

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.8>

УДК: 621.3.049.77

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

И.В. Фролов<sup>1</sup>, А.В. Бугакова<sup>2</sup>, О.В. Дворников<sup>3</sup>, Д.В. Клейменкин<sup>2</sup>

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

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

<sup>3</sup>Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»  
220113, Минск, ул. Я. Коласа, 73

Статья поступила в редакцию 15 марта 2024 г.

**Аннотация.** Исследованы проблемы конструктивно-технологических решений высокотемпературных аналоговых микросхем. На основании обзора публикаций, посвященных проблемам проектирования изделий высокотемпературной электроники показано, что наиболее изученными и используемыми в серийном производстве материалами для изготовления кристаллов, работающих в диапазоне температур до 300-350 °С и в ряде случаев до 500 °С, являются карбид кремния политипов 4H-SiC и 6H-SiC. Использование нитрида галлия GaN в качестве материала для кристаллов позволяет расширить температурный диапазон работы полупроводниковых приборов до 600 °С. Указанные материалы имеют большую ширину запрещенной зоны, высокую скорость насыщения носителей заряда и низкую концентрацию собственных носителей заряда. Одним из основных факторов, сдерживающих темпы роста производства изделий высокотемпературной электроники, является сложность корпусирования. Показано, что особое

внимание исследователей в настоящее время уделяется выбору материалов корпуса, материалов для крепления кристаллов и материалов проводников, соединяющих контактную площадку кристаллов с траверсами корпуса, согласованию коэффициента теплового расширения кристалла, материала для крепления кристалла и посадочного места корпуса, на котором размещают кристалл.

**Ключевые слова:** высокотемпературная электроника, интегральные микросхемы, проектирование, материалы.

**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, [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru)

## **Введение**

Высокотемпературные электронные компоненты применяются в составе датчиков, схем управления и систем питания с электроникой, способной работать в экстремальных условиях окружающей среды. К таким системам относятся системы контроля процесса сгорания топлива в газотурбинных двигателях, двигательные системы транспортных средств, системы бурения глубоких скважин, космические системы и др.

К числу основных факторов, ограничивающих применение стандартной кремниевой электроники при температурах выше 125 °С, является рост проводимости полупроводника при увеличении температуры, увеличение скорости диффузии и уменьшение пробивного напряжения в диэлектриках [1]. Проблема возрастания пробивного напряжения в диэлектриках решается увеличением их толщины. Эффекты, связанные с увеличением скорости диффузии при повышенных температурах, учитывают при проектировании путем выбора оптимальных профилей легирования, материалов с низкой скоростью взаимной диффузии, неподверженных образованию химических соединений. Рост проводимости приводит к значительному увеличению токов утечек. Как следствие, растет потребляемая мощность, и еще более

увеличивается тепловыделение. При высоких температурах стандартная изоляция между транзисторами интегральных микросхем (ИМС) с помощью р-п переходов становится неэффективной. Вместо этого необходимо применять изоляцию канавками, заполненными диэлектрическим материалом. Если кристалл микросхемы изготавливается на основе кремния, то используются пластины «кремний на изоляторе» (КНИ). Это позволяет сократить утечки тока через подложку. Другим вариантом решения проблемы возрастания токов утечки является использование широкозонных полупроводников: GaN, SiC и других. Рассмотрим основные свойства некоторых материалов, применяемых для изготовления кристаллов, и конструктивно-технологические особенности высокотемпературных электронных компонентов.

## 1. Полупроводниковые материалы для кристаллов

Карбид кремния (SiC) – широкозонный полупроводниковый материал, используемый в настоящее время в высокотемпературных электронных устройствах. Благодаря высокой химической стабильности, механической прочности карбида кремния интегральные схемы на его основе способны работать в относительно суровых условиях окружающей среды.

Карбид кремния существует в различных кристаллических структурах, известных как политипы. Политипы различаются последовательностью укладки и расположением атомов, что приводит к изменению их физических и электрических свойств. Политипы 4H-SiC и 6H-SiC принадлежат к гексагональной кристаллической системе. Разница заключается в последовательности их укладки: в 4H-SiC слои уложены в последовательности ABCB, в то время как в 6H-SiC последовательность укладки ABAВAB. Это изменение в укладке приводит к различиям в симметрии, постоянных решетки и электрических свойств этих политипов.

