
ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 539.1.07, 53.072.8, 53.082

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ТОНКИХ КРЕМНИЕВЫХ ПИКсельНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2025 г. В. И. Жеребчевский^{a,*}, Е. О. Землин^a, Н. А. Мальцев^a,
В. В. Петров^a, Г. А. Феофилов^a

^a Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

* e-mail: v.zherebchevsky@spbu.ru

Поступила в редакцию 10.09.2024 г.

После доработки 07.10.2024 г.

Принята к публикации 29.11.2024 г.

Разработана экспериментальная установка для оптимизации процессов газового охлаждения тонких кремниевых пиксельных детекторов большой площади, обладающих высоким пространственным разрешением при регистрации треков заряженных частиц. Испытаны новые технические решения по распределению потоков холодного газа с минимальной скоростью, направленных между близко расположенными цилиндрическими слоями детекторов. Такая схема охлаждения обеспечивает эффективный отвод тепловой мощности, минимизирует температурные градиенты и устраняет проблемы вибраций детекторов, которые могут возникать при более высоких скоростях газового потока. Обсуждаются выявленные особенности охлаждения тонких кремниевых пиксельных сенсоров большой площади в новых экспериментах по физике высоких энергий.

DOI: 10.31857/S0032816225020203, EDN: GLOIFG

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних тридцати лет в экспериментах в области физики высоких энергий и элементарных частиц довольно активно используются детекторные технологии, основу которых составляют различные кремниевые пиксельные сенсоры. В настоящий момент практически все эксперименты на ускорительных комплексах высоких энергий (ALICE, ATLAS, CMS на Большом адронном коллайдере, STAR на релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC)) включают в себя кремниевые пиксельные детекторы, играющие ключевую роль при восстановлении треков регистрируемых заряженных частиц. Планируется их применение и в новых экспериментах, таких как CBM на ускорительном комплексе по исследованию ионов и антипротонов (FAIR) в Центре по изучению тяжелых ионов (GSI), а также установках MPD

и SPD на коллайдере NICA в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ).

Сегодня практически во всех экспериментах на коллайдерах используются так называемые вершинные детекторы, предназначенные для прецизионного определения вершин распада короткоживущих адронов, содержащих тяжелые кварки. Последнее связано с новыми физическими задачами исследований экстремальных состояний сверхплотной и горячей материи, кварк-глюонной плазмы (КГП), образующейся в столкновениях релятивистских ядер. Частицы, содержащие тяжелые кварки, могут образовываться на самых ранних этапах ядро-ядерных столкновений, что позволяет использовать их в качестве инструмента для томографии формирующейся КГП. Серьезная проблема, связанная с непосредственной регистрацией вершин распада короткоживущих частиц, заключается в чрезвычайной близости этих вершин

к первичным вершинам столкновений. Например, для D^0 -мезонов, содержащих очарованный кварк, средняя величина пробега до распада на пион и каон составляет примерно 120 мкм. Поэтому важнейшими требованиями к вершинным детекторам в коллайдерных экспериментах являются: а) минимизация многократного рассеяния в детекторных слоях, б) размещение слоев в непосредственной близости от точки столкновения пучков, в) применение детекторов с высокой плотностью пиксельных сенсоров, которые обладают большой скоростью считывания информации [1–5].

В настоящее время наиболее передовые детекторные модули строятся на основе монолитных активных пиксельных сенсоров (МАПС), изготовленных по технологии КМОП (180 нм), с интегрированной электроникой системы сбора и обработки информации, представляющих собой тонкие пластины размерами $15 \times 30 \text{ мм}^2$ [1–3]. Детекторные модули монтируются на легких углекомпонитных конструкциях позиционирования и поддержки со встроенной системой охлаждения [6, 7]. Данный тип детекторов работает сегодня в новой внутренней трековой системе (BTC-2) эксперимента ALICE (A Large Ion Collider Experiment) на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН [1, 2], также этот тип детектора предложен для второй фазы эксперимента MPD на строящемся в подмосковной Дубне коллайдере NICA [8, 9].

Детекторные технологии следующего поколения на основе пиксельных КМОП-сенсоров (65 нм) позволяют создавать пластины большой площади с размерами до $90 \times 290 \text{ мм}^2$ и толщиной всего 40–50 мкм. Такие тонкие пластины в виде цилиндрических слоев координатно-чувствительных сенсоров размещаются вокруг ионопровода (снаружи вакуумного тракта ускорителя при нормальном атмосферном давлении) на минимальном расстоянии от точки взаимодействия пучков. Последнее необходимо для выполнения указанных выше требований прецизионного определения вершин распада короткоживущих адронов. Эти пиксельные КМОП-сенсоры большой площади с улучшенным пространственным разрешением уже разрабатываются для новых экспериментальных исследований модернизированной внутренней трековой системы (BTC-3) ALICE на БАК [10, 11]. Также они предлагаются при создании вершинного детектора третьей фазы эксперимента MPD на коллайдере NICA [12].

