

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
им. В.И. ВЕКСЛЕРА и А.М. БАЛДИНА



На правах рукописи

Шереметьев Алексей Дмитриевич

**Разработка и изготовление трековых модулей
на основе кремниевых двухсторонних микрополосковых детекторов**

Специальность 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна – 2025

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель — **Мурин Юрий Андреевич**
кандидат физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория физики высоких энергий, Научно-методический отдел кремниевых трековых систем,
Начальник отдела

Официальные оппоненты — **Шехтман Лев Исаевич**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук,
Кафедра физики элементарных частиц,
Главный научный сотрудник

Сучков Сергей Иванович
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Лаборатория гамма-астрономии, Отдел космических
излучений, Отделение ядерной физики и астрономии,
Старший научный сотрудник

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной
сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке
ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Учёный секретарь диссертационного
совета ОИЯИ по физике частиц,
кандидат физико-математических наук



В.А. Артюхин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке конструкции и технологии изготовления кремниевых трековых модулей, состоящих из двухсторонних микрополосковых кремниевых детекторов и считывающей электроники, соединенной с каналами детектора при помощи сверхлегких алюминиевых микрокабелей. Изготовленные трековые модули предназначены для определения траекторий вторичных частиц, их импульсов и вершин рождения. В рамках работы осуществлялось исследование характеристик кремниевых модулей и анализировались результаты тестирования модулей в процессе и после изготовления, а также результаты, полученные после предсерийной сборки трековых модулей для кремниевой трековой системы эксперимента BM@N.

Результаты диссертационного исследования использовались для создания первой плоскости кремниевой трековой станции (STS) для проекта BM@N, которая была успешно интегрирована в экспериментальную установку. Ключевые мировые научные центры занимаются созданием установок на основе полупроводниковых детекторов, что подтверждает интерес к этой области. Создание детектирующей системы современного уровня, удовлетворяющей требованиям эксперимента BM@N, является сложной технологической задачей, которая была успешно решена.

Актуальность разработки данного типа детекторов в настоящее время подтверждается регулярным проведением специальных научно-методических конференций с публикацией большого числа статей по данной тематике. Особый интерес у ученых вызывает проблема разработки технологии изготовления трековых модулей на основе кремниевых микрополосковых детекторов с вынесением считывающей электроники из чувствительной зоны трековой системы.

Работа выполнена в рамках темы проблемно-тематического плана ОИЯИ 02-0-1065-2007/2023 «Комплекс NICA: создание комплекса ускорителей, коллайдера и экспериментальных установок на встречных и выведенных пучках ионов для изучения плотной барионной материи, спиновой структуры нуклонов и легких ядер, проведения прикладных и инновационных работ» на базе существующего ускорительного комплекса Лаборатории физики высоких энергий.

Целью диссертационной работы является разработка и экспериментальное исследование конструктивно-технологических решений изготовления трековых модулей на основе микрополосковых кремниевых детекторов для широкоапертурных кремниевых систем на ускорительном комплексе NICA. Диссертационная работа нацелена на разработку перспективных технологических этапов сборки бескорпусных микросхем с применением

ультразвуковой ЛАС технологии сварки, а также проволоочной технологии сварки с последующим исследованием надежности монтажа на полупроводниковые кристаллы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен краткий обзор физических принципов работы всех элементов кремниевого модуля и обозначены цели его применения в эксперименте BM@N.
2. Разработана оригинальная конструкция, предложена технология изготовления с возможностью серийного производства модулей CBM/BMN с пространственным разрешением не хуже 15 мкм и скоростью считывания до 50 кГц на основе кремниевого микрополоскового детектора с применением сверхлегких алюминиево-полиимидных микрокабелей, используемых для выноса входной электроники считывания из зоны повышенной радиационной нагрузки. Предполагается, что изготовленные модули войдут в состав первой плоскости модернизированной трековой системы установки BM@N.
3. Изготовлена предсерийная партия кремниевых трековых модулей.
4. Исследованы рабочие характеристики кремниевых трековых модулей и оптимизирован технологический процесс их изготовления. Усовершенствована методика измерения рабочих характеристик компонентов кремниевого трекового модуля CBM/BMN в процессе изготовления.
5. Адаптирована к задачам сборки модулей CBM/BMN информационно-производственная система CMIS (Construction Management Information System) для управления и мониторинга одновременного изготовления модулей на нескольких географически удаленных друг от друга сборочных участках.
6. Создана исследовательская инфраструктура, позволяющая детально изучать характеристики разрабатываемых трековых детекторов.
7. Выполнена апробация качества изготовления предсерийных кремниевых трековых модулей в испытаниях на лабораторных стендах и на пучке протонов 1 ГэВ.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – кремниевый микрополосковый трековый модуль, основными составляющими которого являются кремниевый двухсторонний микрополосковый детектор, комплект гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей для передачи аналогового сигнала, две платы фронтальной (входной) считывающей электроники, СИМС STS-XYTER, бескорпусные линейные регуляторы напряжения, комплект радиаторов охлаждения и защитных экранов.

Предмет исследования – технология изготовления трековых модулей с высокой плотностью каналов детектора и использованием бескорпусных микросхем считывания данных с них.

Новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые в ОИЯИ 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 ($0,023\% \ X/X_0$ на один слой микрокабелей), приводящего к снижению пространственного разрешения треков всей трековой станции.
2. Предложен новый метод расчета оптимальных технологических параметров ультразвуковой сварки, которые подтверждены практически с помощью разрушающего и оптического тестирования, за счет чего удалось автоматизировать процесс сборки гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей и повысить число выхода годных трековых модулей.
3. Впервые в ОИЯИ к задачам сборки модулей CBM/BMN была адаптирована информационно-производственная система CMIS.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана оригинальная конструкция кремниевого трекового модуля на основе двухстороннего микрополоскового детектора с пространственным разрешением не хуже 15 мкм и возможностью удаленного от детектора (до 450 мм) размещения входной электроники считывания данных [A4, A9, A10].
2. На практике доказана возможность изготовления трекового модуля с использованием гибких аналоговых алюминиево-полиимидных микрокабелей, удовлетворяющих техническим требованиям кремниевых трековых модулей CBM/BMN [A10]. Разработана технология изготовления надежного электрического и механического соединения трехслойных алюминиево-полиимидных микрокабелей с контактными площадками кристаллов на кремниевом микрополосковом детекторе и СИМС для чтения данных [A1, A7, A8, A11].

3. Разработан метод технологии ультразвуковой ЛАС сварки гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей, позволяющий соединить 2048 каналов микрополоскового детектора со считывающей электроникой на расстоянии до 450 мм [A1, A5, A11].
4. Разработана и экспериментально проверена математическая модель оценки качества сварного соединения 25 мкм проволокой на основе зависимости деформации проводника в процессе УЗ соединения. Данный алгоритм позволяет оценить качество ультразвукового соединения без применения разрушающего механического тестирования [A1].
5. Представлены результаты пошагового функционального тестирования трековых модулей во время изготовления, подтверждающие оптимизацию и высокий уровень отладки технологического процесса их изготовления [A2, A6].
6. Создана исследовательская инфраструктура для изучения характеристик изготавливаемых кремниевых трековых детекторов в процессе производства [A9]. Адаптирована информационно-производственная система CMIS в ОИЯИ, открывающая возможность автоматизации контроля производства сложных детекторных систем на географически удаленных производственных площадках [A3].

Научно-практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная конструкция кремниевого трекового модуля с использованием гибких алюминиево-полиимидных кабелей толщиной 24 мкм, соединенных с считывающей электроникой и кремниевым микрополосковым детектором. Планарная конструкция модуля позволяет создать трековую систему большой площади с возможностью вынесения считывающей электроники из зоны повышенного радиационного воздействия. Использование гибких алюминиево-полиимидных кабелей обеспечивает создание трековой системы с радиационной длиной $X/X_0 \leq 2\%$, что позволяет минимизировать эффект многократного кулоновского рассеяния регистрируемых частиц и тем самым повысить пространственное и импульсное разрешение всей системы.
2. Разработан метод изготовления микрополосковых трековых модулей с повышенной плотностью каналов двухстороннего кремниевого детектора (2048 микрополосок с шагом 58 мкм) с использованием технологии ультразвуковой ЛАС сварки контактных площадок. Описан метод расчета оптимальных параметров для ультразвуковой сварки 25 мкм алюминиевой проволокой бескорпусных микросхем. При этом удалось достичь усилия на отрыв одного проводника $F \geq 9,64$ грамма в 97 % случаев.
3. Разработана методика пошагового тестирования бескорпусных микросхем на тестовых стендах в процессе изготовления трековых модулей, что открыло возможность

ремонтпригодности собираемых изделий в процессе изготовления и тем самым увеличило число выхода годных модулей в предсерийной партии. Разработан комплект технологической оснастки для изготовления, тестирования, транспортировки и хранения трековых модулей.

4. Реализована конструкция защитного экрана кремниевых трековых модулей из безадгезивных алюминиево-полиимидных фольговых диэлектриков, в результате чего удалось достичь соотношение сигнал/шум более 23 для трековых модулей с длиной аналогового кабеля 155 мм.
5. Телескоп на основе кремниевых трековых модулей CBM/BMN протестирован на протонном пучке Синхроциклотрона СЦ-1000 (ПИЯФ, Гатчина), где по результатам эксперимента была продемонстрирована разрешающая способность изготовленного кремниевого модуля ($15,4 \pm 0,4$ мкм) с эффективностью регистрации более 95 % для протонов с энергией 1 ГэВ.

Достоверность результатов данной работы подтверждается экспериментальными данными, а также успешной эксплуатацией изготовленных модулей в лабораторных стендах и при проведении тестовых испытаний на выведенных пучках в ОИЯИ и ПИЯФ, которые хорошо согласуются с проведенными расчетами и результатами других исследований.

Апробация работы. На основе реализованной методики изготовления кремниевых трековых модулей была изготовлена первая кремниевая плоскость на основе модулей CBM/BMN для установки в дипольный магнит СП-41 на расстоянии 70 мм от мишени.

Публикации. Результаты работы были высоко оценены на 135-й сессии Ученого совета ОИЯИ и неоднократно представлялись на общелабораторных и методических семинарах ЛФВЭ ОИЯИ. Материалы диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, 5 из которых в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК и/или международных баз данных Web of Science и/или Scopus [[A1-A4](#), [A10](#)], по результатам работы был получен патент на изобретение № 281624.

Структура и объем работы. Диссертация составляет 148 страниц и состоит из введения, 4 глав и заключения. Текст работы содержит 79 рисунков и список цитируемой литературы из 101 источника.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели, задачи и научная новизна работы, описывается её практическая значимость.

В первой главе представлена характеристика создаваемого комплекса NICA на основе сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон – М. Приведены основные характеристики и перечислены основные физические задачи, поставленные перед экспериментальными установками, входящими в состав комплекса. Представлена структура установки BM@N и кратко описаны ее ключевые детекторные системы. Дано обоснование необходимости применения кремниевых микрополосковых детекторов в составе установки. В соответствии с физическими задачами эксперимента BM@N сформулированы требования к кремниевой трековой станции и ее ключевым компонентам. Кратко перечислены используемые детекторные системы в установке BM@N и описан принцип работы кремниевого детектора. Особое внимание уделено описанию и особенностям использования двухстороннего микрополоскового кремниевого детектора, являющегося базовым позиционно-чувствительным детектором КТС, создаваемой для BM@N.

Установка BM@N является первой начавшей сбор физических данных на комплексе NICA. Конструкция установки с описанием ее подсистем представлена на рисунке 1.

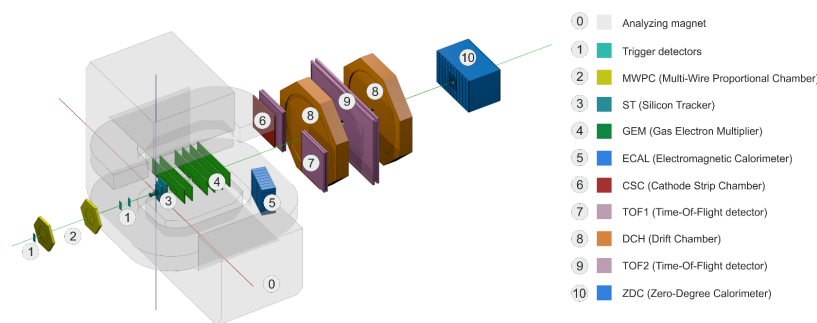


Рисунок 1 – Состав установки BM@N на конец 2023 года [1].

Планируемая модернизация установки связана как с увеличением гранулярности первых плоскостей кремниевой системы, так и с существенным увеличением быстродействия системы считывания данных с них. Цель проведения – идентификация редких процессов образования тяжелых гиперонов Ξ^- и Ω^- при околороговых значениях энергий сталкивающихся тяжелых ядер Bi в центральных столкновениях, характеризующихся большим комбинаторным фоном вторичных частиц. Оценкой желаемой конкурентоспособности может считаться конкурентоспособность с другими установками, работающими и планируемыми к постройке в

этой области. Интенсивность реакции, при которой может эксплуатироваться модернизированная установка BM@N, представлена на рисунке 2.

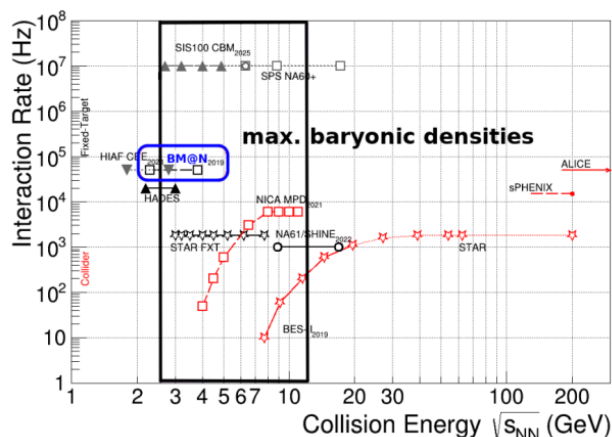


Рисунок 2 – Эксперименты с тяжелыми ионами высокой энергии: планируемые и достигнутые интенсивности взаимодействий энергии на существующих и строящихся машинах, работающих в разных диапазонах энергий, доступных в системе центра масс сталкивающихся ионов [2].

Как следует из данных рисунка 2, энергетический диапазон пучка тяжелых ионов, доступных для исследований коллаборацией BM@N, располагается в области, перекрывающей диапазоны, доступные для исследований как проводимых в GSI (Германия) на ускорителе SIS-18, так и планируемых экспериментов на строящемся ускорителе SIS-100.

Это обстоятельство представляется весьма выигрышным для BM@N в случае, если быстродействие установки будет существенно улучшено и станет возможным накопление данных по интенсивности регистрируемых событий с частотой до 50 кГц. В этом направлении модернизации BM@N наиболее важным элементом представляется улучшение скорости считывания данных с плоскостей трековой системы, расположенных на наиболее малых расстояниях от мишени. Учитывая кинематические особенности методики с существенной угловой неоднородностью испускаемых продуктов реакции и большой множественностью вторичных в центре столкновения ядер, крайне желательно также повысить гранулярность системы.

Конструкция действующей трековой системы, состоящей из: 4^x плоскостей FSD детектора и 7^{mi} плоскостей GEM детектора (рис. 3а). Конструкция модернизированной трековой системы с добавлением вершинной плоскости на основе микрополосковых модулей типа CBM/BMN повышенной гранулярности и быстродействия (рис. 3б).

