

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ТРЕКОВЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ДВУСТОРОННИХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*А. Д. Шереметьев, Д. В. Дементьев,
В. В. Леонтьев, М. О. Шитенков, Ю. А. Мурин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматриваются ключевые технологические этапы изготовления трековых модулей на основе микрополосковых детекторов для будущего применения в широкоапертурной кремниевой трековой станции эксперимента $BM@N$. Описываются методы нахождения оптимальных параметров ультразвуковой линейной автоматической сварки алюминиевых микрокабелей с кремниевым детектором. Рассматривается методика и приводятся результаты промежуточного тестирования в процессе изготовления трекового модуля. Описывается методика монтажа бескорпусных микросхем на плату. Представлены результаты предсерийной сборки кремниевых трековых модулей.

The key technological stages of producing track modules based on microstrip detectors for future use in a wide-aperture silicon track station of the $BM@N$ experiment are considered. The methods of finding the optimal parameters of ultrasonic linear automatic welding of aluminum microcables with a silicon detector are described. The methodology is considered, and the results of intermediate testing in production of the track module are given. The method of board unpacked chip mounting is described. The results of the pre-assembly of silicon track modules are presented.

PACS: 29.40.Gx; 07.05.Tp; 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

Трековые системы на основе кремниевых координатно-чувствительных детекторов, широко применяемые в экспериментах по физике высоких энергий для реконструкции траекторий вторичных частиц, их моментов и вершин рождения, позволяют достичь рекордного пространственного разрешения и обладают необходимым быстродействием для установки их на минимальных расстояниях от источника частиц. Высокая гранулярность кремниевых трековых систем обуславливает наличие большого количества каналов считывающей электроники, которое в современных экспериментах может достигать нескольких миллиардов. Конструкция таких трековых систем предполагает использование легких опорных ферм из углекомпозитных материалов, на которые в виде черепицы монтируются детекторы.

Минимальным детектирующим элементом системы, как правило, является модуль, состоящий из одного или нескольких детекторов и считывающей электроники. При использовании полосковых детекторов в современных физических установках возникает необходимость вынести считывающую электронику из чувствительной области детектора для того, чтобы минимизировать количество вещества на пути вторичных частиц и снизить радиационные загрузки электроники. Впервые с этой технической нетривиальной задачей столкнулся эксперимент D0 (Фермилаб, США), вынужденный модернизировать свой детектор [1]. Решение этой задачи осложняется необходимостью передавать зарядовый сигнал сверхмалой амплитуды ($\sim 3,6$ фКл для детекторов толщиной 300 мкм) от детектора на входные тракты считывающих микросхем с минимальными потерями, не внося при этом дополнительного вещества, ухудшающего пространственное разрешение системы. Кроме того, в современных установках используются детекторы с шагом полосок менее 100 мкм. Это требует разработки и производства специализированных микрокабелей значительной длины (до 50 см), адаптированных под топологию используемых в эксперименте детекторов и микросхем.

В эксперименте D0 в конструкции слоя L0 центральной трековой системы [2] были использованы длинные дорогостоящие медные кабели фирмы «Ducopex AG» (Швейцария) [1]. Вместе с тем основные модули центрального трека с полосковыми сенсорами уже тогда соединялись со считывающей электроникой при помощи коротких алюминиевых микрокабелей на полиимидной основе, изготовленных фирмой LTU (Харьков, Украина). Позже короткие алюминиевые микрокабели LTU с успехом использовались в ЦЕРН при создании модулей двух внешних слоев в первой версии внутренней трековой системы ITS эксперимента ALICE в ЦЕРН [3].

Учитывая опыт экспериментов ALICE и D0, можно утверждать, что отказ от применения медных кабелей в пользу более дешевых и легких ко времени начала работ по созданию кремниевых трековых систем большой площади был вполне оправдан. Расчеты шумовых характеристик, связанные с увеличением сопротивления дорожек кабеля при переходе от меди к алюминию, были малы [1]. Использование алюминиевых проводников позволяет применять ультразвуковую линейную автоматическую сварку (ЛАС) (Tape Automated Bonding, TAB) [4] для соединения микрокабеля с контактными площадками на кремниевых кристаллах. Немаловажным также является и тот факт, что радиационная длина (X_0) для алюминия более чем в два раза выше, чем для меди, что уменьшает вторичное рассеивание частиц и радиационные потери в трековой системе.

В современных экспериментах, нацеленных на изучение свойств сверхплотной барионной материи в столкновениях тяжелых ионов, к внутренним «вершинным» трековым системам предъявляются особые требования. В качестве примера можно привести создающуюся кремниевую трековую систему эксперимента CBM (FAIR, Германия) [5]. Данная система должна измерять треки вторичных частиц в условиях высокого быстродействия (частота взаимодействий до 10 МГц), высокой множественности вторичных частиц (до 700 при соударениях Au + Au при энергиях 10 ГэВ/нуклон), должна иметь способность работать в условиях высоких радиационных загрузок (до 10^{14} МэВ нейтронных эквивалентов на см^2) и обеспечивать при этом пространственное разрешение для треков вторичных частиц не хуже 25 мкм. Конструкция кремниевой трековой системы CBM включает в себя восемь плоско-

стей, состоящих из модулей на основе двусторонних микрополосковых кремниевых детекторов, установленных внутри дипольного магнита. Каждый модуль состоит из детектора, двух плат со считывающей электроникой и набора сверхлегких (0,23 % X_0) алюминиевых микрокабелей на полиимидной основе. Конструкция трекового модуля, а также методика серийной сборки таких модулей была разработана в рамках сотрудничества коллаборации CBM и группы разработки кремниевой трековой системы эксперимента VM@N, где также планировалось использование трековых модулей схожей конструкции.

В данной работе описывается методика сборки трековых модулей, состоящих из двусторонних микрополосковых кремниевых детекторов и считывающей электроники, соединенной с каналами детектора при помощи сверхлегких алюминиевых микрокабелей. Приводятся результаты тестирования модулей в процессе и после сборки, а также результаты, полученные после сборки опытных трековых модулей для будущей кремниевой трековой системы эксперимента VM@N.

ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ТРЕКОВОГО МОДУЛЯ VM@N

Кремниевая трековая система эксперимента VM@N является частью гибридного трека, находящегося внутри дипольного магнита СП-41. В настоящее время гибридный трекер состоит из 4 плоскостей на основе двусторонних кремниевых детекторов (FW-Si) и 7 плоскостей GEM (Gas Electron Multipliers) детекторов, перед которыми планируется установить четыре станции кремниевой трековой системы (KTC) с большей апертурой [6]. KTC должна состоять из 292 трековых модулей. Фотография модуля с обозначениями основных компонентов показана на рис. 1.

Ключевым компонентом трекового модуля является микрополосковый детектор, дизайн которого был разработан под задачи эксперимента CBM [7]. При сборке трековых модулей используются детекторы фирмы Hamamatsu Photonics K. K [8] размером 62×62 мм и 42×62 мм. Толщина детектора составляет (320 ± 15) мкм. Детекторы изготавливаются по планарной технологии на пластинах высокоомного кремния

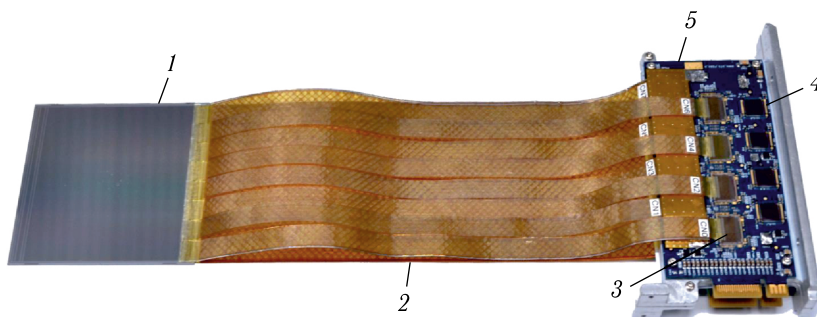


Рис. 1. Общий вид кремниевого трекового модуля VM@N STS: 1 — кремниевый двусторонний микрополосковый детектор; 2 — сверхлегкие алюминиево-полиимидные микрокабели; 3 — специализированная интегральная микросхема (СИМС) STS-XYTER; 4 — микросхемы линейного регулятора напряжения LDO; 5 — интерфейсная плата FEB

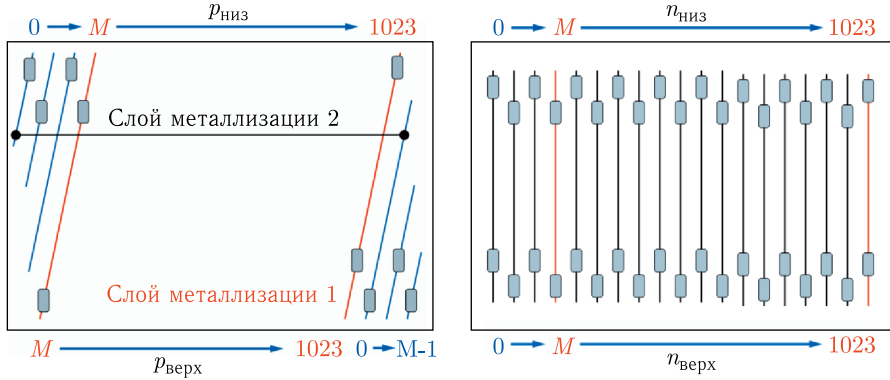


Рис. 2. Схема ориентации микрополосок на детекторе. На p -стороне детектора микрополоски соединены при помощи второго слоя металлизации (для детектора 62×62 мм количество коротких полосок = 134, для детектора 42×62 мм количество коротких полосок $M = 88$)

n -типа, выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП) с удельным сопротивлением ~ 8 кОм \cdot см. На каждой стороне детектора находится 1024 микрополоски, расположенные с шагом 58 мкм. На n -стороне полоски располагаются параллельно краям детектора ($\theta_p = 0^\circ$), на p -стороне полоски расположены под углом $\theta_p = 7,5$. Короткие полоски, находящиеся в противоположных углах детектора, соединяются при помощи второго слоя металлизации на поверхности детектора (рис. 2).

