

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.5>

УДК: 621.382.029

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ

И.В. Фролов<sup>1</sup>, В.А. Сергеев<sup>1</sup>, Д.В. Клейменкин<sup>2</sup>, П.С. Будяков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН,  
432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет,  
344000, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1

<sup>3</sup>ООО «ИнноЦентр ВАО»,  
107564, Москва, ул. Краснобогатырская, д. 2, стр 2

Статья поступила в редакцию 11 марта 2026 г.

**Аннотация.** Исследованы тепловые характеристики коммерчески доступной высокотемпературной микросхемы AD8229HDZ, представляющей собой высокоточный инструментальный усилитель, работающий в температурном диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+210^{\circ}\text{C}$ . Для измерения тепловых характеристик в качестве элементов-источников тепла использовались встроенные защитные диоды, включенные параллельно каждому выводу микросхемы относительно выводов питания положительной и отрицательной полярности. По результатам измерений модуля теплового импеданса идентифицированы и определены значения четырех компонент теплового сопротивления, соответствующих отдельным слоям конструкции микросхемы: кристаллу, слою припоя, посадочной керамической площадке и корпусу. Определено, что значения теплового сопротивления слоя кристалл-припой, измеренные по симметрично расположенным защитным диодам, различаются в пределах 3-4 %. По результатам измерения температурных зависимостей теплового

сопротивления перехода кристалл-слой припоя в диапазоне температур от 25 °С до 150 °С выявлено различие в крутизне увеличения теплового сопротивления с ростом температуры у симметрично расположенных защитных диодов по инвертирующему и неинвертирующему входам усилителя. Показано, что при температуре корпуса микросхемы, равной 200 °С, разница тепловых сопротивлений достигает 2 К/Вт, что может являться причиной возникновения разбаланса токов в дифференциальном каскаде и появлению дополнительных искажений сигнала.

**Ключевые слова:** высокотемпературная интегральная микросхема, тепловые характеристики, измерение, оценка неоднородности.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, <https://rscf.ru/project/23-79-10069/>.

**Автор для переписки:** Фролов Илья Владимирович, [info@ulireran.ru](mailto:info@ulireran.ru)

## Введение

Развитие электроники характеризуется неуклонным ростом требований к работоспособности оборудования в экстремальных условиях эксплуатации. Развитие таких критически важных отраслей, как аэрокосмическая техника, глубоководное бурение, атомная энергетика и автомобильная промышленность (в частности, силовая электроника гибридных и электромобилей), стимулирует спрос на компонентную базу, способную функционировать при температурах, значительно превышающих стандартный диапазон до +125 °С [1-3]. В этих условиях высокотемпературные аналоговые интегральные микросхемы (ИМС) становятся ключевым элементом, обеспечивающим обработку сигналов датчиков, управление исполнительными механизмами и стабилизацию питания непосредственно в зоне высоких температур.

Работоспособность аналоговых ИМС критически зависит от стабильности электрофизических параметров полупроводниковых материалов. При повышении температуры свыше 150-200 °С резко возрастают токи утечки р-п-переходов, снижается подвижность носителей заряда, изменяются пороговые напряжения

транзисторов и параметры пассивных компонентов, выполненных в едином технологическом процессе [4-5]. Эти изменения приводят к дрейфу важнейших характеристик: смещению нуля, изменению коэффициента усиления, падению точности преобразования и, в конечном итоге, к функциональному отказу устройства. Неоднородное распределение температуры в кристалле ИМС может усиливать указанные эффекты. Следовательно, контроль тепловых характеристик ИМС и оценка степени однородности распределения температуры в кристалле является актуальной задачей.

Цель работы заключалась в оценке неоднородности тепловых параметров ИМС по результатам измерения теплового импеданса защитных диодов на примере коммерчески доступной интегральной микросхемы высокоточного инструментального усилителя.

