые модули, которые крепятся на опорные конструкции из углеродного волокна.

Основными источниками тепла на плате являются 8 специализированных микросхем STS-XYTER, каждая из которых выделяет тепловую мощность около 1.2 Вт. Поскольку микросхема считывания должна работать с аналоговыми сигналами малой амплитуды и

обеспечивать предельно низкий уровень шумов, на самой плате размещены четыре малошумящих стабилизатора напряжения с рассеиваемой мощностью ~ 0.8 Вт каждый. Общее энерговыделение достигает 13 Вт на одну плату электроники считывания.

При разработке системы охлаждения основной сложностью являлось ограниченное пространство внутри анализирующего магнита, где должны располагаться все сенсоры и вся считывающая электроника. В связи с этим необходимо было найти решение для отвода тепла, исходя из имеющего объема и с применением минимума тяжелых материалов. Кроме того, следовало полностью исключить какие-либо магнитные материалы.

Исследовались тепловые интерфейсы плат со считывающей электроникой. Схема теплового интерфейса показана на рис. 3. Платы крепятся на тепловые мосты через тонкий слой теплопроводящего материала. Тепловые мосты в свою очередь крепятся на платформу (алюминиевый радиатор), которая зафиксирована на пластине с водяным



охлаждением.

Рис. 3. Схема теплового интерфейса.

Большую часть исследований проводила студент Лыгденова Т.З.; работа аспиранта состояла в теоретической подготовке, обработке данных и подготовке и редактировании статьи (принята к публикации в журнал «Приборы и Техника Эксперимента»).

Для выбора оптимальных материалов и достижения минимального перепада температур между микросхемами и охлаждающей жидкостью были сделаны расчеты при помощи программного пакета ANSYS, а также проведены измерения с различными материалами тепловых мостов и клеев.

По результатам исследований выбраны материал и толщина теплового моста, а также тепловой интерфейс между алюминиевым радиатором и охлаждающей пластиной. Также планируются дальнейшие исследования самодельных клеев для подбора их оптимальных параметров.

3. Лазерная установка для проверки качества трековых модулей типа СВМ для эксперимента VM@N

Как уже было сказано ранее, двухсторонние микроstriповые детекторы до настоящего времени применялись весьма ограниченно, в связи с чем требуется уточнение и более тщательная проверка характеристик такого рода детекторов, аналогичная ситуация и с самотриггерующей считывающей электроникой.

Существует множество методов проверки сенсоров и электроники, в том числе и с помощью самой считывающей электроники. Тем не менее,

окончательным и самым надёжным способом проверки всего модуля, а также цепи считывания, является проверка на реальном излучении. Классическим способом является проверка с помощью радиоактивных источников, но сложность их изготовления и настройки, а также радиационная вредность, мешают их применению. Проверке на ускорителях мешают их размеры и сложность работы с ними. Поэтому было решено использовать лазерное излучение, которое относительно легко в применении и настройке.

Соответствующая лазерная установка для проверки качества детекторных модулей (см. рис. 4) состоит из нескольких подсистем. Первая из них — это система линейного перемещения, включает в себя координатный стол с креплениями для детекторного модуля, шаговый двигатель ДШИ-200-2 с валом для перемещения координатного стола, источник питания для шагового двигателя и драйвер управления шаговым двигателем (см. рис. 5), подключаемый к последовательному порту компьютера. Система управляется с помощью программного обеспечения, реализованного на высокоуровневом языке программирования Python 2.7 с использованием библиотеки pyserial.

