

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ НОВЕЙШИХ ПИКСЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Д. Г. Нестеров**, *В. И. Жеребчевский*, *Г. А. Феофилов*,
С. Н. Иголкин, *Т. В. Лазарева*, *Н. А. Мальцев*,
Д. В. Пичугина, *Н. А. Прокофьев*, *А. Р. Рахматуллина*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Современные трековые детекторные системы играют ключевую роль в экспериментальных исследованиях в области ядерной физики, в физике высоких энергий и элементарных частиц. Использование тонких кремниевых пиксельных детекторов для прецизионной идентификации треков заряженных частиц открывает совершенно новые возможности в исследовании состояний ядерной материи, рождающейся в результате столкновения релятивистских ядер. Для достижения стабильных рабочих параметров таких детекторов требуется создать как оптимальную систему их позиционирования и поддержки, так и эффективную систему их охлаждения. В данной работе представлены новые концепции систем поддержки и охлаждения для вершинных детекторов на базе кремниевых пиксельных детекторов.

Today the silicon-based detector systems are playing a key role in experimental studies of the nuclear matter properties. Using thin silicon pixel detectors for the precise identification of charged particles opens completely new opportunities to investigate the states of nuclear matter arising in processes of relativistic nuclear collisions. For stable operational conditions of such detectors, the efficient mechanic and cooling systems at minimum material budget should be used. In present work, the ideas and developments for mechanic and cooling systems for novel vertex detectors based on silicon pixel sensors have been presented.

PACS: 29.90.+f; 29.30.Ep

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым направлением исследований, проводимых на ускорителях ультрарелятивистских тяжелых ионов, является изучение свойств сверхплотной горячей ядерной материи (кварк-глюонной плазмы, КГП). Измерение выходов адронов, содержащих в своем составе тяжелые кварки, при остывании сверхплотной горячей ядерной материи дает возможность получить сведения о ее свойствах. Объясняется это тем, что такие адроны имеют малое сечение взаимодействия со средой КГП, следовательно, несут неискаженную информацию о начальных этапах эволюции ядерной

* E-mail: dmitrii_nesterov@mail.ru

материи. Для регистрации адронов, содержащих тяжелые кварки, необходимо использовать трековые системы с высоким пространственным разрешением — вершинные детекторы. Это связано со свойством частиц, содержащих тяжелые кварки, обладать малой длиной свободного пробега (например, у D^0 -мезона она составляет порядка 100 мкм), а также малой вероятностью образования. С помощью вершинных детекторов можно восстанавливать вторичные вершины (точки распада частиц, содержащих тяжелые кварки) и проследить с большой точностью и эффективностью за траекториями дочерних частиц [1].

В настоящее время существует определенное число вершинных детекторов, работающих как на ускорителях заряженных частиц со встречными пучками, так и в экспериментах с фиксированной мишенью. Примерами могут служить вершинные детекторы эксперимента STAR на ускорителе RHIC (The Relativistic Heavy Ion Collider), LHCb, ATLAS и ALICE на Большом адронном коллайдере. В конструкции таких детекторов можно выделить три основных компонента: позиционно-чувствительные кремниевые детекторы с соответствующей электроникой и системой сбора и обработки информации, системы поддержки и позиционирования детекторов, системы охлаждения детекторов и детекторной электроники. При создании вершинного детектора к нему предъявляется ряд существенных требований: 1) весь детектор (с соответствующей электроникой и системами охлаждения) должен иметь минимум вещества (для уменьшения многократного рассеяния), 2) положение отдельных детекторных модулей, из которых состоит вершинный детектор, должно быть жестко фиксировано и с высокой точностью позиционировано в пространстве, 3) должна обеспечиваться высокая стабильность температуры, электрических и шумовых характеристик всех детекторных модулей, 4) детекторные модули должны иметь высокую гранулярность, справляться с высокими нагрузками при регистрации частиц и быть радиационно стойкими. Поэтому сегодня в качестве детекторных модулей довольно часто используются кремниевые монолитные активные пиксельные детекторы, отвечающие всем вышеперечисленным характеристикам. Отметим, что первые три пункта в большей степени зависят от систем охлаждения и позиционирования детекторов, а четвертый пункт относится к характеристикам самих детекторов. Таким образом, в данной работе отдельное внимание было уделено исследованиям, связанным с разработками систем позиционирования и охлаждения для монолитных активных пиксельных детекторов.

1. ВЕРШИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Как уже отмечалось, для решения ряда фундаментальных задач в области физики высоких энергий и элементарных частиц необходимо создать многопараметрическую трековую систему, ключевую роль в ко-

торой будет играть вершинный детектор. В качестве примера рассмотрим новый вершинный детектор эксперимента ALICE на LHC — внутреннюю трековую систему (ВТС) [1]. Одна из физических задач данной детекторной системы заключается в регистрации с большой эффективностью адронов, содержащих тяжелые кварки в контексте физической программы по изучению свойств КГП.

В качестве детекторных модулей будут использованы монолитные активные пиксельные сенсоры (МАПС) толщиной 50 мкм [2]. Вся ВТС состоит из семи цилиндрических детекторных слоев с МАПС, установленных на углепластиковые панели с интегрированной системой охлаждения (полиамидные трубки, теплоноситель — вода) с высоким коэффициентом теплопроводности. Панели охлаждения крепятся к сверхлегким углепластиковым фермам, выполняющим функцию несущих конструкций всей системы [2, 3]. Таким образом, детекторный модуль представляет собой сборку углепластиковой сверхлегкой структуры поддержки детекторов, на панели охлаждения которой монтируются пиксельные детекторы МАПС (НИС — Hybrid Integer Circuit) [2]. Ближайшие к ионопроводу три внутренних слоя состоят из 48 детекторных модулей длиной 290 мм [3, 4] с 9 детекторами МАПС. Следующие два средних слоя состоят из 54 детекторных сборок 900 мм длиной каждая, с 112 детекторами МАПС. Наиболее удаленные от точки взаимодействия два внешних слоя состоят из 90 детекторных сборок длиной 1500 мм каждая, с 196 детекторами МАПС [1]. Для модулей средних и внешних слоев ВТС реализована схема фиксации двух панелей охлаждения к одной углепластиковой ферме (по 98 детекторов на каждой из панелей). На рис. 1 показаны отдельные элементы сверхлегких структур поддержки детекторов, предназначенных для внешних слоев вершинного детектора ВТС ALICE, разработанных совместно СПбГУ и ЦЕРН: а) углепласти-

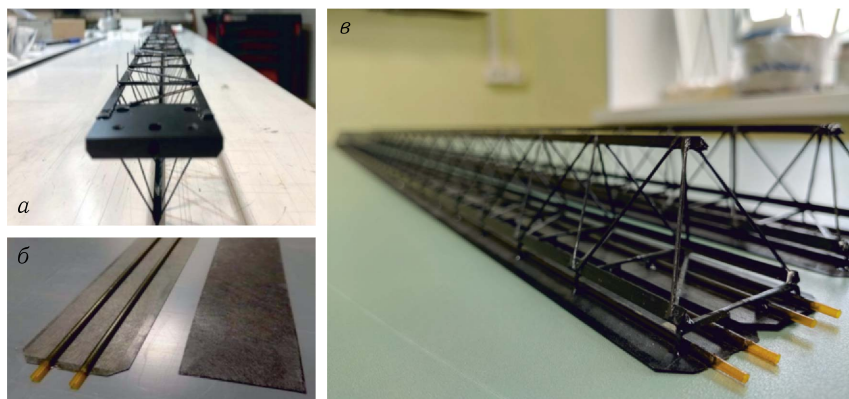


Рис. 1. Элементы сверхлегких структур поддержки внешних детекторных слоев вершинного детектора ВТС ALICE

ковая ферма с элементами крепления к ней панели охлаждения, б) углепластиковая панель с интегрированной системой охлаждения, в) полная сборка сверхлегких структур поддержки детекторов внешних слоев с двумя панелями охлаждения.

