

# Полупроводниковая микроэлектроника – 2024 г.

## Часть 3. Сверхширокозонные полупроводники как новый класс и этап развития полупроводниковых материалов и приборов



**Дмитрий БОДНАРЬ**,  
к.т.н., генеральный директор,  
АО «Синтез Микроэлектроника»

**Широкозонные полупроводники (ШЗП) SiC и GaN благодаря высокой энергоэффективности прочно вошли в круг основных материалов полупроводниковой электроники и теснят кремний во многих сферах применения. Но на горизонте появляется группа материалов, обладающих еще более широкой запрещенной зоной и относящихся к категории сверхширокозонных полупроводников (СШЗП). Их уникальные электрофизические свойства позволяют открыть новые области применения в электронике, недоступные даже широкозонным полупроводникам. СШЗП уже заявляют о себе, но, как и ШЗП, должны пройти путь исследований и коммерциализации, хотя и гораздо быстрее.**

### Уникальные свойства СШЗП

В последние годы значительно вырос интерес к новой группе полупроводников с еще более широкой запрещенной зоной, чем у хорошо известных широкозонных полупроводников (ШЗП). Им посвящено много фундаментальных и прикладных публикаций [1–5]. В сравнении с характерным для широкозонного GaN значением 3,4 эВ, у этой категории сверхширокозонных полупроводников ширина зоны достигает 6,4 эВ (табл.) [4, 6]. Это семейство включает в себя AlGaN/AlN, алмаз, нитрид бора BN и оксид галлия  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (наиболее распространенный политип), а также некоторые пока экзотические оксиды. От исследований физических свойств каких-то из них инженеры перешли к созданию электронных приборов на их основе, а другие СШЗП находятся только на начальном этапе и еще не дошли до коммерциализации, но они обладают большим потенциалом даже в сравнении с широкозонными полупроводниками. Автор настоящей статьи в предыдущих публикациях уже рассма-

тривал прикладные результаты по алмазу и Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Однако СШЗП заслуживают того, чтобы рассмотреть их материалы более подробно. Поскольку ограниченный формат публикации не позволяет описать все особенности СШЗП, автор больше внимания уделит их прикладным перспективам.

В таблице приведены основные электрофизические параметры СШЗП в сравнении с SiC и GaN как наиболее распространенными представителями ШЗП и кремнием. Для случая низкочастотного униполярного вертикального ключа показательным параметром является широко используемая добротность Балиги (BFOM), которая определяется следующим образом:

$$V_{обр}^2 / R_{откр}$$

где  $V_{обр}$  – напряжение пробоя (максимальное обратное напряжение в выключенном состоянии), а  $R_{откр}$  – удельное сопротивление во включенном состоянии (величина, обратная проводимости на единицу площади при замкнутом переключателе).

**Таблица.** Электрические параметры некоторых ШЗП и СШЗП

Тип материала	Запрещенная зона, эВ	Электронная подвижность, см <sup>2</sup> /(В·с)	Критическое электрическое поле, МВ/см	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Добротность Балиги (BFOM), 10 <sup>6</sup> В <sup>2</sup> /(Ом·см <sup>2</sup> )	Добротность Джонсона (JFOM), 10 <sup>12</sup> В/с
Si	1,12	1240	0,3	145	8,8	0,48
4H-SiC	3,2	930	4,1	350	6 270	11,0
GaN	3,4	1 000	3,9	140	27 900	–
$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	150	10,3	27	36 300	18,0
Алмаз	5,5	2 000	13	3450	554 000	47,6
AlN	6,0	426	15,4	319	336 000	31,9
c-BN	6,4	825	17,5	2145	695 000	–

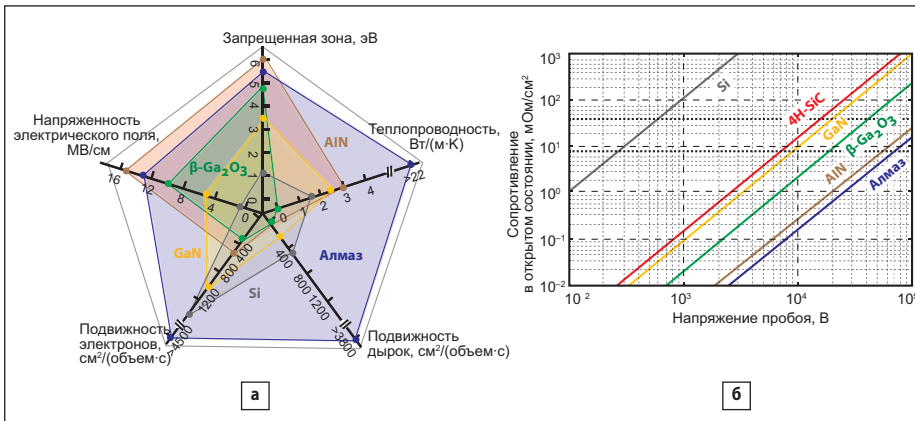


Рис. 1. а) паутина диаграмма параметров; б) зависимость сопротивления в открытом состоянии от напряжения пробоя некоторых СШЗП

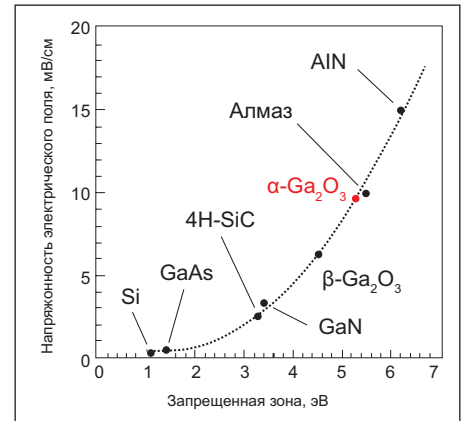


Рис. 2. Зависимость электрического поля пробоя от ширины запрещенной зоны для разных ШЗП и СШЗП

Чем выше ВФОМ, тем более высокое напряжение устройство может блокировать в выключенном состоянии или тем выше его проводимость на единицу площади во включенном состоянии. Поскольку и напряжение пробоя, и проводимость зависят от критического электрического поля, при котором происходит лавинный срыв, добротность ВФОМ может быть выражена как квадрат запрещенной зоны полупроводника. Следовательно, ВФОМ определяется примерно как шестая степень запрещенной зоны полупроводника. Другими словами, переход от GaN к AlN позволяет увеличить запрещенную зону в 1,8 раза (6,0 эВ/3,4 эВ), но при этом ВФОМ возрастает нелинейно в 34 раза – 1,8<sup>6</sup>. Зависимость сопротивления в открытом состоянии от напряжения пробоя и паутина диаграмма параметров некоторых СШЗП представлены на рис. 1 [1], а зависимость электрического поля пробоя от ширины запрещенной зоны разных ШЗП и СШЗП представлена на рис. 2 [7].