## 1. Тепловая эквивалентная схема микросхемы

Исследованы тепловые характеристики микросхемы AD8229HDZ, которая представляет собой высокоточный инструментальный (измерительный) усилитель, предназначенный для работы в температурном диапазоне от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+210\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6]. Микросхема применяется в аппаратуре геологоразведки для глубоководного каротажа, в аэрокосмической отрасли для мониторинга датчиков вблизи горячих частей двигателей, при измерениях в выхлопных системах, а также в системах сбора данных, работающих в агрессивных средах.

Структурная схема ОУ AD8229HDZ приведена на рис. 1.

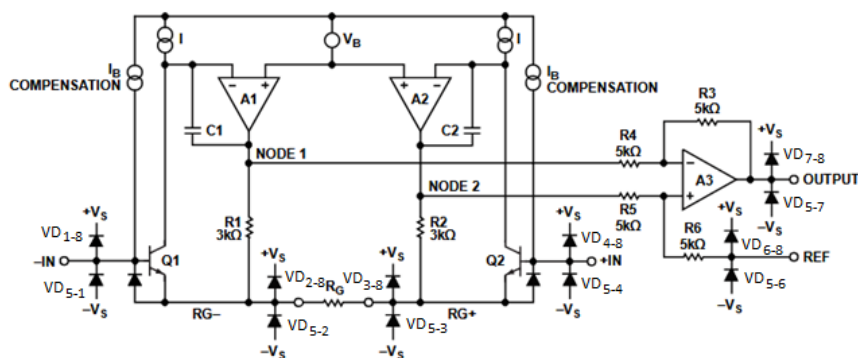


Рис. 1. Структурная схема ОУ AD8229HDZ [6].

ОУ AD8229HDZ построен на базе классической топологии с тремя операционными усилителями. Данная архитектура включает два каскада: предварительный усилитель на усилителях A1 и A2, обеспечивающий дифференциальное усиление, и следующий за ним дифференциальный усилитель, который подавляет синфазное напряжение и обеспечивает дополнительное усиление. Параллельно каждому выводу микросхемы относительно выводов питания  $+V_s$  и  $-V_s$  установлены встроенные защитные диоды, которые использовались в качестве элементов для измерения тепловых характеристик.

Кристалл микросхемы выполнен по технологии кремний-на-изоляторе [7]. Эта технология применяется для предотвращения возникновения паразитных токов утечки при высоких температурах, что позволяет кристаллу сохранять свои параметры и стабильно функционировать при температурах до  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$  [8]. Микросхема AD8229HDZ изготовлена в металлокерамическом корпусе SBDIP (Side-Brazed Dual In-line Package) с восемью выводами. Данный тип корпуса отличается использованием керамического основания и выводов, которые впаиваются сбоку, что обеспечивает высокую механическую прочность и защиту кристалла от воздействия влаги и агрессивных сред. Контакты корпуса имеют золотое покрытие, что гарантирует надежное соединение и устойчивость к коррозии даже при экстремальных температурах. Корпус SBDIP специально разработан для работы в расширенном температурном диапазоне от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+210\text{ }^{\circ}\text{C}$  и является предпочтительным выбором для наиболее требовательных применений. Кристалл микросхемы крепится к подложке корпуса с использованием высокотемпературных методов монтажа. Точные технологические детали крепления кристалла для данной модели микросхемы не раскрываются производителем в открытых источниках. Наиболее вероятным способом крепления является эвтектическая пайка (например, золото-кремниевым или золото-оловянным припоем) либо применение теплопроводящих полимерных клеев, специально разработанных для эксплуатации при температурах до  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$

и выше. Такой подход обеспечивает надежный тепловой контакт и механическую фиксацию кристалла на протяжении всего срока службы.

Приблизненно сечение микросхемы может быть изображено в виде, показанном на рис. 2.



Рис. 2. Микросхема, посаженная на плату [9].