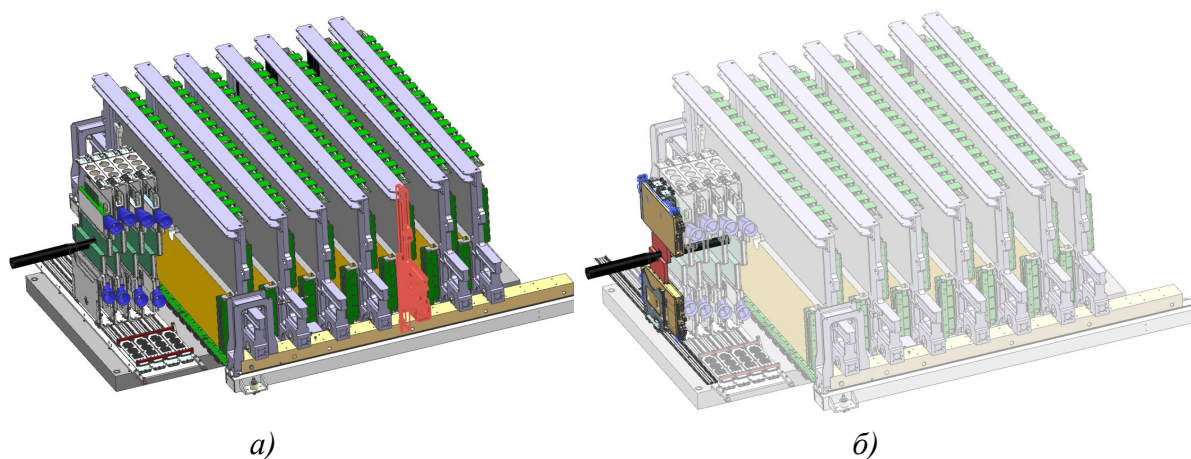
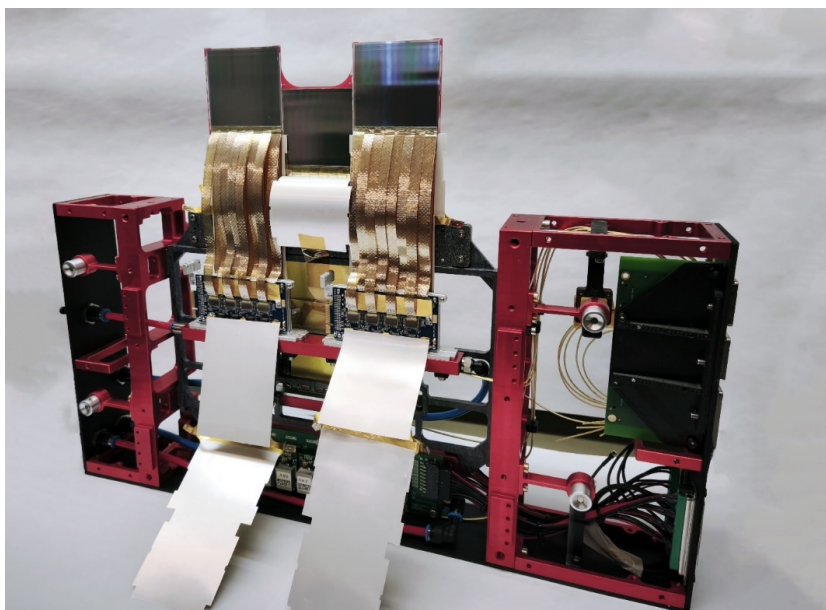


Рисунок 3 – Конструкции существующей и модернизированной трековой системы BM@N.

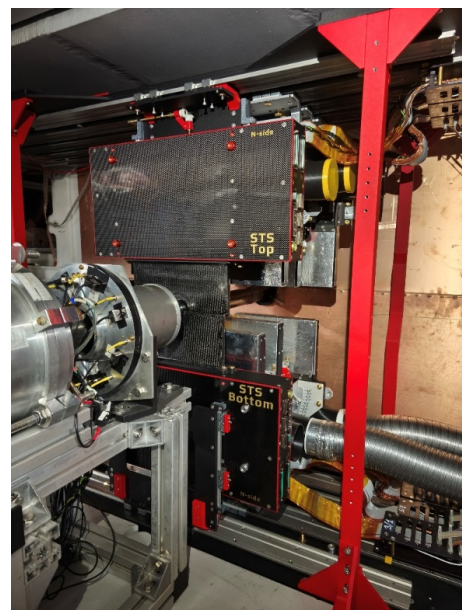
В базовой конфигурации центральная трековая система, состоящая из FSD и GEM детекторов, способна обеспечить реконструкцию треков заряженных частиц с разрешением по импульсу не хуже 3 %, что позволит ей выделять и исследовать общие характеристики вторичных частиц в реакциях легкой и средней массы ионов. Исследование реакций с $Bi + Bi$ потребует увеличения гранулярности КТС. В связи с этим на первом этапе модернизации установку BM@N предполагается дополнить одной плоскостью на основе кремниевых трековых микрополосковых детекторов типа CBM/BMN.

Предполагается, что модернизированная конструкция трековой системы улучшит импульсное разрешение не менее чем в 2 раза, что позволит BM@N выйти на пучок ускоренных ионов Bi . Конструкция предполагаемой вершинной станции представлена на рисунке 4.

Ключевыми технологическими особенностями создаваемой дополнительной вершинной плоскости, помимо трековых детекторов с большой плотностью микрополосок, является применение инновационных материалов при создании механической части детектора, а также системы быстрого считывания, основанной на безтриггерном снятии информации с детектора, составляющих позиционно-чувствительную плоскость станции.



а)



б)

Рисунок 4 – Конструкция созданной вершинной плоскости для модернизации трековой системы $BM@N$ на основе микрополосковых модулей типа CBM/BMN.

а) Полуплоскость с 3-мя модулями CBM/BMN, системой питания, охлаждения и считывающей электроникой; б) Вершинная плоскость STS, установленная на расстоянии 70 мм от мишени в дипольный анализирующий магнит СП-41 на установке $BM@N$.

Во второй главе детализируется конструкция трекового модуля CBM/BMN, рассматриваются основные характеристики ключевых компонентов, используемых при изготовлении кремниевого трекового модуля. Представлена конструкция кремниевого трекового модуля с использованием гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей и двухстороннего кремниевого детектора с высокой плотностью микрополосок. Описаны этапы и методы входного контроля ключевых компонентов, используемых в конструкции трекового модуля, приведены результаты измерений их характеристик. Разрабатываемый кремниевый трековый модуль должен соответствовать следующим характеристикам:

- Пространственное разрешение: < 16 мкм;
- Динамический диапазон измерения амплитуды: $0 - 15$ фКл;
- Временное разрешение < 10 нсек;
- Обработка сигналов с детектора при загрузке до 5 кГц/см²;
- Средний уровень шума в канале модуля: ~ 1000 е⁻;
- Соотношение Сигнал/Шум: не менее 10;
- Энергопотребление: < 10 мВт/канал;
- Количество вещества в рабочем объеме модуля (X/X_0): < 1 %;

- Максимально допустимое число не работающих каналов в модуле: < 62 шт.;
- Использования модуля для создания плоскостей апертур до 900 мм.

Концепция, а затем и сама конструкция трекового модуля разработана с учетом возможности использования его в широкоапертурных трековых системах, оптимизированных для использования в экспериментах на покоящихся мишенях. Для этого детектор, генерирующий сигналы, и входная электроника были разнесены на варьируемое расстояние с помощью специального сверхлегкого полоскового микрокабеля, передающего сигналы с микрополосок детектора на входные контакты входной электроники. Фотография модуля с обозначениями основных компонентов представлена на рисунке 5 .

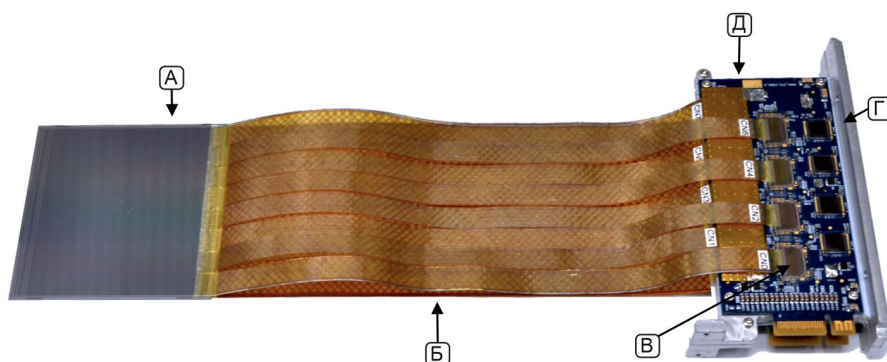


Рисунок 5 – Общий вид кремниевого трекового модуля STS:

- а) кремниевый двухсторонний микрополосковый детектор; б) сверхлегкие алюминиево-полиимидные микрокабели; в) специализированная интегральная микросхема STS-XYTER; г) микросхемы линейного регулятора напряжения LDO; д) интерфейсная плата FEB.*

Ключевой особенностью конструкции трекового детектора CBM/BMN является использование алюминиевых микрокабелей значительной длины (от 110 мм до 450 мм) для передачи аналогового сигнала от детектора к считывающей электронике. Длина кабеля зависит от местоположения детектора в станции, что делает возможным создание позиционно-чувствительных плоскостей с большой площадью из модулей такой конструкции. Конструкция такого типа позволяет сосредоточить всю считывающую электронику на торцах системы, что минимизирует массу вещества в позиционно-чувствительной области части модуля и позволяет исключить температурные влияния тепловыделяющей части входной электроники системы считывания на детектор в процессе его эксплуатации КТС. Конструкция из набора специально разработанных микрокабелей, используемых для соединения выходных контактных площадок детектора с входными каналами считывающей электроники в сечении, представлена на рисунке 6.

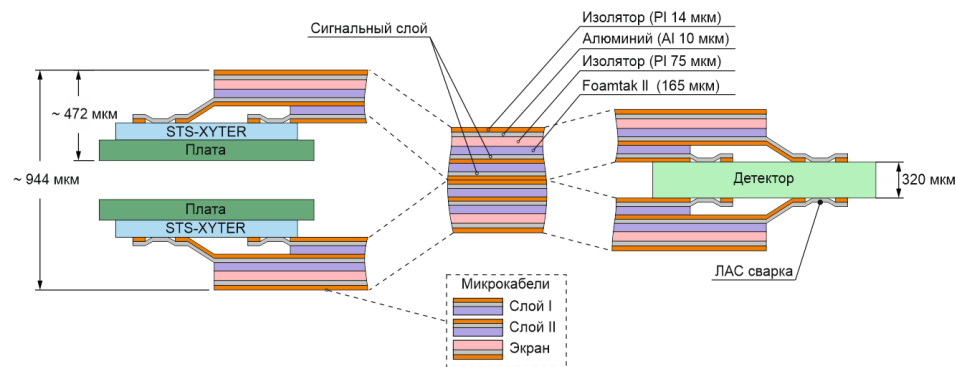


Рисунок 6 – Сечение специализированных полосковых микрокабелей трекового модуля CBM/BMN и способ соединения с кремниевым двухсторонним детектором и входной электроникой системы считывания данных.

Каждый кремниевый детектор проходит сертификацию перед началом изготовления трекового модуля. Сертификация детекторов производилась на специализированной установке ЭМ-6190А (Планар), изготовленной по заказу ОИЯИ [3]. Для расчета напряжения полного обеднения кремниевого детектора (V_{fd}) измеряется вольт-фарадная характеристика. Измерение позволяет определить наличие дефектов на границе слоев в полупроводнике. Результаты измерения зависимости тока утечки от напряжения (ВАХ) и емкости (ВФХ) детектора от напряжения смещения представлены на рисунке 7.

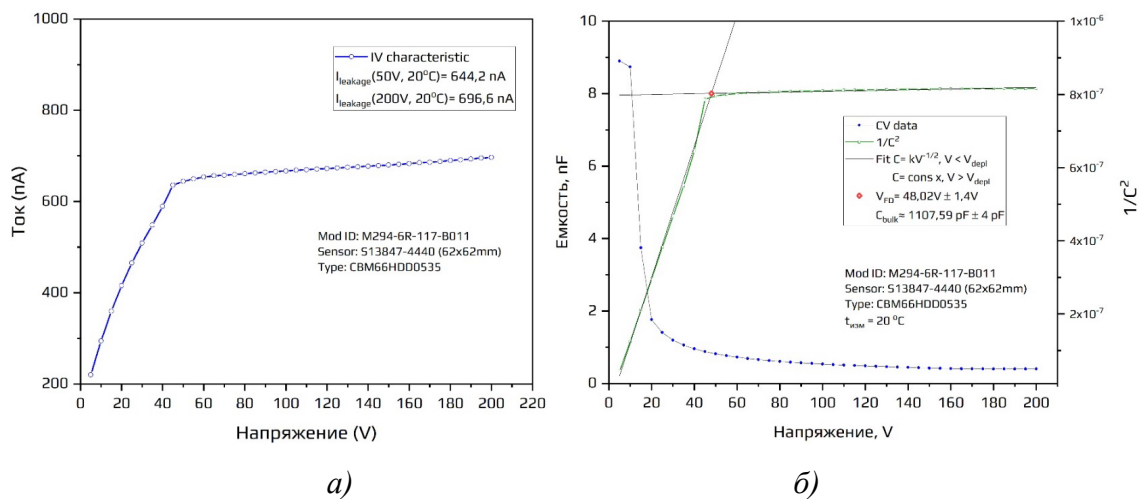


Рисунок 7 – Результаты входного контроля микрополоскового детектора:

- а) результаты измерения вольт-амперной характеристики детектора;
- б) результаты измерения вольт-фарадной характеристики детектора.

Заряд, выделяемый частицей в объеме детектора, собирается на обкладках, имплантированных в кремниевый детектор конденсаторов. Применение двойного слоя окисла позволяет достичь высоких значений емкости имплантированных разделительных конденсаторов ($\sim 30 \text{ пФ}$) и минимизирует вероятность пробоя. Конденсатор не является

изолированной структурой в объеме детектора, а образует емкостную связь с соседними микрополосками (рис. 8).

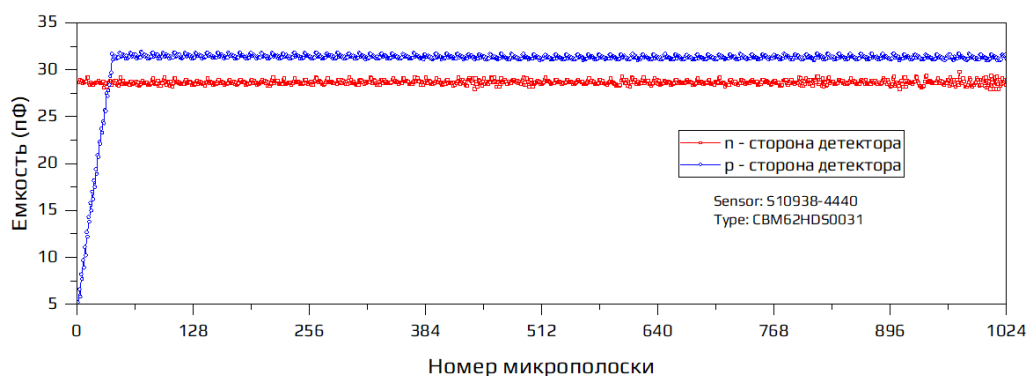


Рисунок 8 – Результаты измерения емкости микрополоски для разных сторон детектора при фиксированной частоте 1 кГц. Характерный спад емкости на p-стороне детектора обусловлен уменьшением длин угловых микрополосок детектора.

