

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.075+536.212

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОДУЛЯ КРЕМНИЕВОЙ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N

© 2021 г. Д. В. Дементьев<sup>a</sup>, Т. З. Лыгденова<sup>a,b</sup>, П. И. Харламов<sup>a,c,\*</sup>

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий  
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>b</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36

<sup>c</sup> НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

\*e-mail: pi.kharlamov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 25.05.2020 г.

После доработки 26.06.2020 г.

Принята к публикации 27.06.2020 г.

Протестированы различные материалы для элементов системы охлаждения считывающей электроники кремниевого трекового детектора установки ВМ@N. Проведены тепловые расчеты при помощи программного пакета ANSYS, а также экспериментальные измерения теплопроводности различных клеев и углепластиковых материалов, по результатам которых были выбраны материалы для тепловых мостов. Выполнены тепловые испытания макетов платы со считывающей электроникой на алюминиевом радиаторе, в ходе которых были также протестированы различные термоинтерфейсы.

DOI: 10.31857/S0032816220060208

## ВВЕДЕНИЕ

ВМ@N (Barionic Matter at Nuclotron) [1] – эксперимент на выведенных пучках ускорительного комплекса NICA-Нуклотрон в Дубне, целью которого является изучение ядерной материи путем столкновения релятивистских пучков тяжелых ионов (до ядер золота) с энергиями до 4.5 ГэВ/нуклон с фиксированной мишенью. ВМ@N является первым экспериментом, проводимым на ускорительном комплексе NICA-Нуклотрон. Ключевой частью трековой системы ВМ@N является кремниевая трековая система, построенная на основе трековых модулей, включающих в себя считывающую электронику и двухсторонние микростриповые кремниевые сенсоры.

Кремниевая трековая система ВМ@N будет состоять из более чем 600000 каналов и работать в условиях высоких нагрузок детектора. Система в значительной степени повторяет общие технические решения планируемой трековой системы эксперимента СВМ на строящемся ускорительном комплексе FAIR [2] в Дармштадте, Германия, но не идентична ей, в частности, существенно отличается ее система охлаждения.

Как и в эксперименте СВМ, в кремниевой трековой системе для обработки сигнала с детектора используется быстрая многоканальная электроника. Побочным эффектом такой электроники является выделение большого количества тепла, которое необходимо отводить из термостата, куда помещен детектор. Для эффективного отвода тепла следует использовать максимально действенные тепловые интерфейсы между микросхемами и тепловыми мостами, а также между радиаторами и охлаждающей пластиной.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 1.1. Концепция теплового интерфейса

Кремниевая трековая система, общая конструкция которой описана в [3], состоит из четырех станций. Составными элементами станций являются двухсторонние микростриповые сенсоры, соединенные с платами считывающей электроники сверхлегкими многослойными алюминиево-полиимидными кабелями. Все это образует так называемые модули, которые крепятся на опорные конструкции из углеродного волокна.

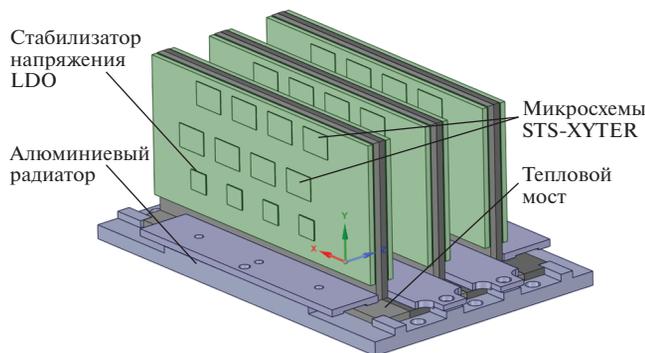


Рис. 1. Схема теплового интерфейса.

Основными источниками тепла на плате являются 8 специализированных микросхем STS-XYTER, каждая из которых выделяет тепловую мощность около 1.2 Вт. Поскольку микросхема считывания должна работать с аналоговыми сигналами малой амплитуды и обеспечивать предельно низкий уровень шумов, на самой плате размещены четыре малошумящих стабилизатора напряжения с рассеиваемой мощностью  $\sim 0.8$  Вт каждый. Общее энерговыделение достигает 13 Вт на одну плату электроники считывания.

При разработке основной сложностью являлось ограниченное пространство внутри анализирующего магнита, где должны располагаться все сенсоры и вся считывающая электроника. В связи с этим необходимо было найти решение для отвода тепла, исходя из имеющего объема и с применением минимума тяжелых материалов. Кроме того, следовало полностью исключить какие-либо магнитные материалы.