Тепло, выделяющееся в кристалле, распространяется через слой посадочного материала и посадочную площадку к корпусу микросхемы. Согласно принципу теплоэлектрической аналогии [10,11], тепловая эквивалентная схема микросхемы планарной конструкции с односторонним отводом тепла, в которой тепловой поток направлен от активной области на рабочей поверхности кристалла к корпусу микросхемы и далее в окружающую среду, в приближении Фостера представляется в виде четырех последовательно соединенных  $RC$ -звеньев (рис. 3), в которой  $R_T$  и  $C_T$  – тепловое сопротивление и теплоемкость соответствующего слоя конструкции.

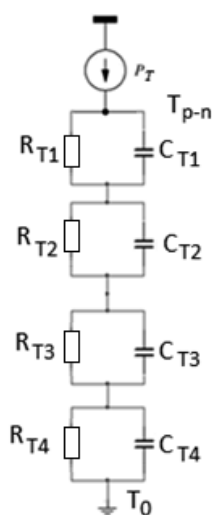


Рис. 3. Тепловая эквивалентная схема микросхемы.

В тепловой эквивалентной схеме, представленной на рис. 3, звено  $R_{T1}C_{T1}$  соответствует тепловому сопротивлению и теплоемкости области кристалла микросхемы, в которой расположен источник мощности,  $R_{T2}C_{T2}$  – слою припоя

(посадочного материала),  $R_{T3}C_{T3}$  – слою посадочной керамической площадки,  $R_{T4}C_{T4}$  – корпусу микросхемы. Зная параметры тепловой эквивалентной схемы полупроводникового изделия, можно рассчитать температуру его активной области в любом заданном режиме работы.

## 2. Результаты измерений тепловых параметров микросхемы

Измерения теплового импеданса защитных диодов проводились на разработанном в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН аппаратно-программном комплексе, описание которого представлено в работе [12]. Принцип работы комплекса состоит в разогреве объекта контроля импульсами тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону, и измерении отклика на это воздействие – изменения температуры кристалла объекта. Температура кристалла объекта определяется на основе измерения температурочувствительного параметра, в качестве которого используется прямое падение напряжения при протекании через него измерительного тока.

Измерение теплового импеданса микросхемы по защитным диодам проводилось в диапазоне частот модуляции длительности импульсов греющего тока от 0,0071 до 708 Гц и амплитуде импульсов тока 30 мА. Значение температурного коэффициента прямого падения напряжения задавалось равным  $-2$  мВ/К.

На рис. 4 представлен результат измерения модуля теплового импеданса защитного диода VD<sub>5-1</sub>.

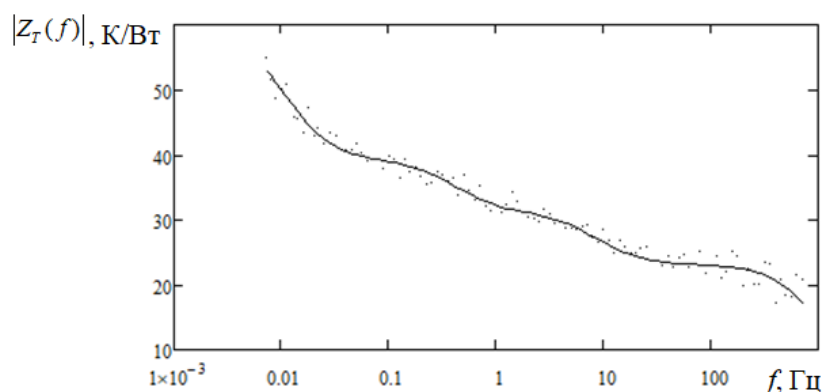


Рис. 4. Модуль теплового импеданса диода VD<sub>5-1</sub>: точки – измерение, сплошная линия – аппроксимация.

Результаты измерения аппроксимированы выражением для модуля импеданса четырехзвенной RC цепи:

$$|Z_T(f)| = \left| \frac{R_{T1}}{1 + j2\pi f \tau_1} + \frac{R_{T2}}{1 + j2\pi f \tau_2} + \frac{R_{T3}}{1 + j2\pi f \tau_3} + \frac{R_{T4}}{1 + j2\pi f \tau_4} \right|, \quad (1)$$

где  $\tau_i = R_i C_i$  – тепловая постоянная времени  $i$ -го звена тепловой эквивалентной схемы.