Стоит отметить, что при довольно небольшом энерговыделении пиксельных сенсоров МАПС, до 40 мВт/см^2 (здесь и далее используется величина энерговыделения или тепловой мощности с площади поверхности детектора), в ходе их длительной эксплуатации необходимо использовать эффективную систему теплоотвода, способную обеспечить работу электроники и детекторов при температуре, не превышающей $+30^\circ\text{C}$, при минимальном количестве вещества, вносимого в область детектирования. Последнее продиктовано требованием минимизации многократного рассеяния, т. е. увеличением радиационной прозрачности всей ВТС. Это важно при регистрации адронов, содержащих тяжелые кварки, и связано с условием снижения порога регистрации поперечного импульса таких частиц. Поэтому в состав новой ВТС эксперимента ALICE входят тонкие кремниевые пиксельные детекторы — МАПС, микрокабели и сверхлегкие углекомпозитные поддерживающие структуры с элементами системы охлаждения, содержащие минимум вещества с малым зарядовым числом Z .

В качестве другого примера вершинного детектора можно привести разрабатываемый в настоящее время вершинный детектор (ВД) для эксперимента MPD на коллайдере NICA [5]. Этот детектор предназначен для эффективной регистрации странных и очарованных частиц, что играет важную роль при анализе возможных фазовых переходов в КГП. Также при энергиях сталкивающихся ядер (Au–Au) коллайдера NICA можно будет изучать кластеры плотной ядерной материи, фрагментация которых сопровождается увеличением количества частиц, содержащих тяжелые кварки [5]. В результате моделирований было предложено создать пять детекторных слоев и (по аналогии с экспериментом ALICE) использовать детекторы МАПС в каждом слое. Было показано, что для точной реконструкции вершин распадов короткоживущих частиц радиационная толщина детекторов с кабельными системами и структурами их поддержки не должна превышать 1% от радиационной длины заряженной частицы. Это связано с тем, что нужно уменьшить влияние многократного рассеяния на разрешающую способность всей ВТС. Исходя из этого все детекторные слои будут иметь минимум вещества как для сенсоров, так и для поддерживающих структур с системой охлаждения. Конструкционно первые три слоя ВД эксперимента MPD будут состоять из 66 детекторных сборок длиной 750 мм, а оставшиеся два слоя — из 42 детекторных сборок длиной 1500 мм. Технологически эти детекторные сборки будут включать в себя те же самые элементы и узлы (детекторы, углепластиковые фермы, углепластиковые панели с интегрированной системой охлаждения), что и описанные выше детекторные сборки внутренней трековой системы эксперимента ALICE. Различаются эти две

трековые системы в геометрии расположения отдельных детекторных слоев относительно точки столкновения пучков коллайдеров LHC [1] и NICA [5].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПИКСЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В рамках представленной работы была создана экспериментальная установка для изучения характеристик детекторных модулей МАПС, используемых в вершинных детекторах экспериментов ALICE и MPD. Также данная установка использовалась для проведения исследований различных схем охлаждения детекторных модулей при их облучении пучками заряженных частиц разной энергии и интенсивности.

Экспериментальная установка состоит из модулей с МАПС, включенных в телескопном режиме. Ее конструкция допускает размещение и монтаж до шести детекторных слоев, однако в проводимых в данной работе экспериментальных исследованиях были задействованы четыре детекторных модуля МАПС. При этом каждый модуль с МАПС позиционируется и фиксируется на сверхлегкой углепластиковой поддерживающей структуре с интегрированной системой жидкостного охлаждения. Аналогичные сверхлегкие структуры используются для детекторных модулей (сборка длиной 290 мм) в трех внутренних слоях детекторного комплекса ВТС эксперимента ALICE [3, 4].

Экспериментальные исследования характеристик МАПС и системы их охлаждения проводились на пучке электронов (с энергией 150 МэВ) ускорителя ЛИНАК-200 в ОИЯИ. Исследовались процессы и механизмы образования пиксельных кластеров (совокупность сработавших соседних пикселей) определенной множественности (число сработавших пикселей в кластере) в зависимости от интенсивности пучка электронов. Также исследовались различные шумовые характеристики при различных интенсивностях электронного пучка. Было показано, что с увеличением интенсивности пучка частота возникновения кластеров с определенным количеством пикселей практически не меняется. Также не растет уровень шумов на всей пиксельной матрице. Это связано с достаточно эффективным сбором заряда на соответствующих пикселях (дополнительно используется напряжение обратного смещения, приложенное к подложке детектора), большим соотношением сигнал/шум, а также с эффективной системой охлаждения как пиксельной матрицы, так и электронной схемы всего детекторного модуля. Благодаря использованию углепластиковой поддерживающей структуры с системой жидкостного охлаждения удалось стабилизировать температуру МАПС на уровне $+23^{\circ}\text{C}$ с отклонением не более $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Кроме того, в ходе исследований характеристик детекторов (токовых и амплитудных значений детекторной электроники, шумовых характеристик, пороговых характеристик) было установлено,

