

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ СБОРКИ СУПЕРМОДУЛЕЙ КРЕМНИЕВОЙ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N

*В. В. Елша<sup>а</sup>, М. Г. Королёв<sup>б</sup>, Д. В. Деметьев<sup>а, 1</sup>, С. Н. Иголкин<sup>в</sup>,  
Н. В. Сухов<sup>а</sup>, А. Д. Шереметьев<sup>а</sup>, М. О. Шитенков<sup>а</sup>,  
А. Л. Воронин<sup>а</sup>, Ю. А. Мурин<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>в</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Кремниевая трековая система эксперимента ВМ@N представляет собой четыре станции на основе двусторонних микроstriповых кремниевых сенсоров. Используемые сенсоры позволяют получить пространственное разрешение для треков вторичных заряженных частиц до 17 мкм. Для чтения и обработки сигналов с обеих сторон сенсора используются две платы со специализированными интегральными микросхемами, входные каналы которых соединены со striпами при помощи сверхлегких (0,23%  $X_0$ ) алюминиевых шлейфов — такая сборка называется *модулем*. Кремниевые сенсоры устанавливаются на легкие углепластиковые опорные фермы с образованием при этом перекрытий мертвых зон по краям за счет «черепичной» схемы расположения. Считывающая электроника детектора располагается в металлических контейнерах с системой теплоотвода, расположенных по обоим концам углепластиковой фермы. Набор модулей, закрепленных на углепластиковой ферме, с двумя контейнерами со считывающей электроникой на концах называется *супермодулем*. Точность позиционирования сенсора в плоскости станции играет решающую роль для ограничения степеней свободы параметров, определяемых с помощью программных средств во время финальной юстировки элементов трековых систем. Для сборки супермодулей разработано специализированное устройство, позволяющее монтировать сенсоры на углепластиковую ферму с точностью до 15 мкм на базе 1200 мм. В статью приводятся результаты тестирования устройства.

Silicon tracking system of the ВМ@N experiment consists of four stations based on double-sided microstrip silicon sensors. The used sensors allow obtaining spatial resolution for secondary charged particle tracks up to 17  $\mu\text{m}$ . To read out and process signals from both sides of the sensor, two boards with specific integrated circuits are used, whose input channels are connected to the strips with ultralight (0.23%  $X_0$ ) aluminum cables. Such an assembly is called a *module*. The silicon sensors are mounted on lightweight carbon fiber trusses in a way that the dead zones at the edges are overlapped due to the “tiled” layout. Frontend electronics is housed in metal containers with a heat sink system located at the rare ends of the carbon fiber truss. A set of

---

<sup>1</sup>E-mail: demetiev@jinr.ru

modules attached to the carbon fiber truss with two containers with readout electronics at both ends is called a *supermodule*. The accuracy of the sensor positioning in the station plane plays a crucial role in limiting the degrees of freedom of the parameters determined by the software during the final alignment of the tracking system elements. A special device has been developed to assemble supermodules, which allows the sensors to be mounted on a carbon fiber truss with an accuracy of  $15\ \mu\text{m}$  on a 1200-mm base. The results of the device testing are given.

PACS: 29.40.Gx

## ВВЕДЕНИЕ

Кремниевая трековая система (КТС) является одним из ключевых элементов установки, которые планируется ввести в эксплуатацию в процессе модернизации детекторных систем эксперимента «Барионная материя на нуклотроне» (BM@N) [1]. Усовершенствование установки BM@N направлено на решение физической задачи по изучению свойств сверхплотной барионной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов (до ядер золота  $^{197}\text{Au}^{79+}$ ) при энергиях до 4,65 ГэВ/нуклон. КТС будет включать в себя четыре станции на основе трековых модулей с двусторонними микростриповыми кремниевыми сенсорами [2]. Станции будут установлены между полюсами дипольного магнита СП-41 внутри термоизолированного корпуса КТС со встроенными элементами водяной и газовой систем охлаждения. Задачами КТС явля-