В данной работе приведены результаты исследования тепловых интерфейсов плат со считывающей электроникой. Схема теплового интерфейса показана на рис. 1. Платы крепятся на тепловые мосты через тонкий слой теплопроводящего материала. Тепловые мосты в свою очередь крепятся на платформу (алюминиевый радиатор), которая зафиксирована на пластине с водяным охлаждением. Такая конструкция обусловлена технологией процесса сборки детектора, описанной в деталях в работе [3].

Для исследования способов наилучшего отвода тепла был создан макет, в котором в качестве имитатора микросхем STS-XYTER использовался миниатюрный нагревательный элемент из нихромовой проволоки, по габаритам имитирующий микросхему толщиной 300 мкм. Так как микросхемы являются основными источниками тепла на плате, тепловые потери на дорожках платы и в соединительных разъемах при проведении тепловых расчетов не учитывались.

## 1.2. Выбор материала для тепловых мостов

Наиболее часто используемые материалы в системах охлаждения — это алюминий и медь вследствие их высокой теплопроводности [4, 5]. Наибольшей теплопроводностью обладает медь, но для эксперимента VM@N этот материал не применим, так как в условиях высокого радиационного фона медь сильно активизируется [6]. Существуют различные сплавы алюминия с разной теплопроводностью, зависящей от чистоты сплава, однако сплавы с максимальной теплопроводностью сложны для механической обработки [7].

В настоящее время в качестве альтернативы алюминию разрабатываются новые теплопроводящие композитные материалы [8]. Теплопроводность углекомпозитного материала, изготовленного из препрега KT13D1U/EX1515 производства компании TenCate Advanced Composites, была измерена в работе [9]. Материал имеет высокую теплопроводность ( $269 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ) в направлении вдоль волокна и существенно меньшую ( $15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ) — в направлении, перпендикулярном волокну.

Также в работе [9] сравнивались два углекомпозитных образца одинакового состава, но разной толщины. Для образца толщиной 78 мкм теплопроводность вдоль волокна составила  $269 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , а для образца толщиной 156 мкм —  $233 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Из этих данных можно сделать вывод, что при увеличении толщины углекомпозитного образца возрастает количество связующего материала в его составе, что ухудшает тепловые характеристики образца.

Важнейшим критерием качества клеевого соединения в нашем случае является его высокая теплопроводность; также необходимо, чтобы тепловой интерфейс между платой и тепловым мостом являлся электрическим изолятором, способным выдерживать напряжение пробоя  $\geq 500$  В. Поиск наиболее теплопроводящего клея — одна из задач данной работы.

Исследованиями влияния пористости полимерных материалов на теплопроводность установлен эффект снижения коэффициента теплопроводности при наличии в материале газовых пор. Так, при повышении относительной пористости в стеклотекстолите от 0.1 до 0.3 коэффициент теплопроводности снижается на 26% [10]. Для данного материала снижение теплопроводности объясняется наличием газовых включений, заполненных продуктами разложения клеевого соединения, теплопроводность которых не превышает 5–10% от теплопроводности связующего соединения [11]. В работе [12] показано, что повышением плотности упаковки частиц в клеях при помощи наполнителей удается увеличить теплопроводность клея на 0.6–0.7  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

В данной работе рассматривается несколько материалов, из которых возможно изготовить

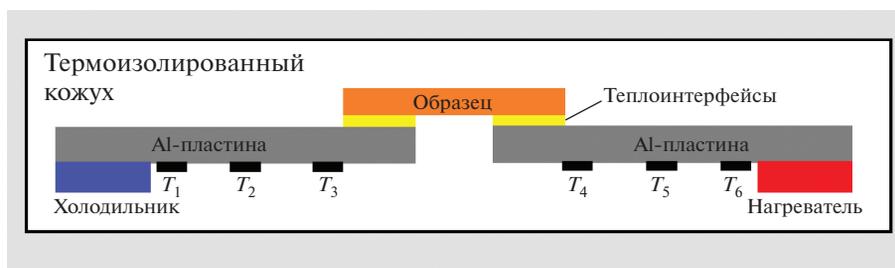


Рис. 2. Экспериментальный стенд для измерения теплопроводности в плоскостном направлении.  $T_1$ – $T_6$  – термопары.

тепловой мост: алюминий и различные композитные материалы из углепластиковых препрегов [9]. Был подготовлен стенд для тестирования теплопроводности образцов (рис. 2).

