Диссертационный совет ОИЯИ.02.01.2024.П по физике частиц при Лаборатории

физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина



Шереметьев Алексей Дмитриевич

Разработка и изготовление трековых модулей

на основе кремниевых двухсторонних микрополосковых детекторов

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность: 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Оппоненты: д. ф.-м. н. Л. И. Шехтман к. ф.-м. н. С. И. Сучков Руководитель: к. ф.-м. н. Ю. А. Мурин

Дубна 2025

Актуальность темы

- Основной задачей проекта BM@N является поиск эффектов предполагаемого сжатия ядерной материи в файерболе, образующемся в центральных столкновениях тяжелых ионов высокой энергии.
- Уникальная возможность, по которой можно отслеживать состояние ядерной материи, образование подбарьерного и околобарьерного рождения Ξ⁻гиперона, для которого утверждение о доминантности двухстадийного наращивания странности до S=-2 считается общепринятым.
 В таком случае выход таких гиперонов напрямую зависит от среднего расстояния между первым и вторым центрами рассеяния, в свою очередь характеризующего степень сжатия среды, в которой эти рассеяния происходят.
- С экспериментальной точки зрения идентификация весьма редких событий рождения Ξ- гиперона установкой BM@N без использования современных технологий для трекинга заряженных частиц практически невозможна.

Цель работы: разработка и экспериментальное исследование конструктивно-технологических решений изготовления трековых модулей на основе микрополосковых кремниевых детекторов для широкоапертурных кремниевых систем на ускорительном комплексе NICA.

Задачи работы:

- Разработать оригинальную конструкцию и технологию изготовления кремниевых трековых модулей CBM/BMN;
- Исследовать рабочие характеристики компонентов кремниевого трекового модуля СВМ/ВМN в процессе изготовления;
- Изготовить предсерийную партию кремниевых трековых модулей;
- Выполнить апробацию качества изготовленных предсерийных кремниевых трековых модулей в испытаниях на лабораторных стендах и на пучке протонов 1 ГэВ;
- Создать исследовательскую инфраструктуру для разработки трековых модулей.

Требования к разрабатываемому КТМ

Разрабатываемый КТМ должен соответствовать следующим характеристикам:

- Пространственное разрешение: < 17 мкм;
- Динамический диапазон измерения амплитуды: 1 ÷ 15 фКл;
- Обработка сигналов с детектора при загрузке до 5 кГц/см²;
- Средний уровень шума в канале модуля: ~ 1000 е⁻;
- Соотношение Сигнал/Шум: не менее 10;
- Количество вещества в рабочем объеме модуля (X/X₀): < 1 %;
- Использование модуля для создания плоскостей апертур до 900 мм;
- Максимально допустимое число неработающих каналов в модуле: < 3%.





Особенности конструкции КТМ СВМ/ВММ



Кремниевый микрополосковый детектор



Измерение параметров детектора



A. Sheremeteva, E. Strletskaya, M. Korolev, I. Martinovsky, M. Merkin, Yu. Murin, N. Zamiatin «Progress in STS Sensor Characterization at JINR» CBM Progress Report 2017

Измерение параметров детектора



Планар ЕМ-6190А

8

Тестирование микросхемы STS-XYTER









A. Sheremetev, A. Kolozhvari, D. Dementev, M. Shitenkov, Yu. Murin "**The Quality** Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment", Physics of elementary particles and atomic nuclei Vol. 20 p. 613-618





Intel CPU

HDD

Тестирование микросхемы LDO



Тестовый стенд входного контроля микросхемы LDO





A. Sheremetev, R. Arteche Diaz and M. Shitenkow «QA tests of the LDOs developed for the assembly of the BM@N STS modules» // CBM Progress Report 2021, GSI Darmstadt (2022).