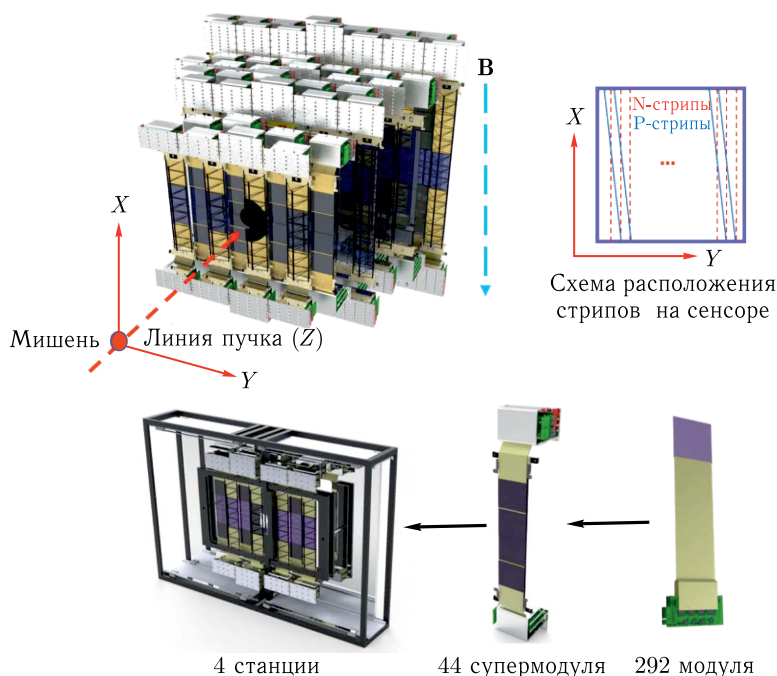


Рис. 1. Схематичное изображение основных компонентов КТС. Показано направление пучка и координатных осей, используемых в тексте статьи, а также ориентация магнитного поля дипольного магнита, внутри которого располагается КТС. Схематично показана ориентация стрипов на микростриповых сенсорах



Рис. 2. Фотография собранного модуля КТС VM@N

ются реконструкция траекторий вторичных заряженных частиц с целью определения вершин их рождения и их импульсов. Схематичное изображение КТС и ее основных компонентов дано на рис. 1.

Базовым элементом КТС является трековый *модуль* [3], состоящий из двустороннего микрострипового кремниевого сенсора, двух плат со считывающей электроникой для чтения сигналов с обеих сторон детектора и комплекта сверхлегких плоских алюминиевых кабелей на полиимидной основе (рис. 2). Кабели используются для передачи аналогового сигнала со стрипов сенсора на входы считывающей микросхемы. Такая конструкция модуля открывает возможность для создания позиционно-чувствительных систем большой площади, позволяя разместить считывающую электронику в периферийной области станций. Такая компоновка станций, в свою очередь, дает возможность минимизировать количество вещества, с которым взаимодействуют вторичные частицы при прохождении через трековую систему. Каждый двусторонний микростриповый сенсор КТС имеет по 1024 стрипа на каждой из сторон, расположенных с шагом 58 мкм. На N-стороне сенсора стрипы установлены строго вдоль направления магнитного поля, т.е. параллельно краям сенсора. На P-стороне стрипы располагаются под углом  $7,5^\circ$  по отношению к стрипам на противоположной стороне. Первоначальная конструкция модуля КТС была разработана в рамках сотрудничества рабочих групп ОИЯИ и GSI для коллаборации CBM (FAIR, Дармштадт) [4]. Конструкция модуля КТС в дальнейшем была, без изменения базовой концепции, технологически переработана группой ЛФВЭ ОИЯИ с учетом специфичных требований установки VM@N.

КТС состоит из 292 модулей разных типоразмеров и образует 598 тыс. считывающих каналов [5]. Типоразмер модуля определяется размером сенсора и длиной кабеля, соединяющего стрипы детектора со входными каналами электроники считывания. Для того чтобы выровнять загрузки стрипов, сенсоры, расположенные в зонах малых углов рассеяния, т.е. близко к ионопроводу, имеют размер  $42 \times 62$  мм. На периферии трековых станций, где загрузки сравнительно малы, устанавливаются сенсоры размером  $62 \times 62$  мм. Модули разных типоразмеров размещаются на легких углепластиковых фермах. Такая сборка называется *супермодулем*.

Модуль КТС способен обеспечить пространственное разрешение до  $58/\sqrt{12} \approx 17$  мкм. В реальности же точность восстановления координат вторичных частиц определяется не только разрешением используемых сенсоров, но и точностью их позиционирования в супермодуле и в станции. В процессе калибровки трековой системы ошибки, связанные с неточной установкой элементов трековых плоскостей, возможно

компенсировать при помощи математических алгоритмов финальной юстировки системы или «выравнивания» (alignment). Данные алгоритмы основаны на принципе минимизации значений «невязки» для большого числа восстановленных треков частиц в условиях отсутствия магнитного поля [6]. Алгоритм минимизирует заданную целевую функцию методом наименьших квадратов. В общем случае она зависит от выравнивающих поправок  $\Delta p$  и параметров трека  $q$  [7]:

$$F(\Delta p, q) = \sum_{\text{наборы данных}} \left( \sum_{\text{события}} \left( \sum_{\text{треки}} \left( \sum_{\text{хиты}} (\Delta_i^2 / \sigma_i^2) \right) \right) \right), \quad (1)$$

где «невязка трека»  $\Delta_i$  — разница между найденным положением хита (отклик сенсора как результат взаимодействия с частицей) в результате фитирования траектории и его измеренной координатой, а  $\sigma_i$  — стандартное отклонение измерения. Из-за большого числа параметров, часть из которых коррелирует между собой, минимизация целевой функции (1) является сложной задачей, зачастую приводящей к неоднозначным результатам. Единственным средством улучшения результатов работы алгоритмов юстировки служит уменьшение диапазонов возможных вариаций параметров. К тому же из-за большого количества используемых сенсоров в трековой системе ВМ@N количество параметров финальной юстировки системы имеет порядок  $10^3$ , что при существующей эффективности алгоритмов может потребовать анализа порядка  $10^6$  треков. Объем данных и количество параметров при слабо определенных степенях свободы могут представлять проблему даже для современных вычислительных машин.