Теплопроводность материалов рассчитывалась в соответствии с законом Фурье по значениям тепловых потоков и перепадов температур, которые зависят линейно от расстояния до холодильника на обеих алюминиевых мостах (рис. 2). Среднее значение теплопереноса вычислялось по формуле:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \lambda_{Al} A \frac{dT_1/dx_1 + dT_2/dx_2}{2}, \quad (1)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – тепловые потоки через тепловой мост между холодильником и нагревателем соответственно,  $A$  – площадь поверхности теплообмена,  $dT/dx$  – тангенс угла наклона графика зависимости температуры от расстояния между холодильником и термопарами, измеряющими температуру тепловых мостов. Примером служит показанный на рис. 3 график, где 1 соответствует тепловому мосту с холодильником, а 2 – тепловому мосту с нагревателем.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Материалы тепловых мостов

Тестовый стенд для исследования теплопроводности материалов (рис. 2) состоит из двух дюралюминиевых пластин (марка Д16Т) толщиной 0.72 мм, шириной 50 и длиной 100 мм.

Пластины размещены на фиксированном расстоянии друг от друга. Одна пластина подключена к нагревателю, а другая – к алюминиевому радиатору, соединенному с охлаждающим термостатом (LAUDA MC 250), позволяющим поддерживать фиксированную температуру на конце пластины с точностью  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . На каждой алюминиевой пластине (тепловом мосте) были установлены три термопары с точно заданной позицией на тепловых мостах.

Для предотвращения тепловых потерь от излучения и конвекции вся конструкция была помещена в термоизолирующий кожух из пенного

материала “Airex C70.75” с теплопроводностью  $0.033 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Как описывалось выше, тепловое сопротивление рассчитывалось на основе измерения теплового потока  $Q$  и градиента температур  $\Delta T$ , который вычислялся с помощью графиков, представленных на рис. 3.

Различие между тепловыми потоками  $Q_1$  и  $Q_2$  обусловлено потерей тепла через тепловые излучения образца. Чтобы минимизировать влияние этого эффекта на измерения, радиационный экран из алюминиевой фольги был помещен на несколько миллиметров выше образца.

Для проверки достоверности эксперимента был взят дюралюминиевый образец из того же материала, что и тепловые мосты, и построена тепловая модель с использованием программной

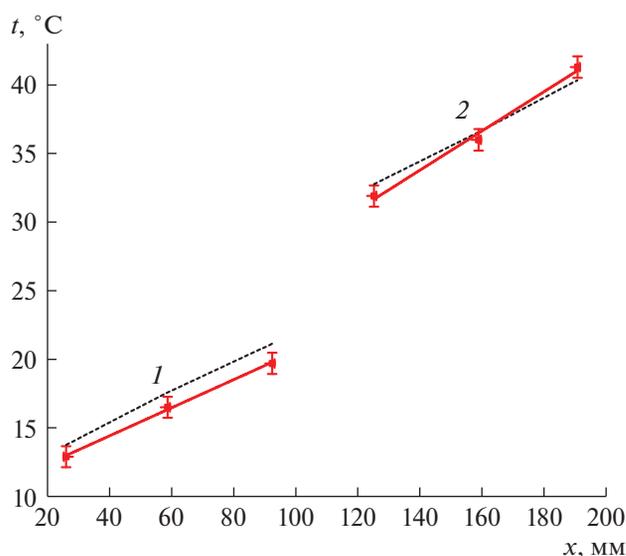


Рис. 3. График для определения перепада температур: 1 соответствует тепловому мосту с холодильником, 2 – тепловому мосту с нагревателем. В качестве образца взят углепластик с добавлением алмазной крошки, прикрепленный на скотч. Сплошная линия – экспериментальные значения, пунктирная – теоретические значения, рассчитанные с использованием программной системы ANSYS.

**Таблица 1.** Теплопроводность различных видов углепластика в направлениях, параллельном и перпендикулярном волокну

Образец	Теплопроводность, Вт/(м · К)	
	вдоль волокна	перпендикулярно волокну
№ 1 (3 слоя препрега общей толщиной 0.75 мм)	12 ± 4.7	3.7 ± 0.9
№ 2 (6 слоев препрега толщиной 1.27 мм)	17 ± 4.5	8 ± 2
№ 3 (6 слоев препрега с графеновой бумагой FGS (0.03 мм) по краям общей толщиной 1 мм)	64 ± 12.1	22 ± 3.7
№ 4 (препрег с графеновой бумагой FGS (0.03 мм) и добавлением алмазного порошка общей толщиной 0.7 мм)	254 ± 82.9	14 ± 3.4
№ 5 (4 слоя препрега, по краям с двух сторон слои углеткани (5 мм), в центре 10 слоев графеновой бумаги FGS и эпоксидная смола)	147 ± 28.1	—

системы ANSYS. Расчетные значения температуры совпали с экспериментальными в пределах погрешности, что позволило судить о корректности проведенных измерений и подтвердило, что тепловыми потерями на нагрев окружающей среды в условиях эксперимента можно пренебречь.