Так как возможность ремонта модуля после изготовления довольно ограничена для того, чтобы гарантировать высокую степень выхода годных модулей, требуется проводить входной контроль каждой считывающей микрополоски. Результаты измерения емкости микрополоски для каждой стороны детектора представлены на рисунке 8.

Во избежание выхода из строя входных цепей фронтальной электроники, помимо емкостных измерений, производится контроль тока утечки интегрированных в топологию детектора конденсаторов связи на каждой микрополоске при разном напряжении (рис. 9). В тонких слоях диэлектрика в структуре конденсатора детектора существует вероятность образования «дырок», что может привести к выходу из строя каналов считывания входной электроники. Поэтому в процессе сборки такие каналы не соединяются с входными цепями электроники считывания.

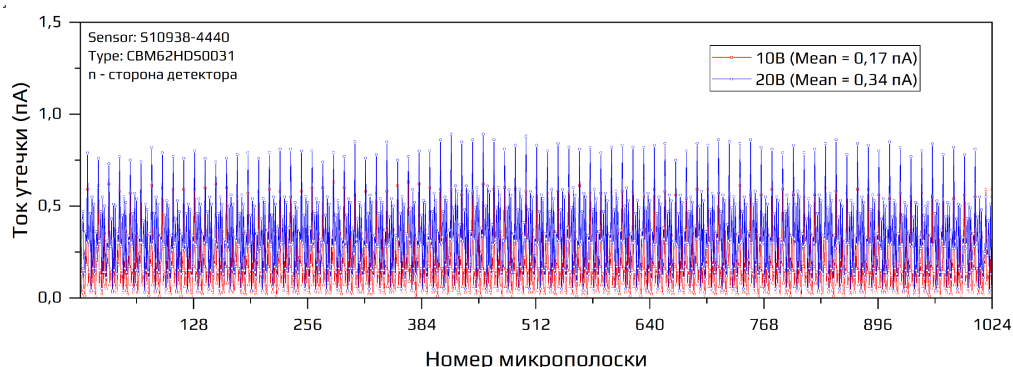


Рисунок 9 – Результаты измерения тока утечки конденсаторов для каждой микрополоски на p – стороне детектора при разных напряжениях.

Также в качестве входного контроля перед началом производства трекового модуля обязательно производится оптическая инспекция поверхности детектора под микроскопом на

предмет наличия возможных визуальных дефектов в процессе его производства и транспортировки, детекторы с такими дефектами отбраковываются.

Для соединения считывающей электроники с микрополосками детектора используется набор плоских алюминиевых микрокабелей (рис. 10). Данные микрокабели изготавливаются при помощи фотолитографии на полиимиде марки FDI-A20 [A8, A11]. Количество вещества в одном слое алюминиево-полиимидных микрокабелей составляет 0,124 % X/X_0 [4]. Толщина микрокабеля составляет 24 мкм: 10 мкм – алюминий и 14 мкм – полиимид. Поверх каждого микрокабеля в процессе сборки модуля приклеивается сетка из полиимида толщиной 75 мкм с 30 % заполнением, что позволяет достичь минимальной диэлектрической проницаемости и тем самым уменьшить емкостную связь между соседними проводниками в сборке.

Каждый микрокабель имеет 64 сигнальных проводника шириной 40 мкм с шагом 116 мкм (рис. 10). Сопротивление сигнальной линии составляет 0,3 – 0,4 Ом/см с емкостью 0,36 – 0,45 пФ/см [4,5]. Топология ультралегкого микрокабеля предполагает использование технологии ленточной автоматической ультразвуковой сварки (ЛАС) для соединения проводников с контактными площадками на детекторе и на считывающей электронике без использования дополнительных переходных соединений.

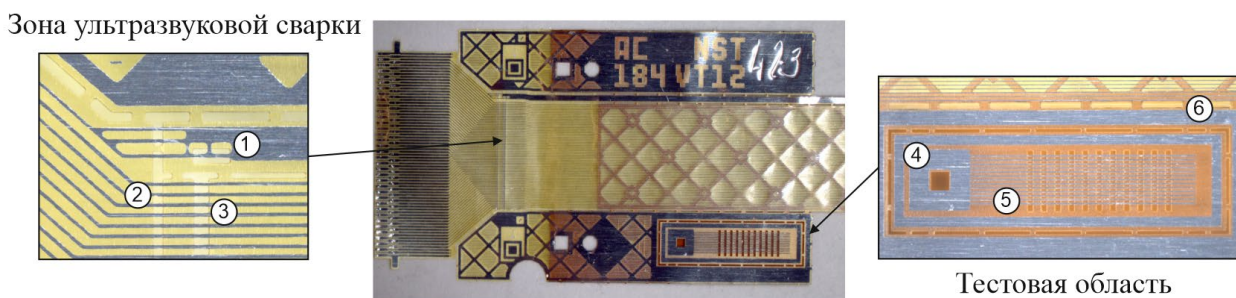


Рисунок 10 – Сверхлегкий алюминиевый полосковый микрокабель с тестовой зоной.

Зона ультразвуковой сварки включает в себя: проводник подачи напряжения смещения на детектор с окном для УЗС (1), окна для отрезания тестовой зоны кабеля (2), 64 сигнальных алюминиевых проводника для УЗС (3). Тестовая область включает в себя: зону для установки инструмента отрыва (4), 11 окон с 10 проводниками для подбора параметров УЗС (5), зону для вырезки тестовой области (6).

Использование микрокабеля представленной конструкции при изготовлении трековых модулей открывает возможность изготовления широкоапертурных кремниевых систем с высокой степенью интеграции. Топология кабеля позволяет минимизировать количество вещества в рабочем объеме детектора. Установка считывающей электроники детектора за пределами рабочего объема облегчает проектирование системы водяного охлаждения для всей станции.

Сигналы от микрополоскового детектора передаются на быструю считывающую электронику на базе СИМС STS-XYTER (рис. 11) [6,7]. Микросхема изготовлена по КМОП процессу UMC 180 нм и имеет площадь $10 \times 6,75$ мм [7]. Размер контактных площадок для ЛАС ультразвуковой сварки составляет 180×60 мкм с шагом 116 мкм. Такая высокая плотность контактов в трековом модуле возможна только с использованием бескорпусных микросхем.

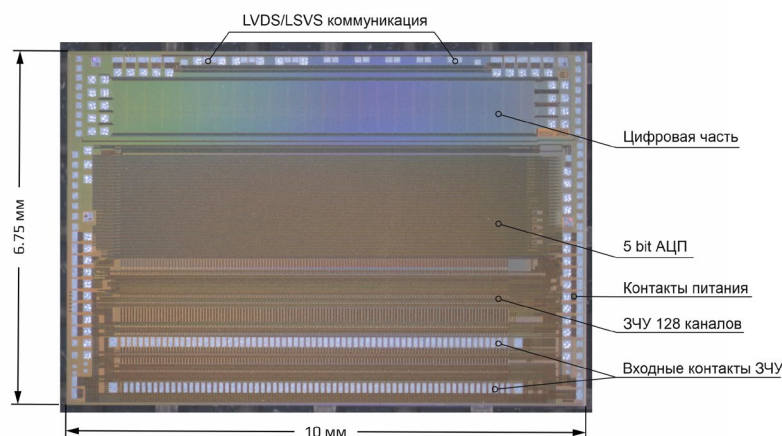


Рисунок 11 – Габариты и топология микросхемы STS-XYTER.

Особенностью микросхемы является использование архитектуры потоковой обработки сигнала без использования внешнего триггера [A12]. Микросхема имеет 128 входных каналов зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ), которые позволяют считывать сигналы с малой амплитудой 3,6 фКл. После ЗЧУ сигнал разделяется на две ветви. Одна из них используется для измерения амплитуды сигнала и определения центра масс кластера с помощью малошумящего пятиразрядного АЦП и цифрового пикового декодера с возможностью регулировки динамического диапазона от 12 до 120 фКл.

Итоговая конструкция трекового модуля включает в себя кремниевый микрополосковый детектор, набор из 32 алюминиевых полиимидных кабелей, 16 микросхем STS-XYTER, 2 интерфейсные платы FEB, 8 бескорпусных линейных регуляторов напряжения LDO, 6 экранов для считывающей электроники и аналоговых микрокабелей и алюминиевый радиатор [A4, A10].

Третья глава посвящена разработке технологии изготовления кремниевых трековых модулей CBM/BMN; разработке методики сборки модулей и проектированию необходимой оснастки для осуществления поставленной задачи; разработке надежных приемов пошагового тестирования качества собираемых узлов модуля для ранней отбраковки негодных узлов с целью максимального возможного выхода годных. В главе детально описан разработанный автором технологический процесс сборки микроэлектронных компонентов высокой степени интеграции трекового модуля CBM/BMN КТС, основанный на применении двух адаптированных

технологических методов: ЛАС, применяемой для соединения контактных площадок СИМС электроники считывания с ультралегкими алюминиево-полиимидными микрокабелями, и ультразвуковой микросварки проволокой 25 мкм, применяемой для соединения бескорпусных микросхем, установленных на плату считывающей электроники [A1]. Приведена математическая модель для расчета оптимальных параметров сварки, используемая для создания микросварных соединений проводников, надежность и качество которых подтверждаются практическими результатами тестирования. Представлены результаты функционального и механического тестирования в процессе последовательной интеграции компонентов трекового модуля.

Качество полученного трекового модуля напрямую зависит от применяемой технологии, соблюдения высокой точности сварных соединений при его изготовлении, а также в процессе пошагового тестирования узлов, задействованных в процессе сборки [A5]. Точность позиционирования микроэлектронных компонентов в значительной степени зависит от конструкции и качества изготовления оснастки, применяемой для сборки. Использование гибких алюминиево-полиимидных кабелей ставит нетривиальную технологическую задачу, а именно – разработать технологию соединения детектора со считывающей электроникой, используя комплект из 32 сверхлегких микрокабелей для передачи аналогового сигнала от детектора к считывающей электронике на расстояниях от 110 до 450 мм (в зависимости от расположения трекового модуля в КТС) [A8]. Данный процесс требует высокого качества настройки параметров ультразвуковой сварной машины¹ (усилие сварки, время сварки, мощность ультразвука), высокого качества изготовления набора оснастки, используемой для сборки модуля, высокой степени квалификации персонала.

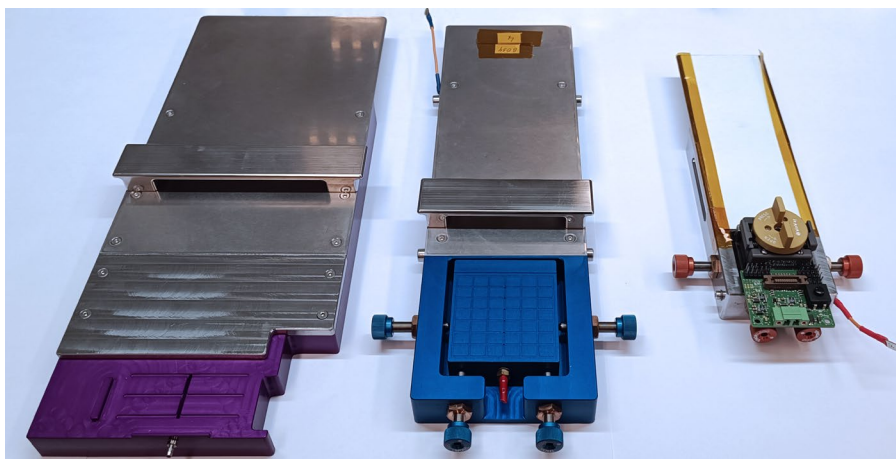


Рисунок 12 – Технологическая оснастка для сборки р-стороны трекового модуля.

Сложностью ЛАС технологии ультразвуковой сварки данного типа микрокабелей является «сварка в колодец», в процессе которой происходит деформация проводника и утонение

¹ F&K Delvotec G5 [10]

области сваривания проводников. Процесс ЛАС ультразвуковой сварки схематично представлен на рисунке 13.

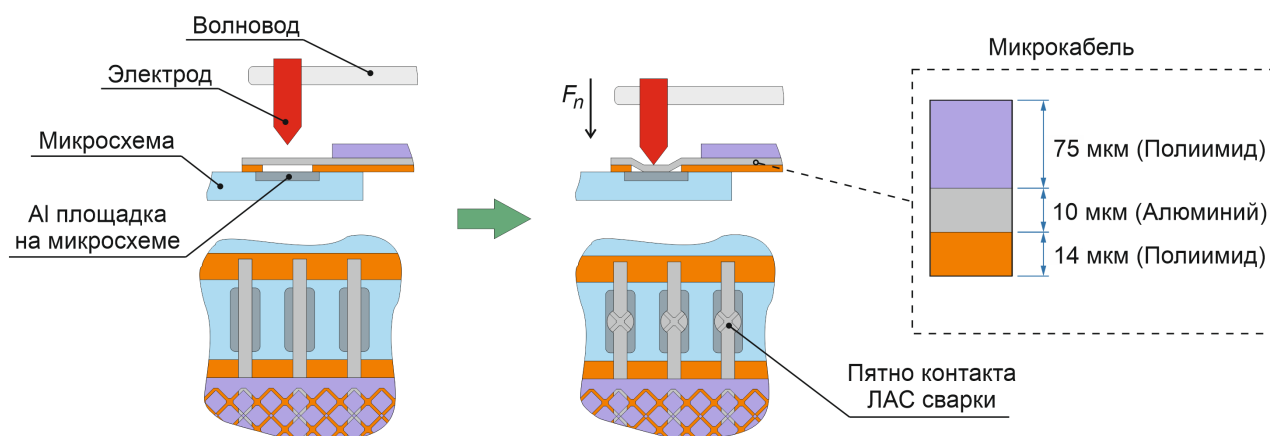


Рисунок 13 – Процесс ЛАС технологии ультразвуковой сварки при изготовлении кремниевого трекового модуля.

Несомненным преимуществом данного метода сварки является наличие лишь одного соединения для организации контакта, что минимизирует количество сварок и повышает выход годных изделий.

Подбор параметров ЛАС ультразвуковой сварки осуществляется при помощи сварки тестовой области микрокабеля к нескольким контактными площадкам на тестовой пластине кремния, изготавливаемой в одном технологическом процессе вместе с детектором. Ультразвуковая сварка тестовой зоны производится в четырех точках, что дает более стабильные результаты измерений и уменьшает вероятность механического повреждения во время установки сваренного узла модуля в тестовый стенд. После отрыва тестовой зоны измеренное усилие на отрыв, в конечном итоге, пересчитывается на одну точку сварки. Это позволяет подобрать время, мощность и усилие для каждого сварного соединения, используемого при последующих операциях сборки трекового модуля. Подбор параметров осуществляется для партии микрокабелей, изготовленных в одном технологическом процессе.

В процессе подготовки к сборке СИМС STS-XYTER с гибкими алюминиевыми микрокабелями было протестировано больше 100 тестовых образцов на отрыв. Среднее значение усилия на отрыв для тестовой зоны с четырьмя точками сварного соединения на кристалле составило $18,4 \pm 0,9$ сН, что соответствует усилию 4,6 сН для каждого проводника в образце. Полученные результаты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к данному этапу изготовления модуля, гарантируя надежное механическое и электрическое соединение микрокабеля с детектором и микросхемой. Результаты измерений представлены на рисунке 14.