Эти параметры являются очень важными и определяющими для уникальных свойств СШЗП, используемых в приборах силовой электроники, датчиках, детекторах и т. д., которые превышают возможности ШЗП. Материал с более высоким значением поля пробоя дает два преимущества высоко-частотным транзисторам. Во-первых, при заданной длине области дрейфа и частоте материал с более высоким напряжением пробоя поддерживает более высокий уровень выходного напряжения и, следовательно, большую выходную мощность. С другой стороны, если выходное напряжение постоянное, длину области дрейфа можно уменьшить, сократив задержку и, следовательно, увеличив природу мощности на рабочей частоте. Таким образом, при заданном напряжении питания СШЗП-транзисторы обеспечивают усиление на гораздо более высоких частотах, чем GaN-транзисторы. Это усиление можно использовать не только для повышения мощности на рабочей частоте, но и для реализации новых конструкций импульсных усилителей выше класса А/В. Для сравне-

ния перспективности материалов для РЧ- и СВЧ-приложений используется показатель добротности Джонсона (JFOM), который определяется скоростью носителей заряда и напряжением электрического поля пробоя материала (табл.) [4]. Видно, что у алмаза и AlN – наилучшие значения этого показателя, существенно превышающие не только показатель кремния, но и GaN.

Несмотря на такой огромный потенциал для революционного улучшения характеристик приборов, СШЗП только начинают свой путь прикладного применения и в настоящее время находятся на той же стадии развития, что и полупроводники GaN и SiC из ШЗП в 1980-х гг. Но, очевидно, что благодаря истории и опыту развития GaN и SiC материалы СШЗП следующие этапы своего развития пройдут более быстрыми темпами, чем их предшественники.

### Соединения AlN, AlGaN

Соединения на основе нитрида алюминия являются самыми универсальными и интересными из СШЗП с разносторонними вариантами применения. Они могут применяться как в прямом варианте сплава AlN с разным соотношением компонентов и изменяемой шириной запрещенной зоны, так и в виде трехкомпонентных составов, что значительно изменяет их физические свойства. Сплавы AlGaN обладают исключительно хорошими фундаментальными физическими свойствами [4]. С точки зрения электроники, они имеют: 1) прямые запрещенные зоны в широком диапазоне (3,4–6,0 эВ); 2) электрические поля с высоким пробоем (>10 МВ/см у AlN); 3) высокую подвижность электронов (объемная подвижность до 1000 см<sup>2</sup>/(В·с); 4) высокие скорости насыщения (>10<sup>7</sup> см/с); 5) относительную легкость легирования n-типа.

С точки зрения оптоэлектроники, эти сплавы обеспечивают применимость к длинам волн излучения менее 365 нм, то есть в диапазонах UV-A, -B и -C. Кроме того, как полупроводники с прямой запрещенной зоной они подходят для изготовления УФ-

излучателей, включая светодиоды (LED) и лазеры. Были также продемонстрированы ультрафиолетовые фотодетекторы, нечувствительные к солнечному свету.

Кроме того, у AlGaN – та же кристаллическая структура, что и у InGaN. AlGaN обладает хорошей совместимостью с другими материалами, а опыт изготовления и глобальные инвестиции в производственную инфраструктуру, связанную со светодиодами InGaN, играют положительную роль для развития AlGaN. Как и InGaN, AlGaN является тройным сплавом и, таким образом, может использовать возможности гетероструктур и запрещенной зоны, как и многие другие тройные сплавы (AlGaAs, InGaAs, InGaP и т. д.) в семействе материалов АIII-ВV. Следует отметить, что, хотя технически это тройной сплав, он является так называемым псевдобинарным сплавом, в котором изменяется только состав столбца III (Al, Ga).

Тем не менее, сплавы AlGaN сталкиваются с несколькими основными проблемами. Первая из них – контроль над легированием. Частично ее можно решить с помощью исследовательских подходов, общих для всех материалов СШЗП. Вторая проблема – отсутствие легкодоступных монокристаллических подложек с качеством, необходимым для эпитаксиального роста. Подложки на основе GaN являются подходящими, поскольку они уже разрабатываются для оптоэлектроники InGaN и технологий силовой электроники GaN. Однако высококачественный эпитаксиальный рост на GaN-подложках ограничен слоями AlGaN с низким содержанием Al, подходящим для применения в ШЗП, а не для СШЗП (например, для лазеров, излучающих на волнах длиннее середины диапазона UV-A, около 365 нм). При более высоком содержании AlGaN рассогласование решетки между эпитаксиальными слоями и подложкой GaN становится значительнее, что может привести к появлению дислокаций и образованию протяженных трещин из-за растягивающих напряжений в слоях AlGaN. Подложки AlN являются наиболее перспективными для выращивания на них гетероструктур AlGaN

с более высоким содержанием Al при относительно меньшей деформации. Поскольку остаточная деформация является сжимающей, а не растягивающей, она не вызывает протяженных трещин. Подложки AlN для эпитаксии были существенно усовершенствованы, но они являются дорогостоящими и ограниченными по доступности. Основным препятствием для получения таких AlN-подложек является очень высокая сложность выращивания свободных от дислокаций и примесей AlN-слитков из расплава. Поскольку AlN разлагается до того, как расплавится, за исключением очень высоких давлений, такой метод формирования нельзя считать жизнеспособным.