Важно отметить, что такие пиксельные КМОП-сенсоры обладают высокой радиационной стойкостью, однако их рабочий диапазон не должен превышать температуру $+30^\circ\text{C}$, что связано с возрастающими шумами считывающей электроники. Кроме того, основной механической особенностью данных тонких детекторных модулей большой площади является их хрупкость. Поэтому проблемы отвода тепла на уровне $20\text{--}50 \text{ мВт/см}^2$ путем газового охлаждения и соответствующее обеспечение термомеханической стабильности тонких (40–50 мкм) КМОП-сенсоров требуют особого внимания и оптимизации.

Авторами работы ранее была предложена система газового охлаждения тонких кремниевых детекторов большой площади на основе холодного азота [13]. Использование больших градиентов температур между рабочим газом и сенсорами позволяет увеличить теплопередачу и удерживать температуру детекторов в рабочем диапазоне, а также существенно снизить скорость газового потока и избежать вибраций детекторных слоев. Ниже приводятся результаты развития данного направления, полученные с помощью новой экспериментальной установки.

2. КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Концепция [13] по использованию паров холодного азота при построении эффективной системы съема тепла с поверхности протяженных детекторных слоев была предложена и опробована авторами на экспериментальной установке с общим названием TICA (Thermal Investigations of Cold-gases Arrays).

В первом варианте установки TICA-1 пары холодного азота подавались на имитатор детекторного слоя, который представлял собой прямоугольную протяженную (290 мм) тонкую пластину из полиимида с токопроводящими фольгами внутри. Имитатор крепился к сверхлегкой углекомпонитной конструкции [6, 7]. Тепловое поле измерялось десятью термосенсорами, расположенными равномерно на поверхности имитатора, а вся конструкция помещалась в толстый термоизолированный цилиндр. При выделяемой пиковой мощности порядка 100 мВт/см^2 было показано эффективное охлаждение данного теплового имитатора детекторного слоя до температуры $+30^\circ\text{C}$. При этом температура азота,

подаваемого в термоизолированный цилиндр, варьировалась от $+5$ до $+10$ °C [13].

Далее экспериментальная установка была модернизирована (TICA-2) с заменой угольного протяженного имитатора тепловыделения с детекторов на цилиндрический слой стекловолоконного композита, по параметрам близкого к кремнию. Внутри данного теплового имитатора были инкапсулированы нихромовые нагревательные элементы. Размеры цилиндрического слоя (диаметр 60 мм, длина 290 мм) соответствовали параметрам проектируемого третьего слоя ультратонких МАПС экспериментов ALICE BTC-3 [10, 11] и эксперимента MPD на коллайдере NICA [12]. Температура азота, подаваемого в термоизолированный цилиндр, варьировалась от $+5$ до $+15$ °C. На установке TICA-2 было получено эффективное охлаждение всего цилиндрического слоя до температуры $+30$ °C. При этом выделяемая мощность на тепловом имитаторе составляла порядка 30 мВт/см², что превышает технические требования по отводу от МАПС ожидаемой тепловой мощности 20 мВт/см². Была также продемонстрирована эффективность замены внешнего термоизолирующего толстостенного цилиндра на самоподдерживающийся сверхлегкий углекомполитный каркас. Каркас состоял из продольных частей углекомполитных ферм (использовались отечественные углекомполитные материалы) сверхлегких структур поддержки детекторов МАПС, разработанных авторами для монтажа внешних детекторных слоев BTC эксперимента MPD на коллайдере NICA [14]. В качестве термоизоляции было задействовано три слоя тонкой (10 мкм) металлизированной полиэтилентерефталатной пленки (производство НИИ космических и авиационных материалов – НИИКАМ). Проводилось отдельное исследование теплоизоляционных свойств такой пленки, которое показало, что при температуре внутри установки $+5$ °C температура на поверхности даже одного слоя пленки составляет около $+15$ °C. На установке TICA-3 было достигнуто охлаждение протяженного цилиндрического имитатора детекторного слоя до температуры $+33$ °C при выделяемой на нем мощности порядка 25 мВт/см² [15]. Было также показано полное отсутствие конденсата как на внутренних, так и на внешних слоях установки.