В результате аппроксимации получены значения параметров, приведенные в таблице 1. Аппроксимирующая кривая, построенная по функции (1) при указанных значениях параметров элементов цепи, показана на рис. 4 сплошной линией.

По результатам измерений тепловых импедансов 12-ти защитных диодов рассчитаны параметры тепловой эквивалентной схемы, которые также приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно различие в значениях тепловых сопротивлений симметрично расположенных диодов VD<sub>5-7</sub> и VD<sub>7-8</sub>, VD<sub>5-6</sub> и VD<sub>6-8</sub>, VD<sub>5-3</sub> и VD<sub>3-8</sub>.

Таблица 1. Параметр тепловой эквивалентной схемы.

	VD <sub>5-1</sub>	VD <sub>5-2</sub>	VD <sub>5-3</sub>	VD <sub>5-4</sub>	VD <sub>5-6</sub>	VD <sub>5-7</sub>	VD <sub>1-8</sub>	VD <sub>2-8</sub>	VD <sub>3-8</sub>	VD <sub>4-8</sub>	VD <sub>6-8</sub>	VD <sub>7-8</sub>
R <sub>T1</sub> , К/Вт	23,0	35,0	35,0	23,0	31,0	34,0	35,0	36,5	36,5	36,0	32,0	35,0
τ <sub>T1</sub> , мс	0,2	0,25	0,25	0,25	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
R <sub>T2</sub> , К/Вт	8	10	10	10	10	10	10	12	10	8	11	9,5
τ <sub>T2</sub> , с	0,02	0,02	0,02	0,02	0,012	0,013	0,013	0,015	0,015	0,015	0,016	0,014
R <sub>T3</sub> , К/Вт	8	6	6	6	6	7	8	6,5	7	9	6	6
τ <sub>T3</sub> , с	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,25
R <sub>T4</sub> , К/Вт	20	20	20	25	20	22	20	18	18	18	20	20
τ <sub>T4</sub> , с	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

Для оценки неоднородности тепловых параметров симметрично расположенных защитных диодов введем коэффициент для пары диодов VD<sub>5-7</sub> и VD<sub>7-8</sub>:

$$\delta_{VD5-7\_VD7-8} = \left| \frac{R_{T1VD5-7} - R_{T1VD7-8}}{1/2(R_{T1VD5-7} + R_{T1VD7-8})} \right| \times 100\%. \quad (2)$$

Полученные оценки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Оценки коэффициента неоднородности теплового сопротивления симметрично расположенных защитных диодов/

Пара защитных диодов	VD <sub>5-7</sub> и VD <sub>7-8</sub>	VD <sub>5-6</sub> и VD <sub>6-8</sub>	VD <sub>5-3</sub> и VD <sub>3-8</sub>	VD <sub>5-2</sub> и VD <sub>2-8</sub>
$\delta, \%$	2,9	3,2	4,2	4,2

Отличия тепловых сопротивлений  $R_{T1}$  диодов VD<sub>5-1</sub> и VD<sub>5-4</sub> от тепловых сопротивлений других диодов, вероятно, обусловлены отличием их площадей. Используя метод эквивалентов [13], рассчитаем площадь защитных диодов. Тепловую модель области микросхемы, расположенной под источником тепла, представим в виде многослойной конструкции, состоящей из кристалла, слоя припоя и керамического основания (рис. 5) аналогично тепловой модели монолитной интегральной схемы, разработанной в [14].