Детекторы имеют интегрированные в каждую микрополоску сопротивление (500 кОм) и разделительную емкость, обеспечивающие связь через диэлектрический слой по переменному току между обедненной областью стрипа и металлизацией микрополоски для считывания сигнала.

Для соединения считывающей электроники с полосками детектора используется набор плоских алюминиевых микрокабелей. Такой микрокабель изготавливается путем фотолитографии на полиимиде марки FDI-A20 [9]. Количество вещества в одном слое алюминиево-полиимидных микрокабелей — 0,23% X_0 [10]. 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%-м заполнением, что позволяет достичь минимальной для данной конструкции диэлектрической проницаемости и тем самым уменьшить связь по переменному току между соседними проводниками в сборке. Каждый микрокабель имеет 64 сигнальных проводника шириной 40 мкм с шагом 116 мкм. Сопротивление сигнальной линии составляет 9–14 Ом/см, его емкость 0,36–0,45 пФ/см [9, 10]. Топология ультралегкого микрокабеля предполагает использование технологии ЛАС (линейной автоматической сварки, TAB-bonding) для соединения проводников с контактными площадками на детекторе и считывающей электронике, без использования дополнительных переходных соединений.

Сигналы от микрополоскового детектора передаются на быструю считывающую электронику детектора на базе СИМС STS-XYTER [11, 12]. Чип изготовлен по КМОП-процессу UMC (United Microelectronics Corporation), толщиной 180 нм и имеет площадь $10 \times 6,75$ мм [12]. Размер контактных площадок для ЛАС составляет 180×60 мкм с шагом 116 мкм. Такая высокая плотность контактов обусловлена

применением бескорпусных микросхем. Ключевой особенностью микросхемы является архитектура потоковой обработки сигнала без использования внешнего триггера [13]. Микросхема имеет 128 входных каналов низкошумящих ($< 1000\text{e}/\text{rms}$) 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 тяжести кластера с помощью пятиразрядного АЦП с возможностью регулировки динамического диапазона входных сигналов от 12 до 120 фКл. Вторая ветвь с более быстрым временем формирования сигнала предназначена для фиксации отметки времени. Максимальная пропускная способность микросхемы составляет 50 млн событий/с на 128 регистрирующих каналов. STS-XYTER может работать с сигналами обеих полярностей. Для этого используется дополнительный инвертор сигнала на выходе с ЗЧУ при работе с зарядами отрицательной полярности.

Для считывания и обработки сигналов со всех полосок детектора используются две интерфейсные платы FEB, на каждую из которых устанавливаются по 8 бескорпусных микросхем STS-XYTER. Для питания считывающей электроники детектора на каждую плату FEB в процессе сборки модуля монтируются 4 специализированные микросхемы линейного регулятора напряжения LDO (Low-DropOut linear regulator) в бескорпусном исполнении [14].

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.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ СБОРКИ ТРЕКОВОГО МОДУЛЯ

Сборка трековых модулей является самым сложным и длительным технологическим этапом производства трековой системы, который потребовал разработки и производства специализированной высокоточной оснастки, оптимизации всех технологических этапов сборки и их последовательности, интеграции процедур контроля качества на всех этапах, а также конструктивно-информационную систему управления производством (CMIS) [15], позволяющую эффективно контролировать серийную сборку модулей в географически удаленных сборочных центрах (GSI–ОИЯИ).

Все компоненты, используемые в сборочном процессе, проходят предварительный этап визуального и функционального тестирования, что позволяет минимизировать количество брака в производственном процессе. Технологический процесс сборки трековых модулей включает в себя четыре ключевых этапа сборки и три этапа промежуточного тестирования:

1) сборка двух интерфейсных плат FEB с микросхемами линейного регулятора напряжения (рис. 3, а);

2) сборка 16 микросхем с микрокабелями. Ультразвуковая сварка (УЗС) СИМС STS-XYTER с двумя микрокабелями для четных и нечетных каналов и тестирование электрического соединения. Данная сборка в технологическом процессе обозначается как «микросхема–микрокабель» (рис. 3, б);

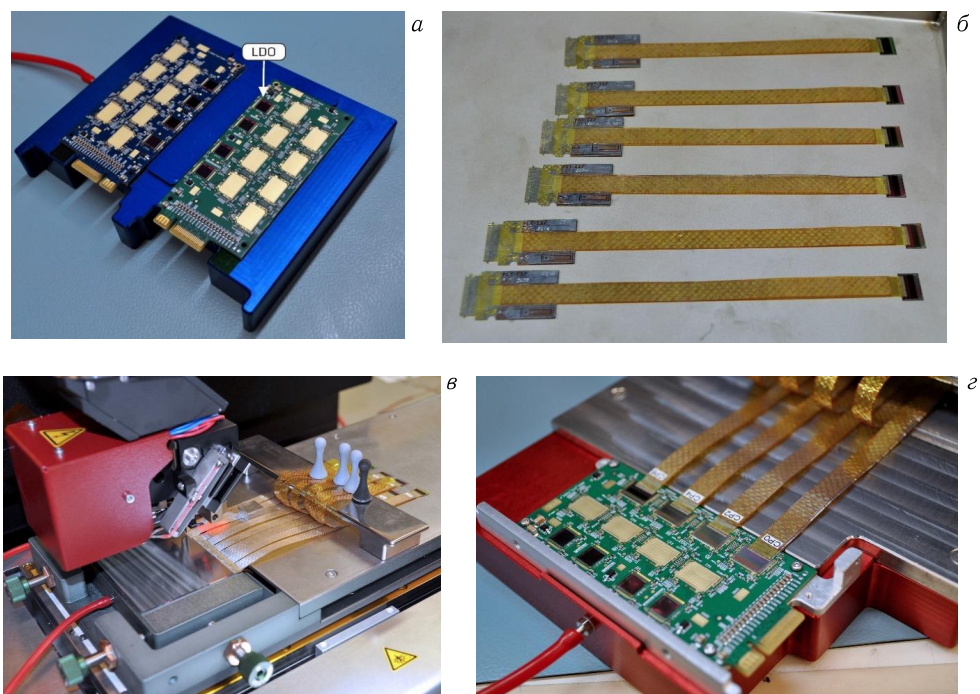


Рис. 3. Результаты основных этапов сборки трекового модуля: а) набор плат FEB, установленных на оснастку для тестирования; б) комплект микрокабелей, собранных с СИМС STS-XUTER с разъемом для тестирования; в) процесс ультразвуковой сварки «микросхема–микрокабель» с детектором; з) установка микросборки «микросхема–микрокабель–детектор» на плату считывающей электроники

3) сборка «микросхема–микрокабель–детектор». Сварка 16 микросхем с микрокабелями к контактным площадкам на обеих сторонах детектора (рис. 3, в);

4) монтаж и сварка СИМС на интерфейсные платы FEB (рис. 3, з).

Установка микросхем линейного регулятора напряжения на интерфейсные платы FEB. Микросхема LDO устанавливается на печатную плату FEB при помощи теплоэлектропроводящего клея¹ (рис. 4, а). Клей наносится при помощи ручного диспенсера. На этом этапе важно обеспечить единый рисунок нанесения клея на все места установки микросхемы, а также его равномерное распределение по всей площади микросхемы для обеспечения качественного отвода тепла от кристалла. Опытным путем был выбран метод точечного нанесения клея с диаметром точки 400 мкм с шагом 800 мкм. После полимеризации клея в печи при температуре 120 °С производится ультразвуковая сварка контактных площадок на микросхеме и интерфейсной плате с использованием алюминиевой проволоки диаметром 25 мкм (рис. 4, б). На следующем этапе производится проверка качества ультразвуковых соединений на установке тестирования микросоединений на отрыв². Используемый метод тестирования

¹Epoxy Technology Epo-Tek®H20E Electrically Conductive, Silver Epoxy.

²Nordson Test & Inspection 4000 Plus Bondtester.

