

ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ТРЕКОВЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА BM@N

П. И. Харламов^{1, 2, *}, *М. О. Шитенков*²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описана экспериментальная установка на основе импульсных лазерных диодов для проверки трековых модулей для эксперимента BM@N. Идея лазерного стенда основана на имитации лазерным пучком прохождения ионизирующей частицы через трековый модуль. Трековые модули основаны на кремниевых микростриповых сенсорах и микросхемах считывающей электроники STS-XYTER. В установке применяются лазерные диоды с излучением на двух длинах волн — 635 и 1064 нм. В качестве источника питания лазерных диодов используется генератор импульсов. Излучение передается по одномодовому оптоволокну через аттенуатор на фокусирующую головку и затем фокусируется на сенсоре. Далее детекторный модуль перемещается вместе с координатным столом с целью измерения отклика от каждого стрипа.

An experimental setup for quality assurance of the BM@N experiment tracking modules based on pulsed diode lasers is described. The main idea of the setup is to simulate an ionizing particle traversing a silicon sensor of the module. The tracking modules are based on silicon microstrip sensors and readout electronics STS-XYTER ASICs. Diode lasers with wavelengths of 635 and 1064 nm are used in the setup. The lasers are powered by a pulse oscillator which can generate rectangular pulses with high frequency. Laser radiation is transmitted through a single-mode optical fiber and an attenuator to a focuser and then is focused on a tracking module sensor. After that, the module is moved along with a positioning table in order to measure signals from all strips and readout channels.

PACS: 07.77.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Основу любого современного эксперимента в области физики частиц составляют детекторы, регистрирующие излучения. Одной из важнейших задач в этих экспериментах является точное определение треков и импульсов ча-

*E-mail: pi.kharlamov@physics.msu.ru

стиц, а также вершин их взаимодействий. Самым распространенным видом детекторов для целей восстановления треков частиц и вершин их взаимодействий в настоящее время являются кремниевые стриповые детекторы.

Кремниевые односторонние стриповые трековые детекторы уже давно и успешно применяются в экспериментах в области физики высоких энергий, например в экспериментах ATLAS, CMS, ALICE и LHCb на Большом адронном коллайдере и в D0 и CDF на тэватроне. Тем не менее новые ускорительные эксперименты по физике тяжелых ионов, такие как BM@N и CBM@FAIR, ставят другие, более строгие условия к трековым системам из-за высоких частоты взаимодействия и множественности этих экспериментов, а также необходимости точного восстановления вторичных вершин взаимодействий, образованных короткоживущими частицами. В связи с вышесказанным было принято решение применять двухсторонние микростриповые детекторы, которые до настоящего времени использовались весьма ограниченно (частично только в D0 [1] и Delphi [2]). Поэтому требуются уточнение и более тщательная проверка характеристик такого рода детекторов. Поскольку детекторный модуль планируется применять в экспериментах с тяжелыми ионами на фиксированной мишени с высокой частотой взаимодействия и множественностью, то неизбежно использование бестриггерной электроники, которая тоже массово не применялась, поэтому необходимо изучение ее параметров и их влияния на работу детекторной системы.

В связи с этим было принято решение о разработке лазерного стенда для проверки качества трековых модулей, который может эмулировать пролет ионизирующей частицы через трековый модуль.

ТЕОРИЯ

Свет от лазерного диода состоит из фотонов, которые характеризуются, в первую очередь, своей энергией, которую можно выразить через длину волны излучения. Если выразить энергию фотона в электронвольтах, а длину волны — в нанометрах, то энергию можно получить по упрощенному выражению

$$E_{\text{ph}} [\text{эВ}] = \frac{1240 \text{ эВ} \cdot \text{нм}}{\lambda [\text{нм}]} . \quad (1)$$

Поглощение фотона происходит, если его энергия, по крайней мере, равна минимальному кванту энергии, который частица вещества может поглотить. В случае монокристаллической решетки кремния (который является рабочим веществом трекового сенсора) минимальная величина энергии соответствует ширине запрещенной зоны, равной 1,12 эВ при 300 К. Для фотонов с энергией меньше 1,12 эВ кремний прозрачен. То есть в соответствии с соотношением (1), для того чтобы излучение лазерного диода взаимодействовало

с сенсором, длина волны излучения должна быть менее 1107 нм. Однако поглощение фотонов с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, все еще возможно, если в запрещенной зоне есть уровни, образованные дефектами кристаллической решетки или примесями.