Ультралегкий аналоговый алюминиевый микрокабель

Характеристики алюминиевого микрокабеля:

Материал кабеля: FDI-A20;

Длина кабеля: 110 – 450 мм;

Кол-во сигнальных полосок: 64 шт.;

Шаг контактов: 116 мкм;

Толщина: 24 мкм (Al-10мкм + Pl 14 мкм);

Экранирующий слой: РІ 75 мкм 30% заполнения;

Количество слоев: 3 шт.;

Радиационная длина: 0,124% *X/X*₀;

Сопротивление сигнальной линии: 0,3-0,4 Ом/см;

Емкость сигнальной линии: 0,36 – 0,45 пФ/см;



V. Elsha, D. Dementev, A. Sheremetev «Towards length specification of ultra-light microcables for the BM@N STS» // CBM Progress Report 2018, GSI, Darmstadt, 2018

Особенности конструкции КТМ СВМ/ВММ

Зона ультразвуковой сварки



- 1. Проводник подачи напряжения смещения на детектор с окном для УЗС.
- 2. Окна для отрезания тестовой зоны кабеля.
- 3. 64 сигнальных алюминиевых проводника для УЗС.
- 4. Тестовая область (состоит из зоны для установки инструмента отрыва).
- 5. 11 окон с 10 проводниками для подбора параметров УЗС.
- 6. Зоны для вырезки тестовой области.



Тестовая область

Преимущества конструкции разработанного трекового модуля

- Высокая радиационная прозрачность конструкции в области взаимодействия;
- Используются специальные алюминиево-полиимидные микрокабели разной длины,
 что дает возможность располагать интегральные микросхемы входной электроники
 считывания данных в периферийной области кремниевой трековой станции;
- Планарная конструкция модуля позволяет создавать трековые системы большой площади;
- Возможность проектирования развитой системы охлаждения.



Выбор способа соединения микроэлектронных компонентов

Способы соединения микроэлектронных компонентов в точном приборостроении:

Термокомпрессионная сварка

Использование проволоки Au, высокое давление в точке сварки, подогрев до ~450 °C.

• Термозвуковая сварка

Проволока Au или Cu (Покрытие гальваникой Au, Ag, Pd, Ni), использование формер газа, формирование шарика разрядом.

• Ультразвуковая сварка

Сложность подбора параметров, необходимость адаптации технологии сварки для производства трековых модулей.

Лазерная пайка

Высокая степень отчистки поверхностей материалов

соединения.





Процесс ультразвуковой сварки проволокой

Основные параметры УЗС:

Диаметр проволоки: от 17 до 150 мкм;

Частота колебаний: 60-150 кГц;

Мощность УЗГ генератора: < 3 Вт;

Усилие прижима: 0 - 250 гр;

Среднее время сварки: 25-150 мксек;

Амплитуда движения электрода: 1-5 мкм.



Два ключевых фактора, влияющих на качество сварки:

- Правильное формирование профиля петли.
- ≻ Точный подбор параметров УЗ генератора;







Расчет оптимальных геометрических параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой



$$F_{wt} = F\left[\frac{1-\varepsilon}{\left(1+\frac{\varepsilon H}{h}\right)} \times \left(1+\frac{\varepsilon^2 d^2}{h^2}\right)^{1/2}\right],$$



Расстояние: d₁+ d₂ ≤ 1150 мкм

Высота микросхемы: Н = 200 мкм

d₁= 0,45(d); *h* = 1460 мкм



Зависимость усилия на отрыв от высоты перемычки при разных отношениях между двумя точками



A. Sheremetev, V. Leontiev, D. Dementev et al., **«Technological Process of Assembly and QA Testing of Silicone Tracking Modules with Silicon Strip Sensor**» // Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 466 – 480 (2024). https://doi.org/10.1134/S1547477124700456





Метод определения оптимальных параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой



Метод определения оптимальных параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой

Зависимость параметров амплитуды (А) и среднего значения (µ) аппроксимированной кривой



деформации от усилия отрыва

Распределение параметров среднего значения для каждого образца в эксперименте

Распределение параметров амплитуды для каждого образца в эксперименте

A. Sheremetev, V. Leontiev, D. Dementev et al., «Technological Process of Assembly and QA Testing of Silicone Tracking Modules with Silicon Strip Sensor» // Phys. Part. Nuclei Lett. 21,466 – 480 (2024).