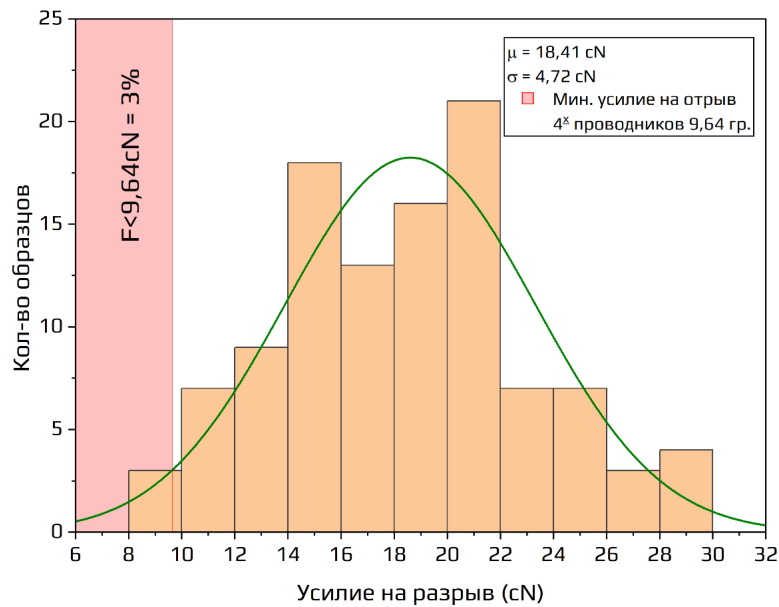


Рисунок 14 – Результаты тестирования на отрыв образцов алюминиевого микрокабеля, сваренных в четырех точках с микросхемой по технологии ЛАС.

Высокая плотность каналов на детекторах в модуле CBM/BMN делает необходимым расположение микросхем STS-XYTER на плате считывающей электроники FEB быть максимально плотным, что требует использования бескорпусных микросхем в конструкции трекового детектора.

Предложенные в работе технологические этапы позволяют достичь ремонтпригодности изделия во время производства, основываясь на том, что в процессе изготовления перед моментом инкапсуляции сварного соединения, опираясь на результаты тестирования, есть возможность произвести дополнительную ультразвуковую сварку некачественно соединенных каналов микросхемы на детекторе или считывающей электронике. Также при изготовлении подборки «Микрокабель – микросхема», проведя полное функциональное тестирование, имеется возможность замены микросхемы и микрокабеля на запасной комплект.

Конечным результатом технологического процесса изготовления подборки «Микрокабель – микросхема» является сборка 16 комплектов микросхем STS-XYTER с 32 микрокабелями. Комплект собранных изделий и этапы изготовления двух слоев представлены на рисунке 15.

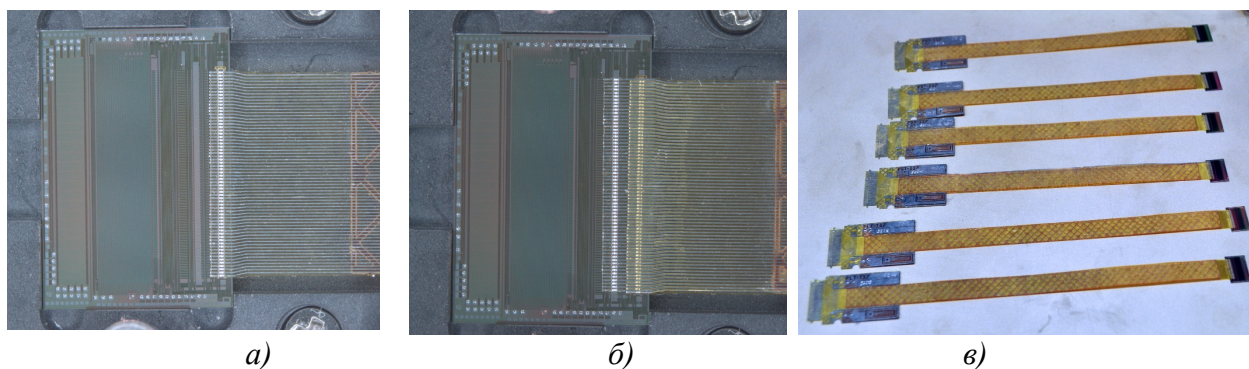


Рисунок 15 – Подборка «Микрокабель – считывающая электроника»:

- а) микросхема с собранным первым слоем микрокабеля;*
- б) микросхема с собранным вторым слоем микрокабеля;*
- в) комплект изготовленных кабелей в сборе.*

Позиционирование восьми подборок «Микрокабель – считывающая электроника» на одной стороне кремниевого детектора осуществляется на специализированной оснастке. Предварительная фиксация микрокабеля осуществляется при помощи магнитов к поверхности оснастки (рис. 16а). В процессе ультразвуковой сварки при необходимости имеется возможность скорректировать позиционирование кабеля относительно сварочных площадок на детекторе (рис. 16б).

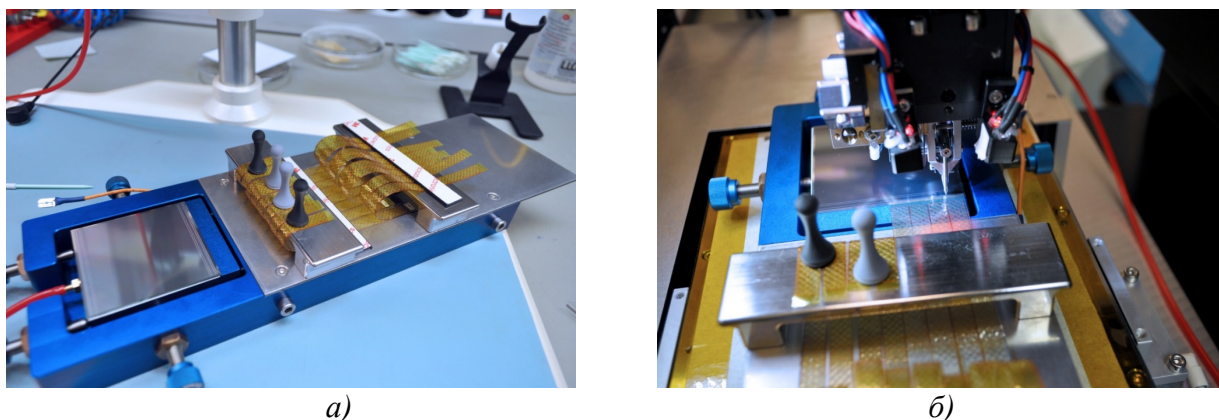


Рисунок 16 – Этап изготовления подборки «Детектор – микрокабель с считывающей электроникой»: а) специализированная оснастка для сборки микрокабеля с детектором; б) процесс сборки первого ряда микрокабелей с детектором с помощью технологии ЛАС ультразвуковой сварки.

Технологический цикл изготовления компонента «Детектор – микрокабель – микросхема» повторяется при изготовлении обратной стороны трекового модуля. Трековый модуль в процессе изготовления второй стороны, установленный на оснастке, представлен на

рисунке 17а. Результат сварки 4 слоев микрокабелей с кремниевым микрополосковым детектором представлен на рисунке 17б.

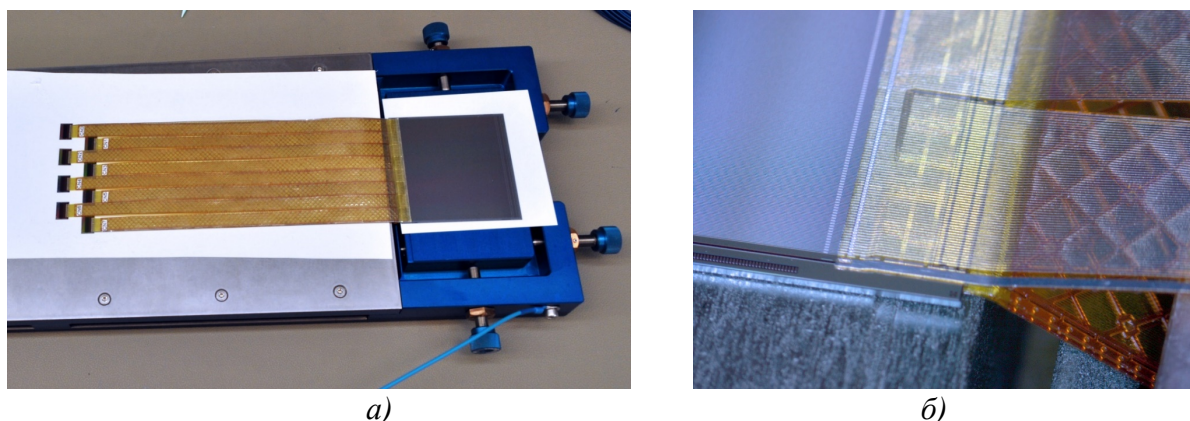


Рисунок 17 – Сборка двух сторон кремниевого детектора с набором микрокабелей при помощи ЛАС ультразвуковой сварки: а) компонент «Детектор – микрокабель – считывающая электроника», установленные на оснастку; б) область соединения микрокабелей с детектором.

В результате изготовления компонента «Детектор – микрокабель – считывающая электроника» получается многослойная конструкция. В этом случае невозможно использовать стандартные методы проверки качества подключения из-за очень малого шага между контактными площадками, а также из-за того, что входы микросхемы STS-XYTER очень чувствительны к электростатическому разряду. Поэтому был разработан метод функционального тестирования составного компонента «Детектор – микрокабель – микросхема» прямо в процессе его изготовления, учитывающий все особенности его конструкции [A1]. Важным моментом тестирования является то, что изготовленный образец собирается на одной оснастке, которая является и тестовой оснасткой (рис. 18). В конструкции оснастки для юстировки детектора относительно микросхемы с точностью 3 – 5 мкм применяются микрометрические винты. Это позволяет коллинеарно выставить положение контактных площадок на детекторе относительно площадок на микросхеме с точностью 3 – 5 мкм, что значительно облегчает процесс сборки с длинными микрокабелями. Такой прием позволяет снизить возможность возникновения дефектов в процессе сборки и тестирования, поскольку в нем минимизирован человеческий фактор.

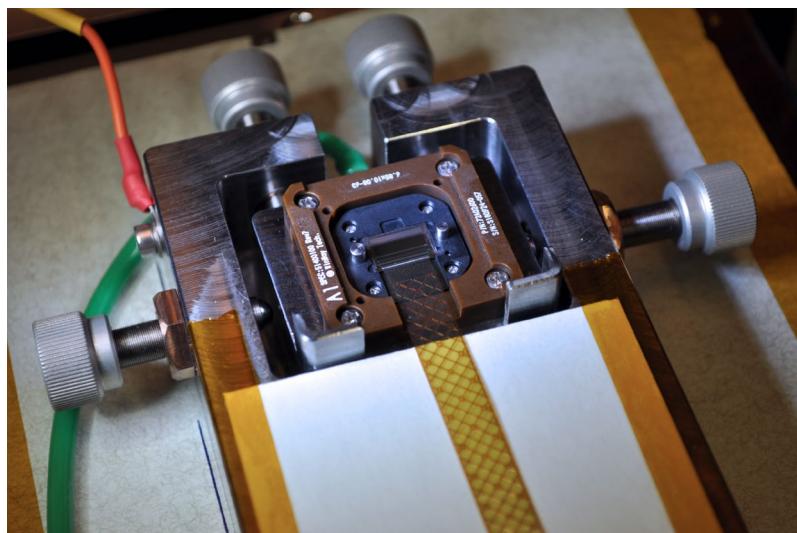


Рисунок 18 – Конструкция оснастки с применением специальной платформы для тестирования микросхемы STS-XYTER.

Данная система позволяет тестировать соединение между микросхемой STS-XYTER, микрокабелями и детектором на отдельных технологических этапах изготовления трекового модуля, прежде чем микросхемы будут окончательно установлены на плату считывающей электроники FEB. Тестирование заключается в измерении уровня шума на входах микросхемы STS-XYTER после каждого этапа сборки модуля и сравнении его со значением, полученным при измерении в конце предыдущего этапа изготовления. После каждого технологического этапа ожидается увеличение уровня шума, поскольку к входам ЗЧУ в микросхеме STS-XYTER подключается дополнительная емкость. Если ожидаемого увеличения не наблюдается, значит, связь между соответствующими элементами модуля отсутствует, что сигнализирует о некачественном процессе сварки или механических разрушениях сварного соединения. Для тестирования разработан стенд, конструкция и принцип измерения которого подробно описаны в работе [A2].

На рисунке 19 приведены результаты тестирования одной под сборки «Детектор – микрокабель с микросхемой». Измерение проводилось в специально разработанном тестовом корпусе, без электрического экрана на микрокабелях, без напряжения смещения на детекторе, так как в процессе сборки кремниевый детектор не снимается с оснастки и нет возможности подать на него напряжение смещения.

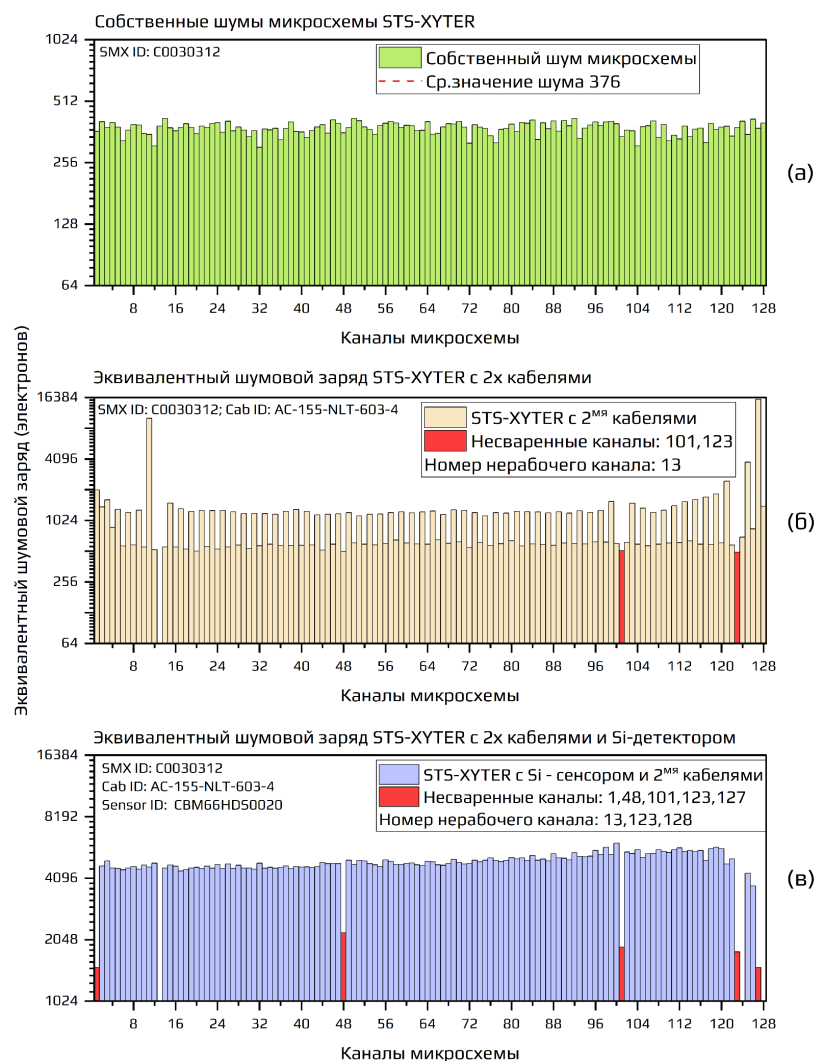


Рисунок 19 – Результаты функциональных тестов в процессе изготовления компонента «Детектор – микрокабель – микросхема»:

- а) результаты измерения собственного уровня шума в каналах микросхемы;
- б) результаты измерения уровня шумов в каналах микросхемы в подборке «Микрокабель – микросхема»;
- в) результаты функционального тестирования полностью собранного компонента «Детектор – микрокабель – микросхема».