Для того чтобы ограничить степени свободы параметров финальной юстировки, необходимо обеспечить точность позиционирования сенсоров трековых плоскостей в процессе сборки детектора не хуже  $\pm 100$  мкм в плоскости станции, ортогонально линиям магнитного поля.

Задачей данной работы являлась разработка технологического процесса сборки супермодуля КТС с обеспечением точности взаимного позиционирования сенсоров  $\pm 15$  мкм в направлении, существенном для точности измерения импульса частицы на опорной ферме длиной до 1200 мм. Данная точность обусловлена возможностями производства и является достаточной для эффективной юстировки трековой системы. Помимо этого такая точность взаимного позиционирования сенсоров дает возможность объединять стрипы соседних сенсоров в единую цепочку для минимизации каналов считывающей электроники в зонах с малыми нагрузками. Для решения этой задачи была предложена оригинальная процедура сборки супермодулей, созданы и испытаны на практике специальное устройство для сборки супермодулей, набор оснасток и программное обеспечение для управления работой созданного устройства.

### СУПЕРМОДУЛЬ КТС ВМ@N

Для того чтобы образовать чувствительную плоскость большой площади, супермодули механически объединяются в узле КТС, называемом «станцией». Супермодули КТС в зависимости от того, в какой станции они находятся, содержат от 4 до 10 сенсоров. Конструкция супермодуля показана на рис. 3.

На несущую конструкцию станции супермодули монтируются вертикально, т. е. соосно направлению магнитного поля дипольного магнита. При этом одноименные

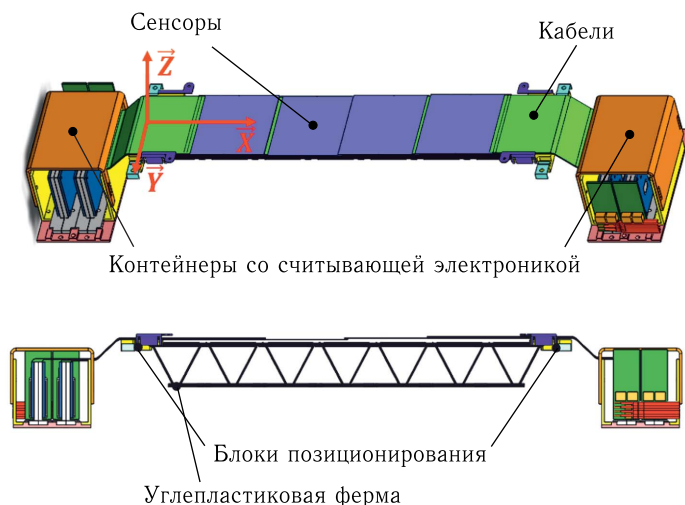


Рис. 3. Модель супермодуля КТС

стрипы на N-сторонах всех сенсоров, установленных на супермодуле, должны располагаться соосно, с точностью не хуже, чем пространственное разрешение сенсоров.

Центральная часть супермодуля представляет собой набор сенсоров различного размера и стопку плоских легких кабелей, закрепленных на углекомпонитной опорной ферме. Каждый сенсор имеет охранную зону по своему периметру, которая не является координатно-чувствительной. Ширина этой области составляет 1 мм. Для того чтобы избежать наличия «мертвых», т. е. нечувствительных областей в трековых плоскостях, сенсоры в направлении вдоль опорной фермы располагаются в виде черепицы с перекрытием 2,5 мм. Для этого каждый сенсор крепится к опорной ферме при помощи так называемых L-ножек на заданной высоте от лицевой стороны фермы, вдоль которой они расположены. L-ножки изготавливаются из стеклоткани в пресс-формах и приклеиваются своей короткой стороной к поверхности сенсора на последнем этапе сборки модуля при помощи специализированной оснастки [8]. Длинная сторона L-ножки приклеивается к опорной ферме супермодуля на последнем этапе его сборки, описываемой ниже.

Использование сверхлегкой углекомпонитной опорной фермы для крепления сенсоров в центральной части супермодуля позволяет минимизировать количество вещества в чувствительной области детектора, а также свести к минимуму дополнительную погрешность в измерении координат, вызываемую изменением габаритов фермы из-за колебания температуры окружающей среды.

Углекомпонитная ферма изготавливается из высококомпонитного препрега из углеволокна марки M55J в пресс-формах. После остывания заготовки геометрия фермы выравнивается при помощи дополнительной термической обработки на прецизионном гранитном столе. Вес фермы составляет не более 15 г на 1 м длины. Технология изготовления сверхлегких углекомпонитных ферм такого типа, изначально разработанная для детектора ALICE ITS (ЦЕРН) [9], была с успехом применена для изготовления видоизмененных ферм КТС BM@N.