Экспериментальные результаты ультразвуковой сварки 25 мкм поволокой





Расчетное значение на отрыв отличается от полученного в

процессе сборки на 15 %.



Принято считать, что минимальная прочность на разрыв качественного сварного соединения, полученного при помощи проволоки диаметром 25 мкм, составляет ≥ 8 сN (CERN BondLab) https://bondlab-qa.web.cern.ch

Набор тестовых образцов с разным качеством поверхности



а) Контрольный образец;

б) Образец с поврежденной поверхностью;в) Образец с загрязнениями.



Распределение усилия на отрыв в зависимости от качества поверхности свариваемых образцов для 25 мкм проволоки

Технология УЗС ЛАС сварки

Процесс линейной автоматической ультразвуковой сварки (ЛАС)





- ≻ Позиционирование электрода;
- > Заглубление электрода на уровень алюминиевой сварной площадки на детекторе;
- ▶ УЗ сварка проводника толщиной 10 мкм шириной 40 мкм происходит за 80 мксек;
- Процесс ультразвуковой сварки останавливается при достижении либо времени, либо диапазона деформации.

Набор оснастки для изготовления КТМ





Измерения плоскопараллельности рабочей поверхности вакуумного столика для детектора (не превышает 20 мкм на базе 62 мм).



Перепад высоты в области позиционирования микрокабеля (не превышает 30 мкм на базе 160 мм).

Результаты тестирования соединения компонентов, собранных по технологии ЛАС ультазвуковой сварки







Среднее значение усилия на отрыв для тестовой зоны с четырьмя точками сварного соединения на кристалле составило 18,4 ± 0,9 cN, что соответствует усилию **4,6 cN** для каждого проводника в образце.



Изготовление компонента «Микросхема – микрокабель» Позиционирование микросхемы УЗ сварка Функциональное тестирование



































Информационно-производственная система CMIS



Результаты изготовления предсерийной партии КТМ

Среднее время, необходимое на сборку 4 модулей, составило 90 часов.

Выход годных модулей составил 87,5 %.

Лабораторное тестирование КТМ

 R_p

Схема подключения кремниевого трекового детектора для измерения уровня шума в каналах

Испытания КТМ на пучке протонов 1 ГэВ

D. Dementev, A. Sheremetev, M. Shitenkov, V. Leontiev, I. Rufanov, Yu. Murin, «Characterization of Tracking Modules Based on DSSD Sensors at the SC-1000 Accelerator for the BM@N Project» // Physics of Particles and Nuclei Letters, 4, 21, 919 – 927, 2024. <u>https://doi.org/10.1134/S1547477124701000</u>

Пространственное разрешение КТМ

Координата	σ _{res} , мкм	σ _{mcs} , мкм	σ _d , мкм
X ₁	30.98 ± 0.04	23.3 ± 0.4	16.7 ± 0.4
U ₁	31.12 ± 0.04	23.3 ± 0.4	16.9 ± 0.4
X ₃	62.03 ± 0.09	53.3 ± 0.9	16.9 ± 0.8
U ₃	62.71 ± 0.09	53.3 ± 0.9	17.6 ± 0.8

D. Dementev, A. Sheremetev, M. Shitenkov, V. Leontiev, I. Rufanov, Yu. Murin, «Characterization of Tracking Modules Based on DSSD Sensors at the SC-1000 Accelerator for the BM@N Project» // Physics of Particles and Nuclei Letters, 4, 21, 919 – 927, 2024. <u>https://doi.org/10.1134/S1547477124701000</u>

Заключение

- Разработана оригинальная конструкция кремниевого трекового модуля на основе двухстороннего микрополоскового детектора с пространственным разрешением 16.7 ± 0.4 и возможностью размещения входной электроники считывания данных на расстоянии 110 - 450 мм от детектора.
- Для выполнения поставленных задач впервые в России была проработана технология ультразвуковой ЛАС сварки гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей с проводником сечением 10 мкм × 40 мкм.
- Экспериментально проверен метод оценки качества сварного соединения (разница расчетного значения и экспериментального составляет <15%).
- Разработана и изготовлена технологическая оснастка для производств трековых модулей.
- Представлены результаты пошагового функционального тестирования трековых модулей во время изготовления и результаты испытания изготовленных детекторов на протонном пучке 1 ГэВ.