Политип 4H-SiC представляет собой широкозонный полупроводник с низкой собственной концентрацией носителей заряда и высокой

теплопроводностью. При увеличении температуры теплопроводность существенно уменьшается (рис. 1) [2].

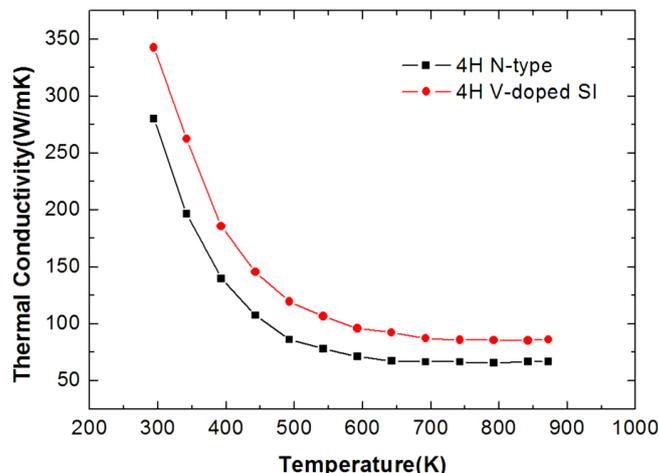


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности монокристаллов 4H-SiC N-типа и полуизолирующего карбида кремния, легированного ванадием от температуры [2].

Политип 6H-SiC характеризуется анизотропией теплопроводности: коэффициент теплопроводности  $k_z$  в поперечной плоскости (перпендикулярной гексагональным плоскостям) 6H-SiC на 30 % ниже, чем коэффициент плоскостной теплопроводности  $k_r$  (параллельно шестиугольным плоскостям). Результаты измерений, приведенные в [3], показали, что теплопроводность политипа 6H-SiC меньше, чем теплопроводность политипа 4H-SiC (рис. 2).

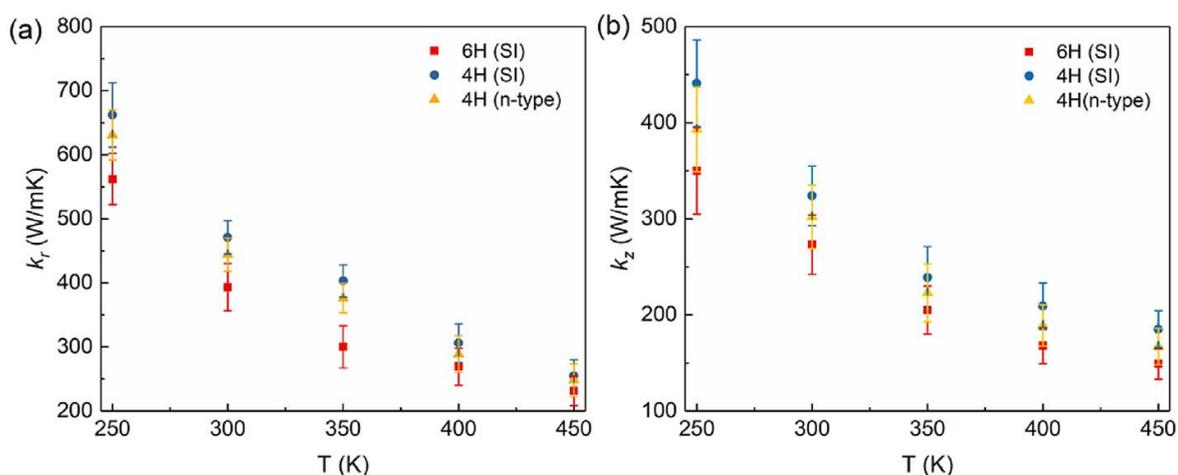


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности полуизолирующего 4H-SiC, 4H-SiC n-типа и полуизолирующего 6H-SiC в плоскостном (а) и поперечном (б) направлении [3].