AlN обладает хорошими перспективами для применения в СВЧ- и силовой электронике. Это подтвердили исследования группы немецких ученых. Чтобы технология AlN стала доступной для промышленности в среднесрочной перспективе, некоторые виды деятельности в Германии были объединены в стратегический кластер для разработки технологии и изготовления транзисторов для силовой электроники и приложений миллиметрового диапазона [8]. Для создания приборов кристаллы AlN были выращены во Фраунгоферском институте (IISB) и нарезаны на пластины диаметром до 1,5 дюйма. Был также разработан процесс полировки для производства эпитаксиальных пластин. На функциональных эпитаксиальных слоях, нанесенных в Институте Фердинанда-Брауна, были успешно изготовлены AlN/GaN HEMT-транзисторы. Пробивное напряжение первых поколений транзисторов, произведенных с этими пластинами, достигло 2200 В, а плотность мощности превзошла показатель SiC-транзисторов в силовых коммутационных устройствах. По сравнению с традиционными кремниевыми устройствами, AlN/GaN HEMT, изготовленные на пластинах AlN, обеспечивают до 3000 раз меньшие потери проводимости в сравнении с кремнием и примерно в десять раз эффективнее SiC-транзисторов.

*Нитрид иттрия алюминия (AlYN).* В 2023–2024 гг. другая группа специалистов из немецкого института Fraunhofer IAF провела исследования по нанесению слоев нитрида иттрия алюминия (AlYN) с контролируемой концентрацией иттрия, одним из уникальных свойств которого является сегнетоэлектричество [9]. Гетероструктуры AlYN/GaN, сформированные методом MOCVD на 100-мм подложках SiC с точно регулируемой концентрацией иттрия, характеризуются превосходным структурным качеством и электрическими свойствами для применения в высокочастотной и высокопроизводительной электронике, а также для разработки HEMT-транзисторов. Благодаря своим сегнетоэлектрическим свойствам материал AlYN перспективен для разработки приложений с энергонезависимой памятью.

Однако основным препятствием для промышленного использования AlYN является его подверженность окислению, что влияет на пригодность материала для определенных электронных приложений. Для устранения этого недостатка потребуется разработка прекурсоров высокой чистоты, использование защитных покрытий или инновационных технологий производства.

## Алмаз

Автор настоящей статьи в предыдущих публикациях уже рассматривал многообещающие результаты исследований алмаза и достигнутые практические результаты по разрабатываемым электронным приборам [10–11]. Алмаз обладает чрезвычайно выгодными свойствами, которые позволяют применять его в таких областях как мощная и высокочастотная электроника, детекторы излучения, электронные излучатели для вакуумных переключателей сверхвысокого напряжения и катодов ламп бегущей волны, а также термоэмиссионные излучатели для преобразования энергии. К некоторым из выдающихся электронных свойств алмаза относятся: электрическое поле пробоя  $>10$  МВ/см, высокая подвижность электронов и дырок более  $2000$  см<sup>2</sup>/(В·с), скорости дрейфа насыщения до  $2,3 \cdot 10^7$  см/с у электронов и  $1,4 \cdot 10^7$  см/с у дырок. Алмаз также обладает самой высокой теплопроводностью среди всех материалов, что особенно важно, поскольку во многих приложениях силовой электроники и оптоэлектроники работа устройств ограничена отводом тепла.

В мире стремительно растет количество компаний и стартапов, устремившихся в исследования алмаза и поиск новых сфер его применения. Одним из начальных этапов коммерциализации искусственного алмаза являлось выращивание слитков и производство драгоценных камней. Однако со временем, после появления публикаций о его больших перспективах в электронике, интерес сместился в сторону исследований свойств, созданию электронных приборов на его основе и инноваций. Прогресс в алмазных технологиях и создание приборов на основе алмаза развивается очень стремительно. В настоящее время он является лидером по коммерциализации среди СШЗП.

Одна из таких инноваций и успехи, достигнутые американской компанией Advent Diamond, позволили решить важнейшие технические проблемы, в частности, изготовления монокристаллического алмаза, легированного фосфором, для создания слоев n-типа [12]. Алмаз с внедренным фосфором позволяет создавать электронные устройства, использующие беспрецедентные свойства алмаза для применения в таких областях применения как квантовое зондирование и вычисления, мощная электроника и обнаружение радиации. Кроме того, компания Advent

Diamond достигла значительных успехов в выращивании слоев легированных бором алмазов на больших площадях, расширяя потенциальные возможности их применения в электронике. Инновационные детекторы радиации на основе алмазов, которые разрабатывает Advent Diamond, обеспечивают революционное решение для оборонного, коммерческого и научного рынков. Благодаря использованию легированных и собственных полупроводниковых алмазных слоев эти детекторы превосходно обнаруживают излучение энергичных частиц, обладая исключительной радиационной стойкостью. Универсальность этих детекторов охватывает диапазон применений от ультрафиолетового света и альфа-частиц до рентгеновских лучей и протонов. Их дорожная карта включает в себя все алмазные мощные диоды и транзисторы для зарядных устройств для электромобилей, твердотельные трансформаторы, компоненты для космической техники и новый высококачественный материал PQuantum Diamond для квантовых компонентов.

В аналогичном направлении работает и американский стартап Diamond Quanta, образованный в 2024 г., но уже заявивший о больших планах по выпуску алмазных полупроводниковых приборов [13].