Медленный поток холодного азота в первых экспериментальных установках направлялся на тепловой имитатор слоя детекторов либо

с одного торца термоизолирующего цилиндра, либо сразу с двух торцов. Этого было достаточно, чтобы показать общую возможность отвода тепла при минимальных скоростях обдува, однако распределение потока по объему цилиндра никак не контролировалось. Это приводило к заметным естественным градиентам температурного поля (до 40 °C), что являлось следствием нагрева газа при движении вдоль слоя теплового имитатора.

Для целей оптимизации температурного поля близко расположенных (на расстоянии около 6 мм) цилиндрических слоев тонких детекторов при их газовом охлаждении авторами была создана новая экспериментальная установка TICA-4, схема которой представлена на рис. 1. Основу установки составляет модуль 1, представляющий собой внешнюю оболочку из сверхлегких углекомполитных структур с теплоизолирующей металлизированной полиэтилентерефталатной пленкой. Внутри установлены концентрические цилиндрические слои тепловых имитаторов детекторов 2 (стекловолоконные композитные тонкостенные цилиндры с инкапсулированными внутрь нихромовыми нитями). Также в самой центральной части в качестве имитатора ионопровода смонтирован алюминиевый цилиндр 3 диаметром 33 мм. Таким образом, расположение тепловых имитаторов и ионопровода полностью соответствует оптимизированной геометрии новой внутренней трековой системы эксперимента ALICE на LHC [10, 11] и вершинного детектора третьей фазы эксперимента MPD на коллайдере NICA [12].

В новой экспериментальной установке TICA-4 выделяемая на каждом слое тепловая мощность может варьироваться от 5 мВт/см² до 50 мВт/см², что регулируется блоком питания 10. Равномерность тепловыделения по всей цилиндрической поверхности имитатора обеспечивается за счет его сплошного покрытия тонкой алюминиевой фольгой. В данном случае была сделана серия контрольных тепловизионных измерений, показавших равномерный нагрев каждого из цилиндрических слоев с разбросом температуры по нагреваемой поверхности ± 1 °C.

Измерения температуры на поверхности цилиндрических слоев осуществлялись набором из 10 откалиброванных температурных сенсоров 4. Использовались термопары типа К–хромель и алюмель, погрешность измерений составляла ± 0.5 °C. На внутреннем детекторном слое,