Контейнеры на обоих концах супермодуля служат для размещения плат со считывающей электроникой детектора. Они изготовлены из алюминиевых сплавов и соединены между собой теплопроводными компаундами для эффективного отвода тепла от считывающей электроники детектора к теплообменникам жидкостной системы охлаждения КТС. Прецизионного позиционирования в станции этих, сравнительно массивных элементов, не требуется. Центральная часть супермодуля с сенсорами и контейнеры со считывающей электроникой связаны между собой лишь стопкой тонких аналоговых кабелей, при этом жесткое механическое соединение между частями отсутствует. Центральная часть супермодуля позиционируется на углекомпозитную несущую конструкцию станции с высокой точностью, а контейнеры со считывающей электроникой монтируются на алюминиевые теплообменники станции.

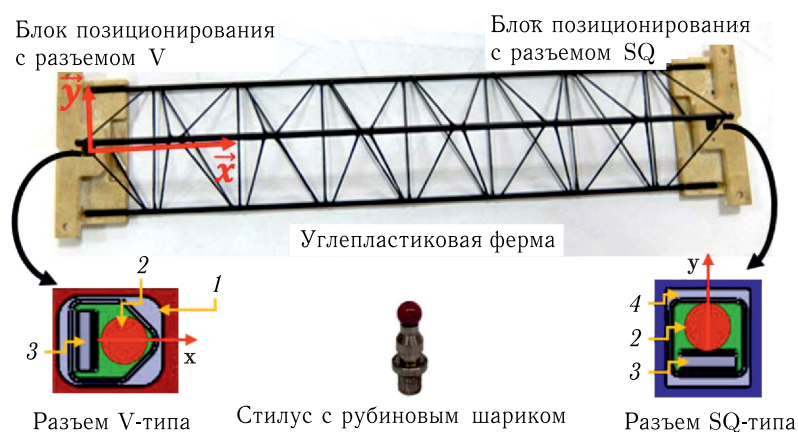


Рис. 4. Углепластиковая ферма супермодуля с позиционирующими блоками. В нижней части рисунка показаны стилус с рубиновым шариком, используемый для позиционирования супермодуля в станции, а также схематично показаны разъемы позиционирующих блоков типов V и SQ. 1 — титановое гнездо разъема V-типа; 2 — положение рубинового шарика в гнезде после установки фермы в станцию; 3 — прижимная пружина; 4 — титановое гнездо разъема типа SQ

Каждая ферма имеет на концах блоки позиционирования с гнездом, ответной частью которого является рубиновый шарик на стилусе (рис. 4). Стилус монтируется на плоскости станции, а рубиновые шарики при этом однозначно определяют положение сенсоров в плоскости станции. Экспериментально подтверждено, что повторяемость позиционирования супермодуля при использовании указанного крепления составляет  $\pm 2$  мкм. Положение каждого рубинового шарика относительно реперных точек станции определяется точностью станка, на котором сверлятся установочные отверстия для стилусов, что соответствует  $\sim 10$ – $15$  мкм. Точкой привязки системы координат супермодуля является рубиновый шарик, вставляемый в разъем блока позиционирования. Данный блок расположен на одном из концов опорной фермы и имеет профиль буквы V. Блок позиционирования на другом конце фермы (SQ) определяет ось установки супермодуля и имеет продолговатое отверстие с шириной, равной диаметру вставляемого в него шарика. Такая конструкция позволяет компенсировать возможные незначительные тепловые колебания длины фермы и устранить механические

нагрузки, вызванные этими колебаниями. В КТС используются фермы трех типоразмеров с различными расстояниями между рубиновыми шариками на обоих концах: 294,6, 414,6 и 538,6 мм.

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ СБОРКИ СУПЕРМОДУЛЕЙ**

Сложность технологического процесса сборки супермодулей КТС ВМ@N определяется, в первую очередь, необходимостью позиционирования кремневых сенсоров на ферме с точностью, предельно достижимой для размеров собираемого объекта. Она должна составлять:

- 1)  $\pm 15$  мкм на базе 1200 мм по оси  $Y$ ;
- 2)  $\pm 12$  мкм на базе 180 мм по оси  $Y$ ;
- 3)  $\pm 50$  мкм по осям  $X, Z$ .

Обозначения используемых осей координат приведены на рис. 3. Повышенная точность установки сенсоров на ферму в направлении, ортогональном направлению стрипов на N-стороне (требование 2), исходит из желания обеспечить совмещения одноименных стрипов разных сенсоров супермодуля в единый «суперстрип» супермодуля, направленный вдоль магнитного поля. Объединение нескольких сенсоров при помощи алюминиевых шлейфов, соединяющих соосные стрипы разных сенсоров, позволяет кратно уменьшить число каналов считывающей электроники в областях с низкими нагрузками. Для использования соединительных алюминиевых шлейфов необходимо обеспечить точность взаимного позиционирования сенсоров не хуже 15 мкм. Точность 12 мкм на базе 180 мкм выбрана с учетом возможностей производства.