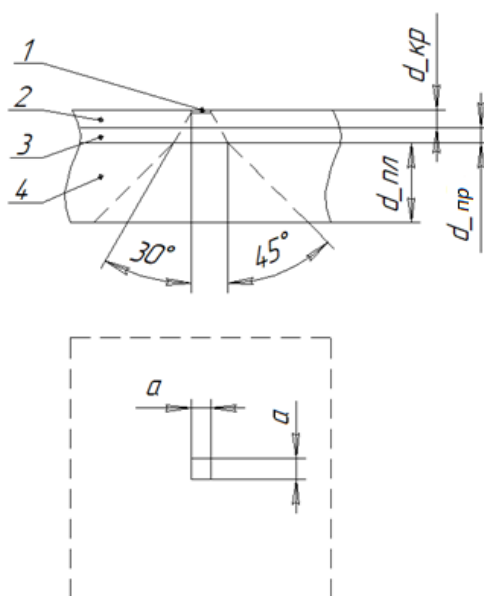


Рис. 5. Геометрия тепловой модели отдельного источника тепла МИС:  
1 – источник тепла; 2 – кристалл микросхемы; 3 – слой припоя;  
4 – керамическое основание (посадочная площадка).

Приближением модели является представление источника тепла в виде квадрата со стороной  $a$ , расположенного на поверхности кристалла. Угол расхождения теплового потока в слое конструкции зависит от отношения размера источника тепла к толщине слоя: если отношение много меньше 1, то оптимальный угол расхождения порядка  $30^\circ$ ; если отношение больше 1, то оптимальный угол расхождения порядка  $45^\circ$  [15]. В тепловой модели,

геометрия которой представлена на рис. 5, угол расхождения теплового потока в кристалле и слое припоя принят равным  $30^\circ$ , а в керамическом основании корпуса –  $45^\circ$ .

Для модели с одним источником тепла тепловое сопротивление слоя конструкции находится путем интегрирования выражения [14]:

$$R_T = \int_0^d \frac{d\xi}{\lambda S(\xi)}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала слоя конструкции;  $S$  – площадь источника тепла.

Для источника тепла квадратной формы размером  $a \times a$  с учетом растекания теплового потока в слое конструкции толщиной  $d$  под углом  $\Theta$  тепловое сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_T = \frac{d}{\lambda a(a + 2d \times \operatorname{tg} \Theta)}. \quad (4)$$

Согласно результатам, приведенным в описании микросхемы AD8229, толщина кристалла составляет 483 мкм.

Результаты измерения теплового сопротивления кристалла тепловому потоку и результаты расчета размеров защитных диодов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результат расчета размеров защитных диодов.

	Тепловое сопротивление $R_{T1}$ , К/Вт	Размер защитного диода $a$ , мкм	Площадь защитного диода $S$ , мм <sup>2</sup>
VD <sub>5-1</sub>	23,0	250	0,063
VD <sub>5-2</sub>	35,0	165	0,027
VD <sub>5-3</sub>	35,0	165	0,027
VD <sub>5-4</sub>	23,0	250	0,063
VD <sub>5-6</sub>	31,0	186	0,035
VD <sub>5-7</sub>	34,0	170	0,029
VD <sub>1-8</sub>	35,0	165	0,027
VD <sub>2-8</sub>	36,5	158	0,025
VD <sub>3-8</sub>	36,5	158	0,025
VD <sub>4-8</sub>	36,0	160	0,026
VD <sub>6-8</sub>	32,0	180	0,032
VD <sub>7-8</sub>	35,0	165	0,027

Из результатов, приведенных в таблице 3, видно, что размеры защитных диодов, расположенных между входами ОУ и выводом отрицательного напряжения питания  $-V_s$ , в среднем в 2,5 раза больше, чем площадь других защитных диодов.

Исследованы температурные зависимости компоненты  $R_{TJ}$  теплового сопротивления областей кристалла микросхемы, в которых расположены защитные диоды. Измерения тепловых импедансов защитных диодов проводились в термостате Combitherm СН-3-150 в диапазоне температур от 25 °С до 150 °С. Результаты измерений аппроксимировались линейной функцией (рис. 6).