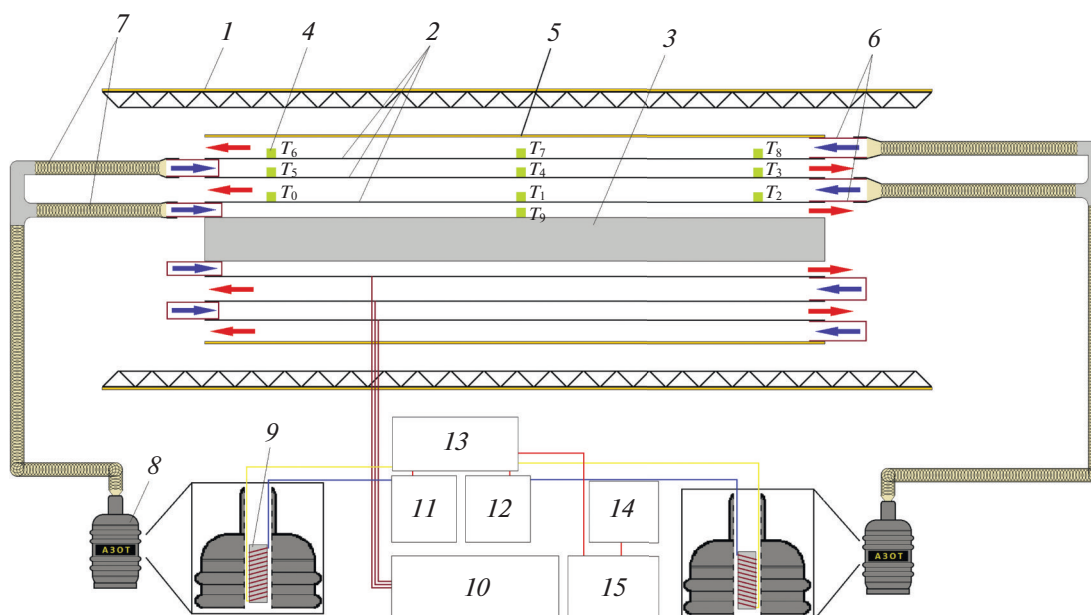


Рис. 1. Схема экспериментальной установки ТИСА-4 для исследования процессов газового охлаждения тонких изогнутых кремниевых пиксельных детекторов большой площади: 1 — замкнутый теплоизолированный объем из углекомпозитных сверхлегких структур поддержки детекторов МАПС с металлизированной полиэтилентерефталатной пленкой; 2 — три цилиндрических слоя тепловых имитаторов детекторов МАПС; 3 — имитатор ионопровода; 4 — термосенсоры (T_0-T_9); 5 — дополнительный теплоизолирующий слой; 6 — направляющие концентрические кольца для подачи азота на нагреваемые цилиндрические слои; 7 — трубки подачи азота на нагреваемые цилиндрические слои; 8 — сосуд Дьюара (2 шт.); 9 — нагревательные элементы внутри сосудов Дьюара; 10 — блок питания нагревательных элементов тепловых имитаторов цилиндрических детекторных слоев; 11, 12 — блоки питания нагревательных элементов, расположенные внутри сосудов Дьюара; 13, 14 — система ПИД-регулятора; 15 — персональный компьютер.

самом близком к ионопроводу, температурное поле измерялось термосенсорами T_0, T_1, T_2 , на среднем — сенсорами T_3, T_4, T_5 и на внешнем детекторном слое — сенсорами T_6, T_7, T_8 . Температура на ионопроводе измерялась термосенсором T_9 . Данные с сенсоров оцифровываются с помощью многоканального специализированного преобразователя напряжения в цифровой код с компенсацией температуры холодного спая и передаются на персональный компьютер 15. Охлаждение нагреваемых детекторных слоев осуществляется подачей в установку газообразного холодного азота, получаемого путем испарения из жидкой фазы. Для уменьшения общего охлаждаемого объема в непосредственной близости от внешнего детекторного слоя был добавлен дополнительный теплоизолирующий слой 5 из металлизированной полиэтилентерефталатной пленки. Холодный азот подавался по трубкам 7 на торцы установки с использованием двух сосудов Дьюара с жидким азотом 8. Для испарения азота внутри каждого сосуда Дьюара монтировались специальные нагревательные элементы 9 с соответствующими отдельными

источниками питания 11 и 12. Контроль расхода азота осуществлялся с помощью электронных весов, расположенных под сосудах Дьюара.

Для целей оптимизации температурных полей цилиндрических детекторных слоев при использовании газового охлаждения была разработана специальная схема распределения потоков, направляемых между тонкими близко расположенными слоями детекторов. Трубки подачи азота 7 соединены на торцах со специальной системой в виде концентрических колец 6, разделяющих слои детекторов и направляющих холодный газ в определенное межслойное пространство. Для устранения больших градиентов температурного поля вследствие нагрева газа при движении холодного медленного потока вдоль детекторного слоя авторами была предложена схема организации разнонаправленных потоков (см. рис. 1, синие стрелки — подача холодного азота, красные стрелки — выход уже нагретого газа). В этом случае при съеме тепла с двух поверхностей детекторных слоев встречными потоками снижается влияние эффекта уменьшения теплопередачи при нагреве потока

холодного газа, движущегося вдоль одной из поверхностей детектора. Температура азота, подаваемого на нагреваемые слои и, соответственно, его поток задаются и контролируются с помощью системы ПИД-регулятора 13 и 14, который соединен с блоками питания 11 и 12 нагревательных элементов 9, расположенных в сосудах Дьюара. Управление и контроль показаний системы ПИД-регулятора осуществляются с помощью персонального компьютера 15. Для создания управляющего сигнала ПИД-регулятора используются показания термосенсоров, расположенных на поверхности

детекторных слоев. Таким образом, ПИД-регулятор устанавливает скорость испарения азота из сосуда Дьюара и обеспечивает в ходе экспериментов температуру на постоянном уровне: либо на входе в экспериментальную установку, либо на отдельных участках охлаждаемых слоев. На рис. 2 показана в разрезе 3D-модель внутренних частей экспериментальной установки, где красным отмечены места фиксации термосенсоров к поверхности детекторных слоев. Общий вид экспериментальной установки ТИСА-4 для исследования процессов газового охлаждения тонких сенсоров МАПС показан на рис. 3.