Французская компания Diamfab, специализирующаяся на исследовании технологий синтетических алмазов, о которой автор этой статьи уже писал в [11], завершила новый раунд финансирования на 8,7 млн евро для ускорения своих исследований алмаза для силовой электроники [14]. DiamFab является частью возглавляемого Airbus проекта по созданию гибридного самолета, в котором один двигатель полностью электрический, а другой – обычная турбина. Одним из компонентов будет преобразователь мощности на основе алмазных транзисторов. Замена всей кремниевой силовой электроники, используемой в авиалайнере, алмазными компонентами сократила бы его вес на 1800 кг [15]. Такое снижение возможно потому, что алмазные устройства не потребуют рассеивателей тепла, которые составляют около 80% общей массы и объема преобразователей напряжения самолетов на основе кремния.

Алмаз хорошо переносит среды с высоким уровнем радиации [15]. Алмазные компоненты могут работать при уровнях излучения, превышающем 1 МГр (MGy), например для мониторинга ядерных реакторов и в авиакосмической промышленности [16]. Это качество было востребовано для измерения потока нейтронов в обломках затопленных ядерных реакторов Фукусимы-1, где алмазный датчик, установленный на небольшой дистанционно управляемой подводной лодке, зондировал ил. Прибор смог различить нейтроны в высоком гамма-фоне, вызванном присутствием радиоактивных цезия и стронция.

Алмазные детекторы излучения в Большом адронном коллайдере внесли свой вклад в открытие бозона Хиггса, отслеживая фоновый сигнал и светимость пучка в детекторах ATLAS и CMS. Алмаз также может стать заменой нейтронным детекторам на основе редкого гелия-3, которые используются на границе для защиты от контрабанды расплывающихся материалов.

**Азотные квантовые приборы – растущий рынок монокристаллических алмазов**

К используемым приложениям относятся вычислительная техника, магнитометрические датчики, детекторы и средства криптографии. Для изготовления таких устройств азот добавляется в ингредиенты в процессе химического осаждения из паровой фазы (CVD). Электронно-лучевое облучение вытесняет некоторые атомы углерода, оставляя вакансии в кристаллической решетке. Затем высокотемпературный отжиг вытесняет вакансии в места, непосредственно прилегающие к атомам азота.

Перспективы применения алмаза обнаружены и для квантовых компьютеров [4, 17]. Создание оптимального квантового компьютера должно изолировать систему от окружающей среды, обеспечив при этом максимально возможный контроль над ней. Согласно законам квантовой механики, оба требования невозможно выполнить одновременно, поэтому необходимо компромиссное решение. Твердотельным решением является алмаз, так как его большая запрещенная зона обеспечивает незанятую полосу проводимости даже при комнатной температуре. Таким образом, никакие свободные электроны

не могут непреднамеренно взаимодействовать с кубитами. Краткая схема узла квантовой сети, использующего цветочные центры в алмазе, показана на рис. 3а. Недавние эксперименты показали большой потенциал цветочных центров в алмазах, которые можно применять в качестве кандидатов в узлы квантовой сети. На рис. 3б показана схема трехузловой квантовой сети с использованием NV-центров (точечных дефектов алмаза, представляющих собой атом азота и вакансию в соседнем узле кристаллической решетки) в алмазном цвете. Сообщалось о 10-кубитном твердотельном спиновом регистре, реализованном с помощью защищенных от декогеренции вентилей с девятью ядерными спинами в алмазе.

Широкое использование алмаза в полупроводниках потребует больших размеров монокристаллических пластин – не менее 50 мм. Ожидается, что 50-мм алмазные пластины смогут производить к 2030 г., но по цене 10 000 долл. за 1 шт. [15]. Альтернативный проект производства спонсируется Французской комиссией по альтернативным источникам энергии и атомной энергии в Сакле. Этот метод, получивший название Mosaic + Smart Cut, может снизить стоимость пластины до 1000 долл. В этом процессе монокристаллические CVD-пластины будут нарезаны горизонтально на несколько пластин.

Немецкая компания Audiatec продает алмазы, полученные с помощью нового процесса – ионной бомбардировки слоя углерода толщиной 1 нм на гетероэпитаксиальной (неалмазной) иридиевой подложке [18]. Компания продает свои алмазы для использования в режущих инструментах, хирургических скальпелях, ИК-оптике и оптических окнах. Audiatec вырастила монокристаллы размером 92 мм и весом 155 карат. К иным возможным применениям относится обнаружение нейтронов, а также диоды Шоттки.

В конце 2023 г. компания Raytheon заключила четырехлетний контракт на сумму 15 млн долл. с Агентством перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) на повышение

электронных возможностей радиочастотных датчиков с помощью транзисторов на основе GaN с высокой плотностью мощности [19]. Выходная мощность усовершенствованных транзисторов будет в 16 раз выше, чем у традиционных транзисторов на основе нитрида галлия; при этом рабочая температура не повысится. Raytheon сотрудничает с Военно-морской исследовательской лабораторией, Стэнфордским университетом и фабрикой Diamond Foundry с целью интеграции выращенных алмазов в транзисторы и GaN-схемы военного класса. В октябре 2024 г. DARPA заключила с Raytheon трехлетний контракт на разработку сверхширокозонных полупроводников с использованием технологий алмаза и нитрида алюминия AlN, которые обеспечивают более высокую мощность и управление тепловым режимом в датчиках и других электронных устройствах, которые будут работать при более высоких температурах и в более экстремальных условиях [20]. Контракт состоит из двух этапов. На первом из них Raytheon разработает и интегрирует в электронные устройства алмазные и алюминидо-нитридные полупроводниковые пленки. На втором этапе основное внимание будет уделено оптимизации и доводке пластин большего диаметра из этих материалов для применения в датчиках.

**Японские алмазные технологии**

Япония является мировым лидером по созданию схемы перехода от фундаментальных к прикладным исследованиям и разработке приборов на новых полупроводниковых материалах. Наиболее эффективным является направление через университетские стартапы. В 2023–2024 гг. в Японии произошел значительный прорыв в области алмазных полупроводниковых технологиях.