В работе было испытано несколько материалов, предназначенных для изготовления тепловых мостов. Помимо дюралюминия, рассматривались варианты различных углекомпозитных материалов, изготовленных из углепластиковых препрегов с высоким коэффициентом теплопроводности.

Образцы углепластика шириной 50 и длиной 20 мм были размещены на обеих алюминиевых пластинах с площадью соединения  $2.5 \times 50$  мм<sup>2</sup> каждая. При вычислении теплового сопротивления необходимо также учитывать сопротивления теплового интерфейса между исследуемым образцом и тепловыми мостами. Общее тепловое сопротивление в нашем случае состоит из нескольких последовательных сопротивлений: образца, тепловых мостов и термоинтерфейсов между ними. В качестве интерфейса между алюминиевыми пластинами и образцом использовался двухсторонний скотч толщиной 800 мкм с измеренным тепловым сопротивлением  $9.2 \pm 1.9$  К/Вт, которое учитывалось при вычислении.

Были измерены параметры пяти образцов разной толщины, с различным числом и разной ориентацией слоев препрега и с наполнителем, в качестве которого использовались графеновая бумага FGS-003 и алмазный порошок:

– образец № 1 – 3 слоя препрега K13D2U толщиной 0.75 мм;

– образец № 2 – 6 слоев препрега K13D2U толщиной 1.27 мм;

– образец № 3 – 6 слоев препрега K13D2U с графеновой бумагой FGS-003 по краям общей толщиной 1 мм;

– образец № 4 – препрег K13D2U с графеновой бумагой FGS-003 и добавлением в клей двух фракций алмазного порошка (30–40 мкм и 7–10 мкм) общей толщиной 0.7 мм;

– образец № 5 – 4 слоя препрега, по краям (5 мм) с двух сторон слои углеткани T300 с поверхностной плотностью 2 г/м<sup>2</sup>, в центре 10 слоев графеновой бумаги FGS-003 и эпоксидный клей ЭД20 с отвердителем Этал-45М.

Графеновая бумага FGS-003 производства “Ames Thermasol” имеет толщину 30 мкм, теплопроводность вдоль волокна – 1500 Вт/(м · К) и перпендикулярно волокну – 15 Вт/(м · К). Полученные значения теплопроводности указанных образцов представлены в табл. 1. Измерения проводились как вдоль волокна (0°), так и поперек него (90°).

Были построены графики температур для вычисления теплопроводности материалов тепловых мостов (аналогично рис. 3). Расчетные значения, полученные с помощью программной системы ANSYS, отличаются от измеренных результатов в среднем на 2°С, что может быть связано с погрешностью  $\lambda$ , которая была вычислена выше.

## 2.2. Клей между платой и тепловым мостом: сравнение клеев с алмазной крошкой

Измерение поперечной теплопроводности тонких материалов основано на принципах, аналогичных описанным в п. 1.2. Два алюминиевых блока (рис. 4) имеют размеры  $50 \times 20 \times 20$  мм [13]. Верхний алюминиевый блок приклеен к нагревателю. Нижний блок охлаждается при помощи термостата. Температура в фиксированных точках ( $T_1 - T_6$ ) измерялась с помощью термопар.

При изготовлении многокомпонентного клея необходимо учитывать неравномерность распределения компонентов разной массы, а также возможность возникновения воздушных пузырей внутри объема. Все это влияет на теплопровод-

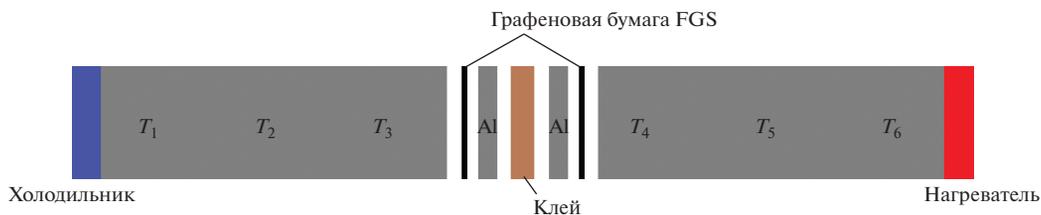


Рис. 4. Экспериментальный стенд для измерения теплопроводности в тонком слое.

ность образцов. Поэтому была использована специализированная центрифуга (THINKY ARE-250) для замешивания клеев.