Следует отметить, что средняя энергия образования электронно-дырочной пары в кремнии при прохождении заряженной частицы или фотона с энергией, значительно превышающей ширину запрещенной зоны, не равна ширине запрещенной зоны 1,12 эВ и составляет 3,6 эВ. Различие этих величин объясняется тем, что фотоны с энергией, не сильно превышающей ширину запрещенной зоны, поглощаются полностью, тогда как остальные частицы теряют энергию в полупроводниках путем множества рассеяний на электронах атомов полупроводника. Часть потерянной энергии тратится на возбуждение кристаллической решетки, а другая часть — на образование электронно-дырочной пары.

При этом фотоны с энергией более 1,12 эВ не обязательно поглощаются кремнием. Вероятность этого взаимодействия зависит от того, насколько энергия фотона превышает ширину запрещенной зоны, и определяется коэффициентом поглощения, зависящим от длины волны излучения и материала, с помощью которого находится, какой процент фотонов, падающих на материал толщиной 1 см, будет поглощен. Также можно определить так называемую длину поглощения (или глубину проникновения) — толщину материала, необходимую, чтобы поглотить $1/e$ (примерно 37 %) падающего излучения. В данной лазерной установке используются лазерные диоды двух

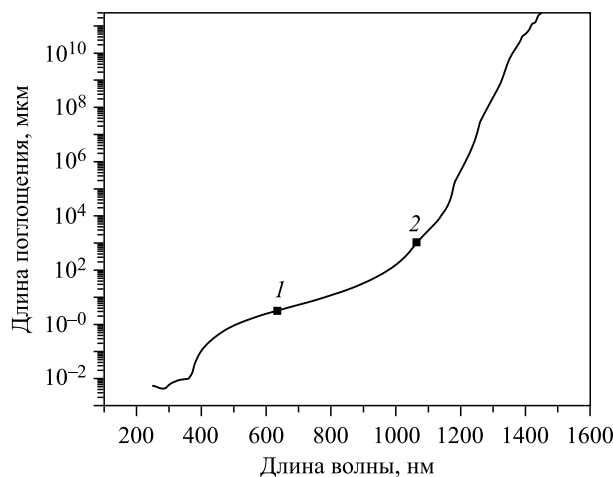


Рис. 1. Зависимость длины поглощения в кремнии от длины волны падающего излучения: 1 — длина волны 635 нм соответствует длине поглощения 3,17 мкм; 2 — длина волны 1064 нм соответствует 1040 мкм

длин волн — 635 и 1064 нм. Длина поглощения в кремнии для излучения с длиной волны 635 нм составляет 3,17 мкм, а с 1064 нм — 1040 мкм [3] (рис. 1).

В данном случае при поглощении фотона с энергией большей, чем ширина запрещенной зоны, эта энергия тратится на перенос электрона из валентной зоны на один из незаполненных уровней в зоне проводимости, в результате чего создается электронно-дырочная пара, которая затем и регистрируется детектором.

Трековый детектор рассчитан на детектирование релятивистских частиц, отклик от которых близок к отклику от минимально ионизирующей частицы (МИР), поэтому тестирование трековых модулей предполагает моделирование ситуации пролета такой частицы. Для этого следует провести расчеты энергии лазерного импульса, примерно соответствующего МИР, и необходимую калибровку оборудования.

В литературных источниках встречаются разные значения количества электронно-дырочных пар, выделяющихся в кремнии толщиной 300 мкм от пролета МИР, — от 20 000 до 25 000. Для оценки необходимой энергии лазерного импульса будем считать, что это 22 500 пар электрон-дырка.