Японская компания Power Diamond Systems (PDS), являющаяся университетским стартапом, сообщила в декабре 2023 г. о разработке первого в мире вертикального алмазного MOSFET по запатентованной технологии (рис. 4) [21]. Второго его особенностью

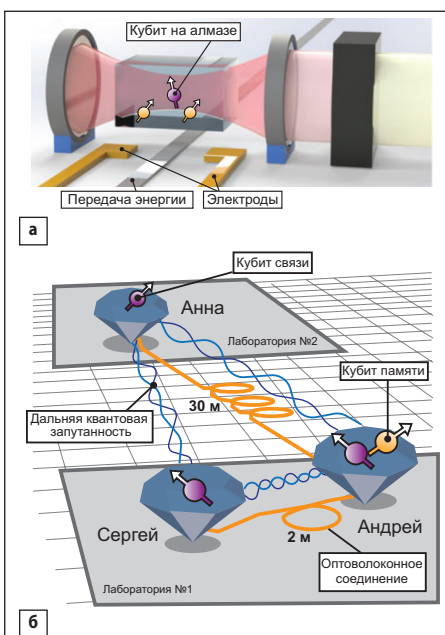


Рис. 3. а) краткая схема узла квантовой сети, использующего цветочные центры в алмазе; б) алмазные цветочные центры в квантовом компьютере

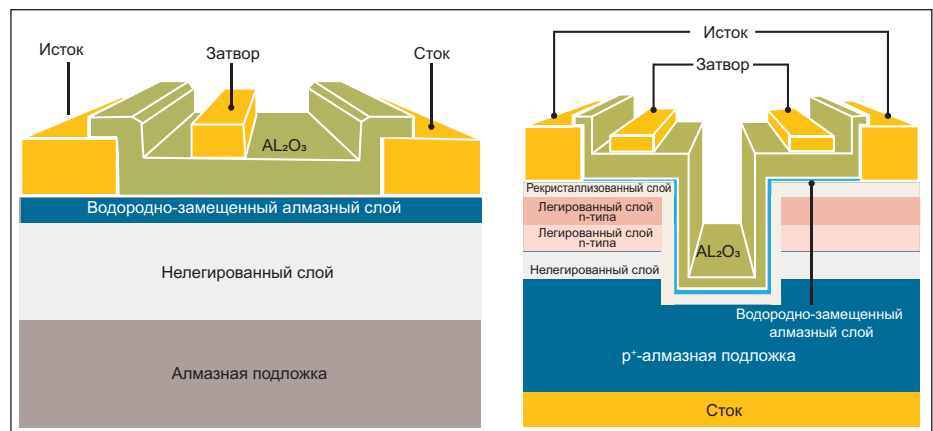
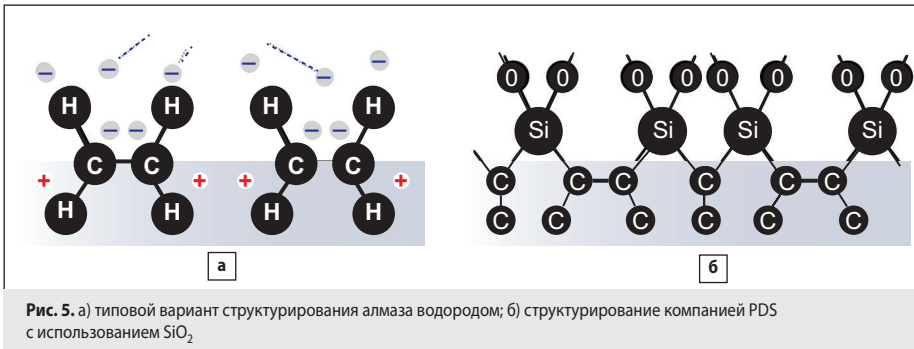


Рис. 4. Латеральный и вертикальный транзистор на алмазе японской компании PDS





является работа в нормально выключенном состоянии. Классический вариант структуры выращиваемого алмаза с внедрением водорода позволяет создавать нормально включенные транзисторы. Для создания более распространенного нормально выключенного транзистора вместо типowego структурирования водородом (рис. 5а) компания PDS использует структурирование  $\text{SiO}_2$  (рис. 5б). Ожидается, что продукция PDS найдет применение в силовых устройствах для возобновляемых источников энергии, преобразующих солнечную и ветряную энергию (на суше и на море), а также в области мобильных средств следующего поколения (электрические самолеты, электрические вертикальные взлетно-посадочные аппараты eVTOL, электрокорабли и т. д.), включая поезда и электромобили (рис. 6). Высокочастотные устройства на основе алмазных полупроводников будут применяться в базовых станциях мобильной связи, совместимых с 5G/6G, радарх (метеорологи-