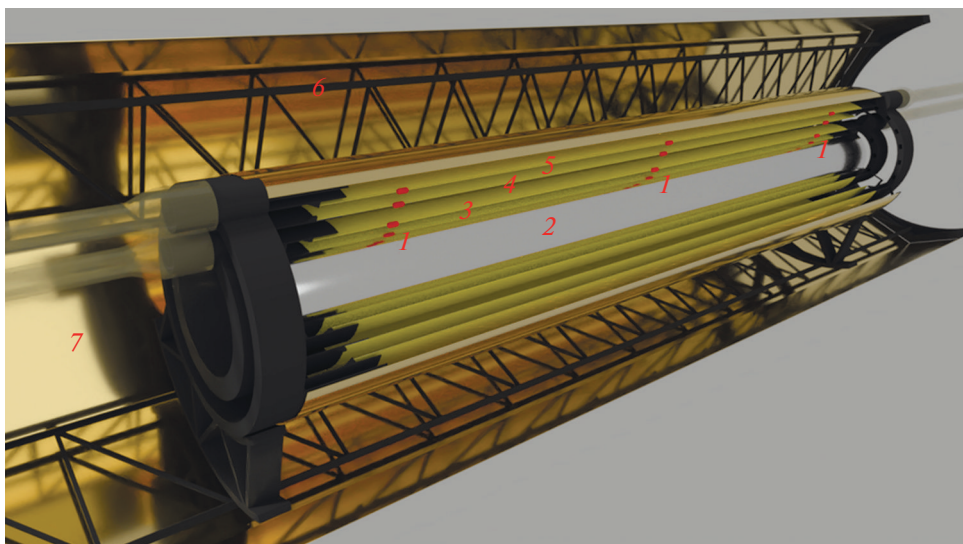


Рис. 2. 3D-модель (в разрезе) внутренних частей экспериментальной установки ТИСА-4 для исследования процессов газового охлаждения тонких кремниевых детекторов МАПС большой площади: 1 – положение термосенсоров, 2 – имитатор ионпровода; 3–5 – три цилиндрических слоя тепловых имитаторов детекторов МАПС, 6 – каркас из углекомпозитных сверхлегких структур поддержки детекторов МАПС, 7 – теплоизолирующий слой (металлизированная полиэтилентерефталатная пленка).

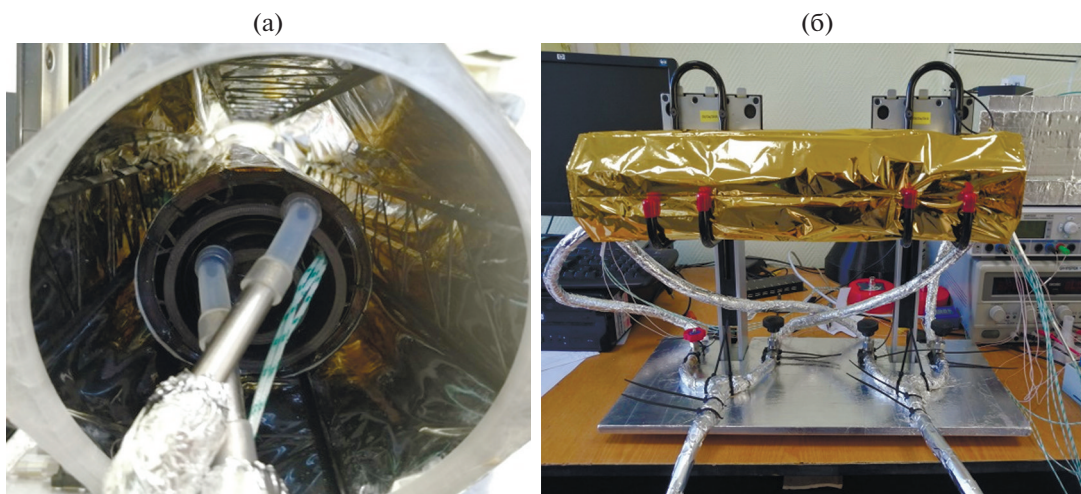


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки ТИСА-4 для исследования процессов газового охлаждения тонких кремниевых детекторов МАПС большой площади: а – вид внутренних модулей с тепловыми имитаторами, б – вид сбоку на установку с внешним слоем металлизированной полиэтилентерефталатной пленки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные измерения температурного поля поверхности детекторных слоев проводились с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$ десятью откалиброванными температурными сенсорами (T_0-T_9). В процессе измерений слои с закрепленными температурными сенсорами можно было вращать вокруг продольной оси, что давало возможность определять температурное поле на всей нагреваемой поверхности при реализуемой схеме обдува холодным азотом.