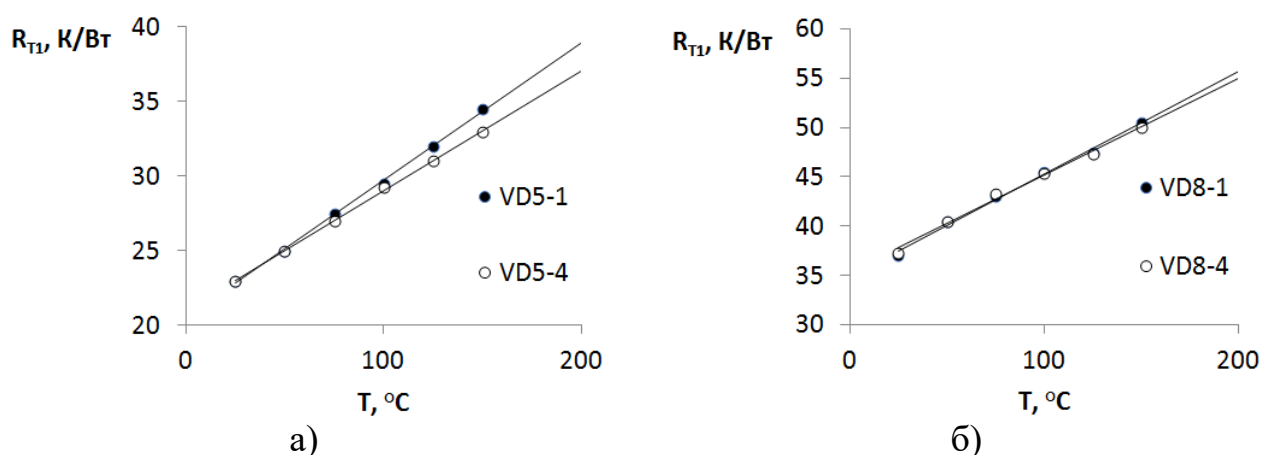


Рис. 6. Зависимости теплового сопротивления компонент переход-припой защитных диодов, расположенных между входами ОУ и выводом отрицательного напряжения питания  $-V_s$  (а) и между входами ОУ и выводом положительного напряжения питания  $+V_s$  (б).

Из рис. 6 следует, что тепловое сопротивление линейно возрастает с увеличением температуры, что связано с уменьшением коэффициента теплопроводности  $\lambda$  кремния. При этом крутизна температурной зависимости теплового сопротивления диодов  $VD_{5-1}$  и  $VD_{5-4}$  различается: при температуре 25 °С тепловые сопротивления этих диодов одинаковы, а при температуре 200 °С (значения получены путем экстраполяции зависимости) разница тепловых сопротивлений составляет 2 К/Вт. При максимально допустимой мощности, выделяющейся в микросхеме, 0,24 Вт, разность температур составляет 0,5 К.

В работе [16] показано, что из-за различия тепловых сопротивлений транзисторов в транзисторном дифференциальном каскаде (ДК) разбаланс токов ДК в статическом режиме пропорционален разности тепловых сопротивлений транзисторов  $\Delta R_T$ :

$$\delta_0 \sim \Delta R_T, \quad (5)$$

где  $\delta_0$  – отклонение от среднего значения токов, протекающих через транзисторы ДК.

Следовательно, при работе ОУ при высоких температурах различие тепловых сопротивлений транзисторов входного ДК может приводить к появлению дополнительных искажений сигнала.

## Заключение

По результатам измерения модуля теплового импеданса коммерчески доступной высокотемпературной микросхемы AD8229HDZ определены значения четырех компонент теплового сопротивления, соответствующих отдельным слоям конструкции микросхемы: кристаллу, слою припоя, посадочной керамической площадке и корпусу. Определено, что значения теплового сопротивления компонент теплового импеданса, соответствующих переходу кристалл-слой припоя, отличаются в пределах 3-4 %. Исследование температурной зависимости теплового сопротивления перехода кристалл-слой припоя показало различие ее крутизны для защитных диодов, установленных по инвертирующему и неинвертирующему входам усилителя. Установлено, что при нагреве корпуса до 200 °С расхождение в тепловом сопротивлении достигает 2 К/Вт. Данный эффект способен вызвать разбаланс токов в дифференциальном каскаде и, как следствие, привести к росту нелинейных искажений выходного сигнала.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, <https://rscf.ru/project/23-79-10069/>.