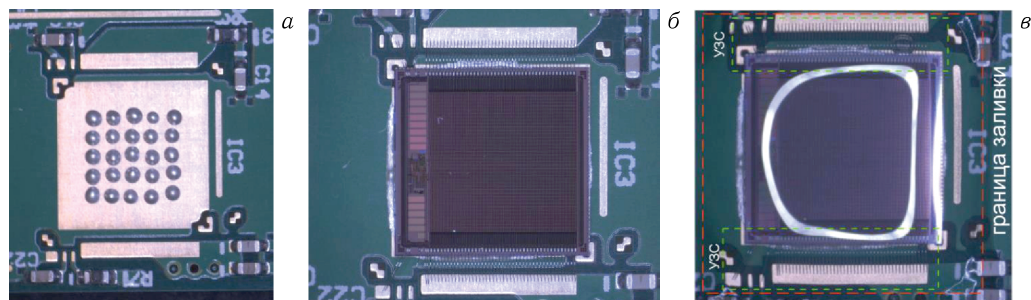


Рис. 4. Этапы сборки микросхемы линейного регулятора напряжения с платой электроники: а) нанесение теплоэлектропроводящего клея на интерфейсную плату FEB; б) микросхема линейного регулятора напряжения после ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой 25 мкм; в) инкапсулированная микросхема с областями УЗС и границей инкапсуляции микросхемы

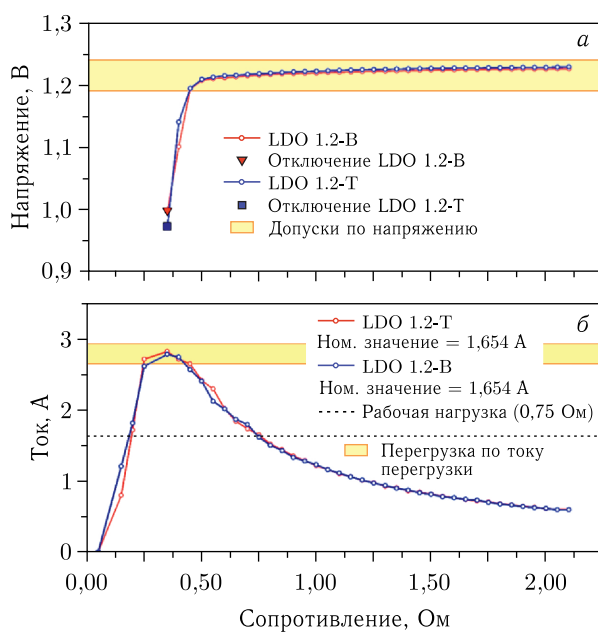


Рис. 5. Результаты тестирования двух микросхем LDO после размещения на плату электроники: зависимость от сопротивления нагрузки выходного напряжения микросхемы (а) и тока на выходе микросхемы (б). В процессе тестирования проверяется значение выходного напряжения при расчетной нагрузке (0,75 Ом), а также срабатывание защитного отключения микросхемы в случае превышения заданного порога по выходному току 2,8 А (при этом значение напряжения понижается до 0,9 В). В случае непрохождения тестов плата с установленными LDO не используется для дальнейшего изготовления модуля

является разрушающим и подразумевает отрыв трех тестовых сварных соединений на сборке. В процессе данного теста ведется измерение усилия отрыва проволоки, которое затем сравнивается с расчетным значением. Для используемого типа проволоки собственное значение максимального усилия на разрыв составляет 14–16 г. После тестирования качества сварных соединений осуществляется инкапсуляция чипа и сварных соединений для защиты от механических повреждений и электрической изоляции проводников. Инкапсуляция производится в два этапа по технологии «Дамба с заполнением» («Dam and Fill») [16] с использованием клеев¹ для создания дамбы и в качестве наполнителя².

После инкапсуляции LDO производится включение микросхем с тестовой нагрузкой. Данный тест необходим для контроля работоспособности микросхем LDO и установленного максимального значения выходного тока, при котором происходит защитное отключение. Для тестирования LDO используется автоматизированный стенд, включающий в себя источник питания³, электронную нагрузку⁴, мультиметр⁵, а также программное обеспечение, написанное на LabVIEW [14]. Пример результатов тестирования двух LDO после установки на печатную плату представлен на рис. 5.

Ультразвуковая сварка микросхем для сборки и обработки сигналов с детектора с алюминиевыми микрокабелями. Следует подчеркнуть, что особенностью трекового модуля является применение сверхлегких алюминиево-полиимидных микрокабелей, присоединение которых к детектору и микросхемам осуществляется при помощи технологии ультразвуковой сварки ЛАС [4]. Данный метод имеет ряд преимуществ перед классической проволочной ультразвуковой сваркой:

- количество необходимых контактных соединений в два раза меньше, чем при использовании термозвуковой шариковой или термокомпрессионной сварки;
- более прочное соединение внутренних выводов на растяжение;
- ультразвуковая сварка алюминиевого плоского проводника и алюминиевой контактной площадки может производиться без предварительного нагрева образца;
- возможность многоуровневой сборки в одной плоскости; возможность низкопрофильной (планарной) конструкции;
- для осуществления сварки необходимо разрушить оксидный слой на контактной площадке. Для того чтобы очистить поверхность от оксида алюминия, требуется приложить меньше усилий по сравнению с удалением оксида меди или золота. Это позволяет более точно подбирать параметры для сварки и минимизировать негативное влияние на структуру кристалла под зоной сварки.

Данная технология применяется при сборке СИМС STS-XYTER с двумя алюминиевыми микрокабелями. Шаг контактов на микрокабеле составляет 116 мкм. Шаг полосок на детекторе — 58 мкм, поэтому контактные площадки на детекторе и СИМС расположены в шахматном порядке, а для сварки четных и нечетных каналов используются два слоя микрокабелей. Каждый микрокабель имеет 64 проводника, а СИМС имеет 128 входных каналов.

¹Dymax Multi-Cure®9001-E-V3.1 Resilient Encapsulant.

²Dymax Multi-Cure®9008 UV-Curable Flex Circuit Adhesive.

³Power supply Rohde Schwarz HMP2030.

⁴Programmable DC Electronic Load Keithley 2380.

⁵Multimeter Keithley 2000.

Зона ультразвуковой сварки

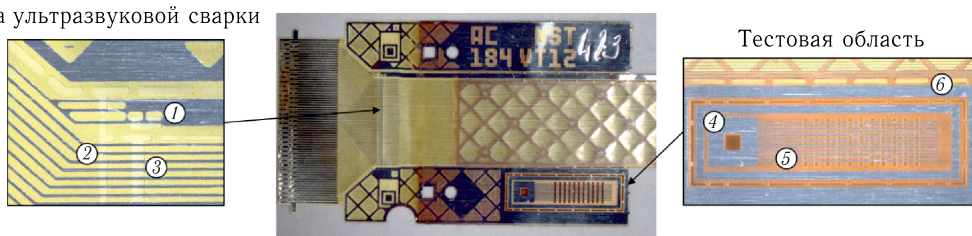


Рис. 6. Ультралегкий алюминиевый микрокабель с тестовой зоной. Зона ультразвуковой сварки: проводник подачи напряжения смещения на детектор с окном для УЗС (1), окна для отрезания тестовой зоны кабеля (2), 64 сигнальных алюминиевых проводника для УЗС (3). Тестовая область: зона для установки инструмента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

Сборка микрокабеля с микросхемой производится в три этапа: совмещение алюминиевого микрокабеля с СИМС на специализированной оснастке, ультразвуковая сварка алюминиевого микрокабеля с микросхемой, тестирование сборки на стенде.

Качество собранных изделий зависит от правильности и точности подобранных параметров ультразвуковой сварки (усилие, время и мощность ультразвуковой сварки). Каждый микрокабель имеет тестовую зону для предварительного подбора параметров (рис. 6) и окно для ультразвуковой сварки контактных площадок на кабеле.

Микрокабель укладывается на СИМС, зафиксированный в специализированной оснастке (рис. 7), и позиционируется при помощи микрометрических винтов. Точность позиционирования составляет около 5 мкм. Площадка для установки микросхемы на оснастке имеет систему позиционирования для установки пробкарты, которая позволяет производить функциональное тестирование (измерения собственных шумов) микросхемы на сборочной оснастке.