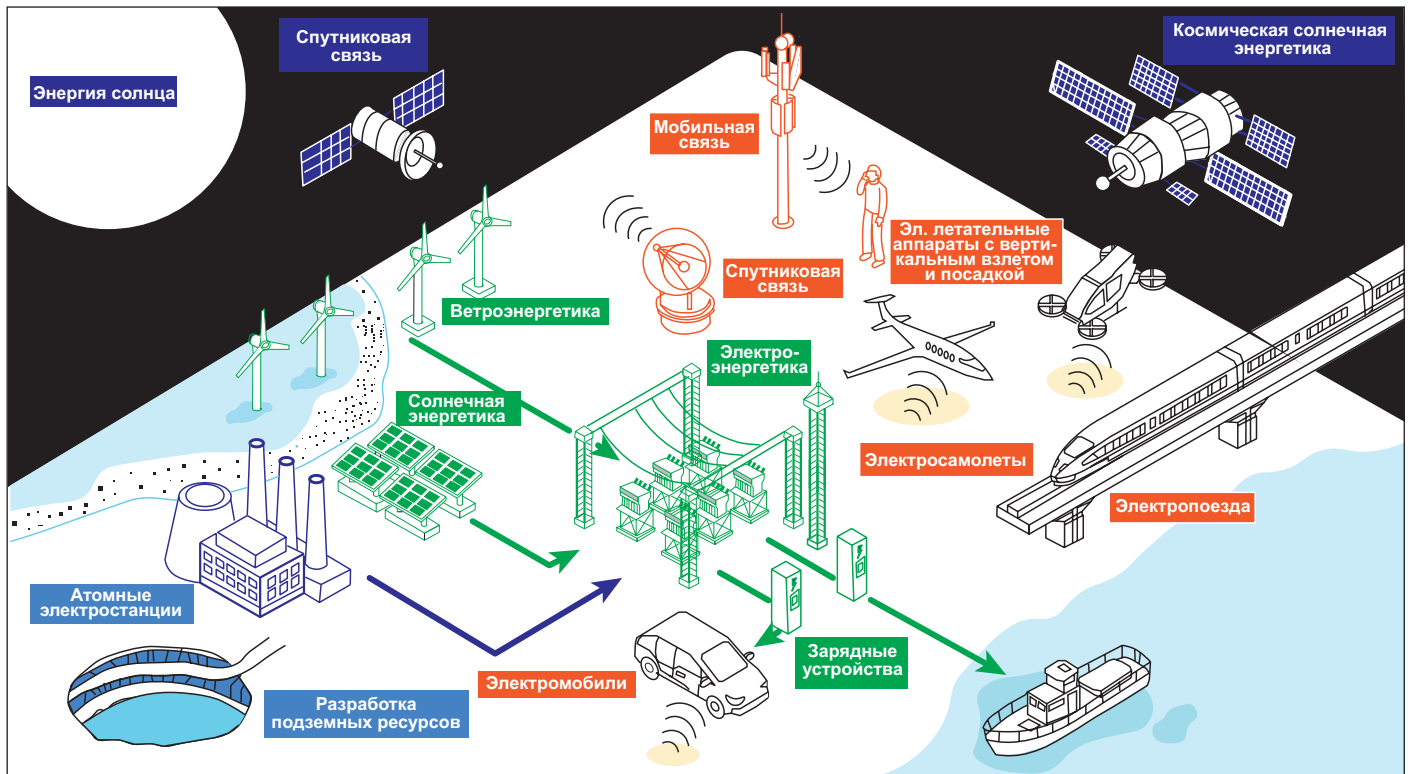
ческих, авиационных, корабельных и т. д.), беспроводных системах передачи энергии и спутниковых системах следующего поколения. Они должны также работать в суровых условиях с высокими уровнями радиации и температуры среды. Предполагается, что они будут использоваться для освоения космоса, в космической солнечной энергетике, в разведке и разработке подземных ресурсов, а также на атомных электростанциях.

Японская компания Orbray Co. создает технологию гетероэпитаксии для производства больших алмазных пластин. Теоретически возможна гетероэпитаксия алмаза, при которой в качестве подложки используется чужеродный материал. Однако из-за гетероэпитаксиальной деформации, обусловленной разницей параметров решетки и теплового расширения алмаза и подложки, при росте толстых объемных алмазов ухудшается качество, и образуются трещины. Компания разработала новый подход к преодолению упомянутых проблем в гетероэпитаксии.

В их технологии применяются подложки Ir/Sapphire в сочетании с разработанной технологией выращивания микронеровностей, что предотвращает образование трещин и позволяет выращивать высококачественную алмазную подложку большого диаметра без напряжения (рис. 7) [22]. Кроме того, была разработана новая технология ступенчатого роста для выращивания алмаза диаметром 50 мм. Наклонная иридиево-сапфировая поверхность обеспечивает боковой рост алмаза, благодаря чему снижается механическое напряжение в процессе роста. В настоящее время компания работает над увеличением диаметра пластины до 10 см.

Японская компания Ookuma Diamond Device Co. создает блоки и элементы для силовых роботов с целью удаления радиоактивных обломков атомной электростанции Фукусима. Однако ее интересы распространяются и на сети 6G следующего поколения, для которых потребуется более 1 млрд базовых станций в мире [23]. Алмазные полупроводники, на которые делает ставку компания, устраняют необходимость в охлаждении, что по сравнению с типовыми вариантами позволяет создавать компактные и легкие конструкции (рис. 8), обеспечивать эксплуатацию в высокотемпературных ( $300^\circ\text{C}$ ) и радиоактивных (3 МГр) средах, а также увеличить усиление сигналов в 4,5 раза в сравнении с традиционными полупроводниками.

Корпорация EDP, еще одна компания из Японии, создает технологии и производит алмазные пластины большого размера для



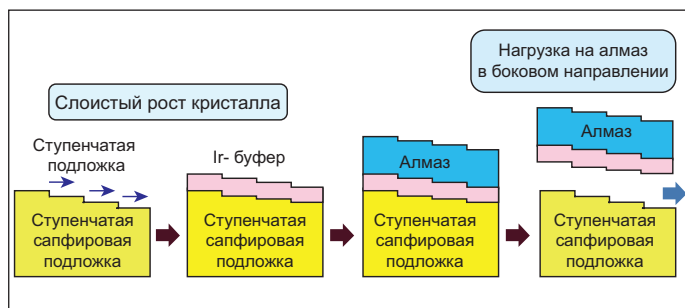


Рис. 7. Техпроцесс выращивания алмаза японской компанией Orbray

ювелирной, полупроводниковой и обрабатывающей промышленности [24].

### Оксид галлия бета-формы ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ )

Из материалов СШЗП, представляющих в настоящее время активный интерес,  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  является новым. Тем не менее, он перспективен благодаря фундаментальным свойствам, доступности подложек и особенно вследствие уже созданных на его основе высоковольтных диодов и транзисторов.

С точки зрения оптоэлектроники, запрещенная зона  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , как и у других СШЗП-полупроводников, находится в области глубокого ультрафиолета (DUV) [4]. Таким образом, с одной стороны ожидается, что изготовленные на его основе такие оптоэлектронные устройства как DUV-фотодетекторы с защитой солнечных батарей, окажутся полезными для разных применений (например, для детекторов пламени). С другой стороны, сложность оптических процессов в  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , а также невозможность легировать материал Р-типа, до последнего времени препятствовала его применению в биполярных устройствах, к которым относятся излучатели света.