Данная методика тестирования компонента «Детектор – микрокабель – микросхема» позволяет эффективно выявить нерабочие каналы на этапе ультразвуковой сварки, что делает сборку ремонтпригодной (имеющей возможность отремонтировать ультразвуковые соединения до финишной инкапсуляции), тем самым минимизируя количество запасных компонентов, используемых в процессе изготовления трекового модуля. Более подробно процесс электрического тестирования описан в статье [A2].

Качество ультразвукового соединения алюминиевой проволоки толщиной 25 мкм напрямую зависит от нескольких факторов: точной настройки параметров ультразвукового

соединения; качества свариваемой поверхности; геометрических параметров петли для ультразвукового соединения.

Для оценки качества ультразвукового соединения в данной работе предлагается аналитическая методика оценки кривой деформации проводника во время ультразвуковой сварки (рис. 20). Зависимость деформации проводника от времени создания ультразвукового соединения наиболее удобна для оценки, так как она связана с параметрами ультразвукового генератора, настраиваемыми параметрами в котором являются: усилие на электроде, время сварки и мощность УЗ генератора.

Для оценки целесообразности применения данного метода был проведен эксперимент с набором данных по сварке 80 образцов. Соединения были сварены с использованием трех разных настроек параметров УЗ генератора. В результате набор полученных зависимостей разделился на три группы: образцы со средним усилием деформации проводника (номер образцов 1 – 40 на рис. 20а); образцы с максимальным уровнем деформации (номер образцов 41 – 60 на рис. 20а); образцы с минимальным усилием деформации (номер образцов 61 – 80 на рис. 20а).

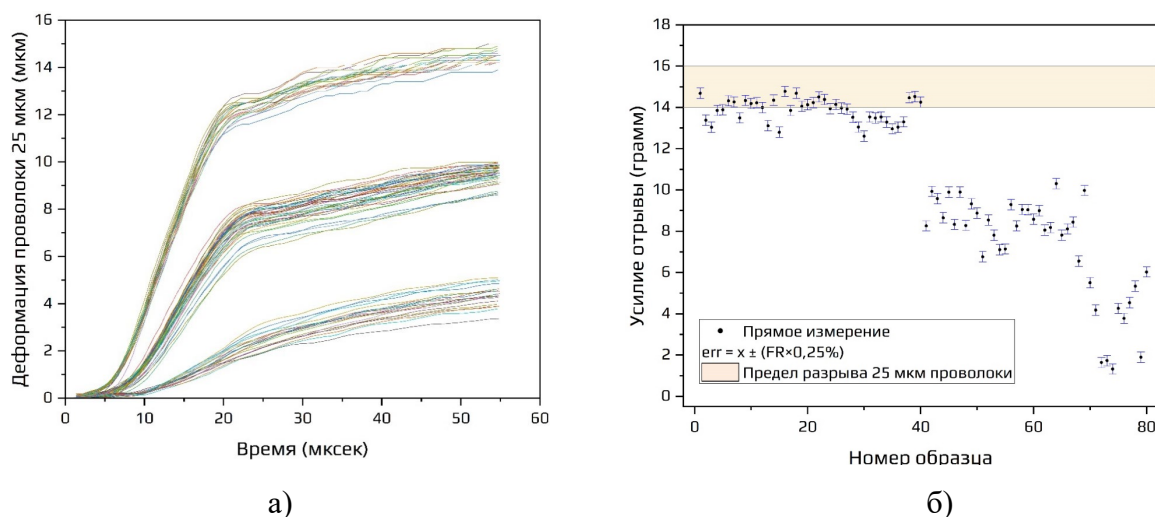


Рисунок 20 – Результаты прямого измерения параметров сварки:

а) зависимость деформации проводника от времени сварки;

б) результаты измерения усилия отрыва для каждого образца в эксперименте.

Для оценки качества сварного соединения было проведено разрушающее тестирование (измерение усилия отрыва) для каждого образца, полученные данные впоследствии будут являться референтным значением для оценки зависимости деформации от времени.

Анализируя статистику усилия отрыва и зависимость деформации от времени сварки, можно заметить связь между этими параметрами и три четко выраженные группы зависимостей. Опираясь на результаты измерения усилия отрыва серии проводников (рис. 20б), замечено, что усилие на отрыв описывается нормальным распределением. Предполагая, что зависимость деформации проводника от времени сварки влияет на качество сварки, можно подобрать

аналитическую кривую, которая описывает ключевые параметры поведения кривой деформации от времени сварки. В качестве наиболее подходящей аналитической функции, описывающей поведение кривой деформации от времени, выбрана нормальная функция распределения [8], которая имеет вид:

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

где y_0 – параметр смещения кривой, A – амплитуда кривой деформации, μ – среднее значение, σ – стандартное отклонение.

После завершения всей серии измерений полученные зависимости деформации от времени аппроксимируются функцией (1). Результаты аппроксимации для трех зависимостей из разных групп представлены на рисунке 21.

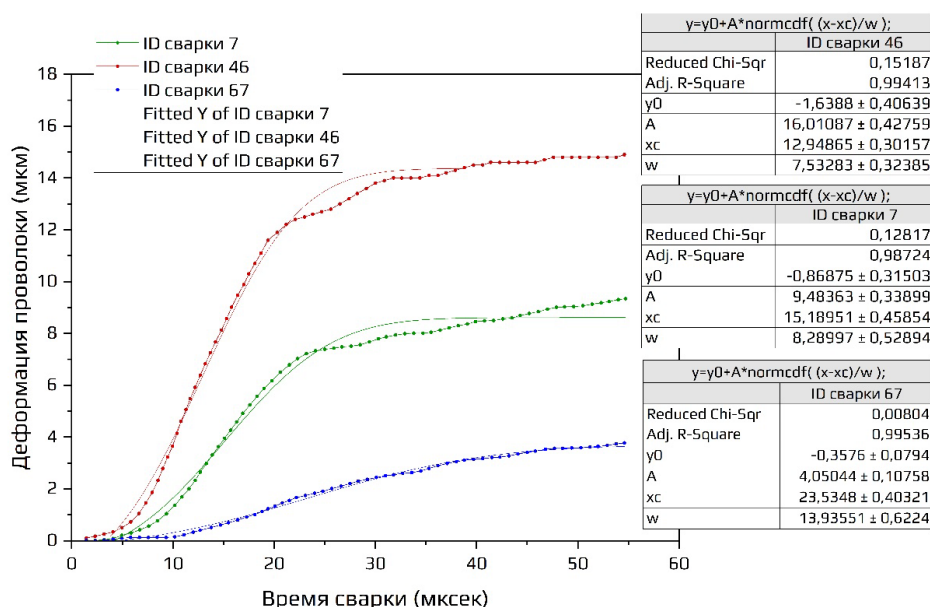


Рисунок 21 – Результаты аппроксимации зависимостей для трех разных уровней деформации проволоки.

Построив распределение усилия отрыва УЗ перемычки от параметра амплитуды (A) из уравнения (1) для каждого образца в эксперименте, можно заметить четко выраженную область с максимальным усилием отрыва (рис. 22а). При приближенном рассмотрении данной области было выявлено, что среднее значение для области с максимальным усилием отрыва составляет $A = 9,47$, а полный набор амплитуд кривой деформации, имеющих максимальное значение усилия отрыва, укладывается в диапазон $8,68 \div 10,26$ с достоверностью 95 % (рис. 22б).

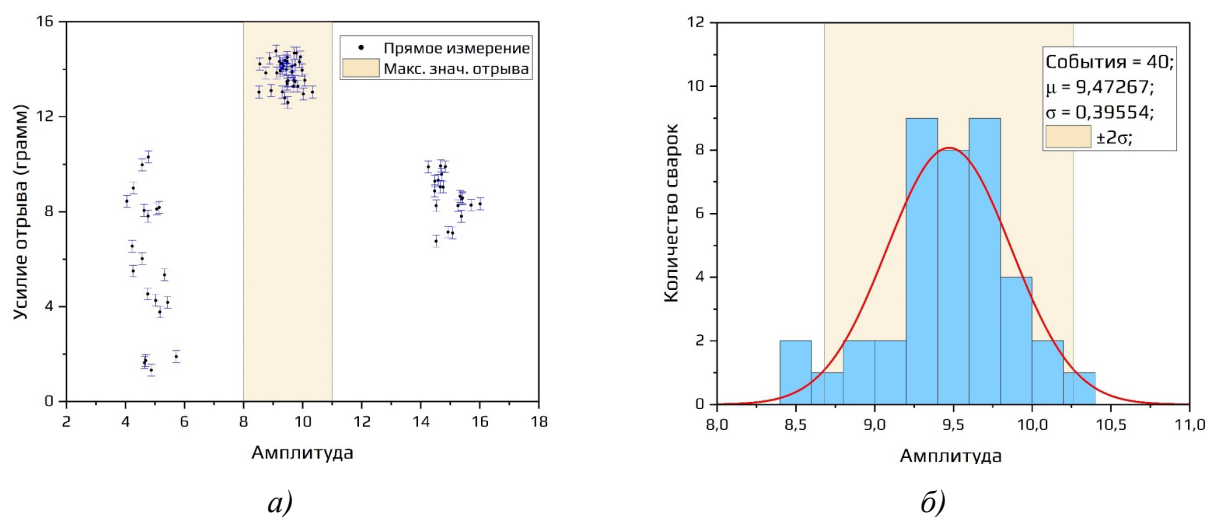


Рисунок 22 – Зависимость параметров амплитуды от усилия отрыва:

а) распределение параметров амплитуды кривой деформации для каждого образца в эксперименте; б) распределение амплитуд в области наибольшего усилия отрыва.

Оценив результаты параметра среднего значения (μ) для каждой аппроксимированной кривой деформации (рис. 23а) при помощи уравнения (1), выявлено, что образцы с максимальным усилием отрыва укладываются в диапазон $14,14 \div 16,13$ с достоверностью 95 % (рис. 23б).

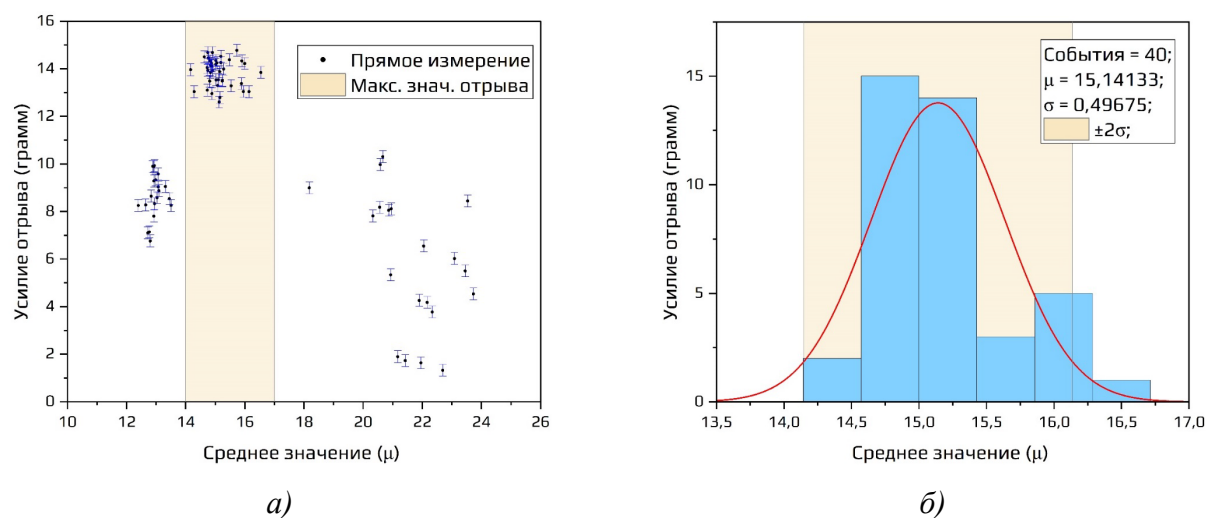


Рисунок 23 – Зависимость параметров μ от усилия отрыва:

а) распределение параметров μ для каждого образца в эксперименте;
б) распределение μ в области наибольшего усилия отрыва.

В результате проведенного эксперимента была подобрана аналитическая модель с достоверными параметрами, наиболее подходящими для зависимости деформации проводника от времени УЗ соединения 25 мкм проволокой. В результате при использовании этой модели с условием использования проволоки Heraeus D63450 совместно с электродом для сварки SPT FP45A-W-2020-1.00-C, можно эффективно контролировать качество ультразвукового

соединения микроскопических компонентов трекового модуля в процессе производства и пренебречь тестированием проводника на отрыв, тем самым сократив время производства.

Вторым важным фактором, влияющим на надежность контактного соединения, является качество свариваемой поверхности. Данный фактор возможно оценить, проведя анализ зависимости усилия отрыва ультразвукового соединения для разных типов свариваемой поверхности. В качестве исследуемого образца был использован тестовый образец, состоящий из материала FR – 4, верхний слой которого состоит из меди толщиной 35 мкм, а в качестве финишного покрытия используется иммерсионное золото, напыленное на 2 – 3 мкм никеля. Тестовый образец был разделен на 3 участка: контрольную поверхность (рис. 24а), которая была предварительно обработана и подготовлена для УЗ сварки (обезжирена и очищена в специальном растворе для печатных плат); образец с поврежденной поверхностью (рис. 24б), в котором слой золотого покрытия и никеля был с механическими дефектами; образец с остатками органических соединений не был подготовлен (не был подвержен технологическому циклу очистки, рис. 24в). На каждый образец было разварено по 70 ультразвуковых перемычек. Для исключения внесения поправки в результаты измерений зависящей от геометрических параметров контактной петли, все образцы были разварены с одинаковыми параметрами: длиной перемычки 2000 мкм, относительной высотой перемычки в 80 % от ее длины.