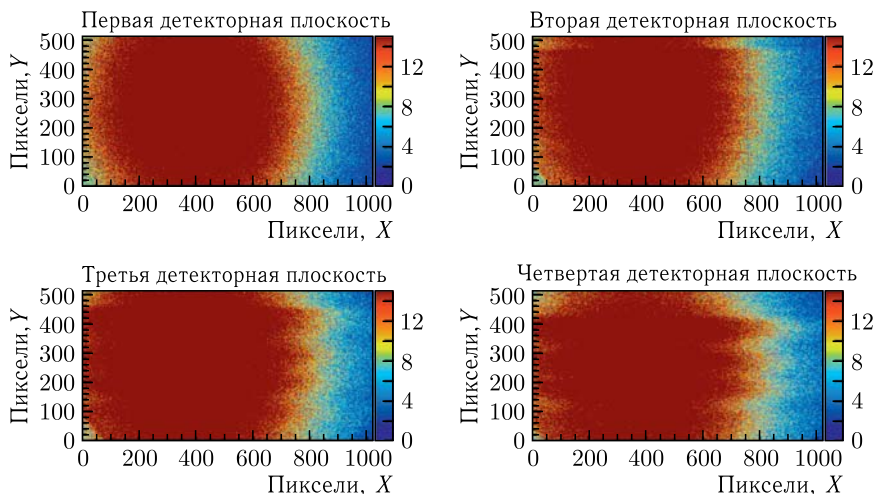


Рис. 2. Распределение сработавших пикселей при облучении четырех детекторов МАПС электронным пучком с энергией 150 МэВ

что их основные параметры практически не менялись. Это подтверждает высокую эффективность системы жидкостного охлаждения и, соответственно, стабильную работу всех детекторных модулей. Также проводились исследования процессов отклика пикселей в детекторе МАПС при воздействии на них электронного пучка с энергией 150 МэВ. Были получены карты сработавших пикселей в зависимости от интенсивности электронного пучка. На рис. 2 показаны карты сработавших пикселей на четырех детекторных плоскостях с учетом частоты срабатывания каждого пикселя для интенсивности электронов порядка 1 пА. Наблюдается отчетливая картина соответствия региона концентрации сработавших пикселей, области облучения пиксельной матрицы. Таким образом, в режиме реального времени было получено устойчивое изображение профиля пучка электронов на всех четырех детекторных плоскостях. Анализ этих распределений сработавших пикселей показал, что на первой детекторной плоскости регистрируется равномерное срабатывание пикселей в матрице, соответствующее не искаженному, первичному профилю пучка электронов.

Однако уже на втором детекторном слое возникает искажение профиля, связанное с перерассеянием электронов на трубках с охлаждающей жидкостью. На третьем и четвертом слоях данный эффект проявляется с большей степенью за счет многократного рассеяния электронов на всех трубках системы охлаждения. В итоге задача по точному восстановлению треков регистрируемых частиц, проходящих через все детекторные плоскости, значительно усложняется. Вывод, который можно сделать, заключается в том, что использование системы жидкостного охлаждения

в экспериментах с заряженными частицами низких и средних энергий приводит к появлению эффектов, связанных с многократным рассеянием этих частиц на элементах и материалах системы охлаждения. Это негативным образом влияет на последующую обработку полученной экспериментальной информации. Дополнительно проведенное моделирование показало, что подобного рода эффекты будут минимальными при регистрации частиц высоких и сверхвысоких энергий. Поэтому в экспериментах на современных коллайдерах использование системы жидкостного охлаждения позиционно-чувствительных детекторов вполне оправдано.