Для подбора параметров ультразвуковой сварки осуществляется наварка тестовой области микрокабеля на кремниевый кристалл (микрорословый детектор, не прошедший функциональные тесты) (рис. 8, а). Ультразвуковая сварка тестовой зоны

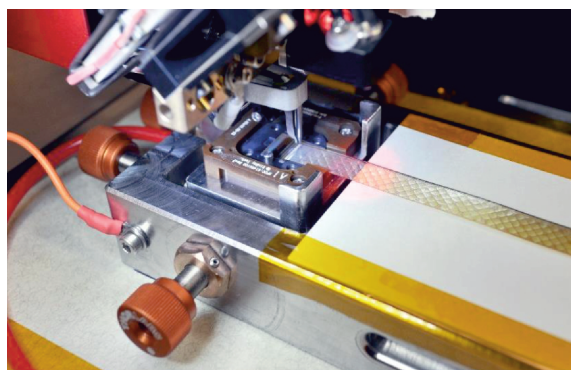


Рис. 7. Процесс сборки считывающей электроники СИМС с ультралегким алюминиевым микрокабелем на установке ультразвуковой сварки

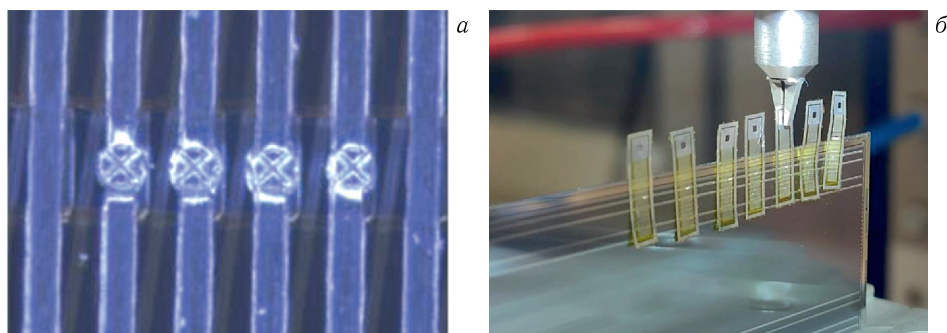


Рис. 8. а) Кремниевый детектор с тестовыми образцами на установке для отрыва; б) ультразвуковая сварка четырех проводников по технологии ЛАС

производится в четырех точках, что дает более стабильные результаты измерений и уменьшает вероятность механического повреждения во время установки в тестовый стенд (рис. 8, б). После отрыва тестовой зоны измеренное усилие на отрыв пересчитывается на одну точку сварки. Данный этап позволяет подобрать время, мощность и усилие для каждого сварного соединения. Подбор параметров осуществляется для партии микрокабелей, изготовленных в одном технологическом процессе. Для оценки качества сварки используется метод тестирования образца на сдвиг в соответствии со стандартом MIL-STD-883 2011.9 [17]. Данный метод является разрушающим, так как в процессе испытания происходит сдвиг образца с измерением усилия на отрыв. Измерения производятся на установке Nordson Bondtester 4000Plus (рис. 8, а).

Параметры сварного соединения устанавливаются в соответствии со стандартом MIL-STD-883 2011.9. Зависимость усилия на разрыв от диаметра алюминиевой проволоки при сварном соединении представлена на рис. 9 [17]. При площади сечения проводника 490 мкм^2 (соответствует диаметру проволоки 25 мкм) усилие на раз-

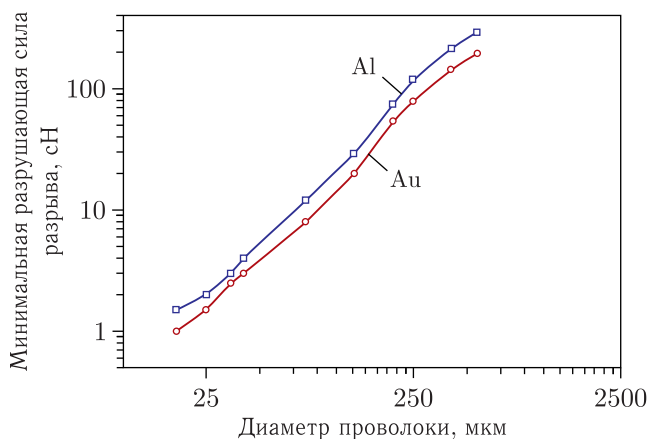


Рис. 9. Графики зависимостей минимальной разрушающей силы разрыва от диаметра проволоки для золотого и алюминиевого ультразвукового соединения

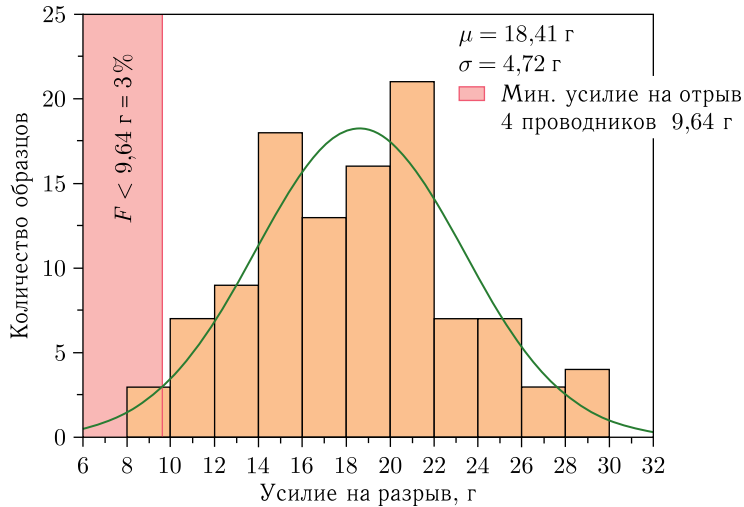


Рис. 10. Результаты тестирования на отрыв образцов алюминиевого микрокабеля, приваренных в четырех точках к микросхеме по технологии ЛАС

рыв после сварки должно превышать значение 2 г. Площадь сечения проводника, используемого для сварки микрополосковых модулей, составляет 560–595 мкм^2 и определяется временем травления проводника в процессе фотолитографии. Исходя из площади сечения проводника в микрокабеле, можно сделать вывод, что усилие на разрыв, требуемое для качественного соединения, должно составлять $\geq 2,41$ г для одного проводника.

В процессе подготовки к сборке СИМС STS-XYTER с гибкими алюминиевыми микрокабелями было протестировано более 100 тестовых образцов на отрыв. Среднее значение усилия на отрыв для тестовой зоны с четырьмя точками сварного соединения на кристалле составило $(18,4 \pm 0,9)$ г, что соответствует усилию $18,4 - 4 = 4,6$ г для каждого проводника в образце. Полученные результаты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к данному этапу изготовления, и гарантируют надежное механическое и электрическое соединение микрокабеля с детектором и микросхемой. Результаты измерений представлены на рис. 10.

После сборки «микросхема–микрокабель» производится функциональное тестирование при помощи пробкарты [14]. Помимо проверки работоспособности микросхемы, тестирование дает возможность выявить неработающие, несваренные или поврежденные статическим зарядом во время сборки каналы. Метод оценки качества сварного состояния и работоспособности отдельно взятого канала микросхемы основан на измерении и отслеживании уровня шума в каждом канале микросхемы на каждом этапе сборки модуля. После каждого нового этапа сборки емкость на входе зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) растет, а за счет этого увеличивается и уровень шума в отдельно взятом канале. Если шум в канале после сборки «микросхема–микрокабель» остался на прежнем уровне, это говорит о том, что электрическое соединение между кабелем и входной площадкой микросхемы отсутствует. Если входной тракт был поврежден в процессе сварки, то сигнал с этого канала отсутствует. На рис. 11, а в качестве примера показаны результаты тестирования одной сборки «микросхема–

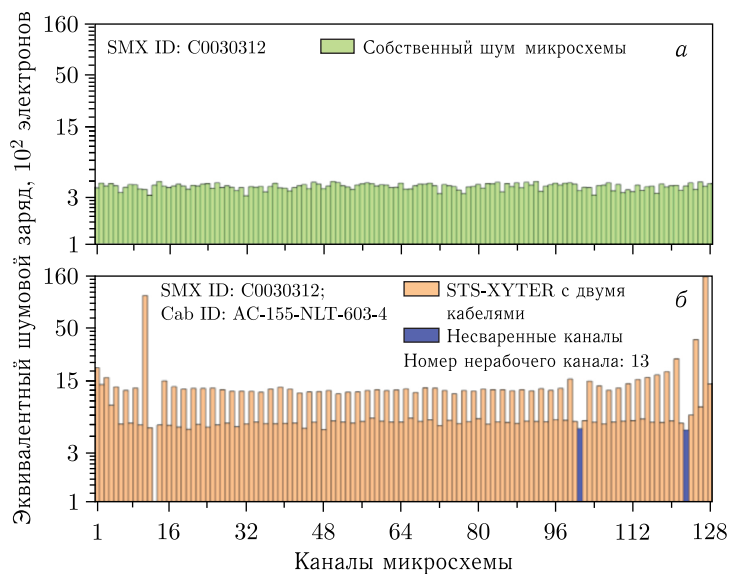


Рис. 11. Результаты промежуточного тестирования СИМС STS-XYTER в процессе сборки «микросхема–микрокабель». Тестирование микросхемы с кабелем производилось в тестовой коробке, без установленного экрана. Разница между четными и нечетными каналами характеризуется тем, что верхний кабель в сборке является экраном для нижнего кабеля

микрокабель». Измеренный шум сравнивается с собственным шумом микросхемы до сборки. Нулевой уровень шума (рис. 11, б, 13-й канал) подразумевает отсутствие сигналов с данного канала, что может быть вызвано повреждением статическим зарядом или механическим повреждением во время сборки. Последствием повреждения также является увеличенный шум на соседнем 11-м канале (10248 электрон).