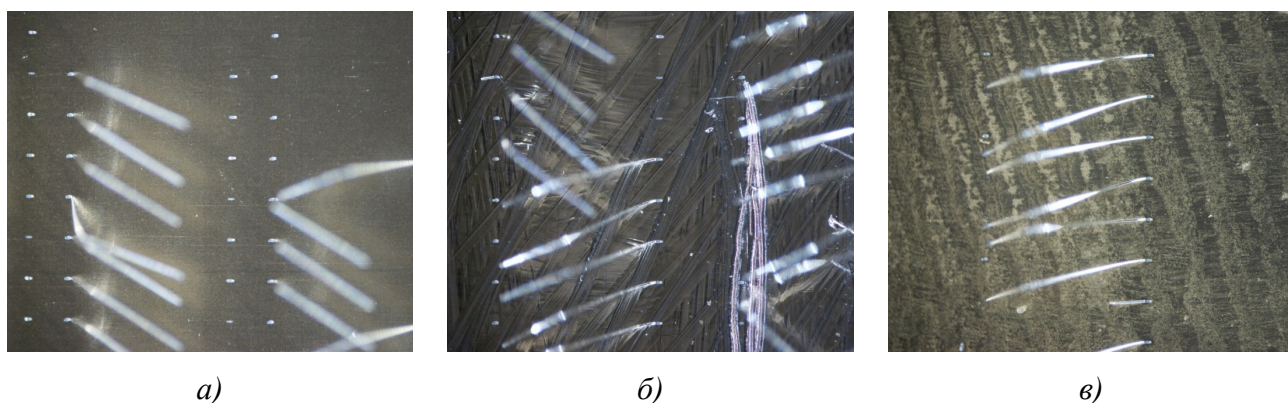


Рисунок 24 – Набор тестовых образцов с разным качеством поверхности:

- а) контрольный образец; б) образец с поврежденной поверхностью;
в) образец с остатками органических соединений.*

Результаты тестирования на отрыв показали, что при автоматическом процессе сварки с правильно подобранными параметрами на контрольном образце, все 70 проводников были успешно разварены, а по результатам отрыва среднее усилие на отрыв составило значение $\mu = 13,08$ грамм, при этом среднеквадратичное отклонение усилия составило значение $\sigma = 1,12$. Малое среднеквадратичное отклонение продемонстрировало хорошую повторяемость результатов от соединения к соединению. Результаты отрыва ультразвукового соединения для второго образца с повреждениями составили $\mu = 10,78$ грамм, при $\sigma = 4,25$. В процессе УЗ сварки на данном образце 7,14 % соединений не были разварены. Образец с остатками органических

соединений показал худший результат – $\mu = 9,44$ грамм, при $\sigma = 5,19$. В процессе УЗ сварки 21,43 % перемычек на образце не были разварены, что демонстрирует нестабильную повторяемость процесса и, как следствие, низкое качество сварного соединения. Сравнительный анализ зависимости усилия на отрыв сварного соединения для разного типа поверхностей представлен на рисунке 25.

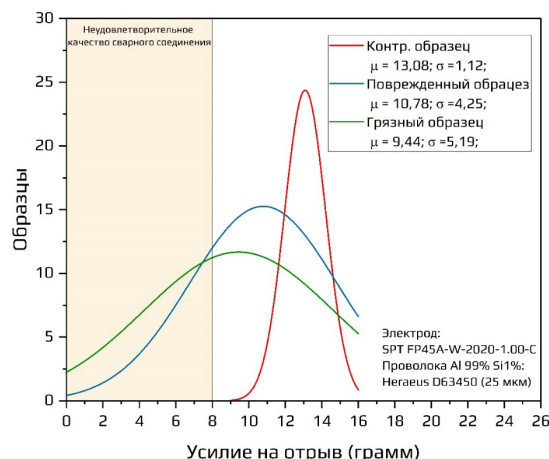


Рисунок 25 – Распределение усилия на отрыв в зависимости от качества золотой поверхности свариваемых образцов для 25 мкм алюминиевой проволоки.

Результаты практического опыта показывают, насколько важно для создания надежных соединений качество поверхности используемых образцов. По результатам описанных тестовых измерений в процесс изготовления кремниевых трековых модулей был добавлен трехэтапный процесс очистки печатных плат и визуальный входной контроль используемых компонентов.

Топология платы в области установки микросхемы была спроектирована таким образом, чтобы сделать максимально одинаковым расстояние от точек сварки между контактной площадкой на кристалле СИМС и площадкой на плате. Каждая микросхема STS-XYTER имеет 87 перемычек с минимальным расстоянием 950 – 1150 мкм. Параметры петли, которые использовались при ультразвуковой сварке методом «клин – клин», представлены на рисунке 26.

Принято считать, что минимальная прочность на разрыв качественного сварного соединения, полученного при помощи проволоки диаметром 25 мкм, составляет ~ 8 сН [9]. Показателем качественной сборки микросхемы с платой является результат измерения усилия на отрыв проволоки $\vec{F}$, которое является векторной суммой двух сил: $\vec{F}_{wd}$ – силы отрыва от площадки на плате и $\vec{F}_{wt}$ – силы отрыва от площадки на микросхеме (рис. 26).

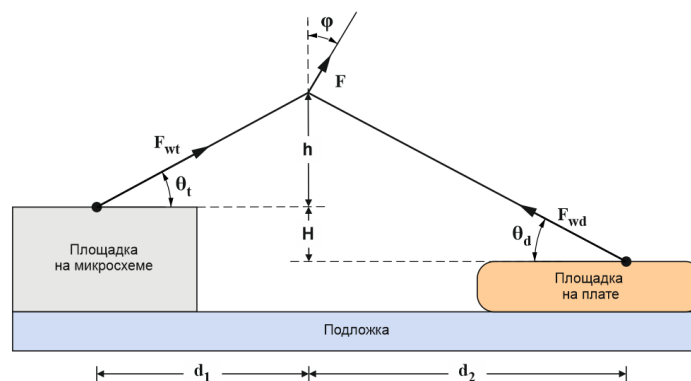


Рисунок 26 – Геометрические переменные для расчета параметров ультразвукового соединения.

Оптимальный подбор характеристик петли требует расчета силы отрыва сварного соединения от площадки на кристалле СИМС $\vec{F}_{wt}$ и на плате $\vec{F}_{wd}$. Определение правильного соотношения сил $\vec{F}_{wt}$ и $\vec{F}_{wd}$, действующих на сварные соединения в точках сварки на микросхеме и на плате, помогает приблизиться к максимальным значениям усилия на отрыв создаваемого соединения, достичь наилучшего результата ультразвукового соединения между микросхемой и площадкой на плате и тем самым гарантировать надежные механические свойства собранного трекового модуля.

Горизонтальное расстояние между точками связи (ε) на микросхеме и площадке измеряется как отношение расстояния от точки сварки на микросхеме до точки приложения силы отрыва d_1 к расстоянию от точки сварки на плате до точки приложения силы отрыва d_2 . Так как точки сварки находятся на разных уровнях, то расстояние между ними изменяется в диапазоне $1/4 \leq \varepsilon \leq 3/4$, а силы на отрыв не будут равны: $\vec{F}_{wt} \neq \vec{F}_{wd}$. Зависимость отношения длины перемычки ($d_1 + d_2$) от высоты представлена на рисунке 27а.

Зависимость усилия на отрыв от высоты перемычки при максимальной длине сварки между платой и микросхемой 1150 мкм при разных значениях ε с углом растягивающей связи по отношению к подложке ($\varphi = 0^\circ$) представлена на рисунке 27б. Наибольшее значение усилия на отрыв возможно достичь при $\varepsilon = 0,45$ (рис. 27а).

Очевидно, что наилучшее качество ультразвуковой сварки будет достигаться при равных значениях усилия на отрыв петли в точках сварки на плате и микросхеме. В процессе сборки микросхема STS-XYTER приклеивается на основание платы, разница высоты между двумя точками сварки на плате и микросхеме (H) для всех перемычек составляет 200 мкм. На параметры отрыва в значительной степени влияют значения переменных h , d_1 , d_2 . График зависимости усилия на отрыв на плате $\vec{F}_{wd}$ и на микросхеме $\vec{F}_{wt}$ от геометрических параметров петли сварки при отношении горизонтальных расстояний между точками связи $\varepsilon = 0,45$ представлен на рисунке 27б.

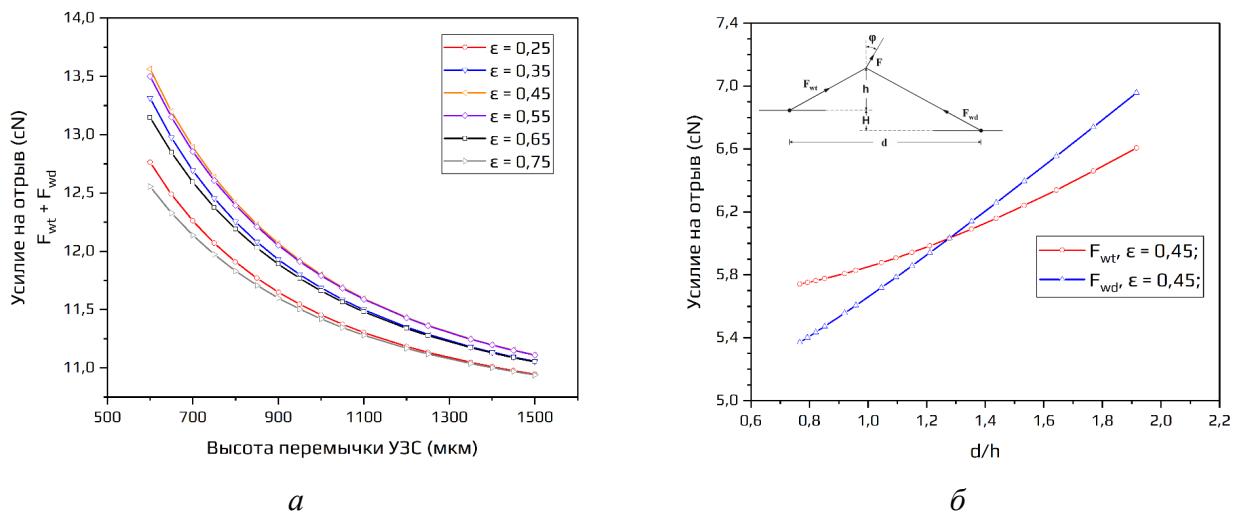


Рисунок 27 – Зависимости усилия отрыва от параметров сварного соединения:

а) зависимость усилия на отрыв от высоты перемычки при разных отношениях между двумя точками связи; б) зависимости усилия отрыва в точках $\vec{F}_{wt}$ и $\vec{F}_{wd}$ от геометрических параметров петли сварки при $\epsilon = 0,45$ и угле натянутой проволоки по отношению к подложке ($\phi = 0^\circ$).

Одинаковое распределение усилий на отрыв $\vec{F}_{wt} = \vec{F}_{wd} = 6,032$ cH достигается при отношении $d/h = 1,27$. Следовательно, при максимальной длине петли сварки 1150 мкм расстояния $d_1 = 402$ мкм, $d_2 = 748$ мкм (рис. 26). Полученные геометрические параметры применяются для настройки ультразвуковой автоматической сварки Delvotec G5 перед началом сборки микросхемы STS-XYTER на плату FEB.

Расчетное значение усилия на отрыв, составляет 12,06 cH. Каждая микросхема STS-XYTER имеет дополнительные контактные тестовые площадки, на которых предварительно подбирается режим ультразвуковой сварки. Среднее значение усилия на отрыв, полученное в результате измерения партии собранных модулей, составило $10,46 \pm 0,22$ cH, при доверительном интервале 95 %. Результаты измерения усилия на отрыв, полученные в процессе сборки трековых модулей, представлены на рисунке 28.

Представленный метод расчета параметров сварного соединения является достоверным, поскольку подтверждается полученными практическими результатами. На основе полученных данных можно сделать вывод, что ультразвуковое соединение микросхемы с платой удовлетворяет предъявляемым требованиям. Расчетное значение на отрыв отличается от полученного в процессе сборки на 15 %.

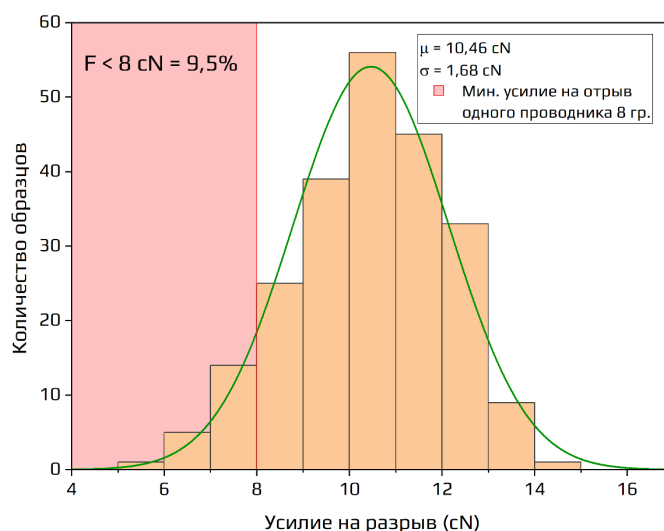


Рисунок 28 – Результаты тестирования на отрыв алюминиевой проволоки диаметром 25 мкм, сваренной по технологии «клин – клин».

Представленный метод расчета параметров сварного соединения является достоверным, поскольку подтверждается полученными практическими результатами. На основе полученных данных можно сделать вывод, что ультразвуковое соединение микросхемы с платой удовлетворяет предъявляемым требованиям. Расчетное значение на отрыв отличается от полученного в процессе сборки на 15 %. Это объясняется тем, что при отрыве проводника визуальное позиционирование инструмента для отрыва происходит в ручном режиме, что в значительной степени влияет на точность нахождения центра перемычки во время позиционирования в реальных измерениях. Более подробно расчет параметров для ультразвуковой сварки проволокой диаметром 25 мкм представлен в статье [A1].

Важным этапом изготовления трекового модуля является установка четырех микросхем линейного регулятора напряжения для питания микросхем STS-XYTER. Для минимизации возможных наводок напряжение питания для микросхемы STS-XYTER разделено на два разных тракта. Для питания цифровой части используется микросхема LDO с выходным стабилизированным напряжением равным $1,8 \pm 0,1$ В. Для питания аналоговой части микросхемы STS-XYTER используется LDO с выходным стабилизированным напряжением, равным $1,2 \pm 0,06$ В. Технологические этапы изготовления компонента трекового модуля CBM/BMN «Плата электроники с LDO» представлены на рисунке 29.

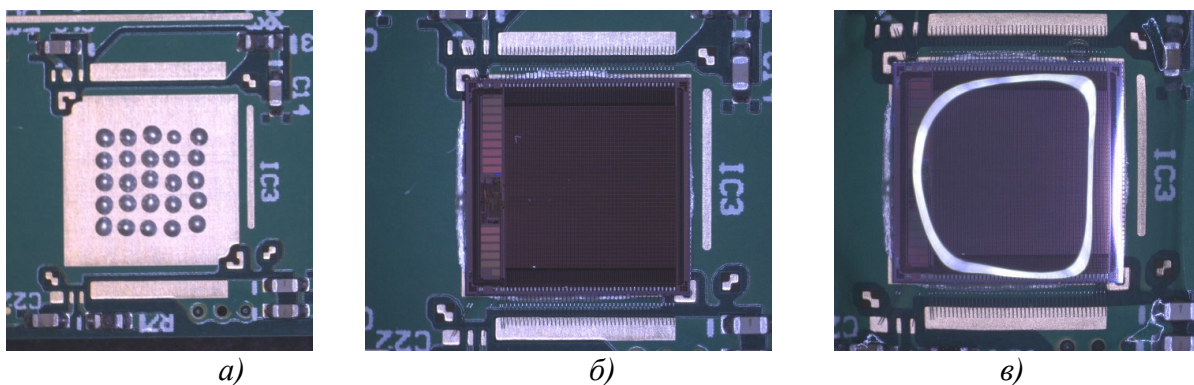


Рисунок 29 – Технологические этапы установки микросхемы линейного регулятора напряжения на платы входной электроники считывания данных с детектора:

а) нанесение теплопроводящего клея на интерфейсную плату FEB; б) микросхема линейного регулятора напряжения после ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой диаметром 25 мкм; в) инкапсулированная микросхема.