В данной работе в связи со значительным влиянием рассеяния электронов на трубках с охлаждающей жидкостью была модернизирована экспериментальная установка и разработана новая система охлаждения с применением холодного и сухого воздуха. Система воздушного охлаждения включает в себя компактный насос, который нагнетает воздух из окружающей среды (обычно температура воздуха $+25$ – $+27$ °С) через фильтр и осушительный объем, наполненный силикагелем, в радиатор. Для охлаждения радиатора на него с внешней стороны крепятся два элемента Пельтье. Данная система позволяет получить на выходе сухой воздух при температуре $+15$ °С, который по трубке поступает сначала внутрь установки, где с помощью системы рассекателей распределяется на шесть формирователей выходящего потока с соплами малого диаметра. Данные формирователи потока располагаются над детекторами со смещением в направлении задней поверхности на 1 см. Эксперименты показали, что воздушная система охлаждения позволяет поддерживать температуру детекторов на уровне $+30$ °С. Также было показано, что в ходе экспериментов по исследованию основных характеристик МАПС при использовании этой системы охлаждения рабочие параметры сенсоров практически не изменились в течение длительных сеансов их облучения заряженными частицами.

3. СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ БУДУЩИХ ВЕРШИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Дальнейшие исследования физики процессов с участием так называемых очарованных частиц, а также гиперонов, имеющих в своем составе тяжелые кварки, требуют прецизионной реконструкции вершин распадов короткоживущих частиц и продуктов реакций с последующей не менее точной реконструкцией треков всех рожденных в таких реакциях частиц. Для решения этих физических задач необходимо минимизировать вклад вещества, располагающегося на пути детектируемых заряженных частиц, и разместить детекторные слои как можно ближе к точке взаимодействия. В настоящее время ведутся интенсивные разработки новых детекторных комплексов на основе ультратонких (20 мкм) кремниевых пиксельных сенсоров [6]. Благодаря развитию технологий в области полупроводниковых материалов удалось создать достаточно тонкие слои

кремниевых детекторов большой площади и с большой степенью интеграции элементов электроники непосредственно в детекторном сенсоре. Это дает возможность создавать изогнутые цилиндрические слои таких кремниевых детекторов, максимально приблизив их к точке взаимодействия пучков современных коллайдеров (ЛНС, NICA). При этом влияние поддерживающих структур на прохождение заряженных частиц через все слои вершинного детектора будет практически минимизировано (более детально концепцию такого вершинного детектора для эксперимента ALICE см. в [6]).

Поэтому для нового поколения вершинных детекторов на основе ультратонких гибких пиксельных детекторов требуется разработать новые концепции для систем их охлаждения с учетом конструкционных особенностей (с упором на минимизацию вещества, используемого в элементах системы охлаждения) и заменой жидкостного теплоносителя на газовый.

Таким образом, на основе проведенного анализа данных, полученных при исследованиях процессов охлаждения кремниевых детекторов МАПС, в представленной работе было предложено использовать холодный газообразный азот для создания эффективной системы охлаждения новейших ультратонких кремниевых детекторных комплексов. Основные преимущества такой системы заключаются в том, что: а) газ минимизирует количество вещества в системе, б) холодный газообразный азот не содержит паров воды, что предотвращает образование конденсата на детекторах и электронике, в) система позволяет обеспечить высокую эффективность теплоотвода с детекторов, используя потоки газа с минимальной скоростью. Последний критерий имеет важное значение в контексте механической стабильности всей детекторной системы. Малые потоки газа при отсутствии дополнительных поддерживающих структур не создадут лишних колебаний и вибраций изогнутых ультратонких детекторных слоев.

В данной работе был создан новый экспериментальный комплекс, с помощью которого исследовались процессы и механизмы газового охлаждения в рамках задач по построению вершинных детекторов следующих поколений. Экспериментальная установка состоит из криогенного модуля, полиамидного нагревателя, который имитирует тепловыделение с детекторов (представляет собой полосу длиной 300 мм и шириной 14 мм) [3, 4], системы температурных датчиков, системы сбора и обработки данных с температурных датчиков, испарительной системы с использованием жидкого азота, системы электронного управления криогенным модулем. Криогенный модуль представляет собой замкнутый термоизолированный объем, внутри которого с помощью специальных колец устанавливается углепластиковая сверхлегкая поддерживающая структура с закрепленным на ней полиамидным нагревателем (рис. 3).