Поскольку в установке используются лазерные диоды с длинами волн 635 и 1064 нм, то соответствующие им энергии квантов будут 1,95 и 1,17 эВ согласно соотношению (1). Предположим, что эффективность регистрации равна 100% и потерь в оптической системе нет. Тогда полные энергии лазерных импульсов, соответствующих МИР, будут равны

$$\begin{aligned} E_{635} &= 1,95 \text{ эВ} \times 22500 = 43,875 \text{ кэВ} = 7,0 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}, \\ E_{1064} &= 1,17 \text{ эВ} \times 22500 = 26,325 \text{ кэВ} = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (2)$$

Красный лазерный импульс, вероятно, полностью поглотится кремнием, но инфракрасный поглотится примерно на 25%, в оптоволоконных линиях и узлах есть некоторые небольшие потери (обычно порядка 0,3 дБ), часть лазерного луча отразится от металлизации или оксида кремния на поверхности и задней плоскости сенсора. Приблизительный учет этих потерь показывает, что энергию импульса нужно повысить на один-два порядка. Но и в этом случае энергия 10^{-14} – 10^{-13} Дж слишком мала, даже для мало-мощных лазерных диодов. Поэтому необходимо использование аттенуаторов.

ТРЕКОВЫЕ МОДУЛИ

Восстановление треков и импульсов частиц, образующихся в столкновениях атомных ядер, — это одна из центральных детекторных задач в экспериментах по столкновению тяжелых ионов. В будущем эксперименте VM@N

(Baryonic Matter at Nuclotron) задачу по восстановлению траекторий и импульсов частиц решает гибридный трекер, частью которого является кремниевая трековая система STS (Silicon Tracking System) [4].

Эксперимент BM@N — это первый этап проекта NICA, который служит задачам не только изучения КХД-материи и иных физических исследований, но и тестирования оборудования для проектов CBM@FAIR и NICA. Этот эксперимент имеет много общего с экспериментом CBM, в том числе похожую кремниевую трековую систему, состоящую только из четырех станций. Поскольку в BM@N ожидаются значительно меньшие, чем в CBM, загрузки сенсоров, то для STS BM@N выбраны сенсоры размерами 4×6 см и 6×6 см для внутренних и внешних областей станции соответственно. Сенсоры 4×6 см, прилегающие к выводу пучка, будут произведены с вырезом, чтобы предотвратить взаимодействие сенсоров с остаточным пучком и в то же время покрыть как можно больший телесный угол.

Модули STS состоят из кремниевых сенсоров, считывающей электроники и соединительных кабелей. Выбраны кремниевые микростриповые двухсторонние сенсоры толщиной 300 мкм, которые обладают 1024 стрипами на каждой стороне с шагом стрипов 58 мкм, от двух производителей — CiS (Германия) и Hamamatsu (Япония). Телесный угол между стрипами на двух сторонах составляет $7,5^\circ$, что сделано для уменьшения неопределенности при восстановлении треков. Шаг стрипов в 58 мкм ведет 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 объеме кремния, как и в случае односторонних. В условиях нехватки пространства двухсторонние сенсоры являются лучшим решением, несмотря на большую сложность в изготовлении и при считывании информации.

Другая важная часть трекового модуля — это его считывающая электроника. В нашем случае для этих целей используется самотриггирующаяся считывающая электроника, основанная на ASIC STS-XUTER — многоканальной бестриггерной считывающей микросхеме [5]. Каждая такая микросхема может считывать 128 каналов с сенсора. Один двухсторонний сенсор в трековом модуле имеет 1024 стрипа на каждой стороне и, соответственно, 2048 каналов считывания, что соответствует 16 микросхемам STS-XUTER, расположенным на двух платах Front-End Board-8 (FEB-8).

ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Идея лазерного стенда основана на имитации лазерным пучком прохождения ионизирующей частицы через трековый модуль. Подобный тест является последним перед установкой модуля в трековую систему. Именно такой тест