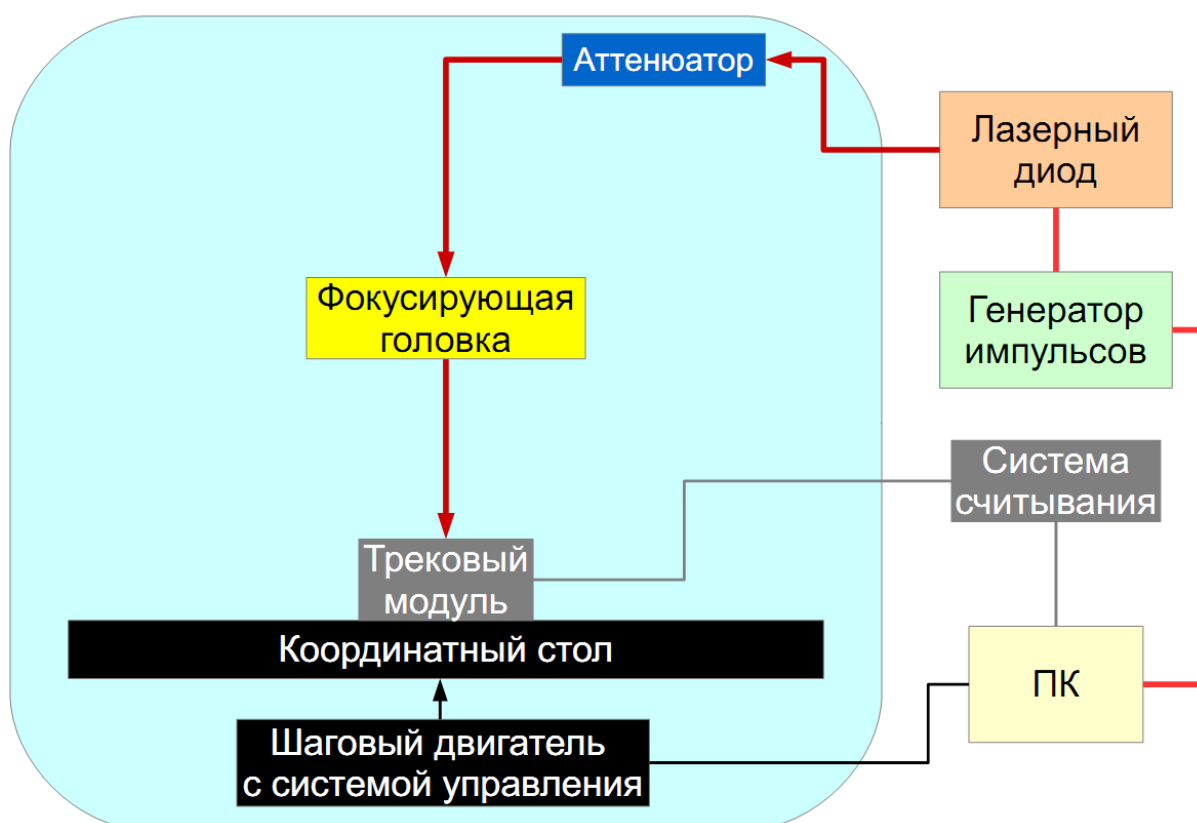


Рис. 4. Блок-схема лазерной установки для проверки качества детекторных модулей.

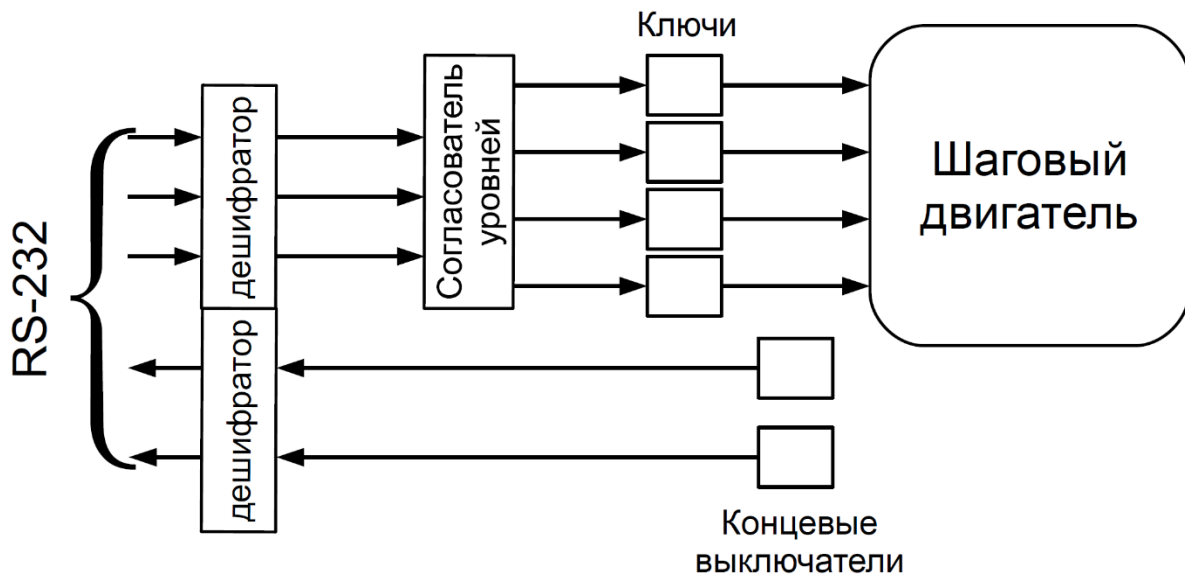


Рис. 5. Блок-схема драйвера управления шаговым двигателем.