На первом этапе исследований была проведена серия экспериментов, в которых температура азота на входе в экспериментальную установку устанавливалась и поддерживалась с помощью ПИД-регулятора на уровне от $+10$

до $+15^\circ\text{C}$. Мощность на слоях устанавливалась от 0 до 30 мВт/см^2 с шагом 5 мВт/см^2 . Данная схема контроля температуры газообразного азота на входе оказалась неэффективной, наблюдались большие температурные градиенты на охлаждаемой поверхности (разница в температурах могла достигать $\pm 40^\circ\text{C}$). Поэтому на втором этапе исследований контрольная температура устанавливалась на конкретном участке поверхности цилиндрических детекторных слоев, причем в качестве входной точки для ПИД-регулятора фиксировалась температура в центре слоев (исследовался диапазон от $+5$ до $+20^\circ\text{C}$). Анализ полученных данных позволил выбрать оптимальный температурный режим в точке измерения, равный $+20^\circ\text{C}$ (температура окружающей среды была $+26^\circ\text{C}$). Была проведена третья серия

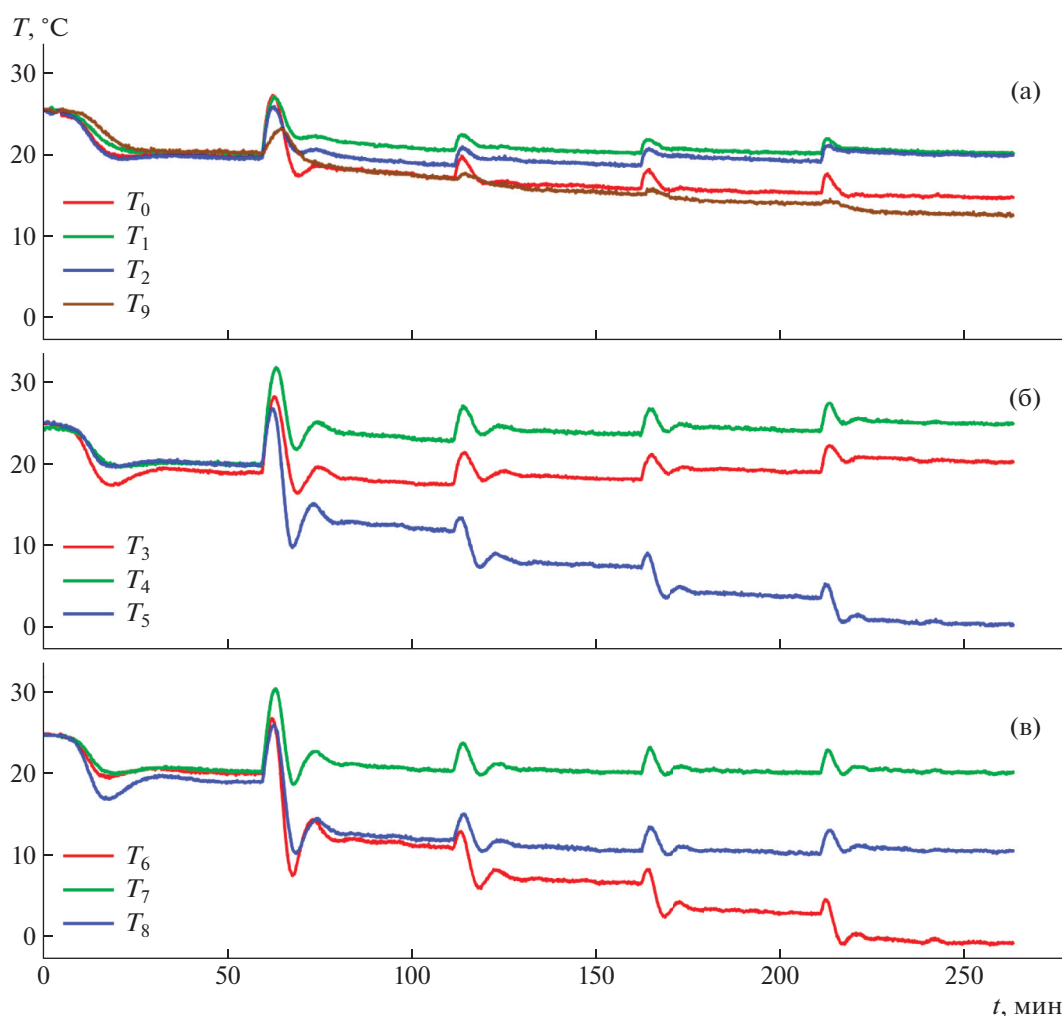


Рис. 4. Показания температурных сенсоров (расположение термосенсоров на слоях согласно схеме на рис. 1) на каждом из детекторных слоев, охлаждаемых разнонаправленными потоками азота, при измерениях в определенном временном интервале, где фиксировалась тепловая мощность от 10 до 25 мВт/см^2 : а – внутренний слой; б – средний слой; в – внешний слой. Скачки при переходе к большей мощности связаны с конечным временем реакции системы на срабатывания ПИД-регулятора.