- Оригинальная конструкция кремниевого трекового модуля на основе двухстороннего микрополоскового детектора с пространственным разрешением ~ 15 мкм и возможностью размещения входной электроники считывания данных на расстоянии 110 - 450 мм от детектора.
- Технология изготовления надежного электрического и механического соединения трехслойных аналоговых алюминиевое-полиимидных микрокабелей по технологии ЛАС.
- На практике доказана возможность изготовления кремниевых трековых модулей конструкции CBM/BMN.
- Модель оценки качества сварного соединения 25 мкм проволокой на основе зависимости деформации проводника в процессе УЗС.
- Результаты пошагового функционального тестирования трековых модулей во время изготовления, подтверждающие оптимизацию и высокий уровень отладки технологического процесса их изготовления.
- Исследовательская инфраструктура для изучения характеристик изготавливаемых кремниевых трековых детекторов в процессе производства.

Научная и практическая значимость

- Впервые в России разработан технологический процесс изготовления кремниевых трековых модулей с большой плотностью каналов на детекторе на основе технологии ЛАС ультразвуковой сварки для гибких алюминиево-полиимидных кабелей длиной до 450 мм, который позволяет обеспечить высокую плотность монтажа компонентов и способствует уменьшению массы пассивного вещества в рабочем объеме детекторной станции.
- Разработан метод расчета оптимальных параметров для ультразвуковой ЛАС сварки бескорпусных микросхем. При этом удалось достичь усилия на отрыв одного проводника F ≥ 9,64 грамма в 97 % случаев.
- Разработана методика пошагового тестирования бескорпусных микросхем на тестовых стендах в процессе изготовления трековых модулей.
- Впервые в ОИЯИ к задачам сборки модулей СВМ/ВМN была адаптирована информационнопроизводственная система СМIS.

Основные публикации

- Sheremetev, V. Leontiev, D. Dementev et al., «Technological Process of Assembly and QA Testing of Silicone Tracking Modules with Silicon Strip Sensor» // Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 466 – 480 (2024). https://doi.org/10.1134/51547477124700456
- Sheremetev A., Kolozhvari A., Dementev D. et al., «Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment» // Phys. Part. Nuclei Lett. 20, 613 – 618 (2023) https://doi.org/10.1134/S1547477123040593
- 3. D. Dementev et al., «In-beam tests of double-sided silicon strip detector modules for the BM@N experiment» // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol.1075, page. 170390, (2025). https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170390
- D. Dementev, A. Sheremetev, M. Shitenkov, V. Leontiev, I. Rufanov, Yu. Murin, «Characterization of Tracking Modules Based on DSSD Sensors at the SC-1000 Accelerator for the BM@N Project» // Physics of Particles and Nuclei Letters, 4, 21, 919 – 927, 2024. <u>https://doi.org/10.1134/S1547477124701000</u>
- 5. Ceballos C., Kolozhvari A., Sheremetev A. et al, «Construction Management Information System at JINR»
 // Phys. Part. Nuclei Lett. 20, 981 987 (2023). https://doi.org/10.1134/S1547477123050187

Участие в конференциях

- 1. 135th session of the Scientific Council, Joint Institute for Nuclear Research (Дубна, Россия).
- 2. 59th meeting of the PAC for Particle Physics, JINR (Дубна, Россия).
- Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, Российская академия наук (Дубна, Россия)
- LXX International conference «NUCLEUS 2020. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies» (Санкт-Петербург, Россия).
- 5. 6th Collaboration Meeting of the BM@N Experiment at the NICA Facility, JINR (Дубна, Россия).
- 6. 34th CBM Collaboration Meeting (Дармштадт, Германия).
- LXXI International conference «NUCLEUS 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies», Saint Petersburg State University (Санкт-Петербург, Россия).
- 8. 11th Collaboration Meeting of the BM@N Experiment at NICA (Дубна, Россия).
- 9. 36th CBM collaboration meeting, GSI (Дармштадт, Германия).