На основе карбида кремния изготавливают JFET транзисторы [4, 5], логические интегральные микросхемы [6], биполярные логические элементы и ячейки памяти [7, 8], дифференциальные усилители [9].

Представленный в [4] *n*-канальный JFET транзистор 4H-SiC с режимом латерального обеднения работает при температурах до 600 °С (рис. 3). Подложка представляет собой пластину 4H-SiC  $p^+$  типа, на которой выращены три эпитаксиальных слоя: нижний слабо легированный слой  $p^-$  типа толщиной 7 мкм, слой *n* типа толщиной 300 нм и сильно легированный  $p^+$  слой толщиной 200 нм. Слой  $p^+$  используется для формирования электрода затвора, а *n* слой содержит область канала полевого транзистора.

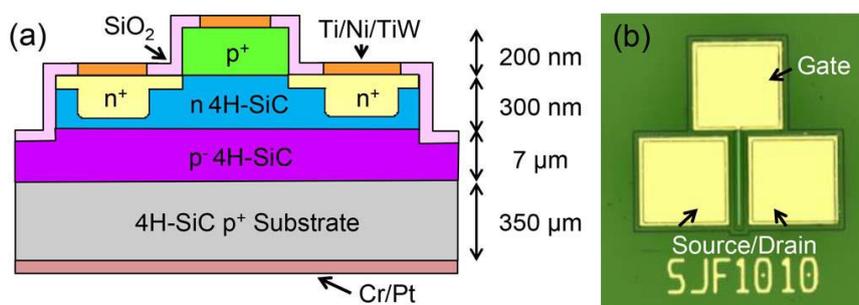


Рис 3. 4H-SiC JFET транзистор [4].

При повышении рабочей температуры от комнатных значений до 600 °С из-за уменьшения подвижности носителей заряда крутизна снижается от 4,94 мкСм/мкм до 0,79 мкСм/мкм, при этом собственный коэффициент усиления остается выше 50 при 600 °С.

В статье [6] представлены аналоговые и логические ИМС на основе технологии SiC. Микросхемы построены с использованием JFET транзисторов с вертикальным каналом, металлопленочных резисторов и боковых *p-n* диодов. Аналоговые микросхемы представляют собой операционные усилители различных типов, а логические микросхемы – вентили НЕ, И-НЕ, И, ИЛИ и ИЛИ. Интегральные микросхемы упакованы в керамические DIP корпуса и испытаны при температуре до 500 °С. Показано, что операционные усилители сохраняли работоспособность при температурах до 430 °С, логические микросхемы – до 500 °С.

Авторы работы [8] утверждают, что для работы при высоких температурах применение биполярных транзисторов предпочтительнее МОП устройств, в первую очередь из-за отсутствия оксида затвора (рис. 4).

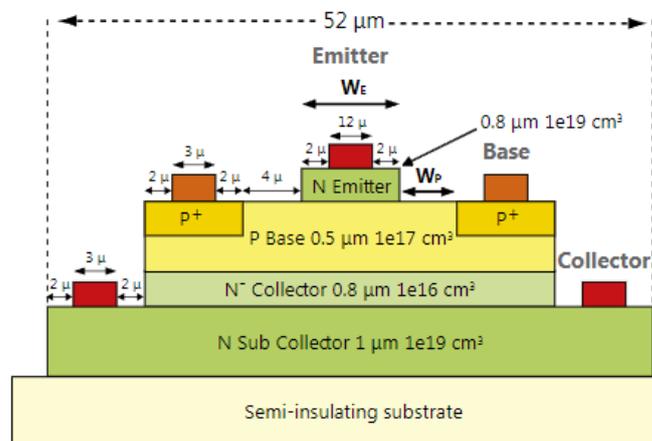


Рис. 4. Поперечное сечение базового оптимизированного эпитаксиального  $n$ - $p$ - $n$  биполярного транзистора на полуизолирующей подложке [8].