Очевидно, что обеспечение заданной точности установки сенсоров на сверхлегкую опорную ферму при сборке супермодулей невозможно без изготовления специализированной прецизионной оснастки и разработки соответствующего технологического процесса.

Сборка супермодуля происходит в два этапа на специализированном устройстве сборки (УС). Сначала сенсоры укладываются на прецизионной скамье с вакуумными столиками-присосками, положение которых на скамье УС юстируется оператором до совмещения всех реперных точек сборки с заданными табличными координатами. Подобным образом размещается и углепластиковая ферма, роль реперных точек которой играют рубиновые шарики в гнездах блоков позиционирования. Указанные шарики имитируют положение шариков, установленных на ферме станции, для которой собирается данный супермодуль и на который будут монтироваться его блоки позиционирования V и SQ при установке супермодуля в станцию. Каждый сенсор имеет на поверхности восемь реперных меток, нанесенных на поверхность кристалла при помощи фотолитографии заводом-изготовителем. Точность привязки реперных меток относительно положения стрипов на поверхности сенсора составляет  $\pm 0,1$  мкм. Таким образом, точность, с которой определено взаимное положение меток и стрипов на поверхности сенсоров, можно условно считать идеальной, а взаимное положение сенсоров в сборке обусловлено исключительно точностью сборочной оснастки и работы оператора. Для каждого типоразмера супермодуля составлена карта положения реперных меток на поверхности сенсоров и рубиновых шариков в блоках позиционирования фермы.

Работа оператора УС состоит в последовательном итерационном выравнивании положения каждого сенсора с приклеенными L-ножками и фермы относительно табличных координат, указываемых при помощи целеуказательной камеры УС. Механическая система перемещения указательной камеры УС, управляемая компьютерной программой, обеспечивает точность 2 мкм. Затем, на втором этапе сборки супермодуля, между всеми L-ножками сенсоров и фермой наносятся капли клея. В итоге после полимеризации клея в одном процессе фиксируется заданное взаимное положение сенсоров и фермы.

Эта концепция была реализована нами совместно с инженерами ОАО «Планар» (г. Минск), на предприятии которого УС и было построено. Схема УС и ее составные части показаны на рис. 5.

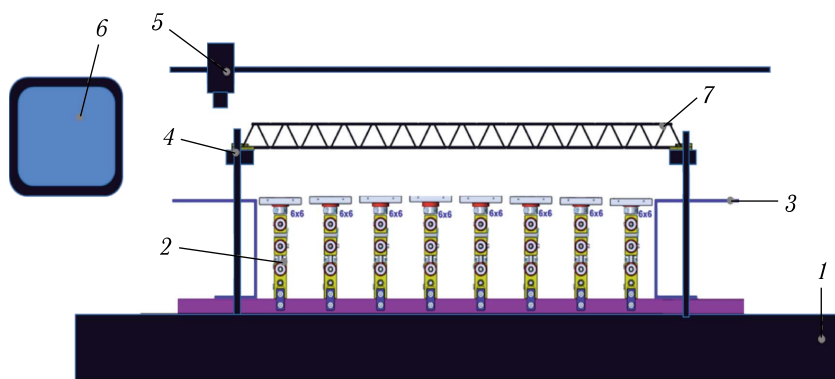


Рис. 5. Схема УС: 1 — гранитный стол; 2 — шаблон супермодуля, состоящий из вакуумных столиков для сенсоров; 3 — поддержки для кабелей и плат со считывающей электроникой детектора; 4 — кран для установки углекомпонитной фермы с рубиновыми шариками для блоков позиционирования; 5 — оптическая система с системой линейного перемещения; 6 — ПК; 7 — углекомпонитная ферма

Основанием установки является гранитный стол, вес которого составляет 600 кг. Использование массивного основания позволяет избежать вибраций в процессе сборки супермодуля. Само устройство находится в комнате, оснащенной климатическим оборудованием, которое позволяет поддерживать постоянную температуру в диапазоне  $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

На столе расположены две позиционирующие системы. Первая служит для размещения сборочного шаблона супермодуля, состоящего из набора вакуумных столиков для сенсоров. Вторая используется для позиционирования углекомпонитной фермы.

Шаблоны для сборки супермодулей представляют собой собранные на направляющей вакуумные столики для сенсоров, каждый из которых снабжен трехкоординатным манипулятором. В ортогональной системе координат манипулятора оси  $X$  и  $Y$  лежат в плоскости сенсора (модуля), при этом ось  $X$  направлена вдоль супермодуля, а угол  $\Phi$  соответствует углу между осью модуля и осью  $X$ . Всего таких столиков с манипуляторами может быть установлено до 20 шт., и размещать на них можно сенсоры размером  $62 \times 22$ ,  $62 \times 42$  и  $62 \times 62$  мм. Для обеспечения перекрытия сенсоры на супермодуле располагаются на разном расстоянии от фермы, которая определяет



ся высотой столика (ось  $Z$ ). Высота столика регулируется с шагом 1 мм. Вакуум на каждый столик может быть подан отдельным выключателем.