Были протестированы следующие 6 образцов толщиной 100 мкм из смеси эпоксидного клея с различными фракциями алмазного порошка и 1 образец смеси с нитридом бора:

- № 1 – две фракции алмазной крошки в массовом соотношении с клеем 1/1/1;
- № 2 – мелкая фракция алмазной крошки в массовом соотношении с клеем 1/1;
- № 3 – крупная фракция алмазной крошки в массовом соотношении с клеем 1/1;
- № 4 – две фракции алмазной крошки в массовом соотношении с клеем 1/1/2;
- № 5 – две фракции алмазной крошки в массовом соотношении крупной фракции с мелкой фракцией с клеем 4/1/5;
- № 6 – две фракции алмазной крошки в массовом соотношении крупной фракции с мелкой фракцией с клеем 90/5/57;
- № 7 – нитрид бора с содержащим серебро токопроводящим клеем КТК в массовом соотношении 1/10.

Основной задачей тестирования было измерение теплового сопротивления слоя клея фиксированной толщины. По результатам измерений меньшее тепловое сопротивление показал образец № 6 с добавлением двух фракций алмазной крошки с соотношением мелкой к крупной 1/18. Можно предположить, что мелкая фракция заполнила объем между крупными, увеличивая таким образом общую теплопроводность слоя.

Несферичность алмазов, предположительно, не будет сильно влиять на плотность упаковки, поскольку, как показано в [14], плотности случайной упаковки для платоновых тел и для сфер отличаются слабо. Это позволяет оценить плотность случайной упаковки двухфракционного алмазного порошка [15] (без учета разброса размеров алмазной крошки).

В нашем случае оценка плотности упаковки дает 76%, что могло бы привести к массовому соотношению крупной фракции алмазов к их мелкой фракции и к клею как 14/5/2. Тем не менее, опыт показал, что при малом количестве клея со-

став теряет свои клеящие свойства. По этой причине в образце № 6 использовался состав с меньшим количеством алмазов мелкой фракции и с большим количеством клея. Исследования по поиску оптимального соотношения клея и двух фракций алмазов с точки зрения клеящих, прочностных и теплопроводящих свойств будут продолжены.

Измеренные значения теплового сопротивления образцов № 1–№ 4 с использованием в качестве термоинтерфейса термопрокладки КПТД-2/1-0.20 составили соответственно:  $1.9 \pm 0.97$ ;  $2.96 \pm 0.22$ ;  $2.94 \pm 0.54$ ;  $2.27 \pm 0.49$  К/Вт.

При измерении теплового сопротивления образцов № 5–№ 7 для более точных результатов термопрокладка КПТД-2/1-0.20 производства компании НОМАКОН была заменена на графеновую бумагу FGS (см. рис. 4). Этот материал, имея меньшее тепловое сопротивление, позволяет точнее измерять тепловое сопротивление образцов в интервале  $<1$  К/Вт. Измеренные значения для образцов № 5–№ 7 составили соответственно:  $0.28 \pm 0.08$ ;  $0.05 \pm 0.01$ ;  $1.58 \pm 0.46$  К/Вт. В качестве примера, приведен график температур для вычисления теплового сопротивления образца № 6 (рис. 5).

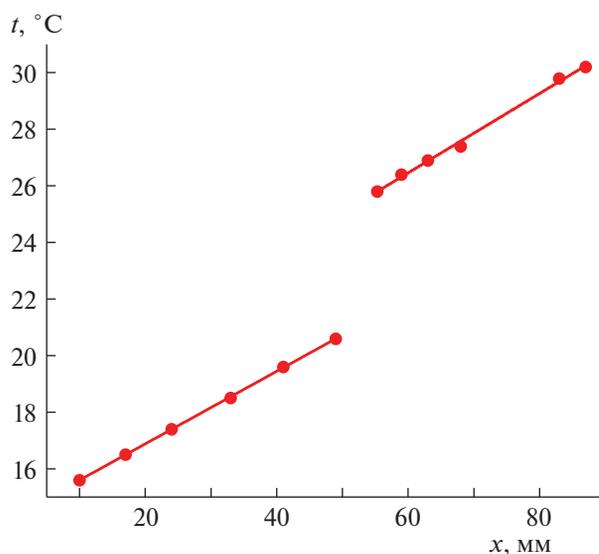


Рис. 5. График для определения перепада температур в образце № 6.