Благодарю за внимание!

Благодарность

Хотел бы выразить свою признательность участникам коллаборации BM@N и сотрудникам лаборатории ЛФВЭ, благодаря которым эта работа смогла состояться.

Я благодарен и глубоко признателен своему научному руководителю к. ф.-м. н. **Ю. А. Мурину** за постановку научных задач, профессиональную помощь и поддержку на всех этапах работы.

Хотел бы сказать большое спасибо оппонентам д. ф.-м. н. **Л. И. Шехтману** и **С. И. Сучкову** за их кропотливый труд по прочтению и оценке диссертационной работы.

Выражаю огромную благодарность к.т.н. **Н. И. Замятину**, д. ф.-м. н. **М. М. Меркину** и д. т. н. **В. Н. Борщеву** за внимательное прочтение работы и полезные комментарии, основанные на большом опыте в разработке и изготовлении кремниевых детекторов, которым они поделился.

Коллективу отдела №5 НМОКТС: **Д.В. Дементьеву, М.О. Шитенков, С.С. Себаллос, Д.Р. Артече, А.А Родригес, А.А.Коложвари, Д.И. Андрееву, В.В. Елше, Н.В.Сухов, С.В. Патроновой, Т.В. Семчуковой, Т.В. Андреев**,

Микросхема STS-XYTER

Характеристики микросхемы STS-XYTER:

Возможность работы в бестриггерной моде;

Размеры микросхемы: 10×6,75 мм;

Количество каналов: 128 + 2 тест;

Измерение амплитуды: ЗЧУ + Мед. форм. + 5 бит АЦП;

Измерение временной отметки: ЗЧУ + Быс. форм. + Дискрим. + 14 бит АЦП;

Шаг входных каналов: 116 мкм (Два ряда контактов).

Бескорпусное LDO

Характеристики микросхемы LDO:

Размеры микросхемы: 5,6× 5,8 мм;

Входное напряжение: 2,4 - 3,3 В;

Линейное выходное напряжение: 1,8 (1,2) B ± 3%;

Максимальный ток: 1,6 А;

Макс. перегрузка по току (более 1 сек): З А;

Температурная перегрузка: 120 °С;

Размер контактной площадки: 118 × 58 мкм;

Температурный дрейф: 100 мВ/В (-20..+50 °С);

Количество каналов: 43.

Плата считывающей электроники

Характеристики платы FEB и теплового моста:

Размеры платы: 40× 86 мм;

Количество слоев: 8 шт.;

Материал теп. моста: алюминий АД1 (210 Вт/(м×К)).

Место установки микросхемы STS-XYTER

Место установки микросхемы LDO

Метод определения параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой

Деформация. Параметр изгиба проводника в месте контакта с электродом, измеряющийся во время ультразвуковой сварки. Измеряется при помощи тензодатчика, установленного на волноводе (в граммах). Позволяет оценить на сколько деформировалась проволока во время сварки между электродом и свариваемым объектом.

Идеальные параметры деформации проводника в процессе сварки

Метод определения параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой

Возможность исследовать качество сварного соединения при помощи разрушающего метода тестирования (отрыва приваренной перемычки) не всегда оправданна. Для оценки качества ультразвукового соединения предлагается аналитическая методика оценки кривой деформации.

Метод определения параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой

 $y = y_0 + A \int_{-x}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt,$

- *у₀–* параметр смещения кривой*;*
- А амплитуда;
- μ среднее значение;
- σ стандартное отклонение;

Критерий х² для каждого образца в эксперименте

47

Метод определения параметров ультразвукового соединения алюминиевой проволокой

Зависимость параметров амплитуды (А) и среднего значения (µ) аппроксимированной кривой

деформации от усилия отрыва

Распределение параметров среднего значения для каждого образца в эксперименте

Распределение параметров амплитуды для каждого образца в эксперименте

A. Sheremetev, V. Leontiev, D. Dementev et al., «Technological Process of Assembly and QA Testing of Silicone Tracking Modules with Silicon Strip Sensor» // Phys. Part. Nuclei Lett. 21,466 – 480 (2024).