$\text{Ga}_2\text{O}_3$  обладает некоторыми выдающимися качествами для применения в униполярных силовых устройствах. Во-первых, ширина его запрещенной зоны превышает 4,5 эВ, что обеспечивает высокое электрическое поле пробоя 9 МВ/см. Во-вторых, его проводимость n-типа хорошо управляется в широком диапазоне концентраций  $10^{15}\text{--}10^{19}\text{ см}^{-3}$  за счет легирования кремнием, а удельное сопротивление перестраивается в еще более широком диапазоне  $10^{-3}\text{--}10^{12}\text{ Ом}\cdot\text{см}$ . В-третьих, его оценочный показатель добротности по шкале Балиги выше, чем у SiC и GaN (несмотря на относительно меньшую подвижность), хотя и не такой высокий, как у AlN, алмаза и нитрида бора c-BN. К другим привлекательным областям применения  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  относятся высокотемпературная обработка сигналов, электроника для жестких условий эксплуатации и беспроводные устройства/схемы связи. Что касается работы в суровых условиях, то присущая  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  устойчивость (в качестве оксидного полупроводника) к окислению и широкая запрещенная зона являются важными свойствами.

Пожалуй, самое большое преимущество  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  заключается в обеспечении доступных высококачественных крупных подложек с хорошей обрабатываемостью материала, что является важной характеристикой для экономичного массового производства. Ведущий мировой поставщик таких подложек и эпитаксиальных структур японская компания Novel Crystal Technology поставляет пластины диаметром 100 мм [25].

До недавнего времени  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  обладал двумя основными недостатками. Во-первых, в отличие от материала n-типа, проблемой являлось создание легированных областей р-типа и, следовательно, эффективной дырочной проводимости в  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . В 2023 г. японские компании FLOSFIA Inc. и JSR Corporation объявили о совместной разработке нового материала для пленочного осаждения на основе иридия в качестве решения для массового производства оксида иридия-галлия ( $\alpha\text{-(Ir, Ga)}_2\text{O}_3$ ) [26]. Этот первый в мире силовой полупроводник р-типа был разработан компанией FLOSFIA для применения совмест-

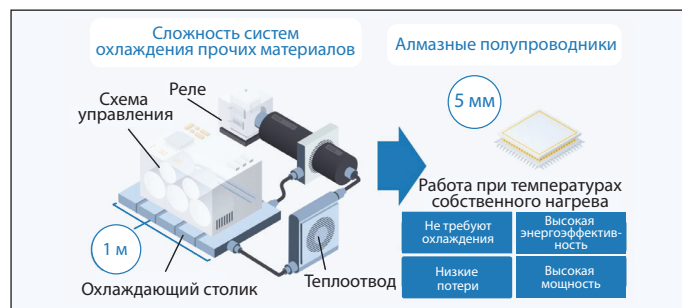


Рис. 8. Алмазные полупроводники не требуют охлаждения и позволяют уменьшить размеры блоков

но с оксидом галлия корундового типа ( $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ). Оксид иридия-галлия, используемый в сочетании с оксидом галлия, был успешно испытан в структуре траншейной конструкции диода.

Во-вторых, у  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  – плохая теплопроводность и, следовательно, плохая способность к рассеиванию тепла. Эта низкая теплопроводность является, пожалуй, самым серьезным потенциальным недостатком  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  для силовых устройств. Экспериментальные значения теплопроводности  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  находятся в диапазоне  $10\text{--}27\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  при комнатной температуре, что на один–два порядка ниже, чем у других СШЗП-полупроводников.

### Нитрид бора (BN)

Особый интерес среди новых СШЗП представляет собой нитрид бора (BN). Различают гексагональные (h-BN), ромбоэдрические (r-BN), турбоэдрические (t-BN), кубические (c-BN) структуры нитрида бора. В настоящее время наибольший интерес вызывают модификации h-BN и c-BN [2].

Нитрид бора (BN) можно легировать материалами AlN или GaN, чтобы увеличить запрещенные зоны. Структура BN может служить естественным продолжением семейства нитридных полупроводников, состоящего из InN, GaN и AlN. Среди интересных применений сплавов BAlN – гетеробарьеры для структур с мажоритарными носителями BAlN/AlN, а также в качестве квантовых барьеров для квантовых ям AlN (например, BAlN/AlN/BAlN), что позволяет использовать оптоэлектронику в ультраглубоком диапазоне УФ-излучения.

Гексагональный нитрид бора (h-BN). Запрещенная зона h-BN может трансформироваться из не прямой в прямую. Ранние теоретические расчеты предполагали, что h-BN является материалом с прямой запрещенной зоной, в то время как некоторые более поздние методы указывали на не прямую запрещенную зону со значениями в диапазоне 4,027–4,47 эВ. h-BN является материалом СШЗП, который можно использовать в качестве изолятора за счет частичных ионных связей B–N. Благодаря своей относительно большой диэлектрической проницаемости и высокому электрическому полю пробоя материал h-BN служит отличным диэлектриком в транзисторах и конденсаторах. h-BN уже давно используется в качестве диэлектрика затвора в алмазных полевых транзисторах (FET). Имея плоскую и инертную поверхность с небольшим количеством дефектов и висячих связей, h-BN является превосходной подложкой и отличным материалом для выращивания, особенно для низкоразмерных материалов, к которым относится графен. Благодаря превосходным оптическим свойствам материал h-BN перспективен для фотонных приложений. Обладая шириной запрещенной зоны около 6,0 эВ, сильным поглощением и УФ-излучением, h-BN является хорошим материалом для оптоэлектроники в диапазоне DUV, включая DUV-детекторы, излучатели и лазеры. Благодаря исключительной теплопроводности и превосходным механическим свойствам материал h-BN востребован в комбинациях с полимерами, улучшающих термические и механические характеристики. h-BN широко используется в полимерах в качестве наполнителей для получения теплопроводящих композитов и повышения их механической прочности. Широкая запрещенная зона h-BN

и способность синтезировать одиночные слои делают его особенно привлекательным для двумерной электроники или в качестве прослойки для гетерозатисакции.