Промежуточное тестирование (рис. 11, б) показало, что каналы 101 и 123 не имеют значительного прироста шума по отношению к измеренным собственным шумам микросхемы. Незначительное увеличение шума в каналах микросхемы после сборки требует дополнительного визуального контроля, так как, возможно, в данных каналах качество сварки не удовлетворяет предъявляемым требованиям сборки. Более подробно процесс электрического тестирования описан в статье [18].

Установка считывающей электроники с микрокабелями на кремниевый микрополосковый детектор. Процесс сборки «микросхема–микрокабель–детектор» происходит с помощью специализированной оснастки. Процесс сборки включает четыре этапа: юстировку площадок сборки «микросхема–микрокабель» относительно площадок микрополоскового детектора; ультразвуковую сварку с подобранными на образцах параметрами; функциональное тестирование микросхемы в сборе и инкапсуляцию соединений.

Качество сварных соединений, а в дальнейшем и всего модуля, зависит от стабильной повторяемости процесса ультразвуковой сварки, что влечет за собой высокие требования к точности изготовления оснастки, применяемой для ультразвуковой сварки микрополоскового детектора. Рабочая плоскость оснастки была измерена перед сборкой детекторов для внесения корректировочных значений в программу свар-

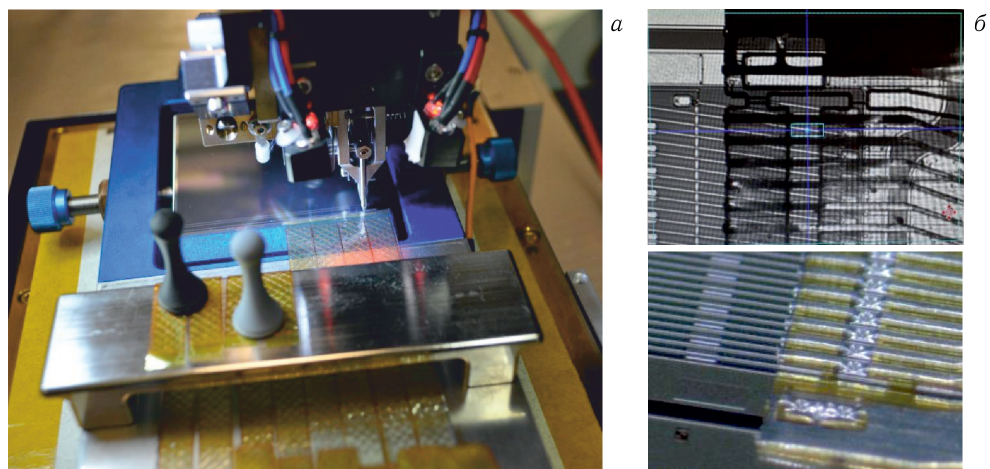


Рис. 12. а) Процесс ультразвуковой сварки гибкого микрокабеля с детектором; б) результат совмещения микрокабеля с площадкой детектора

ки. Плоскопараллельность оснастки в зоне ультразвуковой сварки микрополоскового детектора составляет $\sigma = 10\text{--}20$ мкм, что в четыре раза меньше минимально допустимого значения для используемой ультразвуковой машины Delvotec G5. 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. Процесс и результат ультразвуковой сварки гибкого микрокабеля с детектором представлен на рис. 12.

После сборки осуществляется тестирование качества сварных соединений, для этого используется тот же метод, что и на предыдущем этапе. В процессе сборки модуля учитываются паспортные данные детектора. В детекторе могут присутствовать три основных типа дефектов: замыкание слоев металлизации микрополосок, разрыв микрополосок, пробой МОП-конденсатора. В процессе сборки с использованием паспортных данных детектора микрополоски с пробитыми конденсаторами не развариваются. В случае присутствия группы закороченных микрополосок производится сборка только центральной микрополоски. Микрополоски с дефектами структуры металлизации собираются в стандартном технологическом процессе.

На рис. 13 приведены результаты тестирования одной микросхемы STS-XYTER с микрокабелем и микрополосковым детектором. Сравнение результатов измерений до сборки детектора и после (рис. 13, б, в) показало, что после сборки добавилось 2 неработающих канала (123-й, 128-й) и 3 неразваренных канала. Результаты тестирования детектора с напряжением смещения представлены на рис. 20.

Данная методика сборки и тестирования «микросхема–микрокабель–детектор» позволяет эффективно выявить нерабочие каналы на этапе ультразвуковой сварки, что делает сборку ремонтпригодной (возможность отремонтировать ультразвуковые соединения до финишной инкапсуляции). Тем самым уменьшается количество запасных компонентов, используемых в процессе изготовления трекового модуля.

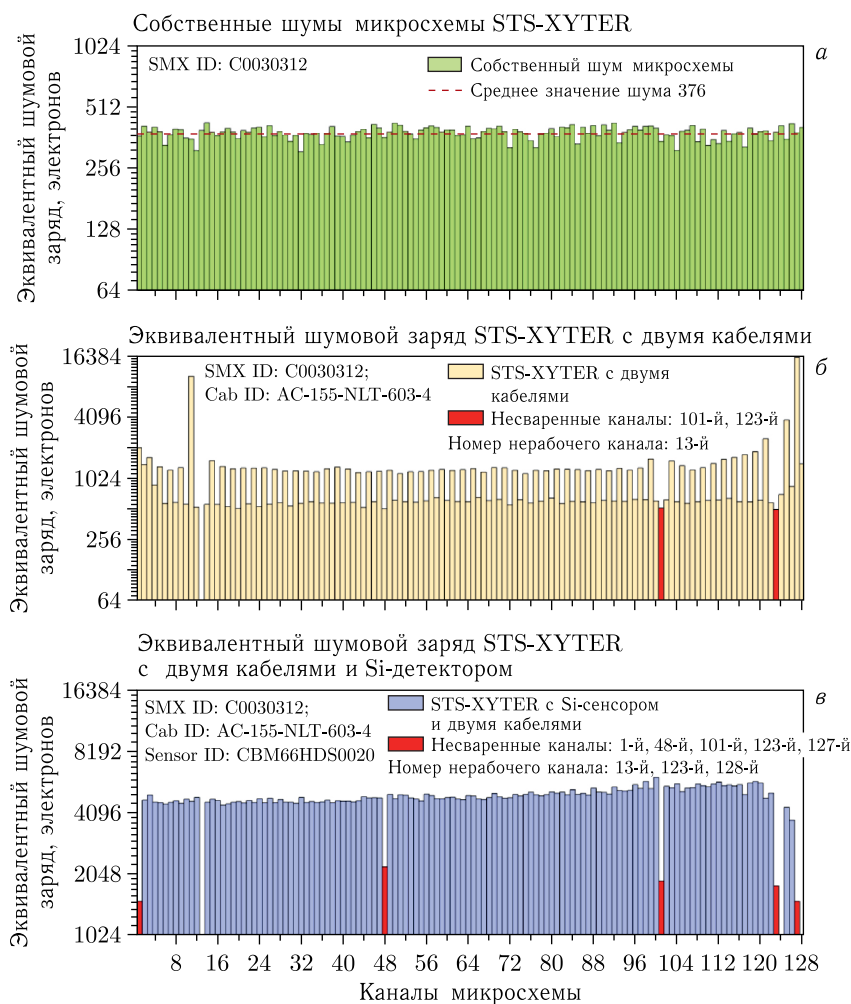


Рис. 13. Результаты промежуточного электрического тестирования микросхемы STS-XYTER в процессе сборки с микрополосковым детектором. а) Собственные шумы микросхемы STS-XYTER до ультразвуковой сварки кабеля на вход микросхемы. б) Результат измерения шумов в канале считывающей электроники с собранными микрокабелями. Разница шума между четными и нечетными каналами обусловлена тем, что верхний микрокабель является экраном для нижнего кабеля. Увеличение шума в 11-м канале обусловлено емкостной связью с 13-м нерабочим каналом. в) Результат измерения шума в каналах микросхемы с собранным кремниевым детектором, измерение в тестовой коробке без экрана на микрокабелях и без напряжения смещения на детекторе, так как в процессе сборки кремниевый детектор не снимается с оснастки и нет возможности подать напряжение смещения

Монтаж и сварка СИМС на интерфейсные платы ФЕВ. Подбор параметров ультразвуковой сварки и механическое тестирование после сборки. Установка микросхемы STS-XYTER на плату считывающей электроники является важнейшим из этапов в сборочном процессе микрополоскового модуля. В данном процессе боль-

шое внимание уделяется ультразвуковой приварке микросхемы к плате, так как в случае неудачной сборки в трековом модуле происходит потеря сразу 128 каналов. Точный подбор параметров ультразвуковой сварки и геометрии соединяющей петли, а также механическое тестирование после сборки гарантируют высокую надежность и большой период наработки на отказ микрополоскового модуля.