## Литература

1. Xiaoyan T. et al. 4H-SiC integrated circuits for high-temperature applications // Journal of Crystal Growth. – 2023. – V. 605. – P. 127060. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2022.127060>
2. Pradhan D. K. et al. Materials for high-temperature digital electronics // Nature Reviews Materials. – 2024. – V. 9. – № 11. – P. 790-807. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00731-9>
3. Xiao Y. et al. Review of high-temperature power electronics converters //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – V. 37. – № 12. – P. 14831-14849. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2023.02.001>
4. Lien W. C. et al. 4H-SiC N-channel JFET for operation in high-temperature environments // IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2014. – V. 2. – №. 6. – P. 164-167. <https://doi.org/10.1109/JEDS.2014.2355132>
5. Grella K. et al. High temperature characterization up to 450 C of MOSFETs and basic circuits realized in a silicon-on-insulator (SOI) CMOS technology // Journal of microelectronics and electronic packaging. – 2013. – V. 10. – №. 2. – P. 67-72. <https://doi.org/10.4071/imaps.374>
6. AD8229HDZ Datasheet (PDF) – Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/422568/AD/AD8229HDZ.html> (дата обращения: 26.02.2026).
7. Передатчик тока, работающий при экстремально высоких температурах [Электронный ресурс]. – <http://elcomdesign.ru/uncategorized/peredatchik-toka-rabotayushhij-pri-ekstremalno-vysokih-temperaturah/#respond> (дата обращения: 26.02.2026).
8. Чаплыгин Ю. А. и др. Исследование электрических характеристик КМОП-КНИ-структур с проектными нормами 0.5 мкм для высокотемпературной электроники // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2016. – №. 4. – С. 10-15.
9. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: краткий справочник разработчика. – Горячая линия-Телеком, 2005.

10. Сергеев В. А., Фролов И. В. Оценка погрешности определения параметров линейных тепловых цепей полупроводниковых приборов по частотным зависимостям теплового импеданса // Измерительная техника. – 2016. – №8. – С. 41–45. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1056-4>
11. Сергеев В. А., Тетенькин Я.Г. Оценка адекватности линейных тепловых моделей цифровых интегральных схем // Известия вузов. Электроника. – 2017. – №4. – С. 350-360. <https://doi.org/10.214151/1561-5405-2017-22-4-350-360>
12. Smirnov V.I., Sergeev V.A. & Gavrikov A.A. Measurement of the Thermal Impedance of Light-Emitting Diodes and Light-Emitting Diode Matrices. Measurement Techniques. – 2017. – Vol.60. – P.46–51. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1157-8>
13. Xu Y., Hopkins D. C. Misconception of thermal spreading angle and misapplication to IGBT power modules // 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. – IEEE, 2014. – P. 545-551. <https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803362>
14. Фролов И.В., Ходаков А.М., Сергеев В.А., Клейменкин Д.В. Моделирование тепловых характеристик высокотемпературных монолитных интегральных схем с неоднородным распределением источников тепловыделения в кристалле. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.7>
15. Захаров, А.Л.; Асвадунова, Е.И. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов: метод эквивалентов. – М. : Радио и связь, 1983.
16. Сергеев В. А., Куликов А. А. Искажения тепловой природы в дифференциальных транзисторных каскадах // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2008. – №. 4 (44). – С. 55-57.

**Для цитирования:**

Фролов И.В., Сергеев В.А., Клейменкин Д.В., Будяков П.С. Исследование неоднородности тепловых параметров высокотемпературной интегральной микросхемы. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.5>