В отличие от предыдущих исследований, в статье [8] представлены результаты моделирования и исследования технологий биполярной логики на основе 4H-SiC в широком диапазоне температур (300-773 K) и напряжений питания (7-17 В), оцениваются различные технологии, использующие одну и ту же структуру устройства при моделировании, чтобы подчеркнуть истинные преимущества каждой логической технологии.

Стандартная технология объемной КМОП рассчитана на рабочую температуру не выше 175 °С. Увеличение температуры МОП транзистора приводит к увеличению токов утечки и уменьшению порогового напряжения прибора. Для устранения утечек между транзисторами и уменьшения утечек самих транзисторов при повышенной температуре используется подложка типа кремний-на-изоляторе, которая, в свою очередь, может привести к возникновению эффекта саморазогрева [10]. В технологии КНИ в качестве диэлектрической подложки используется слой SiO<sub>2</sub>. Он может быть сформирован во внутренних частях монокристалла кремния путем его ионного легирования кислородом на определенную глубину с последующим отжигом в инертной атмосфере. Скрытый изоляционный слой в структуре КНИ

значительно уменьшает путь утечки, связанный с диодами стока и истока с  $p$ - $n$  переходом, что обеспечивает работу при температурах до 300 °С [11-13].

Например, компания Fraunhofer IMS предлагает универсальный процесс КНИ-КМОП с толщиной 1,0 мм для пластин диаметром 200 мм. В линейке высокотемпературной КНИ-КМОП технологии H035 [13] отдельные транзисторы изолируются не диодами, а скрытым оксидом, что снижает токи утечки до трех порядков. Дополнительная оптимизация устройств обеспечивает эффективную работу ИМС при температуре до 300 °С. Для повышения надежности и уменьшения электромиграции технология предполагает применение вольфрамовой металлизации вместо обычно используемой алюминиевой. Минимальный размер структуры 0,35 мкм и до четырех металлических слоев позволяют реализовать компактные интегрированные системы, включающие небольшие встроенные микроконтроллеры.

Нитрид галлия (GaN) является перспективным материалом для электроники, работающей в экстремальных условиях окружающей среды. Благодаря превосходным свойствам на основе GaN создают транзисторы для радиочастотных, силовых, микроэлектромеханических устройств [14-18].

Нитрид галлия имеет ширину запрещенной зоны 3.45 эВ, напряженность поля пробоя порядка 1 МВ/см [14]. Теплопроводность монокристалла GaN при комнатной температуре равна 253 Вт/(м×К), что составляет примерно 60% от значения теплопроводности карбида кремния (рис. 5) [15].

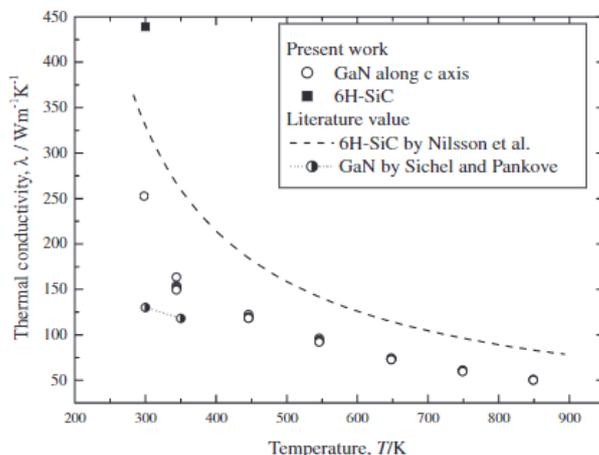


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности GaN [15].

В [16] сообщается о внедрении и проверке нескольких цифровых ИМС, которые были успешно изготовлены с использованием технологии GaN500, предоставленной Национальным исследовательским советом Канады (NRC). Электрические характеристики интегральных пассивных элементов были протестированы при различных температурах от 25 °С до 600 °С. Кроме того, авторы экспериментально продемонстрировали цифровые логические элементы и источники опорного напряжения, реализованные с использованием технологии GaN500: экспериментальная проверка показала стабильность работы логических элементов НЕ, ИЛИ и И-НЕ при температурах до 400 °С, а источника опорного напряжения – до 550 °С.