измерений. Результаты представлены на рис. 4, где температурные данные на каждом из детекторных слоев указаны при измерениях в определенном временном интервале, где фиксировалась тепловая мощность от 10 до 25 мВт/см². Видно, что при отсутствии нагрева все слои одинаково хорошо охлаждаются, причем достигается заданная температура +20 °С. Как и следовало ожидать, участки поверхности ближе к краям охлаждаются интенсивнее, что приводит к возникновению температурного градиента, особенно ярко выраженного при подаваемой мощности 25 мВт/см². Пики и провалы на рис. 4 перед выходом показаний температур на плато обусловлены переходным процессом в моменты переключения мощности нагревателей. Его вид зависит от выбора коэффициентов ПИД-регулятора. В данном случае переходный процесс не представляет интереса, поскольку предполагается, что детекторы в рабочем режиме будут рассеивать постоянную мощность. Приоритетом для установки коэффициентов ПИД-регулятора выступает плавность изменения скорости потока азота.

Анализ распределений на рис. 4 и в табл. 1, в которой представлены усредненные показания температурных сенсоров для выбранной тепловой мощности, позволяет сделать общие выводы. Все детекторные слои эффективно охлаждаются при температуре в центре каждого слоя не более +24 °С, которая является оптимальной для

работы пиксельных сенсоров МАПС. Для рабочей мощности МАПС, равной 20 мВт/см², центральный слой охлаждается почти равномерно с перепадом температур не более ± 5 °С. На среднем и на внешнем слоях наблюдается перепад температур в центре и по краям детекторных слоев, причем удается добиться градиента не более ± 15 °С. Последнее не скажется на прочностных и деформационных свойствах жестко закрепленных тонких МАПС-детекторов, поскольку в проведенных отдельно температурных тестах было показано, что даже при перепаде температур (градиенте) ± 60 °С соответствующие тонкие кремниевые пластины немного деформируются, но не ломаются, сохраняя при этом свои прочностные свойства.

По результатам проведенных исследований были выбраны оптимальные режимы охлаждения детекторных слоев как при рабочей мощности 20 мВт/см², так и при повышенной мощности 25 мВт/см². Отдельные измерения и оценки были сделаны для скорости потока азота внутри экспериментальной установки. Полученные результаты показали, что скорость потока азота на охлаждаемых детекторных слоях не превышает 0.05–0.1 м/с. Это дает большое преимущество для будущих экспериментов с использованием тонких протяженных (продольные размеры до 300 мм) слоев кремниевых пиксельных детекторов.

Важным дополнительным результатом данных исследований с разнонаправленными потоками

Таблица 1. Усредненные показания температурных сенсоров при работающей системе газового охлаждения для заданной тепловой мощности от 10 до 25 мВт/см² (термосенсоры на слоях расположены согласно схеме на рис. 1)

Охлаждаемый слой	Положение термосенсоров	Тепловая мощность на сенсорах, мВт/см ²				
		0	10	15	20	25
		Показания термосенсоров, °С				
Внутренний слой	T_0	19.7	17.2	15.9	15.3	14.7
	T_1	20.0	20.5	20.2	20.1	20.1
	T_2	19.6	18.6	18.6	19.0	20.4
	T_9 (ионопровод)	20.1	17.0	15.0	13.9	12.6
Средний слой	T_5	20.1	11.8	7.3	4.6	0.7
	T_4	20.0	22.8	23.5	23.8	24.8
	T_3	19.0	17.5	18.2	18.8	20.4
Внешний слой	T_8	19.0	11.8	10.5	10.0	10.5
	T_7	20.2	20.3	20.0	20.1	20.2
	T_6	19.9	11.0	6.6	2.8	–0.7

холодного газа является поддержание стабильного температурного режима на ионопроводе даже при увеличенной тепловой мощности на всех окружающих его детекторных слоях.

Необходимо также отметить, что экспериментальная установка является универсальной и многомодульной разборной конструкцией, что позволит провести модернизацию системы напуска холодного азота и увеличить количество температурных сенсоров. С помощью данной установки в дальнейшем планируется проводить исследования протяженных тонких пиксельных детекторных структур с размерами до 580 мм и более, которые будут использованы в экспериментах MPD на поздних стадиях его работы.

4. ВЫВОДЫ

В ходе работ была разработана и запущена в эксплуатацию экспериментальная установка для исследования и оптимизации процессов газового охлаждения тонких и изогнутых кремниевых пиксельных детекторов большой площади. Были решены проблемы распределения потоков холодного азота в установке и поддержания необходимого температурного режима на охлаждаемых поверхностях тонких кремниевых пиксельных детекторов большой площади. Проведена серия экспериментов, в которых выявлены особенности охлаждения близко расположенных цилиндрических детекторных слоев. Данная экспериментальная установка позволила определить температурные поля на всех участках исследуемых нагретых слоев и оптимизировать эффективное охлаждение с приемлемыми температурными перепадами вдоль охлаждаемой поверхности.