Топология платы в области установки микросхемы была спроектирована таким образом, чтобы сделать максимально одинаковые расстояния от точек сварки между площадкой на кристалле и плате. Каждая микросхема STS-XYTER имеет 87 перемычек с минимальным расстоянием 950 мкм и максимальным 1150 мкм. Параметры петли, которые использовались при ультразвуковой сварке методом «клин-клин», представлены на рис. 14.

Минимальная прочность на разрыв для 25-мкм проволоки составляет ~ 8 сН [19]. Результатом качественной сборки микросхемы с платой будет являться показатель измерения усилия на отрыв \mathbf{F} , которое является векторной суммой сил: \mathbf{F}_{wd} — сила отрыва от площадки на плате и \mathbf{F}_{wt} — сила отрыва от площадки на микросхеме (см. рис. 14). Оптимальный подбор характеристик петли требует расчета силы отрыва сварного соединения от площадки на кристалле \mathbf{F}_{wt} и на плате \mathbf{F}_{wd} . Нахождение правильного соотношения сил, действующих на сварные соединения в точках сварки на микросхеме \mathbf{F}_{wt} и на плате \mathbf{F}_{wd} , поможет приблизиться к максимальным значениям усилия на отрыв. Максимальное усилие на отрыв поможет достичь наилучшего ультразвукового соединения между микросхемой и площадкой на плате, тем самым гарантировать лучшие механические свойства трекового модуля после сборки.

Горизонтальная дистанция между точками связи (ε) на микросхеме и площадке измеряется как отношение d_1 (расстояние от точки сварки на микросхеме до точки приложения силы отрыва) к d_2 (расстояние от точки сварки на плате до точки приложения силы отрыва). Дистанция между двумя точками связи с разной высотой будет изменяться в диапазоне $1/4 \leq \varepsilon \leq 3/4$.

Так как точки сварки на микросхеме и плате находятся на разных уровнях относительно подложки, силы на отрыв не будут равны: $\mathbf{F}_{wt} \neq \mathbf{F}_{wd}$. Расчет сил при угле растягивающей связи по отношению к подложке ($\varphi = 0^\circ$) (см. рис. 14) производится

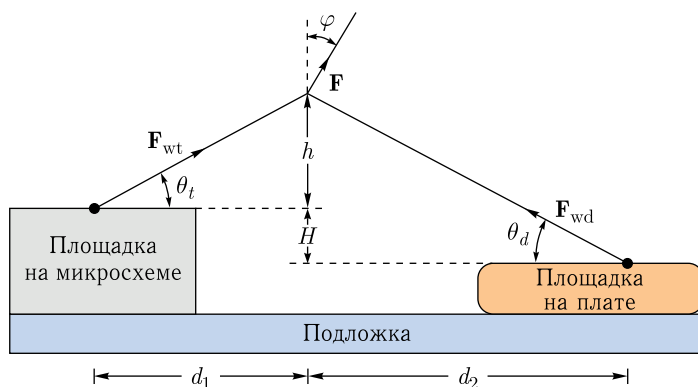


Рис. 14. Геометрические переменные для расчета параметров ультразвукового соединения

по формулам [20]:

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

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

где H — разница высоты между двумя точками сварки на плате и микросхеме; h — высота от первой точки сварки до точки приложения силы; d — полная дистанция сварного соединения; ε — отношение горизонтальных дистанций между точками связи.

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 рис. 15. Наибольшего значения усилия на отрыв можно достичь при $\varepsilon = 0,45$.

Наилучший результат ультразвуковой сварки будет при равных значениях усилия на отрыв петли в точках сварки на плате и микросхеме. В процессе сборки микросхема STS-XYTER приклеивается на основание платы, и разница высоты между двумя точками сварки на плате и микросхеме (H) для всех перемычек составляет 200 мкм. На параметры отрыва в значительной степени будут влиять переменные h , d_1 , d_2 . График зависимости усилия на отрыв на плате F_{wd} и на микросхеме F_{wt} от геометрических параметров петли сварки при отношении горизонтальных дистанций между точками связи $\varepsilon = 0,45$ представлен на рис. 16.

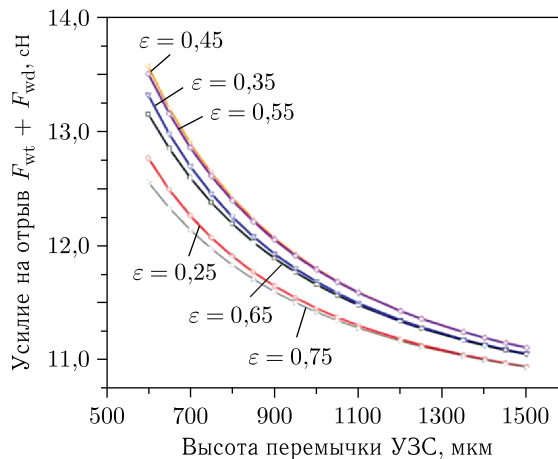


Рис. 15. Зависимость усилия на отрыв от высоты перемычки при разных отношениях между двумя точками связи

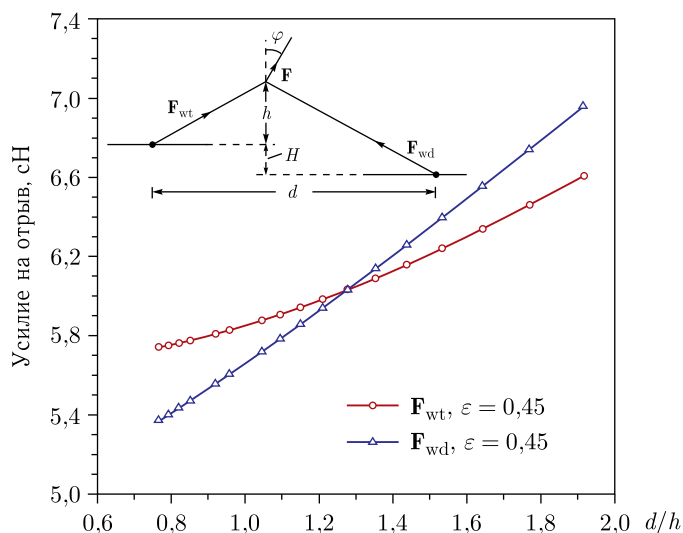


Рис. 16. Зависимости усилия отрыва в точках F_{wt} и F_{wd} от геометрических параметров петли сварки при $\varepsilon = 0,45$ и угле растягивающей связи по отношению к подложке ($\varphi = 0^\circ$)

Одинаковое распределение усилий на отрыв $F_{wt} = F_{wd} = 6,032$ сН выполняется при коэффициенте $d/h = 1,27$. При максимальной длине петли сварки 1150 мкм расстояния $d1 = 402$ мкм, $d2 = 748$ мкм (см. рис. 14). Полученные параметры применяются для настройки ультразвуковой автоматической сварки Delvotec G5 перед началом сборки микросхемы STS-XYTER на плату FEB.

Расчетное значение усилия на отрыв, полученное с использованием формул (1) и (2), составляет 12,06 г. 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 $(10,46 \pm 0,22)$ г, при доверительном интервале 95%. Результаты измерения усилия на отрыв, полученные в процессе сборки модулей, представлены на рис. 17.

Качественным соединением ультразвуковой проволоки диаметром 25 мкм принято считать значение больше 8 г [19]. Исходя из полученных практических результатов, можно сделать вывод, что механическое соединение между микросхемой и платой удовлетворяет предъявляемым требованиям. Расчетное значение на отрыв отличается от полученного в процессе сборки на 15%, так как при отрыве проводника позиционирование инструмента для отрыва происходит в ручном режиме, что в значительной степени влияет на точность нахождения центра ультразвуковой перемычки в реальных измерениях.

Установка микросхемы STS-XYTER происходит в несколько этапов: нанесение теплоэлектропроводящего клея¹ на места для установки чипов (рис. 18, а); полимеризация клея в печи при температуре 120 °С; ультразвуковая сварка микросхемы к пла-

¹Epoch Technology Epo-Tek[®] H20E Electrically Conductive, Silver Epoxy.