На полиамидный нагреватель, основу которого составляет полиамид толщиной 100 мкм с тонкими проводящими фольгами внутри, пода-

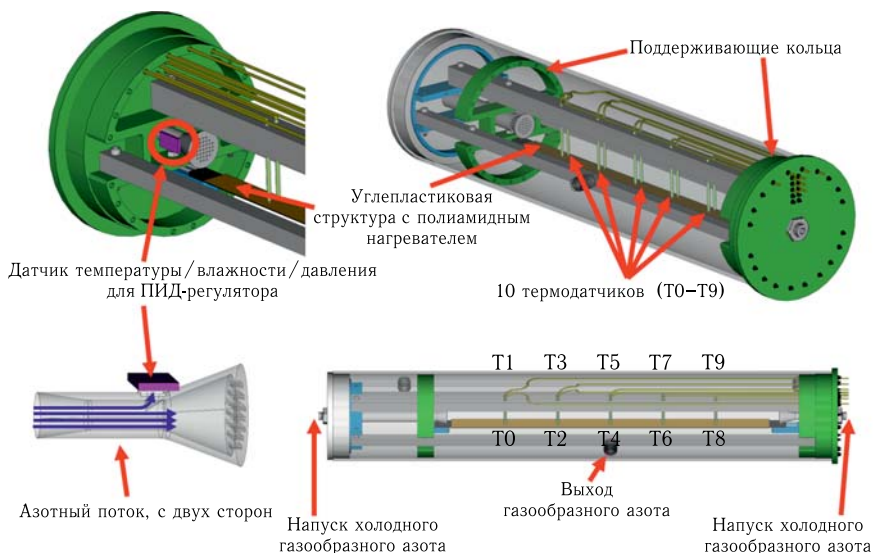


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки с отдельными элементами для исследования процессов газового охлаждения вершинных детекторов новых поколений

ется ток заданной величины. Тем самым имитируется тепловая мощность, выделяемая детекторами при их интенсивной работе. В данной установке тепловая мощность может варьироваться в пределах от 10 до 500 мВт/см². Перед началом всех основных измерений проверялась равномерность теплового поля работающего нагревателя. Для этих целей использовался тепловизор, с помощью которого регистрировалась общая картина распределения температуры на нагревателе. В ходе проведенных измерений отклонения составили не более $\pm 2^\circ\text{C}$ по всей поверхности нагревателя.

С обеих сторон от нагревателя в криогенный модуль происходит напуск холодного газообразного азота через симметрично расположенные патрубки, на концах которых находится система сопел малого диаметра. Таким образом, данная система охлаждения работает по принципу холодного газового «душа». Эта концепция напуска холодной газовой струи позволила добиться равномерного распределения холодного азота в рабочем объеме криогенного модуля.

Для генерации холодного газообразного азота использовалась испарительная система (нихромовый нагреватель, погруженный в сосуд Дьюара с жидким азотом, и электроника управления). В испарительной системе реализован автоматический контроль и регулировка интенсивности испарения азота с последующим контролем его потока в

криогенном модуле. В ходе решения этой задачи была создана система контроля тепловых процессов как в самом модуле, так и в сосуде Дьюара с жидким азотом на основе прецизионного датчика температуры/давления/влажности с использованием пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора (см. рис. 3).

Основные измерения температурного поля поверхности полиамидного нагревателя проводились с помощью 10 откалиброванных температурных датчиков — термопар (тип К — изготовлен из хромели и алюмели) с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Температурные датчики устанавливаются парами с поперечным расстоянием 5 мм между датчиками для контроля равномерности охлаждения. Продольное расстояние между термопарами выбиралось таким образом, чтобы снять температурное поле со всей поверхности нагревателя. Данные с термопар оцифровываются с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя с компенсацией температуры холодного спая и передаются на компьютер.