**Таблица 2.** Средняя температура  $t$  микросхем при использовании различных клеев (температура алюминиевой пластины  $+20^{\circ}\text{C}$ )

Клеи	$t, ^{\circ}\text{C}$
Клей с добавлением алмазной крошки 18/1 (100 мкм)	$28.1 \pm 1.3$
Пленочный клей (100 мкм)	$28.6 \pm 0.7$
Пленочный клей с добавлением алмазной крошки (110 мкм)	$25.9 \pm 1.5$
Пленочный клей с добавлением алмазной крошки (160 мкм)	$28.1 \pm 1.4$
Теплопроводный скотч (500 мкм)	$33.4 \pm 2.5$

Далее рассмотрим свойства клеев, используемых между алюминиевым тепловым мостом и печатной платой. На пластину размером  $7.2 \times 19$  мм, изготовленную из того же материала, что и тепловые мосты, были наклеены нагреватели с использованием клея, показавшего меньшее тепловое сопротивление (образец № 6), а также пленочного клея ГПК-21 и двухсторонней клейкой ленты 3М 9448А. Температура измерялась между микросхемами при подаваемой мощности 8.7 Вт (табл. 2). Лучший отвод тепла показал пленочный клей толщиной 110 мкм с добавлением алмазной крошки.

### 2.3. Измерение перепада температур на тепловых мостах

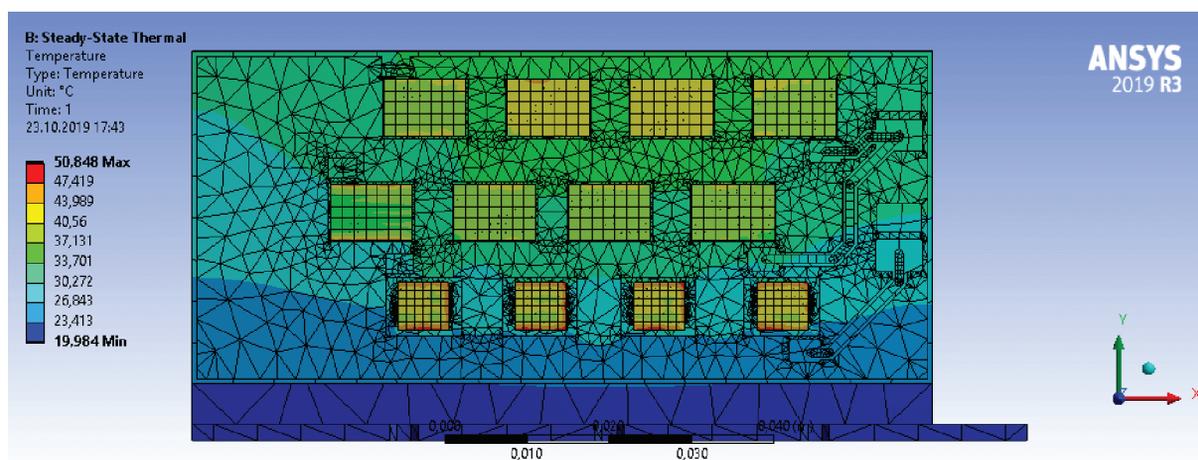
Были проведены испытания имитаторов плат считывающей электроники на дюралюминиевом тепловом мосте с использованием клея с алмазным порошком между платой и тепловым мостом.

На тепловой мост крепилась плата размером  $90 \times 40$  мм, на которую приклеивались имитаторы микросхем STS-XYTER с подаваемой мощностью 9.6 Вт и имитаторы стабилизаторов с подаваемой мощностью 3.2 Вт. Тепловые мосты были соединены с алюминиевой охлаждающей пластиной,

которая в свою очередь была подключена к термостату (LAUDA MC 250) с водяным охлаждением, позволяющему понизить температуру охлаждающей жидкости до  $5^{\circ}\text{C}$ . Измерения температуры проводились с помощью термопар, подключенных к мультиметру FLUKE+17B. Тепловая модель строилась с помощью программного пакета ANSYS (рис. 6). Измеренные и рассчитанные значения температур представлены в табл. 3. Средняя температура имитаторов микросхем  $\sim 41^{\circ}\text{C}$ , при этом температура основания теплового моста  $\sim 20^{\circ}\text{C}$ . Как видно из полученных данных, практические и расчетные значения совпали в пределах погрешности.

Для улучшения отвода тепла на плате под микросхемами были сделаны сквозные отверстия, заполненные медью (так называемая система Thermal vias) [16], которые способствовали дополнительному отводу тепла через стеклотекстолит FR4 к внешнему радиатору.

Моделирование показало, что увеличение толщины теплового моста от 2 до 3 мм позволило уменьшить температуру более чем на  $4^{\circ}\text{C}$ . Дополнительно были рассмотрены толщины тепловых мостов 1 и 2.5 мм. Результаты приведены в табл. 4.