Описание созданного стенда для тестирования параметров микросхемы LDO представлено в работе [A6]. Пример результатов тестирования двух микросхем LDO после их установки на печатную плату показан на рисунке 30. В процессе тестирования проверяется значение выходного напряжения при расчетной нагрузке, равной 0,75 Ом, а также срабатывание защитного отключения микросхемы в случае превышения заданного порога по выходному току 2,8 А, при превышении которого значение напряжения понижается до 0,9 В.

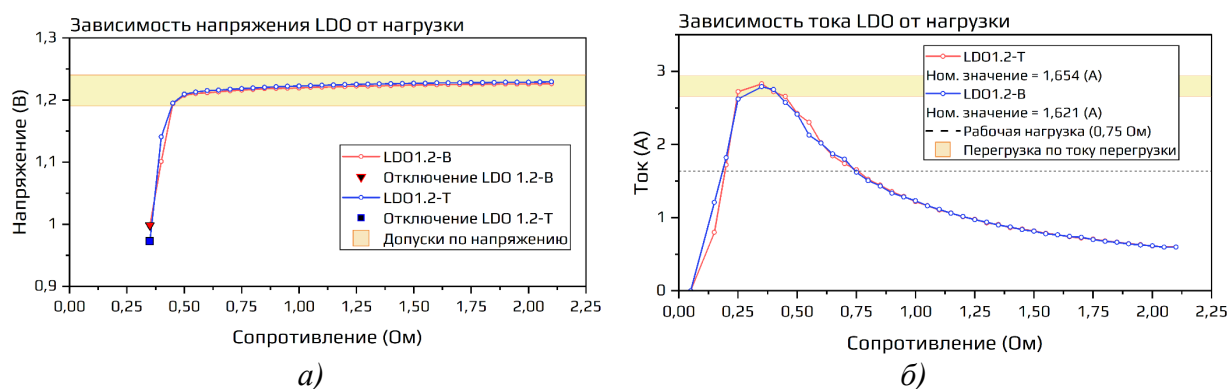


Рисунок 30 – Результаты тестирования двух микросхем LDO после сборки на плату электроники: а) зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки; б) зависимость тока от сопротивления на выходе микросхемы.

Данная последовательность сборки платы входной электроники считывания данных с детекторов позволила минимизировать ошибки при изготовлении модуля, существенно облегчив проведение большого количества контрольных тестов качества собираемого изделия в процессе производства. Полностью изготовленная р-сторона детектора представлена на рисунке 31.

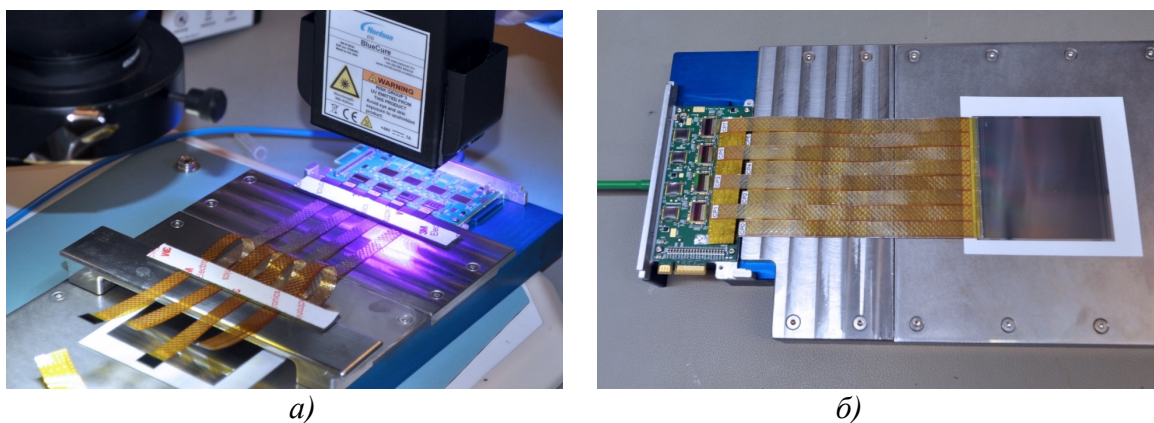


Рисунок 31 – Технологический этап установки под сборки «Детектор – микрокабель – микросхема» на плату считывающей электроники: а) процесс полимеризации клея для первого ряда микросхем STS-XYTER; б) результат изготовления одной стороны детектора.

Изготовление второй стороны трекового модуля (n -стороны кремниевого детектора) включает в себя все вышеизложенные технологические этапы и методы тестирования. Однако для изготовления n -стороны кремниевого детектора требуется использовать конструктивно другой набор оснасток. Изготовление n -стороны кремниевого трекового модуля технологически является более сложной задачей, так как во время сборки этой стороны имеется вероятность появления дефектов на уже собранной противоположной p -стороне трекового модуля.

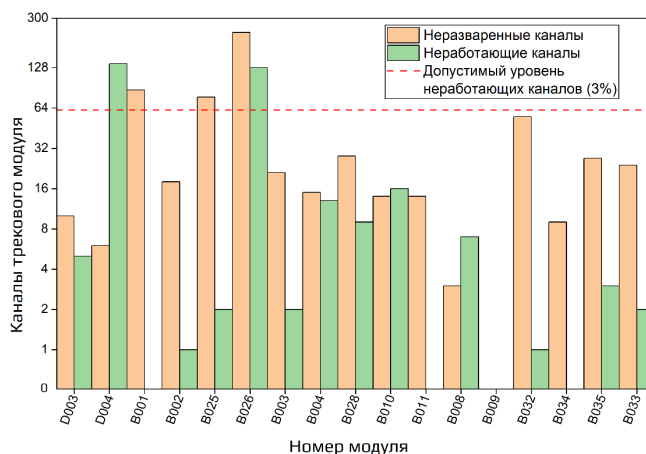


Рисунок 32 – Количество неработающих и неразваренных каналов в трековых модулях предсерийной сборки.

Общее количество собранных модулей составило 25 штук [A4]. Для отладки сборочных процедур, а также оценки выхода годных модулей была осуществлена предсерийная сборка первой партии из 8 трековых модулей с применением последнего типа оснастки и режимов ультразвуковой сварки. При этом осуществляется параллельная сборка четырех модулей в одном

процессе. Выход годных модулей в предсерийной партии составил 87,5 %. Результаты сборки трековых модулей с количеством неработающих каналов в модуле представлены на рисунке 32.

В четвертой главе представлены результаты тестирований модулей предсерийной партии, проведенных на лабораторных испытательных стендах и пучке протонов с энергией 1 ГэВ [A13]. Представлена схема тестовой установки с цепочкой считывающей электроники, использованной для стендовых испытаний. Предсерийная партия трековых модулей была успешно изготовлена и собрана в сборку типа «телескоп», которая впоследствии, с целью экспериментального подтверждения соответствия технических характеристик модуля требованиям модернизации КТС ВМ@N, была облучена на пучке протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью от 10^4 до 3×10^5 протонов $\text{сек}^{-1} \text{см}^{-2}$. На основе результатов проведенных испытаний были сделаны выводы о высокой эффективности разработанной технологии изготовления трековых модулей для планируемой модернизации КТС проекта ВМ@N, в которой первая станция будет комплектоваться модулями предсерийной сборки, изготовленными рабочей группой под руководством автора данной работы.

Каждый трековый модуль по завершении сборки устанавливается на рамку-носитель (рис. 33), которая является оснасткой для его хранения и тестирования. В конструкцию рамки помимо собственно трекового модуля, входит радиатор с водяным охлаждением, который обеспечивает необходимый съем тепла со считывающей электроники модуля, тепловыделение которой составляет ~ 24 Вт.

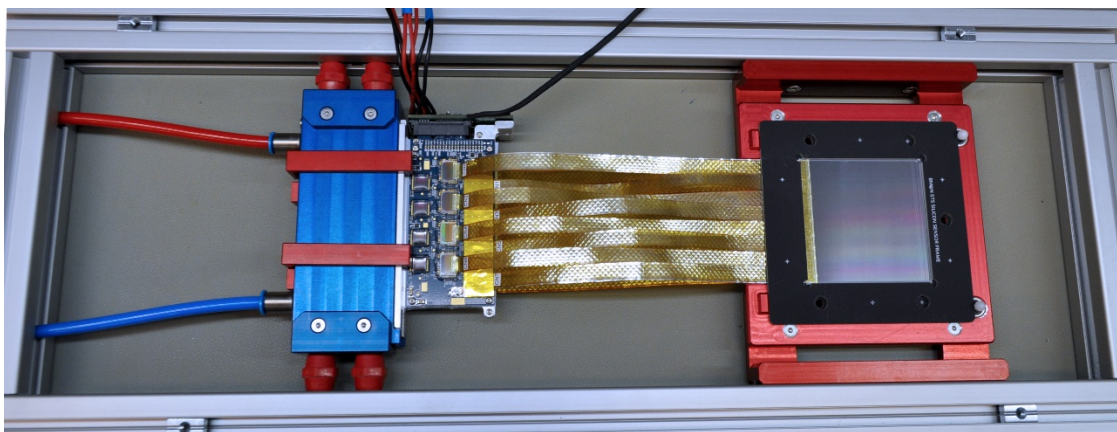


Рисунок 33 – Трековый модуль СВМ/ВМN без установленных экранов на оснастке для тестирования. Платы считывающей электроники прикреплены к радиатору водяного охлаждения.

Измерение шума в отдельно взятом канале СИМС основано на процедуре измерения значения порогов для 32-х компараторов АЦП. Для этого используется встроенная калибровочная система СИМС, а также счетчики числа срабатываний каждого компаратора. Калибровочная система включает в себя прецизионный ЦАП и проходную емкость 100 фФ,

позволяющую имитировать токовый сигнал с детектора заданной амплитуды. Так как шум канала имеет нормальное распределение, то зависимость числа срабатываний компаратора от амплитуды калибровочного сигнала при фиксированном количестве импульсов имеет характер S-кривой. Анализ S-кривых для отдельного компаратора позволяет вычислить значение уровня шума в каждом канале. Подробнее процедура измерения уровня шума описана в статье [A2].

Повышенный уровень шума в каналах (1-128) на *p*-стороне детектора обусловлен наличием *z* – образного соединения угловых микрополосок на детекторе при помощи двойной металлизации. Более высокий уровень шума в каналах на *p*-стороне соответствует шуму микрополосок на детекторе, соединенных при помощи второго слоя металлизации и обладающих за счет этого большей емкостью. Средний уровень шума определяется величинами емкости полоски сенсора и емкости полосковой линии микрокабеля и должен составлять не более 1500 е⁻. На уровень шума могут оказать дополнительное негативное влияние такие технологически неправильно выполненные операции, как нанесение клея (инкапсуляция) и монтаж электромагнитных экранов.

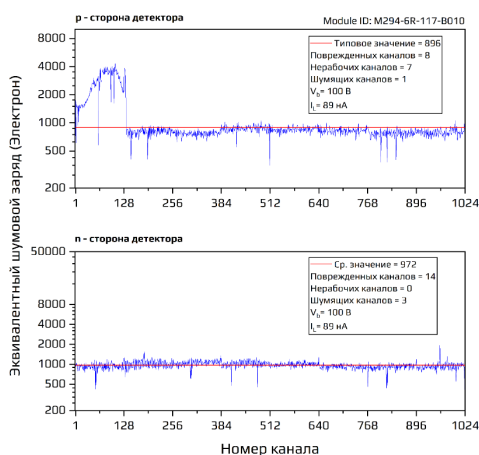


Рисунок 34 – Результаты измерения шума в каналах трекового модуля на *p*- и *n*-сторонах.

Окончательные испытания работоспособности собранных предсерийных модулей, предназначенных для комплектования первой станции модернизированной КТС установки ВМ@N, проводились на пучке протонов с энергией 1 ГэВ интенсивностью от 10^4 до 3×10^5 протонов сек⁻¹см⁻² на синхроциклотроне ПИЯФ в Гатчине.

Все трековые модули изготовлены с кремниевыми детекторы 62×62 мм², однако имели разную длину аналоговых микрокабелей в диапазоне от 110 до 155 мм, передающих сигналы с детекторов на входы электроники считывания. Рабочее напряжение смещения детекторов всех модулей установлено 100 В, гарантирующее создание обедненного слоя на всю толщину детектора, при этом измеренный ток утечки составляет $350 \div 550$ нА.

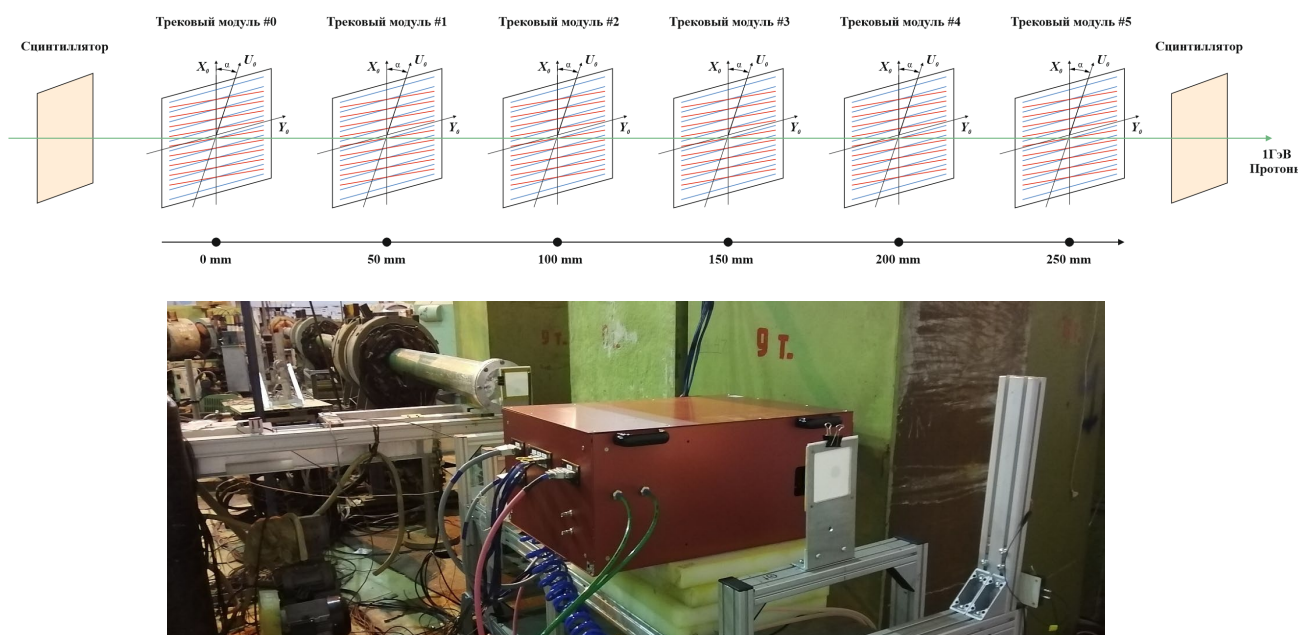


Рисунок 35 – Схема расположения кремниевых трековых детекторов в тестовой сборке во время испытаний их в ПИЯФ.

Кремниевые трековые модули установлены с шагом 50 мм по оси пучка. В процессе измерений были экспериментально получены данные: соотношение «Сигнал/Шум» для модулей различной конфигурации при длине микрокабеля 110 и 155 мм, соединяющего контактные площадки кремниевого микрополоскового детектора со считывающей электроникой, составило величину для n-стороны 21 – 24,5, для p-стороны 28 – 30,5 для области детектора с наклоненными микрополосками 8 – 13 [A11]. Координатное разрешение сенсоров составило $15,4 \pm 0,4$ мкм [A13]. Эффективность регистрации частиц единичным детектором 99 % для тех областей, где рабочими являются все каналы. В существующей конфигурации трекового модуля и системы считывания данных возможно использовать максимальную частоту триггера до 78,5 кГц, с возможностью минимального окна до 12,5 нс. Считывающая электроника модулей продемонстрировала стабильную работу в условиях загрузок на микросхему до $1,3 \text{ МГц сек}^{-1}$ ($295 \text{ кГц сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$).