В ходе проведенных экспериментов температура газообразного азота на входе в криогенный модуль устанавливалась и поддерживалась на уровне $+10^\circ\text{C}$. Мощность на полиамидном нагревателе устанавливалась от 0 до 100 мВт/см^2 с шагом 10 мВт/см^2 . Для получения усредненных значений температурного поля измерения для данного значения мощности на полиамидном нагревателе проводились в течение 10 мин. Для детального исследования процессов охлаждения всей поверхности нагревателя проводились измерения при его тепловой мощности, равной 50 мВт/см^2 , в течение 60 мин. Результаты измерений температурного поля полиамидного нагревателя показаны на рис. 4.

На рис. 4, *a* показаны температурные зависимости, снимаемые с охлаждаемого полиамидного нагревателя при различных тепловых мощностях на нем. Как уже отмечалось, для проведения расширенного анализа изучалось температурное распределение, когда тепловая мощность на полиамидном нагревателе была 50 мВт/см^2 . Хорошо видно (тепловая мощность 50 мВт/см^2 , рис. 4, *a*), что при подаче азота в криогенный модуль (температура $+10^\circ\text{C}$) в месте расположения термопар Т0, Т1 и Т8, Т9 (расстояние 45 мм от точки подачи азота на обдув нагревателя) температура была $+15$ – $+17^\circ\text{C}$, в месте расположения термопар Т2, Т3 и Т6 (на расстоянии 90 мм) температура была $+18$ – $+19^\circ\text{C}$. Показания на термопаре Т7 несколько превышают общую тенденцию температурного распределения вдоль нагревателя. Это может объясняться влиянием краевых эффектов, связанных с недостаточным охлаждением данного участка нагревателя, а также с существованием области локального перегрева в месте расположения данной термопары. Однако уже показания следующих термопар Т4, Т5 (расстояние 135 мм, почти в середине нагревателя) снова отражают общую тенденцию увеличения температуры с увеличением расстояния от места ввода холодного азота. Показания этих термопар лежат в диапазоне $+21$ – $+22^\circ\text{C}$. Важно отметить, что данная температура была стабильной и практически не менялась с течением

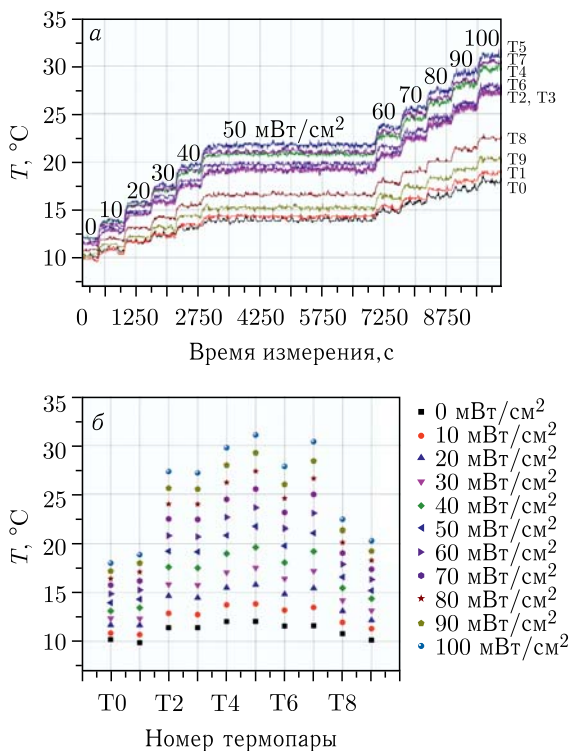


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Температурное поле на нагревателе: а) зависимость температуры, измеряемой каждой из термопар на поверхности полиамидного нагревателя, от его тепловой мощности; б) зависимость усредненной за время проведения измерений температуры для каждого температурного датчика