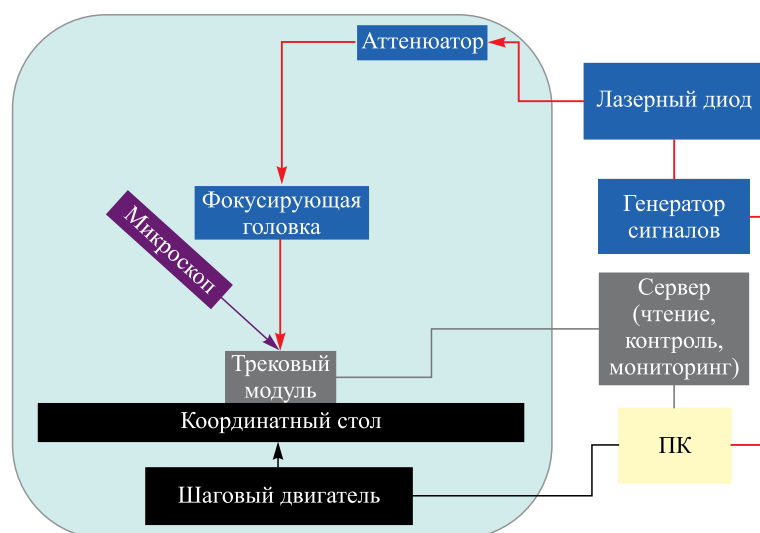


Рис. 2. Блок-схема лазерного стенда

может определить реальную работоспособность трекового модуля, основываясь на откликах от всех стрипов сенсора. Критерии отбора модулей разрабатываются. Предположительным критерием является «количество нечитаемых каналов считывания менее 1 %» по всем возможным причинам.

Лазерная установка для проверки качества детекторных модулей состоит из нескольких подсистем (рис. 2).

Первая подсистема состоит из микроскопа с цифровой камерой, которая подключается через конвертер видеосигнала RCA в VGA к внешнему монитору. Эта система используется только для дополнительной настройки остальных подсистем и не работает во время тестирования, чтобы исключить дополнительные шумы.

Вторая — это система позиционирования, которая 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, подключаемый последовательно к порту компьютера. Система управляется с помощью программного обеспечения, реализованного на высокоуровневом языке программирования Python 2.7 с использованием библиотеки pyserial. Движение координатного стола ограничено концевыми выключателями для лучшего позиционирования. Стол перемещается только вдоль одной оси, но этого достаточно для полного тестирования всех стрипов на сенсоре.

Третья подсистема охватывает чтение, контроль и мониторинг детекторного модуля*. Для чтения аналоговых сигналов с одной стороны сенсора используются 8 микросхем STS-XYTER v.2.1, установленных на платах FEB (Front-End Board). Передача данных, а также команд управления платами FEB реализована с помощью специализированного протокола STS-НСТSP через двухосевой кабель, который подключается к плате обработки данных GBTxEmulator. На этом этапе для конфигурации системы чтения, медленного контроля, синхронизации плат FEB и сортировки данных используется плата DPB (Data Processing Board), основанная на плате AFCK. Затем данные передаются по оптической линии в FLIB (First-Level Event Selector (FLES) Interface Board) для последующей обработки. Полное описание архитектуры системы сбора данных представлено в техническом дизайне трековой системы [4].

Четвертая подсистема — оптическая, она состоит 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 длительности нарастания/убывания импульсов 7 нс. Такая длительность импульса меньше типичного времени сбора заряда кремниевого детектора, которое составляет менее 20 нс.

Выбирались такие лазерные диоды, которые могут работать с настолько короткими импульсами напряжений, обладают подходящими длинами волн (один красного диапазона и второй инфракрасного с длиной волны около 1060 нм) и имеют выход в одномодовое оптоволокно и малую мощность. Таким образом, были выбраны лазерные диоды FPL-635-14BF-1 и FPL-1064-14BF-1 производителя «Нолатех» с выходом на одномодовое оптоволокно диаметром 4,5 и 5,6 мкм соответственно. Мощность в непрерывном режиме этих лазерных диодов 1 мВт достаточна и даже избыточна, поэтому были закуплены переменные аттенюаторы VOA1064-FC и VOA630-FC производителя «Thorlabs» для соответствующих длин волн диодов.

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

$$1 \text{ мВт} \times 12 \text{ нс} = 10^{-3} \text{ Дж/с} \cdot 12 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.} \quad (3)$$

Сравнение рассчитанных величин (3) и (2) позволяет сделать вывод о том, что максимальное ослабление необходимо не более чем в 10^5 раз, поэтому были выбраны соответствующие аттенюаторы с ослаблением до 50 дБ.