Вместе с тем разработка высокотемпературных (до 500 °С) GaN интегральных схем все еще находится на ранней стадии. Основной проблемой при реализации устойчивых к высоким температурам GaN интегральных микросхем является отсутствие масштабируемой технологии.

## **2. Особенности сборки кристаллов и выбора внешних элементов для подключения высокотемпературных ИМС**

Выбор корпуса, материалов для крепления кристалла и разварки проводников является одной из значительных проблем изготовления высокотемпературных ИМС [1, 19, 20]. Рассмотрим проблемы корпусирования и монтажа высокотемпературных ИМС, принимая во внимание элементы на рис. 6.

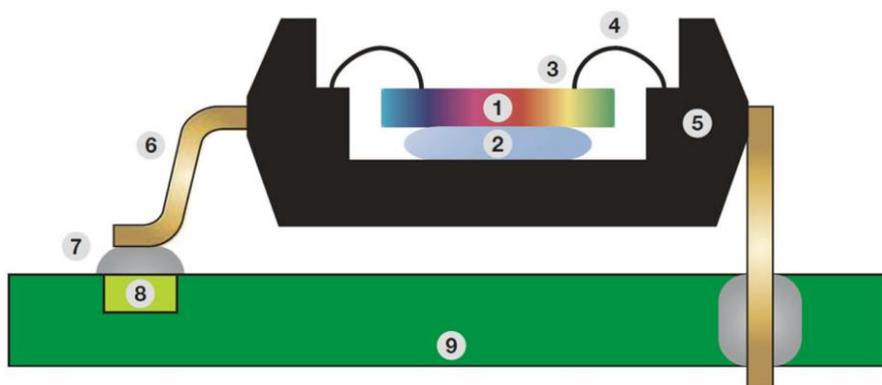


Рис. 6. Элементы корпуса и монтажа ИМС: 1 – полупроводниковый кристалл; 2 – материал для крепления кристалла; 3 – металлизация контактной площадки на кристалле; 4 – проводник, соединяющий контактную площадку с корпусом; 5 – корпус ИМС; 6 – вывод корпуса; 7 – припой; 8 – проводник на печатной плате; 9 – печатная плата

Многие материалы, применяемые для стандартного температурного диапазона, имеют низкую температуру стеклования и не подходят для работы при высоких температурах.

Особое внимание необходимо уделять согласованию коэффициента теплового расширения кристалла, материала для крепления кристалла и посадочного места корпуса, на котором размещают кристалл. Даже незначительное механическое напряжение на кристалле может вызвать изменение электрических параметров недопустимое для прецизионных применений.

Для монтажа кристаллов высокотемпературных микросхем уже не подходят клеи на основе полимерных материалов, и вместо них следует применять металлические или стеклянные припои: Indalloy 151 [21], Indalloy 182 [1], Au80Sn20. Наилучшей альтернативой эпоксидному клею и сплаву Au80Sn20 являются наполненные серебром стеклянные припои, например, новый продукт компании Namics ХН9930-1. Этот материал обладает высокой тепло- и электропроводностью. Он может быть использован для монтажа кристаллов, предназначенных для эксплуатации при температурах до 300 °С. Этот припой наносится на подложку методом дозирования, как эпоксидный клей для монтажа кристалла. Оплавление ХН9930-1 происходит при 370 °С [1].

Для крепления кристалла в [17] на его обратную сторону был нанесен слой золота, толщиной 5 мкм, а посадка в металлокерамический корпус выполнена с помощью серебросодержащей эпоксидной смолы фирмы «EPOXY TECHNOLOGY», которая допускает применение при температуре до 325 °С.

Следует учитывать, что микросхемы, применяющие указанные материалы для крепления кристаллов, можно однократно исследовать при более высоких температурах, но при этом следует избегать перемещения корпусов.

При рассмотрении надежности соединения проводников при повышенных температурах необходимо обязательно учитывать совместимость металлов, используемых для проводников и контактных площадок. Для высокотемпературных условий в основном применяется проволока на основе Au, Al, Pt и Ni. К сожалению, одно из самых популярных сочетаний металлов в промышленности – золотая проволока и алюминиевая контактная площадка – склонно к появлению дефектов при повышенных температурах и длительном температурном воздействии.