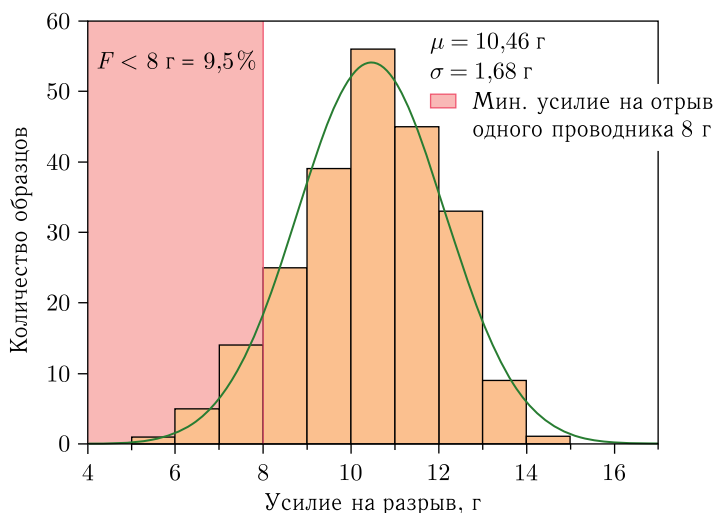


Рис. 17. Результаты тестирования на отрыв алюминиевой проволоки 25 мкм, сваренной по технологии клин–клин

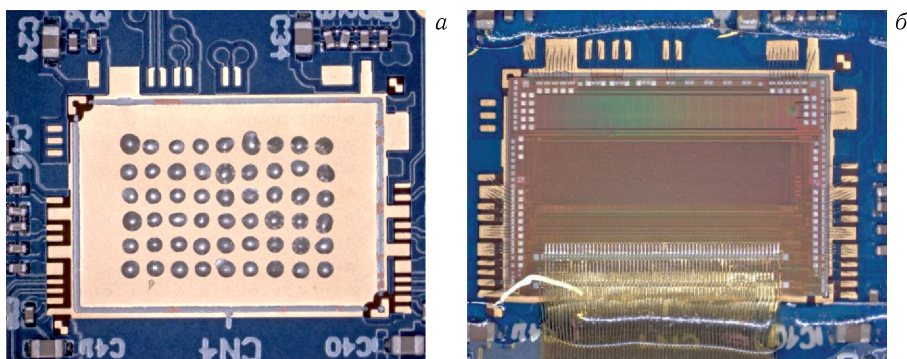


Рис. 18. Этапы установки микросхемы считывающей электроники СИМС STS-XYTER на плату: а) теплоэлектропроводящий клей, нанесенный на место установки микросхемы; б) микросхема STS-XYTER с ультразвуковым соединением после инкапсуляции

те; механические тестирования ультразвуковых соединений на отрыв; инкапсуляция ультрафиолетовым клеем для механической защиты и защиты от внешних факторов (влага, пыль и др.) (рис. 18, б); установка защитного экрана.

Тестирования трековых модулей после сборки. Каждый трековый модуль устанавливается на рамку-носитель (рис. 19), которая является оснасткой для хранения и тестирования. В конструкцию рамки входит радиатор с водяным охлаждением, который обеспечивает необходимый сьем тепла со считывающей электроники модуля, тепловыделение которой составляет ~ 24 Вт.

В процессе тестирования в информационную систему CMIS [15] заносится следующая информация: энергопотребление каждой интерфейсной платы со считывающей электроникой, ток утечки при напряжении смещения $V_{\text{bias}} = 100$ В, адреса неработающих каналов и каналов с повышенным шумом, температура микросхем. Для

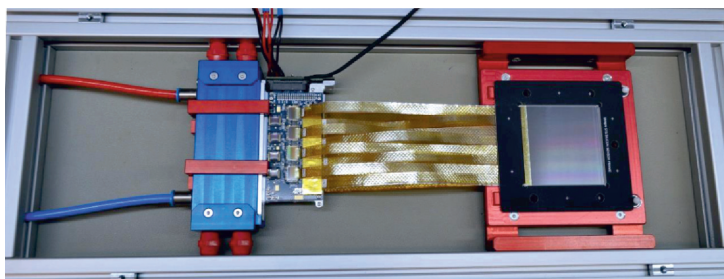


Рис. 19. Трековый модуль без установленных экранов на оснастке для тестирования. Платы считывающей электроники прикреплены на радиатор для охлаждения в процессе тестирования

каждого отдельного канала всех СИМС производится процедура калибровки АЦП и порогов дискриминатора быстрого канала, используемого для выработки отметки времени хита. Калибровочные файлы, а также файлы с масками каналов заносятся в CMIS и используются в дальнейшем при конфигурации модуля в составе трековой системы. После проведения функционального тестирования и калибровок проводится 24-ч тест с бета-источником ^{106}Ru , в процессе которого измеряется отклик каждого канала, разброс коэффициентов усиления каналов, а также работоспособность модуля при долговременной работе.

Одним из наиболее важных этапов тестирования является этап измерения уровня шума в каждом отдельно взятом канале при смещенном детекторе. Пример распре-

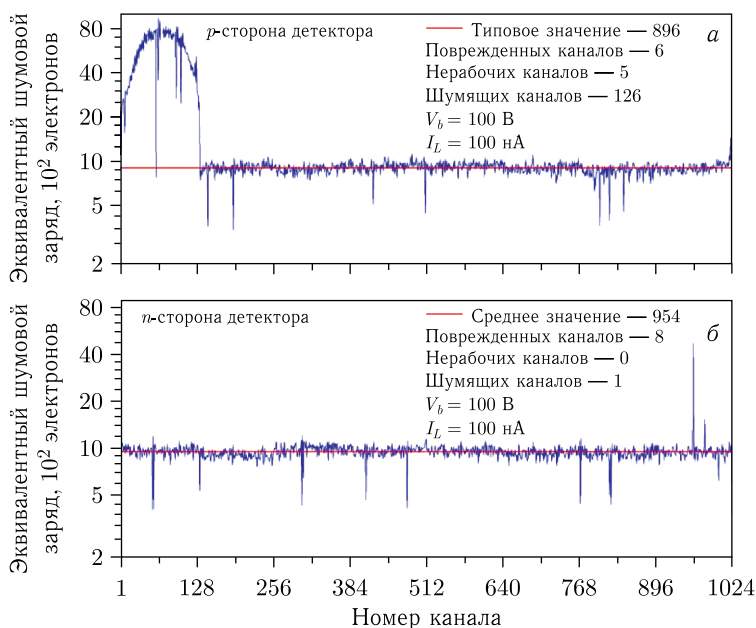


Рис. 20. Результаты измерения шума в каналах трекового модуля на p - (а) и n -сторонах (б). Повышенный уровень шума в каналах (1–128) на p -стороне детектора обусловлен z -микрореполосками (см. рис. 2) и двойной металлизацией на детекторе

деления шума в каналах для одного из модулей показан на рис. 20. Низкий уровень шума говорит о низкой входной емкости на входе ЗЧУ, т.е. об отсутствии электрического соединения на одном из двух концов микрокабеля. Нулевой уровень шума на графике обозначает отсутствие шумовых хитов в канале, что в общем случае является следствием неработающей аналоговой части канала микросхемы. Более высокий уровень шума в каналах (1–128) 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 [13] и должен составлять не более $1500 e^-$. На уровень шума могут оказать влияние такие технологические операции, как нанесение клея (инкапсуляция) и монтаж электромагнитных экранов.

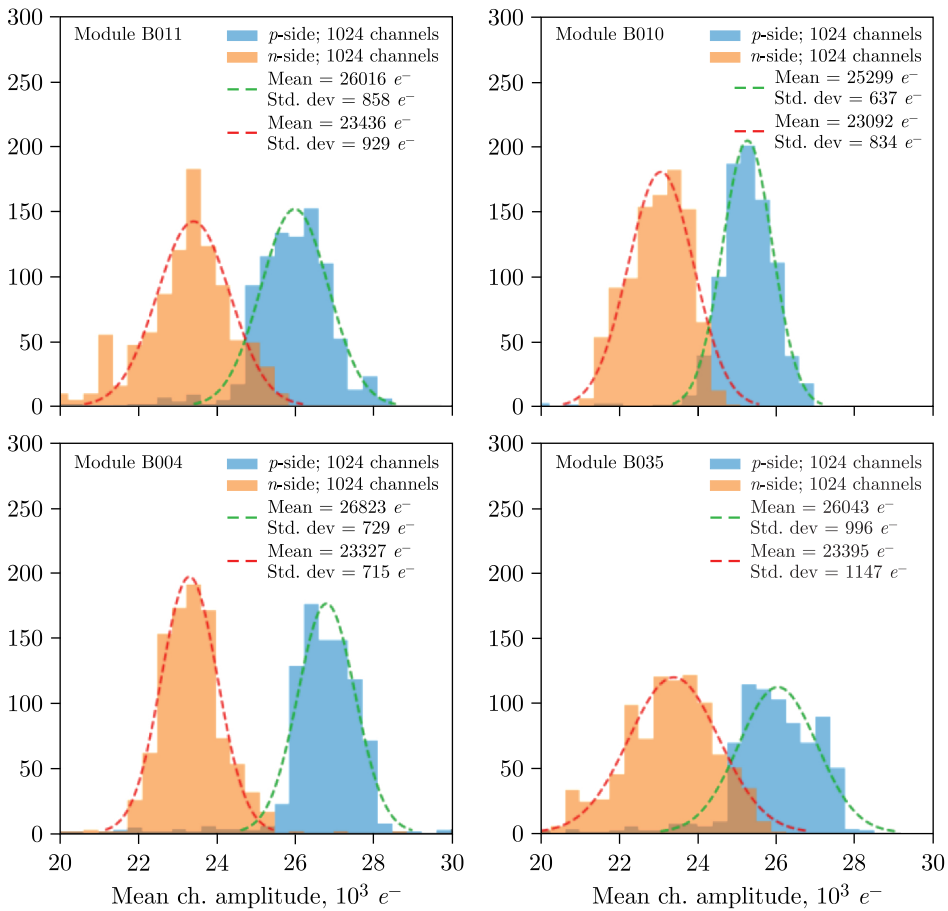


Рис. 21. Разброс коэффициентов усиления от 1 МIP в каналах детектора для разных модулей (одноstriповый кластер)

На следующем этапе производится тестирование модуля с радиоактивным источником для проверки карты сварки и определения разброса коэффициентов усиления в каналах детектора. Пример результатов измерений показан на рис. 21. Разброс коэффициентов усиления в каналах на одной стороне детектора составляет не более 15%.