**Рис. 6.** Модель теплового моста.

**Таблица 3.** Сравнение результатов моделирования с измерениями температур микросхем при температуре на охлаждающем термостате +5.5°C, температура основания теплового моста +20°C

Место измерения температуры	Температура, °C	
	Расчет по программе ANSYS	Измеренные значения
Верхний ряд микросхем	42.3	42.4 ± 2.4
Нижний ряд микросхем	39.7	40.6 ± 4.8
Микросхемы стабилизаторов напряжения	42.4	43.1 ± 7.3

В разделе 2.1. было указано, что образец № 6 из углепластика имеет более высокую теплопроводность в продольном направлении ( $\lambda_{\parallel} = 254 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ), но более низкую в поперечном ( $\lambda_{\perp} = 14 \pm 3.4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ), чем из дюралюминия (Д16Т). Для выяснения тепловых характеристик мостов, изготовленных из перспективных композитных материалов, было проведено моделирование с шестью тепловыми мостами различных размеров. Также для оценки эффективности теплосъема проведено моделирование схожих конструкций при изменении только свойств материалов.

Результаты моделирования показали, что у теплового моста из углепластика значения температуры ниже на 4°C, чем из дюралюминия (табл. 5). Такой выигрыш по температуре не оправдывает сложности изготовления теплового моста из углепластика.

**Таблица 4.** Изменение температуры в зависимости от толщины алюминиевого теплового моста, температура основания теплового моста +20°C

Толщина тепловых мостов, мм	Температура, °C		
	верхнего ряда микросхем	нижнего ряда микросхем	стабилизатора напряжения LDO
1	48.90	44.50	45.70
2	43.90	41.88	42.55
2.5	41.80	39.40	41.22
3	37.97	35.66	31.97

**Таблица 5.** Сравнение теплоотвода тепловых мостов из различных материалов, температура основания теплового моста +20°C

Тепловой мост	Температура, °C		
	верхнего ряда микросхем	нижнего ряда микросхем	стабилизатора напряжения LDO
из алюминия	41.3	39.1	39.9
из углепластика	37.4	35	37.6

#### 2.4. Сравнение тепловых интерфейсов между алюминиевым радиатором и тепловым мостом

В отличие от теплового интерфейса между печатной платой и тепловым мостом, от термоинтерфейса между алюминиевым радиатором и тепловым мостом не требуются обеспечения электрической изоляции, поскольку отсутствует электрический контакт с электронными компонентами. При выборе термоинтерфейса важны его высокая теплопроводность и химическая нейтральность к сплавам алюминия.

Для выбора термоинтерфейса было проведено сравнение различных теплопроводящих материалов: графеновой бумаги FGS, смоченной глицерином, различных видов термопаст и термопрокладок. Значения разницы температур между основаниями теплового моста и алюминиевого радиатора представлены в табл. 6; для отвода тепла термостат охлаждался хладагентом от холодильной установки К6 компании “Applied Thermal Control”.

Список испытанных термоинтерфейсов:

1. Термопаста GD900 (4.5 Вт/(м · К));
2. Термопаста Polimetech PK-2 (10.2 Вт/(м · К));
3. Графеновая бумага FGS (120 Вт/(м · К));
4. Термопрокладка КПТД 2/1-0.20 (1 Вт/(м · К));
5. Термопаста Thermalright TF8 (13.8 Вт/(м · К));
6. Термопрокладка Thermal Grizzly Carbonaut (62.5 Вт/(м · К));
7. Термопаста Thermalright TFX (14.3 Вт/(м · К)).

Из данных табл. 6 видно, что использование термопасты по сравнению с термопрокладкой и графеновой бумагой FGS значительно снижает

**Таблица 6.** Тестирование различных теплопроводящих материалов при температуре на охлаждающем термостате +10°C

Теплопроводящий материал	Температура, °С		$\Delta T$ , °С
	алюминиевого радиатора	основания теплового моста	
1. Термопаста GD900 (4.5 Вт/(м · К))	21.6	23.3	1.7
2. Термопаста Polimetech PK-2 (10.2 Вт/(м · К))	17.96	19.3	1.3
3. Графеновая бумага FGS	25.3	38.4	13.1
4. Термопрокладка КПТД 2/1-0.20 (1 Вт/(м · К))	26.7	33.9	7.2
5. Термопаста Thermalright TF8 (13.8 Вт/(м · К))	17.1	18.0	0.9
6. Термопрокладка Thermal Grizzly Carbonaut (62.5 Вт/(м · К))	21.4	27.2	5.8
7. Термопаста Thermalright TFX (14.3 Вт/(м · К))	26.1	26.8	0.7

перепад температур между охлаждающей пластиной и основанием теплового моста.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система охлаждения является важной частью кремниевой трековой системы BM@N. Для выбора оптимальных материалов и достижения минимального перепада температур между микросхемами и охлаждающей жидкостью были сделаны расчеты при помощи программного пакета ANSYS, а также проведены измерения с различными материалами тепловых мостов и клеев.