Предложенная схема охлаждения детекторных слоев может быть использована в модернизированной внутренней трековой системы (ВТС-3) ALICE на БАК, а также взята за основу для проектируемого вершинного детектора третьей фазы эксперимента MPD на строящемся в ОИЯИ коллайдере NICA.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00042, <https://rscf.ru/project/23-12-00042/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abelev B., Adam J., Adamová D. et al. (*The ALICE Collaboration*) // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 2014. V. 41. P. 087002. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/41/8/087002>
2. Musa L., Beole S. ALICE Tracks New Territory. CERN Courier, 2021. <https://cerncourier.com/a/alice-tracks-new-territory/>
3. Жеребчевский В.И., Кондратьев В.П., Крымов Е.Б., Лазарева Т.В., Мальцев Н.А., Мерзлая А.О., Нестеров Д.Г., Прокофьев Н.А., Феофилов Г.А. // Изв. РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 8. С. 1041. <https://doi.org/10.7868/S0367676516080469>
4. Klein J., van Leeuwen M. ALICE 3: A Heavy-Ion Detector for the 2030s. CERN Courier, 2023. <https://cerncourier.com/a/alice-3-a-heavy-ion-detector-for-the-2030s/>
5. Contín G., Greiner L., Schambach J., Szeleziński M., Andersson E., Bell J., Cepeda M., Johnson T., Qiu H., Ritter H.-G., Silber J., Stezelberger T., Sun X., Tran C., Vu C., Wieman H., Wilson K., Witharm R., Woodmansee S., Wolf J. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2018. V. 907. P. 60. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.03.003>
6. Жеребчевский В.И., Иголкин С.Н., Крымов Е.Б., Мальцев Н.А., Макаров Н.А., Феофилов Г.А. // ПТЭ. 2014. № 3. С. 126. <https://doi.org/10.7868/S0032816214020335>
7. Zhrebchevsky V.I., Alisybeev I.G., Feofilov G.A., Francescon A., Gargiulo C., Igolkin S.N., Krymov E.B., Laudi E., Lazareva T.V., Maltsev N.A., Gomez Marzoa M., Prokofiev N.A., Nesterov D.G. // J. Instrum. 2018. V. 13. P. T08003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/08/T08003>
8. Zhrebchevsky V.I., Kondratiev V.P., Vechernin V.V., Igolkin S.N. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2021. V. 985. P. 164668. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164668>
9. Abraamyan Kh.U., Afanasiev S.V., Alfeev V.S. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2011. V. 628. P. 99. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.293>
10. The ALICE collaboration. Technical Design Report for the ALICE Inner Tracking System 3 – ITS3; A Bent Wafer-Scale Monolithic Pixel Detector. CERN-LHCC-2024-003 ; ALICE-TDR-021. 2024. <https://cds.cern.ch/record/2890181?ln=en>
11. Aglieri Rinella G., ALICE Collaboration // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2023. V. 1049. P. 168018. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168018>
12. Zhrebchevsky V.I., Kondratiev V.P., Maltsev N.A., Murin Yu. A., Petrov V.V. // Eurasian J. Phys. Funct. Mater. 2023. V. 7. P. 139. <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2023070301>
13. Нестеров Д.Г., Жеребчевский В.И., Феофилов Г.А., Иголкин С.Н., Лазарева Т.В., Мальцев Н.А., Пичу-

- гина Д.В., Прокофьев Н.А., Рахматуллина А.Р. // ЭЧАЯ. 2022. Т. 53. № 2. С. 537.
14. Жеребчевский В.И., Мальцев Н.А., Нестеров Д.Г., Белокурова С.Н., Вечернин В.В., Иголкин С.Н., Кондратьев В.П., Лазарева Т.В., Прокофьев Н.А., Рахматуллина А.Р., Феофилов Г.А. // Изв. РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 8. С. 1146.
- <https://doi.org/10.31857/S0367676522080269>
15. Zherebchevsky V.I., Kondratiev V.P., Vechernin V.V., Maltsev N.A., Igolkin S.N., Feofilov G.A., Petrov V.V., Torilov S. Yu., Prokofiev N.A., Belokurova S.N., Zemlin E.O., Komarova D.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. P. 1235.
- <https://doi.org/10.1134/S1062873824707372>