Над сборкой находится трехкоординатная система перемещения целеуказательной камеры, обладающая пространственным разрешением  $\pm 2$  мкм. Для компенсации нелинейности систем перемещения камеры используются программные алгоритмы, параметры которых откалиброваны при помощи встроенной интерференционной оптической линейки. Компенсации люфтов механических систем перемещения также реализована при помощи программных методов. Движение камеры к каждой точке выполняется по заданному алгоритму с фиксированным направлением движения. Фото устройства в сборе — на рис. 6.



Рис. 6. Фото УС (слева), столиков для сенсоров с регулировочными винтами и объектива целеуказательной камеры с закрепленным микрометром (справа)

В процессе последовательной расстановки модулей на сборочном шаблоне положения двух выбранных реперных меток на сенсоре модуля совмещаются с соответствующими точками расстановочной «карты» для выбранного шаблона. При этом оптическая система УС последовательно передает на экран ПК изображение положения двух выбранных точек карты, а оператор итерационно перемещает сенсор, закрепленный на соответствующем позиционере сборочного шаблона ручными манипуляторами  $X, Y, Z$ , добиваясь максимального совмещения видимых микрометок на сенсоре с их желаемым расчетным положением. Пример работы программы показан на рис. 7.

Реперные метки сборки имеют разные размеры: характерный размер крестов на сенсорах составляет 50 мкм, диаметр рубиновых шариков — 4 мм. Поэтому при распознавании этих объектов целеуказательная камера используется с разным увеличением. Чтобы избежать погрешностей, связанных с изменением положения оптической оси, используются два фиксированных положения зума. Для крестов применяется максимальное увеличение, а для шаров — минимальное, с взаимной калибровкой положения. Резкость камеры меняется линейными перемещениями по оси  $Z$ , привязанными к высоте каждого столика, и тем самым меняется автоматически при движении камеры от сенсора к сенсору.

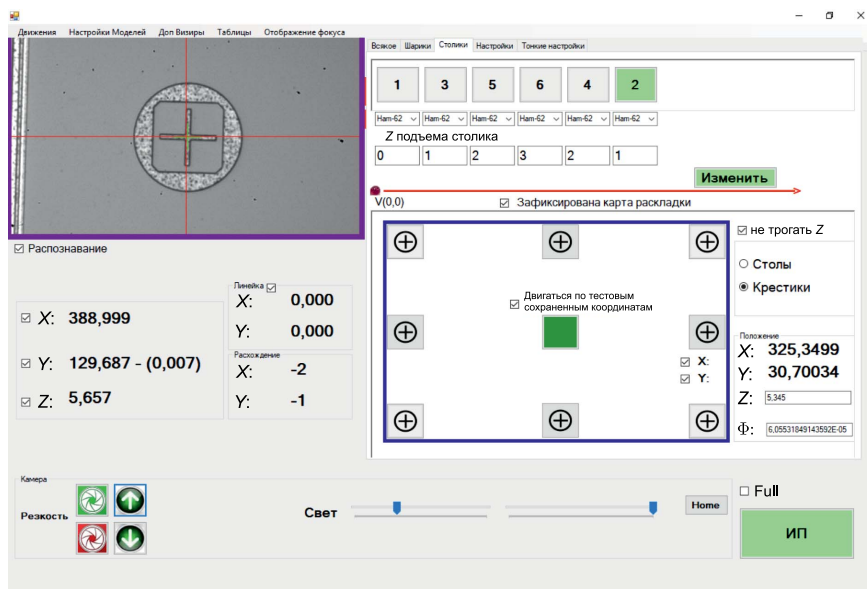


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Интерфейс рабочей программы УС. В левом верхнем углу изображение реперной метки на поверхности сенсора, красным крестом программа обозначает место расположения метки согласно карте. Цифры расхождения координат указаны в микрометрах

Программное обеспечение УС выполняет следующие функции:

- произвольное перемещение целеуказательной камеры между реперными метками модели, выбранными оператором из множества реперных меток собираемого супермодуля;
- распознавание рубинового шарика и определение его центра для размещения опорной фермы в позиции склейки;
- распознавание реперной метки на сенсоре и измерение разницы текущей координаты с ее проектным положением;
- программную компенсацию измеренных заранее систематических нелинейностей в системе перемещения целеуказательной камеры;
- выход в указанную оператором реперную точку с компенсацией механических люфтов в линейных перемещениях целеуказательной камеры;
- редактирование координат реперных точек супермодуля, функции сохранения их в файл и загрузки из файла;
- сохранение в лог-файле достигнутых отклонений позиций реперных меток от их положения в модели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Работа УС, а также полный технологический процесс сборки супермодулей КТС протестированы сначала в процессе сборки массогабаритных макетов, а затем нескольких прототипов супермодулей КТС.