времени даже при довольно низкой скорости потока холодного газа. На рис. 4, б представлены усредненные значения температур за время измерений для каждой из термопар в зависимости от тепловой мощности нагревателя. Это распределение еще раз подтверждает основной вывод о том, что охлаждение осуществляется равномерно от концов нагревателя к его середине с максимумом температуры в центральных областях.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что система газового охлаждения без особых проблем функционирует вплоть до тепловых мощностей детекторов $100 \text{ мВт}/\text{см}^2$, охлаждая их до рабочих температур $+30^\circ\text{C}$. Такая система охлаждения может эффективно работать как уже с существующими пиксельными детекторами МАПС (тепловая мощность $40\text{--}50 \text{ мВт}/\text{см}^2$ [1, 2]), так и с новыми ультратонкими детекторными системами (тепловая мощность до $20 \text{ мВт}/\text{см}^2$ [6]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вершинные детекторы играют ключевую роль в изучении свойств кварк-глюонной плазмы и процессов ее адронизации в экспериментах в области физики высоких энергий. Современные разработки детекторной техники открывают новые возможности, предоставляя ученым все более совершенные инструменты для проведения исследований. Применение тонких позиционно-чувствительных пиксельных детекторов вместе со сверхлегкими структурами поддержки и охлаждения в современных вершинных детекторах позволяет в значительной степени повысить точность реконструкции траекторий заряженных частиц и, как следствие, точность восстановления вторичных и первичных вершин распадов короткоживущих адронов. Вместе с совершенствованием детекторных систем возникает необходимость совершенствования методов их охлаждения.

В рамках данной работы проведены экспериментальные исследования двух различных систем охлаждения монолитных активных пиксельных детекторов: с применением углепластиковых панелей с жидкостным охлаждением и с применением холодного газообразного азота. В первом случае углепластиковые конструкции вместе с пиксельными детекторами облучались пучками электронов с энергией 150 МэВ. Было установлено, что с увеличением интенсивности пучка уровень шумов на всей пиксельной матрице не увеличивается. Это связано с эффективной работой системы охлаждения как пиксельной матрицы, так и всей электроники детекторов. Использование углепластиковой поддерживающей структуры с системой жидкостного охлаждения позволило стабилизировать температуру МАПС на уровне $+23^{\circ}\text{C}$ с отклонением не более $\pm 1^{\circ}\text{C}$. В итоге установлено, что основные характеристики МАПС (при использовании данной системы охлаждения) и их рабочие параметры практически не изменились в течение длительных сеансов облучения детекторов.

Для новых детекторных комплексов на основе ультратонких кремниевых пиксельных сенсоров была разработана и создана система воздушного охлаждения с использованием холодного азота в качестве вещества, осуществляющего теплосъем. Эксперименты с имитаторами таких детекторов показали эффективность работы системы вплоть до тепловых мощностей детекторов 100 мВт/см². Получена высокая стабильность температуры на разных участках нагревателя, имитирующего тепловыделение на детекторах при достаточно низких скоростях продуваемого азота и полном отсутствии конденсата. Это свидетельствует о том, что данную технологию охлаждения можно будет с успехом применить при создании новых детекторных комплексов не только в физике высоких энергий, но и в экспериментах в области ядерной физики и прикладных ядерно-физических технологиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-40075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abelev B. et al. (The ALICE Collab.)*. Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System // *J. Phys. G*. 2014. V. 41, No. 8. P. 087002.
2. *Musa L.* ALICE Inner Tracking System Upgrade // ECFA High Luminosity LHC Experiments Workshop. 2016.
3. *Zherebchevsky V.I., Altsybeev I.G., Feofilov G.A. et al.* Experimental Investigation of New Ultra-Lightweight Support and Cooling Structures for the New Inner Tracking System of the ALICE Detector // *J. Instrum.* 2018. V. 13. P. T08003.
4. *Zherebchevsky V.I., Igolkin S.N., Krymov E.B. et al.* Extra Lightweight Mechanical Support Structures with the Integrated Cooling System for a New Generation of Vertex Detectors // *Instrum. Exp. Tech.* 2014. V. 57, No. 3. P. 356.
5. *Zherebchevsky V.I., Kondratiev V.P., Vechernin V.V., Igolkin S.N.* The Concept of the MPD Vertex Detector for the Detection of Rare Events in Au + Au Collisions at the NICA Collider // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2020. V. 985. P. 164668.
6. *Musa L. et al. (The ALICE Collab.)*. Letter of Intent for an ALICE ITS Upgrade in LS3 // 144th LHCC Meeting. LHCC-I-034. Geneva: CERN, 2019. No. CERN-LHCC-2019-018.