Алюминиевый проводник широко используется в кремниевых чипах, однако он выходит из строя из-за электромиграции при температуре выше 200 °С через несколько тысяч часов работы и выше 300 °С через сотни часов. Заметим, что в GaAs приборах обычно используется золото в качестве проводников и адгезионных слоев контактных площадок.

В [4] для создания омического контакта к 4H-SiC *n*-типа в полевом транзисторе с управляющим *p-n* переходом (JFET) с удельным сопротивлением  $1.14 \times 10^{-3}$  Ом/см<sup>2</sup> при температуре 600 °С использовались Ti/Ni/TiW металлические столбики. В [22, 23] использована высокопрочная схема металлизации Ti/TaSi<sub>2</sub>/Pt.

Таким образом, целесообразно использовать один и тот же металл для соединительного проводника и контактной площадки (монометаллическая связь), чтобы избежать негативных последствий. Для систем Au/Al можно использовать процесс металлизации над контактной площадкой,

либо использовать барьерную металлизацию. Например, компания Tanaka производит проволоку типа GPG, в которую добавлен палладий [1].

Корпус микросхемы также должен выдерживать высокотемпературные нагрузки. Пластмассовые корпуса, хотя являются промышленным стандартом, рассчитаны только на 150 °С или кратковременного воздействия 175 °С.

По этой причине герметичные металлокерамические и металлостеклянные корпуса часто предпочтительнее для высокотемпературных применений. Герметик уплотнения обеспечивает барьер для влаги и загрязнений, вызывающих коррозию. К сожалению, герметичные корпуса обычно больше, тяжелее и значительно дороже пластиковых аналогов.

Рекомендуемыми типами подложек для высокотемпературных условий являются печатные платы на основе полиимидных ламинатов для температур до 250 °С, толсто пленочные подложки с использованием  $Al_2O_3$  с максимальной допустимой температурой 500 °С и тонко пленочные подложки с наивысшей допустимой температурой 300 °С на основе  $Si_3N_4$  и нитрида алюминия (AlN) [17], термостойкие материалы с добавлением керамики, усиленные стекловолокном, Rogers 4003C [21]. Например, в работе [24] в качестве подложек использовались нитрид алюминия и оксид алюминия, а толсто пленочные материалы золота (Au) были выбраны в качестве материала металлизации подложки для системы электрических соединений.

При выборе печатной платы и монтируемых на ней компонентов необходимо учитывать надежность соединений при повышенной температуре, конфигурацию и металлизацию выводов корпуса. Надежность присоединения компонентов поверхностного монтажа зависит исключительно от площади контактирующей площадки и качества клея. С другой стороны, конфигурация DIP- корпуса со сквозным отверстием в плате для вывода корпуса, является одна из наиболее проверенных и надежных и обеспечивает надежную защиту от ударов и вибраций.

## Заключение

Анализ проблем разработки высокотемпературных аналоговых микросхем позволил установить, что для изготовления кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, работающих в диапазоне температур до 300-350 °С, используется карбид кремния политипов 4H-SiC и 6H-SiC, а также технология кремний-на-изоляторе, а в диапазоне температур до 600 °С – нитрид галлия GaN. Показано, что особое внимание исследователей в настоящее время уделяется выбору материалов корпуса, материалов для крепления кристаллов и материалов проводников, соединяющих контактную площадку кристаллов с траверсами корпуса. Рассмотрены конкретные типы материалов, применяемых при корпусировании кристаллов и монтаже корпусов высокотемпературных ИМС.