Собраны и настроены шаблоны с комплектами вакуумных столиков для сенсоров для сборки выбранных для прототипирования супермодулей КТС. Для начального выравнивания сборочных столиков в плоскости  $XU$  и проверки их высот ( $Z$ ) УС оснащена стойкой с микрометром, которая перемещается вместе с камерой. Плоскостность каждого столика была отрегулирована проставками в их опорах с точностью  $\pm 10$  мкм.

Для проверки повторяемости позиционирования целеуказательной камеры УС проведены следующие измерения. В качестве опытных образцов были использованы 5 микросхем (МС), каждая с восемью реперными метками. Каждая МС находилась на своем столике-позиционере. Для тестирования программы распознавания центра реперной метки микросхемы были предварительно выравнены на плоскости столика. Столики располагались на расстоянии до 200 мм друг от друга вдоль оси  $X$ . Максимальные перемещения камеры составили 750 мм. Координаты всех 40 реперных точек расставленных МС были сохранены в памяти в качестве расстановочной карты. Карта точек и схема перемещений целеуказательной камеры в рамках последующих измерений показаны на рис. 8.

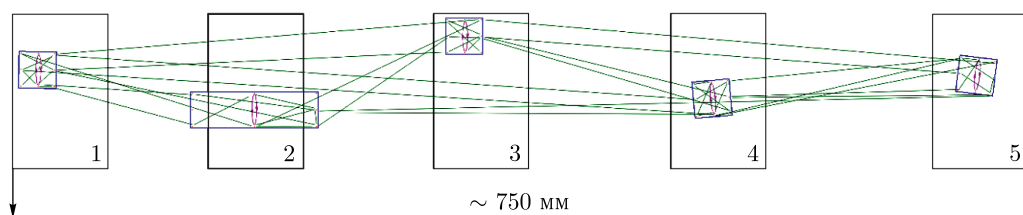


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Карта перемещений во время проведения тестовых измерений на УС. Черным цветом показано расположение вакуумных столов, синим цветом изображено положение микросхем (МС) на столах. Зеленым цветом обозначены перемещения между метками на разных МС, красным цветом — последовательные перемещения между двумя метками на одной МС

На первом этапе измерений было сделано 100 перемещений между случайно выбранными метками. В процессе измерений фиксировалась разница по координатам  $X$  и  $Y$  между сохраненными значениями координат карты и распознанным положением метки, достигнутыми в конце перемещения. В таблице приведены полученные стандартные отклонения для координат  $X$  и  $Y$  меток для разных диапазонов перемещения целеуказательной камеры. Результат практически не зависит от диапазона перемещений камеры. Существующий разброс измеренных значений для разных МС определяется, в первую очередь, параллельностью плоскости столика плоскости перемещения целеуказательной камеры. Максимальное отклонение измеренных координат по осям  $X$  и  $Y$  от средних значений не превышает 5 мкм. В среднем для всех проведенных измерений значение стандартного отклонения для обеих координат составляет  $\sigma_{x,y} = 1,6$  мкм. Полученные результаты лежат в рамках необходимых требований.

На следующем этапе измерений имитировались итерационные перемещения камеры при процедуре выравнивания сенсоров. При выполнении данной процедуры опе-

**Результаты тестирования повторяемости результатов измерения координат реперных меток при помощи целеуказательной камеры УС на разных диапазонах координатной линейки. Описание измерений представлено в тексте**

Диапазон перемещений целеуказательной камеры. Диапазон оси X	$\sigma_x$ , МКМ	$\sigma_y$ , МКМ
0–20 мм (в пределах МС1)	1,9	1,8
200–220 мм (в пределах МС2)	0,9	0,9
380–400 мм (в пределах МС3)	1,2	2,1
600–620 мм (в пределах МС4)	1,2	1,3
700–750 мм (в пределах МС5)	1,6	1,2
0–220 мм (между МС1 и МС2)	1,9	2,0
200–400 мм (между МС2 и МС3)	1,6	1,2
380–620 мм (между МС3 и МС4)	1,9	2,3
600–750 мм (между МС4 и МС5)	2,1	1,1
0–750 мм (между МС1 и МС5)	1,8	1,7

ратор производит серию последовательных перемещений камеры между точками на одном сенсоре, выполняя точечную настройку положения модуля при помощи регулировочных винтов на вакуумном столике. В этих измерениях оценивалась точность воспроизведения координат при десяти последовательных перемещениях между двумя метками на одной МС. Выбранные точки располагались на разных расстояниях друг от друга. Схема перемещений показана красным цветом на рис. 8. Максимальное отклонение обеих координат составило 4 мкм. Было показано, что повторяемость позиционирования камеры в данных измерениях определяется, в первую очередь, параллельностью поверхности столика плоскости перемещения камеры. Для столиков, плоскопараллельность которых была предварительно отрегулирована с точностью  $\pm 10$  мкм, повторяемость позиционирования камеры составила  $\pm 3$  мкм.