Моделирование показало, что использование углепластика толщиной от 2 мм незначительно улучшает отвод тепла по сравнению с алюминием той же толщины. По всей видимости, это обусловлено тем, что значения теплопроводности углепластика в поперечном направлении существенно ниже, чем в продольном. Представляется, что сложность изготовления теплового моста из углекомпозитных материалов, несмотря на небольшой выигрыш по температуре в сравнении с мостом из алюминия, делает его применение в кремниевой трековой системе эксперимента BM@N неоправданным.

Также были протестированы различные виды клеев. Наилучшие результаты показал образец № 6 с двумя различными фракциями алмазного порошка в соотношении 1/18. При сравнении лучшего из самодельных жидких клеев с пленочным ТПК-21 получены схожие значения по отводу тепла. Лучшие характеристики показал пленочный клей толщиной 110 мкм с добавлением алмазной крошки, специально изготовленный в ООО НПФ «Техполиком» по технологии, аналогичной ТПК-21. Работы в этом направлении предполагается продолжить.

Протестированы тепловые макеты платы считывающей электроники на алюминиевом радиаторе. Разница температур между микросхемой и

охлаждающей поверхностью составила 22°C на тепловом мосте. Также было показано, что при увеличении толщины теплового моста удается снизить температуру микросхем.

Сравнение тепловых интерфейсов между алюминиевым радиатором и охлаждающей пластиной показало, что термопаста обеспечивает лучший отвод тепла по сравнению с графеновой бумагой FGS и термопрокладками.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований: 18-02-40113 мега и 19-32-90001 Аспиранты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Senger P., Dementev D.* // Particles – Open Access Journal. 2019. V. 2. P. 481. <https://doi.org/10.3390/particles2040029>
2. Silicon Tracking System (STS). Technical Design Report. CBM Collaboration. GSI, Germany, December 2012. <http://repository.gsi.de/record/54798/files/GSI-Report-2013-4.pdf>
3. The Silicon Tracking System as part of the hybrid tracker of the BM@N experiment. Technical Design Report. Dubna, Dec. 2019. [https://bmn-wiki.jinr.ru/bin/download/Doc/4. Documents/4.4 BM%40N TDR/Hybrid tracker/WebHome/TDR\\_BM\\_N\\_hybrid\\_tracker\\_final.pdf?rev=1.2](https://bmn-wiki.jinr.ru/bin/download/Doc/4. Documents/4.4 BM%40N TDR/Hybrid tracker/WebHome/TDR_BM_N_hybrid_tracker_final.pdf?rev=1.2)
4. *Aksöz S., Ocak Y., Marash N., Cadirli E., Kaya H., Böyük U.* // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. V. 34. P. 1507. <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2010.07.015>
5. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
6. *Овчинников И.И., Овчинников И.Г.* // Интернет-журнал Науковедение. 2012. № 4. С. 98.
7. *Грушко О.Е.* // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 2. С. 13.
8. *Zherebchevsky V.I., Altsybeev I.G., Feofilov G.A., Igolkin S.N., Krymov E.B., Lazareva T.V., Maltsev N.A.,*

- Prokofiev N.A., Nesterov D.G., Francescon A., Gargiulo C., Laudi E., Marzosa M.G.* // Journal of Instrumentation. 2018. V. 13. № 8. P. T08003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/08/T08003>
9. *Maier S.* Application of synthetic graphite for cooling of silicon sensor modules in tracker construction // Master thesis // IEKP. 30.08.16. <https://publish.etp.kit.edu/record/21348>
10. *Зинченко В.Ф.* // Механика полимеров. 1969. № 3. С. 284.
11. *Попов В.М., Новиков А.П., Квитко К.С., Калашников Н.С., Внуков А.Н.* // Воронежский научно-технический вестник. 2018. № 1 (23). С. 41. <http://vestnikvgtu.ru/arhiv/2018/1-1-23-2018/41-46.pdf>
12. *Мозговой Н.В., Попов В.М., Попов Д.В.* // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 56.
13. *Teertstra P.* // Proc. of the ASME InterPack Conference IPACK 2007. Canada, Vancouver, British Columbia, July 8–12, 2007. <https://www.semanticscholar.org/paper/Thermal-Conductivity-and-Contact-Resistance-for-Teerts-tra/cf6e0b53b934ac9236b7adb226e54fce0c52f40d>
14. *Zong C.* A Mathematical Theory for Random Solid Packings. 2014-10-04. <http://arxiv.org/abs/1410.1102>
15. *Dias R.P., Teixeira J.A., Mota M.G., Yelshin A.I.* // Ind. Eng. Chem. Res. 2004. V. 43. P. 7912. <https://doi.org/10.1021/ie040048b>
16. *Винокуров А.* // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 16.