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

## Литература

1. Скупов А. Технологические материалы для высокотемпературных микросхем // Вектор высоких технологий. – 2017. – №6 (35).
2. Wei R. et al. Thermal conductivity of 4H-SiC single crystals // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113. – №. 5. <https://doi.org/10.1063/1.4790134>
3. Qian X., Jiang P., Yang R. Anisotropic thermal conductivity of 4H and 6H silicon carbide measured using time-domain thermoreflectance // Materials Today Physics. – 2017. – V. 3. – P. 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2017.12.005>
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. Neudeck P. G., Spry D. J., Chen L. Y. Experimental and theoretical study of 4H-SiC JFET threshold voltage body bias effect from 25° C to 500° C // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2016. – V. 858. – P. 903-907. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.858.903>
6. Alexandrov P. et al. Analog and logic high temperature integrated circuits based on SiC JFETs // Additional Papers and Presentations. – 2014. – V. 2014. – №. HITEC. – P. 000061-000065. <https://doi.org/10.4071/HITEC-TP12>
7. Elgabra H., Siddiqui A., Singh S. 4H-SiC bipolar SRAM cell for high temperature applications // Extended Abstracts of the 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba. – 2016. – P. 1013-1014. <https://doi.org/10.7567/SSDM.2016.PS-14-18L>
8. Elgabra H., Siddiqui A., Singh S. Simulation of conventional bipolar logic technologies in 4H-SiC for harsh environment applications // Japanese Journal of Applied Physics. – 2016. – V. 55. – №. 4S. – C. 04ER08. <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.04ER08>
9. 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.jcrysgro.2022.127060>
10. 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.
11. High Temperature SOI CMOS Technology (H035) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ims.fraunhofer.de/en/Business\\_Units\\_and\\_Core\\_Compencies/High-Temperature-Electronics/Technologies/HT-SOI-CMOS.html](https://www.ims.fraunhofer.de/en/Business_Units_and_Core_Compencies/High-Temperature-Electronics/Technologies/HT-SOI-CMOS.html) (дата обращения: 07.08.2024).
12. 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>

13. Huque M. A. et al. Silicon-on-insulator based high-temperature electronics for automotive applications //2008 IEEE international symposium on industrial electronics. – IEEE, 2008. – P. 2538-2543. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2008.4677170>
14. Лебедев А. А., Челноков В. Е. Широкозонные полупроводники для силовой электроники //Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – №. 9. – С. 1096-1099.
15. Shibata H. et al. High thermal conductivity of gallium nitride (GaN) crystals grown by HVPE process //Materials Transactions. – 2007. – V. 48. – №. 10. – P. 2782-2786. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRP2007109>
16. Hassan A. et al. Circuit techniques in GaN technology for high-temperature environments // Electronics. – 2021. – V. 11. – №. 1. – P. 42. <https://doi.org/10.3390/electronics11010042>
17. Hassan A. et al. Towards GaN500-based high temperature ICs: Characterization and modeling up to 600° C // 2020 18th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). – IEEE, 2020. – P. 275-278. <https://doi.org/10.1109/NEWCAS49341.2020.9159796>
18. Li S. et al. High-temperature electrical performances and physics-based analysis of p-GaN HEMT device //IET Power Electronics. – 2020. – V. 13. – №. 3. – P. 420-425. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0510>
19. Hassan A., Savaria Y., Sawan M. Electronics and packaging intended for emerging harsh environment applications: A review //IEEE transactions on very large scale integration (VLSI) systems. – 2018. – V. 26. – №. 10. – P. 2085-2098. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2018.2834499>
20. Watson J., Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2015. – V. 26. – P. 9226-9235. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3459-4>

21. Salem J. M., Ha D. S. A high temperature active GaN-HEMT downconversion mixer for downhole communications //2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2016. – P. 946-949. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2016.7527398>
22. Neudeck P. G. et al. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology //physica status solidi (a). – 2009. – V. 206. – №. 10. – P. 2329-2345. <https://doi.org/10.1002/pssa.200925188>
23. Neudeck P. G. et al. Stable Electrical Operation of 6H-SiC JFETs and ICs for Thousands of Hours at 500 °C // IEEE Electron Device Letters. – 2008. – V. 29. – №. 5. – P. 456-459. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.919787>
24. Chen L. Y. et al. Packaging of High Temperature SiC Based Electronics // NASA, USA. – 2015.

**Для цитирования:**

Фролов И.В., Бугакова А.В., Дворников О.В., Клейменкин Д.В.  
Конструктивно-технологические особенности высокотемпературных интегральных микросхем. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.8>