Предсерийная сборка модулей. Общее количество собранных модулей составляет 25 шт. Для отладки сборочных процедур, а также оценки выхода годных моду-

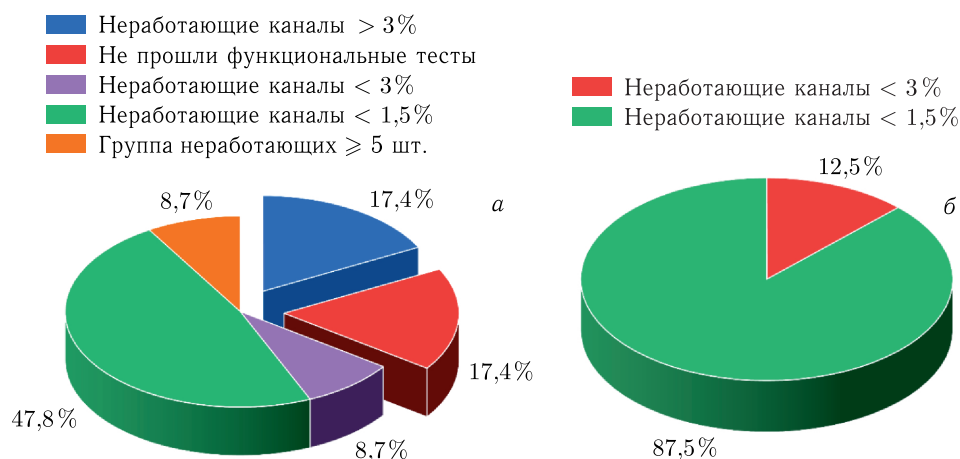


Рис. 22. (цветной в электронной версии). Результаты сборки трековых модулей: а) общее количество собранных модулей (23 шт.); б) результаты сборки предсерийной партии трековых модулей (8 шт.)

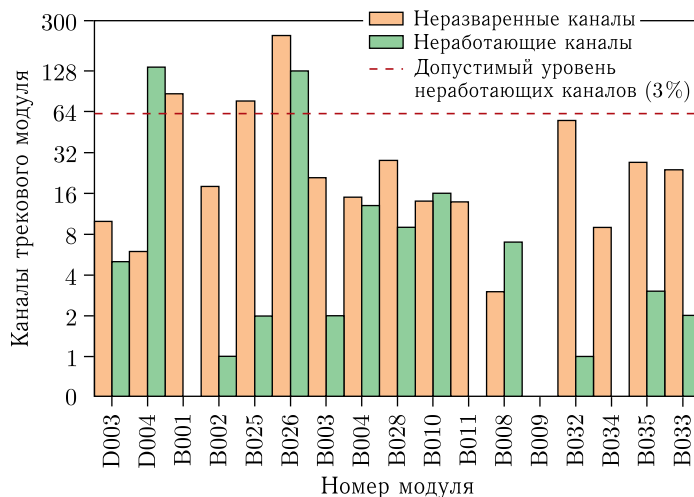


Рис. 23. Количество неработающих и неразваренных каналов в трековых модулях предсерийной сборки (8 шт.). Выход годных трековых модулей — 88,3%

лей была осуществлена предсерийная сборка первой партии из 8 трековых модулей с применением нового типа оснастки и режимов ультразвуковой сварки.

К модулям, квалифицируемым в качестве годных для изготовления трековой системы, предъявляются следующие требования (рис. 22):

— количество неработающих каналов на каждой из сторон детектора не более 1,5 %;

— общее количество неработающих каналов не более 3 %;

— количество соседних неработающих каналов группы не больше 5 шт.;

— модуль должен успешно пройти все этапы функционального тестирования.

В сборочном процессе участвует группа из четырех человек, время работы одной смены составляет 7 ч. В одном процессе осуществляется параллельная сборка четырех модулей. Среднее время, необходимое на сборку одного модуля, составило 22,5 ч. Выход годных модулей в предсерийной партии — 87,5 %.

Время сборки трековых модулей возможно уменьшить на 15 %, увеличив количество аппаратов ультразвуковой сварки, разделив при этом процесс ЛАС и проволоочной сварки.

Результаты сборки трековых модулей с количеством неработающих каналов в модуле представлены на рис. 23.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана методика сборки трековых модулей с двусторонними микрополосковыми кремниевыми детекторами с использованием сверхлегких алюминиевых микрокабелей на полиимидной основе с применением тестовых стендов для промежуточного механического и функционального тестирования. Представлено подробное описание метода определения оптимальных параметров для ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой и результаты применения технологии ультразвуковой ЛАС в производстве трековых модулей. С помощью данного метода подбора параметров удалось получить среднее значение усилия на отрыв для Al-проводника толщиной 14 мкм и шириной 40 мкм, равное 4,6 г.

Расчет геометрических параметров для технологии сварки алюминиевой проволокой позволил добиться среднего значения усилия на отрыв ($10,46 \pm 0,22$) г для сварки 25-мкм проволокой.

Лабораторные тесты трекового модуля показали, что средний эквивалентный шумовой заряд для p -стороны составляет $896 e^-$, а для n -стороны — $954 e^-$. Тестирование модулей на протонном пучке энергией 1 ГэВ показало, что средний уровень электронов для минимальной ионизирующей частицы составляет $\sim 26\,000 e^-$ для p -стороны детектора и $\sim 23\,000 e^-$ для n -стороны детектора.

Предварительная оценка производительности сборочного участка была выполнена на основе предсерийной сборки партии из 8 модулей. Выход годных модулей составил 88,3 %. Среднее время на сборку одного модуля составило 22,5 ч. Таким образом, для сборки 292 модулей на одном сборочном участке силами одной смены потребуется 3,5 года. Для увеличения производительности участка сборки модулей в разы необходимо вводить дополнительные смены и подготовить необходимый персонал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Angstadt R. et al.* The Layer 0 Inner Silicon Detector of the D0 Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 622, No. 1. P. 298–310.
2. *Abachi S. et al.* The D0 Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 338, No. 2–3. P. 185–253.
3. *Kuijjer P.* The ALICE Silicon Strip Detector System // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 447, No. 1–2. P. 251–256.
4. Handbook of Tape Automated Bonding. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. 646 p.
5. *Friman B. et al.* Compressed Baryonic Matter in Laboratory Experiments. Berlin; Heidelberg: P. Senger, 2011. V. 814. P. 1–960.
6. *Baranov A. et al.* The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment. Dubna, 2020.
7. *Heuser J. et al.* Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS). GSI Rep. 2013-4. Darmstadt: GSI, 2013.
8. *Bertini O.* Production Readiness Review for the Silicon Sensors of the CBM Silicon Tracking System. Techn. Note CBM-TN-18010. Darmstadt, 2013.
9. *Borshchov V. et al.* Development of Thin Multi-Line Cables for the STS Micro-Strip Detector Modules. CBM Progress Rep. 2007. Darmstadt, 2008. P. 34–35.
10. *Panasenko I. et al.* Microcable Quality Assurance: Capacitance Measurements. Darmstadt, 2017. 43 p.
11. *Shitenkov M. et al.* Front-End Electronics for BM@N STS // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 4. P. 826–829.
12. *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. Instr. Meth. A. 2018. V. 908. P. 225–235.
13. *Деметьев Д. В. и др.* Соотношение сигнал/шум модуля кремниевой трековой системы эксперимента BM@N // ПТЭ. 2023. № 1. P. 23–32.
14. *Sheremetev A., Artech Diaz R., Shitenkov M.* QA Tests of the LDOs Developed for the Assembly of the BM@N STS Modules. Darmstadt, 2022. 44 p.
15. *Ceballos C. et al.* Construction Management Information System at JINR // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 20, No. 5. P. 981–987.
16. *Lindgren M., Belov I., Leisner P.* Experimental Evaluation of Glob-Top Materials for Use in Harsh Environments // J. Microelectron. Electron. Packaging. 2005. V. 2, No. 4. P. 253–268.
17. Department of Defense US. MIL-STD-883 Test Method Standard for Microcircuits. 1996.
18. *Sheremetev A. et al.* The Quality Assurance Test System for Assembly of STS Modules for the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 4. P. 613–618.
19. Testing of Wire Bonds, CERN. https://bondlab-qa.web.cern.ch/Pull_test.html.
20. *Bullis W. M.* Semiconductor Measurement Technology: The Destructive Bond Pull Test. U.S. Government Printing Office Publication 400-29. Washington, 1976. V. 3.

Получено 29 августа 2023 г.