Это позволяет утверждать, что достигнутые значения основных характеристик трековых модулей удовлетворяют с запасом всем предъявленным требованиям к ним для модернизации существующей кремниевой трековой системы BM@N. В данной конфигурации системы считывания несущая частота передачи данных составляет 80 МГц и, в принципе, если понадобится, может быть увеличена еще в 4 раза без изменения конструкции модуля путем увеличения несущей частоты передачи данных до 320 МГц. Таким образом, считывающая электроника трековых модулей имеет пропускную способность, более чем в 80 раз превышающую ожидаемую максимальную загрузку в условиях эксперимента BM@N [A12]. Сверхбыстрая считывающая электроника созданных модулей, а также использование потоковой

архитектуры передачи данных позволяет использовать систему в условиях загрузок до 545 кГц/см^2 кремниевого детектора, что делает перспективной возможность применения CBM/BMN модулей в условиях высоких загрузок, что в случае измерения крайне редких событий подпорогового рождения мультистранных гиперонов представляется крайне важным. Измеренный в опыте профиль выведенного пучка протонов с энергией 1 ГэВ для 6 детекторов сборки представлен на рисунке 36.

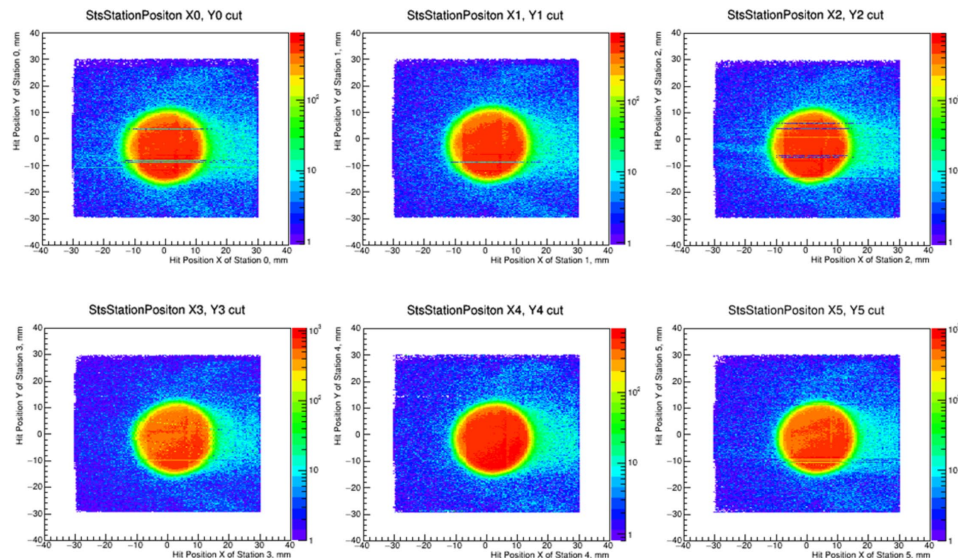


Рисунок 36 – Профиль протонного пучка с энергией 1 ГэВ с интенсивностью от 10^4 до 3×10^5 протонов $\text{сек}^{-1} \text{см}^{-2}$ для 6 плоскостей детекторов, установленных в испытательной сборке.

В рамках данной работы впервые были выполнены измерения амплитуд сигналов трековых модулей CBM/BMN на моноэнергетическом пучке протонов. Распределение амплитуд сигналов кластеров от протонов с энергией 1 ГэВ на p - и n -сторонах детектора, использованных в модуле, показано на рисунке 37. Под кластером понимается набор стрипов на одной из сторон сенсора, между которыми распределяется заряд, индуцированный заряженной частицей.

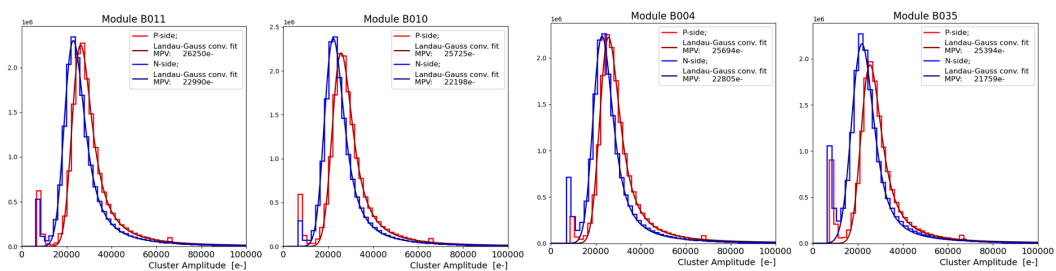


Рисунок 37 – Распределение амплитуд сигналов кластеров сработавших микрополосок в детекторе на p - и n -сторонах трекового модуля CBM/BMN [A12].

По результатам полученных данных на протонном пучке проведена оценка корреляции между микрополосками для разных детекторов в телескопе. Корреляция между микрополосками n -стороны детектора для разных модулей в телескопе представлена на рисунке 38.

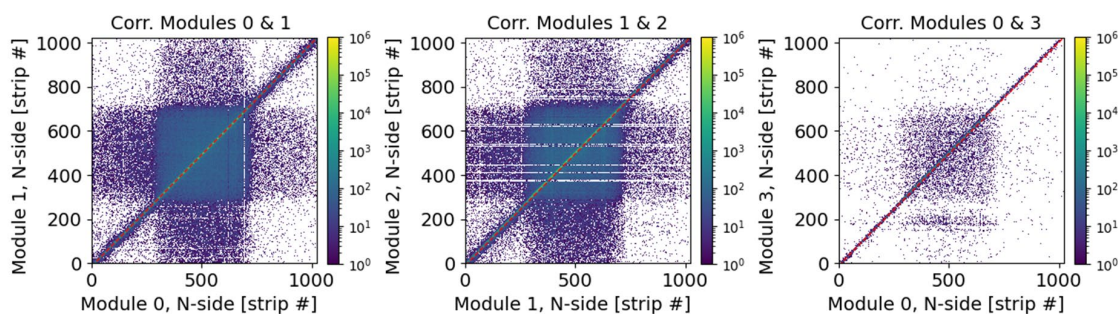


Рисунок 38 – Корреляция между микрополосками n-стороны детектора для разных модулей в телескопе.

Испытания 6 модулей предсерийной сборки, проведенные на пучке энергией 1 ГэВ, продемонстрировали стабильную работу изготовленных трековых модулей. Шесть изготовленных модулей установлены в телескоп с шагом 50 мм по оси пучка. Толщина каждого модуля составляет $X/X_0 = 0,38 \pm 0,01$ %. Рабочее напряжение смещения для всех сенсоров составляло 100 В, при этом значение напряжения полного обеднения для всех модулей находится в диапазоне $50 \div 70$ В. Ток утечки на детекторе составлял от 350 до 550 нА при средней температуре 20 °С. После анализа невязок треков пространственное разрешение для первой плоскости составило $15,4 \pm 0,04$ мкм, что хорошо соответствует аналитическому значению, при шаге микрополоски $p = 58$ мкм, разрешение составляет $p/\sqrt{12} = 16,7$.

В заключении приведены основные результаты работы, которые отражены в выводах.

Разработана оригинальная конструкция кремниевого трекового модуля на основе двухстороннего микрополоскового детектора с пространственным разрешением $15,4 \pm 0,04$ мкм и возможностью удаленного от детектора (до 450 мм) размещения входной электроники считывания данных.

При разработке технологии изготовления трекового модуля применялись передовые технологические процессы современного микроэлектронного производства. На практике доказана возможность изготовления трекового модуля с использованием гибких аналоговых алюминиево-полиимидных микрокабелей, удовлетворяющих техническим требованиям кремниевых трековых модулей CBM/BMN. Разработана технология изготовления надежного электрического и механического соединения трехслойных алюминиево-полиимидных микрокабелей с контактными площадками кристаллов на кремниевом микрополосковом детекторе и СИМС STS-XYTER, используемыми в трековом модуле для чтения данных с кремниевого детектора.

Разработан метод ЛАС ультразвуковой сварки гибких алюминиево-полиимидных микрокабелей, позволяющий соединить 2048 каналов двухстороннего микрополоскового

детектора со считывающей электроникой на расстоянии до 450 мм. Продемонстрирован алгоритм расчета оптимальных параметров ультразвукового соединения, который подтверждается результатами механического тестирования в процессе изготовления трековых модулей.

В работе представлено подробное описание разработанных методов определения оптимальных параметров как для ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой, так и для соединений, выполненных ЛАС ультразвуковой сваркой. С помощью разработанных методов подбора оптимальных параметров удалось получить среднее значение усилия на отрыв соединения, выполненного ЛАС ультразвуковой сваркой для Al-проводника толщиной 10 мкм и шириной 40 мкм, равное 4,6 грамм. Расчет геометрических параметров для технологии сварки алюминиевой проволокой позволил добиться среднего значения усилия на отрыв $10,46 \pm 0,22$ грамм для сварки 25 мкм проволокой.

Создана исследовательская инфраструктура для изучения характеристик изготавливаемых кремниевых трековых детекторов в процессе их производства.

Представлены результаты пошагового функционального тестирования компонентов трековых модулей во время их изготовления, подтверждающие проведенную оптимизацию процесса изготовления и высокий уровень отладки технологического процесса их изготовления.

Лабораторные испытания изготовленных трековых модулей на стендах показали, что средний эквивалентный шумовой заряд для p -стороны составляет $896 e^-$, а для n -стороны – $954 e^-$. При этом средний уровень электронов для минимальной ионизирующей частицы составляет $\sim 26000 e^-$ для p -стороны детектора и $\sim 23000 e^-$ – для n -стороны детектора. Соотношение «Сигнал/Шум» для модулей различной конфигурации с длинами микрокабелей от 110 до 155 мм составило величины в диапазоне от 21 до 29. Координатное разрешение сенсоров составило $15,4 \pm 0,4$ мкм. Эффективность регистрации частиц единичным детектором составила 99 % для тех областей, где рабочими являются все каналы. Считывающая электроника модулей продемонстрировала стабильную работу в условиях загрузок на микросхему до $1,3 \text{ МГц сек}^{-1}$ ($295 \text{ кГц сек}^{-1} \text{ см}^{-2}$).

Адаптирована информационно-производственная система CMIS в ОИЯИ, открывающая возможность автоматизации контроля производства сложных детекторных систем на географически удаленных производственных площадках.

Испытания модулей на пучке энергией 1 ГэВ продемонстрировали стабильную работу модулей, планируемых к установке в первой плоскости модернизированной установки КТС для BM@N.

Публикации автора по теме диссертации

- A0. 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>
- A1. 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>
- A2. 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>
- A3. 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>
- A4. Sheremetiev A., Dementev D., Elsha V. et al., «Status of the BM@N STS Module Assembly» // Phys. Part. Nuclei 53, 377 – 381 (2022) <https://doi.org/10.1134/S1063779622020745>
- A5. A. Sheremetev, Yu. Murin, V. Borshchov, et al., «Development of tooling for STS module assembly at VB LHEP JINR Assembly lab» // CBM Progress Report 2015, Изд: GSI, Darmstadt, 40, 2015 <https://doi.org/10.1134/S1547477124700456>
- A6. A. Sheremetev, R. Artech Diaz and M. Shitenkow «QA tests of the LDOs developed for the assembly of the BM@N STS modules» // CBM Progress Report 2021, ISSN:978-3-9822127-0-8, Изд: GSI Darmstadt, 44, (2022).
- A7. A. Sheremetev, T. Semchukova, T. Andreeva et al., «Assembly of demonstrators for laboratory and in-beam tests at JINR LHEP» // CBM Progress Report 2016, Изд: GSI Darmstadt, 49, ISSN: 978-3-9815227-4-7, (2016).
- A8. V. Elsha, D. Dementev, A. Sheremetev et al., «Towards length specification of ultra-light microcables for the BM@N STS» // CBM Progress Report 2018, GSI, Darmstadt, 2018
- A9. Yu. Murin, V. Elsha, V. Penkin, O. Sheremetyev, et al., «Setting up the STS module and ladder assembly site at JINR-LHEP» CBM Progress Report 2014, Изд:GSI, Darmstadt, 50, ISSN 978-3-9815227-2-3, (2014)
- A10. Dementev D., Baranov A., Elsha, V. et al., «The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment» // Phys. Part. Nuclei 53, 197 – 202 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063779622020265>

- A11. A. Sheremetev, Yu. Murin, M. Ladatko «Assembly of an STS module with two daisy-chained double sided Si sensors» // CBM Progress Report 2017, Изд: GSI Darmstadt, 34, 978-3-9815227-5-4, 2017.
- A12 Дементьев Д. В., Шитенков М. О., Леонтьев В. В., Сухов Н. В., Шереметьев А. Д., Мурин Ю. А, «Соотношение Сигнал/Шум модуля кремниевой трековой системы эксперимента BM@N» // Приборы и техника эксперимента, ISSN:0032-8162, Изд:МАИК Наука Интерпериодика, 23 - 32, 2023. <https://doi.org/10.31857/S0032816223010111>
- A13 Д. Дементьев, В. Леонтьев, Ю. Мурин, И. Руфанов, А. Шереметьев, М. Шитенков, «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. <https://doi.org/10.1134/S1547477124701000>

Цитируемая литература

1. Afanasiev S. et al. «Production of π^+ and K^+ mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 AGeV» // Journal of High Energy Physics, 2023. [https://www.doi.org/10.1007/JHEP07\(2023\)174](https://www.doi.org/10.1007/JHEP07(2023)174).
2. Maksymchuk A. et al. «Upgrade of the BM@N detector for studies of heavy ion interactions» // Int J Mod Phys Conf Ser. 2023. Vol. 51. <https://www.doi.org/10.1142/S201019452361013X>.
3. A. Sheremeteva et al. «Progress in STS Sensor Characterization at JINR» // CBM Progress Report. 2017. P. 18. <https://www.doi.org/10.15120/GSI-2018-00485>.
4. I. Panasenکو et al. «Microcable Quality Assurance: Capacitance measurements» // Darmstadt, Germany, 2017. 43–43 p.
5. V. Borshchov et al. «Development of thin multi-line cables for the STS micro-strip detector modules» // CBM Progress Report 2007, Germany, 2008. 34–35 p.
6. Shitenkov M. et al. «Front-End Electronics for BM@N STS» // Physics of Particles and Nuclei. 2021. Vol. 52, № 4. P. 826–829. <https://www.doi.org/10.1134/S1063779621040559>.
7. Kasinski K. et al. «Characterization of the STS/MUCH-XYTER2, a 128-channel time and amplitude measurement IC for gas and silicon microstrip sensors» // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., 2018. Vol. 908. P. 225–235. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.076>.
8. Tacq J. «The Normal Distribution and its Applications» // International Encyclopedia of Education, 2010. P. 467–473. <https://www.doi.org/10.1016/B978-0-08-044894-7.01563-3>.
9. CERN. «Testing of Wire Bonds». https://bondlab-qa.web.cern.ch/Pull_test.html.
10. Delvotec the Ball-Wedge Bonder G5 62000. 2017. <https://www.fkdelvotec.com>.