*Подробнее система считывания описана в докладах М. Шитенкова и Д. Дементьева.

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

Измеренные параметры лазерного стенда в основном соответствуют запланированным. Постоянство частоты и энергии импульсов обеспечивается по большей части качеством генератора сигналов. Поскольку лазерные диоды обладают малой мощностью и заключены в довольно крупный металлический корпус, то не происходит сильного нагрева диодов, благодаря чему значительно уменьшается нестабильность импульсов. Также планируется использовать 1000 импульсов на стрип для того, чтобы усреднить результаты, при этом влияние нестабильности импульсов незначительно.

Поскольку ионизирующие частицы обычно имеют малые эффективные электромагнитные радиусы, было бы лучше более тщательно фокусировать лазерные импульсы. Теоретически возможно сфокусировать лазерный луч из оптоволокна в пятно диаметром, равным диаметру оптоволокна (в нашем случае 4,5 и 5,6 мкм). На практике подобные фокусирующие системы очень громоздкие и дорогие. Так что 50-мкм фокусировка, предоставляемая фокусирующей головкой, достаточна для проведения тестирования трековых модулей, поскольку лазерные импульсы могут быть сфокусированы между стрипами. На самом деле тесты фокусирующей системы показали, что импульсы могут быть сфокусированы даже в пятно с эффективным диаметром примерно 40 мкм, так как гало может быть отрезано как фон.

Как было сказано ранее, шаг стрипов сенсора составляет 58 мкм, так что было бы предпочтительно иметь точность позиционирования 1 мкм. К сожалению, конфигурация шагового двигателя и вала системы позиционирования позволяет равномерно перемещать координатный стол только с полными шагами (по 20 мкм). К счастью, можно работать с шаговым двигателем в режиме четверти шага (5 мкм). Подобный режим работы не настолько стабилен, как режим полного шага, но может использоваться для коррекции перемещения. В конечном итоге подобная точность позиционирования достаточна для тестов модулей. Измеренное время тестирования модулей составляет примерно 30 мин, и оно должно быть уменьшено с улучшением системы считывания и программного обеспечения лазерного стенда. Это время зависит от ширины и частоты импульсов, а также от скорости вращения шагового двигателя. Поиск оптимальных значений этих зависимых величин является важной задачей.

Ожидаемое время тестирования модулей должно достигнуть 15–20 мин после всех улучшений.

Все достигнутые параметры удовлетворяют целям тестирования трековых модулей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге следует сказать, что все компоненты лазерного стенда протестированы. Разработано программное обеспечение для системы позиционирования и питания лазерных диодов. Проведена калибровка системы позиционирования, выбран наиболее стабильный режим работы шагового двигателя. Изготовлен и собран экранированный кожух с черным матовым покрытием. Проведена полная проверка работоспособности лазерного стенда. Ожидается большее количество серийных образцов трековых модулей для тестирования.

Авторы выражают благодарность Дмитрию Карманову и Михаилу Королеву из НИИЯФ МГУ за консультации по данной работе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-02-40113 и № 19-32-90001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahmed S. N. et al. (D0 Collab.). The D0 Silicon Microstrip Tracker // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 634, Iss. 1. P. 8–46; doi: 10.1016/j.nima.2010.11.121.*
2. *Chabaud V. et al. (DELPHI Collab.). The DELPHI Silicon Strip Microvertex Detector with Double Sided Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 368, Iss. 2. P. 314–332; doi: 10.1016/0168-9002(95)00699-0.*
3. *Green M. A., Keevers M. J. Optical Properties of Intrinsic Silicon at 300 K // Prog. Photovolt: Res. Appl. 1995. V. 3, No. 3. P. 189–192; doi: 10.1002/pip.4670030303.*
4. *Baranov A. V. et al. (BM@N STS Group). The Silicon Tracking System as Part of the Hybrid Tracker of the BM@N Experiment. Technical Design Report. Dubna, 2020. 101 p.*
5. *Kasinski K., Kleczek R., Szczygiel R. Front-End Readout Electronics Considerations for Silicon Tracking System and Muon Chamber // J. Instrum. 2016. V. 11, No. 2. P. C02024; doi: 10.1088/1748-0221/11/02/c02024.*