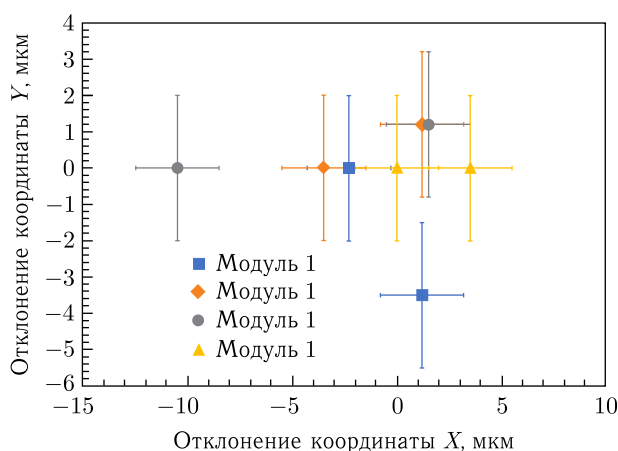


Рис. 9. Измеренное расхождение координат меток на сенсорах от заданных положений на карте после сборки супермодуля с четырьмя модулями. Ось X направлена вдоль стрипов на N-сторонах сенсоров, а ось Y — перпендикулярно стрипам

Для проверки качества распознавания рубиновых шариков на концах ферм была проведена серия последовательных измерений положения центра шарика после перемещения камеры. Повторяемость результатов составила  $\pm 2$  мкм, что не превышает пространственного разрешения оптической системы.

Для проверки технологического процесса был собран массогабаритный макет супермодуля первой станции КТС, включающий в себя четыре сенсора размером  $62 \times 62$  мм. После склейки макета и полимеризации клея был проведен контрольный замер положений реперных меток на сенсорах. Измеренные значения координат сравнивались с расстановочной картой. Результаты представлены на рис. 9. Отклонения положения меток от заданных значений не превышают  $\pm 12,5$  мкм по оси  $X$  и  $\pm 6$  мкм по оси  $Y$ .

## ВЫВОДЫ

Разработано и создано устройство, позволяющее собирать супермодули для кремниевых трековых систем на основе микроstriповых сенсоров с точностью позиционирования детектирующих элементов до 15 мкм на базе 1200 мм. Высокая точность позиционирования сенсоров позволит в будущем существенно упростить алгоритмы и повысить надежность финальной юстировки элементов трековых систем установки. Разработанное устройство сборки и методики установки сенсоров планируется использовать в дальнейшем для сборки всех супермодулей КТС для установки BM@N.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар», принимавшим участие в изготовлении и пусконаладочных работах устройства сборки супермодулей КТС: Г. В. Ковальчуку, А. Е. Ковенскому, И. А. Рудене, Д. Н. Гавдею, М. Д. Трушкевичу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Senger P., Dementev D., Heuser J., Kapishin M., Lavrik E., Murin Y., Maksymchuk A., Schmidt H.R., Schmidt C., Senger A., Zinchenko A.* Upgrading the Baryonic Matter at the Nuclotron Experiment at NICA for Studies of Dense Nuclear Matter // *Particles*. 2019. V. 2, No. 4. P. 481–490.
2. *Dementev D., Baranov A., Elsha V. et al.* The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 2022. V. 53. P. 197–202.
3. *Sheremetiev A., Dementev D., Elsha V., Kolozhvari A., Murin Y., Shitenkov M., Sukhov N.* Status of the BM@STS Module Assembly // *Ibid.* P. 377–381.
4. *CBM Collab.* Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS). Darmstadt: GSI, 2013; <https://repository.gsi.de/record/54798/>.
5. *Baranov A.V., Dementev D., Elsha V., Heuser J., Kharlamov P.I., Kovalev I.M., Kolzhvari A., Kudryashov I.A., Kurganov A.A., Lavrik E., Leontyev V.V., Lygdenova T., Merkin Y., Murin M.M., Panasenkov J.* The Silicon Tracking System as Part of the Hybrid Tracker of the BM@N Experiment. Technical Design Report. Dubna: JINR, 2020; [http://www1.jinr.ru/Books/The%20Silicon%20Tracking%20System\\_sajt.pdf](http://www1.jinr.ru/Books/The%20Silicon%20Tracking%20System_sajt.pdf).
6. *Blobel V.* Software Alignment for Tracking Detectors // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2006. V. 566, No. 1. P. 5–13.
7. *Blobel V.* Alignment Algorithms // *Proc. of the First LHC Detector Alignment Workshop*. 2007. P. 5–12; <https://10.5170/CERN-2007-004.5>.

8. *Voronin A., Sheremetev A., Chikalov O.* Production and Gluing of the L-Legs for the Silicon Sensors. CBM Progress Report 2016. Darmstadt: GSI, 2017; <https://repository.gsi.de/record/201318>.
9. *van den Brink A., van den Broek D.J., Kok L.J., Nooren G.-J.L., Feofilov G.A., Igolkin S.N., Daudo F., Giraudo G.* Tests of Prototype ITS-SSD Ladder and Fixators. ALICE Note INT 2000-04. 2000; <http://cds.cern.ch/record/689315/files/>.

Получено 18 декабря 2022 г.