Вторая — микроскоп с цифровой камерой, которая подключается через конвертер видеосигнала RCA в VGA к внешнему монитору.

Третья подсистема — оптическая, состоящая из фокусирующей головки, переменного аттенюатора, лазерного диода и генератора сигналов в роли источника питания лазерного диода. Генератор сигналов AFG3052C фирмы Tektronix, в свою очередь, подключается к компьютеру к порту Ethernet, который позволяет создавать последовательности прямоугольных импульсов длительностью 12 нс и амплитудой 1.9 В при периоде 1.2 мс и длительностях нарастания/убывания импульсов 7 нс. Такая длительность импульса соответствует времени сбора заряда кремниевого детектора, которое составляет 8 – 10 нс.

Лазерные диоды выбирались такие, которые смогут работать с настолько короткими импульсами напряжений, обладают подходящими длинами волн (один красного диапазона и второй инфракрасного диапазона с длиной волны около 1060 нм), имеющий выход в одномодовое

оптоволокно и с малой мощностью. Таким образом, были выбраны лазерные диоды FPL-635-14BF-1 и FPL-1064-14BF-1 производителя «НОЛАТЕХ» с выходом на одномодовое оптоволокно с диаметрами 4.5 и 5.6 мкм соответственно. Мощность в непрерывном режиме этих лазерных диодов 1 мВт достаточна и даже избыточна, поэтому были также закуплены переменные аттенюаторы VOA1064-FC и VOA630-FC производителя «Thorlabs» для соответствующих длин волн.

Энергия лазерного импульса для вышеуказанного режима работы генератора импульсов при известной мощности лазерных диодов в непрерывном режиме:

$$1\text{ мВт} \times 12\text{ нс} = 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \times 12 * 10^{-9} \text{ с} = 1.2 * 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Сравнение рассчитанной величины и энергий лазерных импульсов, соответствующих минимально ионизирующей частице (порядка 10^{-15} Дж), позволяет сказать, что максимальное ослабление необходимо не более чем в 10^5 раз, поэтому были выбраны соответствующие аттенюаторы с ослаблением до 50 дБ.

Также важной частью оптической системы является фокусирующая головка, в качестве которой используется конденсор PS-2 производителя «СоларЛС», который позволяет сфокусировать лазерный луч в пятно диаметром до 50 мкм и обладает фокусным расстоянием 4 см. Поскольку расстояние между полосами в используемых сенсорах равно 58 мкм, это позволяет сфокусировать лазерный луч между полосами и получить отклик, похожий на отклик от попадания одной ионизирующей частицы. Система фокусировки специально выбиралась достаточно длиннофокусной, чтобы обеспечить достаточный зазор между исследуемым модулем и оптической системой для уменьшения вероятности повреждения модуля.

В работу входили: разработка стенда, подбор и закупка компонентов (для чего посещалась выставка «Фотоника-2019»), разработка

программного обеспечения для управления питанием лазерных диодов и управления координатным столом, разработка и улучшение креплений для системы линейного перемещения, конденсора и модуля, тестирование и калибровка лазерных диодов, конденсора и системы линейного перемещения, изготовление и сборка каркаса и экранированного кожуха лазерного стенда, создание светопоглощающего покрытия экранированного кожуха, полная сборка стенда.

Собранный прототип лазерного стенда требует доработки, но уже позволяет фокусировать лазерные импульсы в пятно <60 мкм и управлять удалённо системой линейного перемещения и системой питания лазерных диодов, т.е., соответственно, также и лазерными импульсами.

~~По результатам~~ ~~вышеназванных~~ исследований ~~принято участие~~ ~~вдоложены на~~ конференциях «QFTNER-2017», «AYSS-2017», «QFTNER-2019» ~~с докладами~~, ~~в~~ ~~на~~ международной школе «ESHER-2019» ~~с~~ ~~(постерным постерный доклад)ом~~, ~~в~~ ~~на~~ коллаборационных совещаниях VM@N, а также ~~во~~ ~~на~~ ~~множестве~~ ~~нескольких~~ научных ~~семинаров~~ ~~семинарах~~ НИИЯФ МГУ и ОИЯИ.