Кубический нитрид бора *c-BN* имеет очень большую запрещенную зону около 6,4 эВ и обладает чрезвычайно высокой теплопроводностью, близкой к теплопроводности алмаза. Кроме того, он характеризуется самым высоким напряжением пробоя среди всех членов семейства СШЗП и может быть легирован как в *n*-, так и в *p*-типах. По этим причинам *c-BN* может стать конкурентным материалом для будущих мощных высокочастотных и высокотемпературных электронных устройств. К сожалению, трудно обеспечить хорошее качество *c-BN* с помощью традиционных методов молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) или МOCVD.

По своей кубической структуре *c-BN* близок к алмазу. Легирование получают с помощью Si и Be для *n*- и *p*-типов, соответственно. Запрещенная зона кубического *c-BN* составляет 6,4 эВ, а электрическое поле пробоя превышает 15 МВ/см. У чистого *c-BN* – вторая по величине теплопроводность среди всех материалов (теоретически, около 2145 Вт/(м·К)) и небольшое (1,4%) несоответствие решетки с алмазом, что позволяет при использовании *c-BN* в качестве промежуточного слоя интегрировать алмаз с другими полупроводниками группы III-V.

Кубический *c-BN* является наименее зрелой технологией; при этом подложки *c-BN* в настоящее время производятся только методами импульсного лазерного, ионно-лучевого, электронно-лучевого нанесения и осаждения при высоком давлении и высокой температуре, с помощью которых традиционно производилось большинство промышленных алмазов. Эта технология останется малосерийной и дорогостоящей в течение некоторого времени, пока не бу-

дут разработаны методы производства более крупных подложек или методы выращивания эпитаксиального *c-BN* на разнородных подложках.

В 2021 г. группа физиков Массачусетского технологического института создала ультратонкий сегнетоэлектрический материал на основе BN, где положительные и отрицательные заряды разделяются на разные слои [27]. По мнению этих ученых, BN обладает неплохой перспективой использования в компьютерной памяти и во многих других приложениях. Был создан транзистор из этого материала. Хотя выводы этой группы физиков основаны на исследовании одного лабораторного транзистора, «в некоторых отношениях его свойства уже соответствуют или превосходят отраслевые стандарты» для производимых в настоящее время сегнетоэлектрических транзисторов. Новый транзистор может быстро переключаться между положительными и отрицательными зарядами в наносекундном диапазоне времени. Кроме того, после 100 млрд коммутационных циклов он по-прежнему работал без признаков деградации. Благодаря использованию очень тонких слоев этого материала имеется возможность создать гораздо более плотную компьютерную память и более энергоэффективные транзисторы. Проблема в том, что нынешний способ производства новых сегнетоэлектриков сложен и не способствует массовому производству. Однако фундаментальные исследования BN с прикладным уклоном только стартовали и самые интересные открытия еще впереди.

### Оксидные СШЗП ( $\text{GeO}_2$ )

В то время как AlGaIn/AlN, алмаз и  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  являются материалами СШЗП, которые вызвали наибольший интерес в последние годы, многие другие заслуживают изуче-

ния. К ним относятся, например, оксидные полупроводники  $\text{MgGa}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также  $\text{ZnSiN}_2$  и  $\text{MgSiN}_2$  группы II-IV-N, которые находятся на этапе фундаментальных исследований, и о них пока говорить рано. Но один из оксидных СШЗП  $\text{GeO}_2$  начинает заявлять о себе громче других оксидов.

Япония является мировым лидером в исследовании и разработке оксидного СШЗП  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  и приборов на его основе. В 2022 г. при университете Рицумейкан был создан стартап Patentix Inc. для исследований и продвижения на рынке нового материала класса СШЗП – оксида германия ( $\text{GeO}_2$ ) [28]. В 2023 г. компания сообщила, что впервые в мире с использованием метода Phantom SVD (Spatial Vapor Deposition) успешно разработала процесс нанесения пленки диоксида германия с рутиловой структурой (*r-GeO*<sub>2</sub>) на карбиде кремния. У  $\text{GeO}_2$  – пять кристаллических разновидностей: рутиловая структура *r-GeO*<sub>2</sub>, структура  $\alpha$ -кварца, тип  $\text{CaCl}_2$ , тип  $\alpha$ - $\text{PbO}_2$  и тип пирита. Среди них рутиловая структура *r-GeO*<sub>2</sub> имеет большую запрещенную зону величиной 4,6 эВ; при этом теоретически предсказана его проводимость как *n*-, так и *p*-типов.

Компания ожидает, что этот материал найдет применение в следующих поколениях высокопроизводительных нормально закрытых МОП-транзисторов. Предполагается, что он будет востребован в качестве элемента НЕМТ с диодами Шоттки следующего поколения и высокоскоростной связи 7G с высокой пропускной способностью, которые появятся после 6G. Важной сферой станет его использование в создании источников питания и двигателей сверхвысокой мощности в сотни МВт (что существенно превышает возможности других материалов ШЗП), а также в построении малых инверторов, силовых приборов для космического пространства, радиационно-стойких силовых приборов и т. д. (рис. 9). Компания сообщает о находящихся в разработке силовых полупроводниковых приборах, не указывая их типы и сроки изготовления.

Еще одна тригональная  $\alpha$ -кварцевая структура  $\text{GeO}_2$  имеет очень большую запрещенную зону 6,2 эВ и проявляет пьезоэлектрические свойства, что может открыть новую сферу применения.

### Радиационно-стойкая электроника с ШЗП и СШЗП повышает надежность космической техники

Одним из главных преимуществ технологий ШЗП и СШЗП по сравнению с кремниевыми технологиями является устойчивость к радиационным воздействиям. К приложениям, требующим высоковольтных, сильноточных, устойчивых к излучению силовых устройств, относятся электронные приводы управления тягой ракет (в отличие от гидрав-

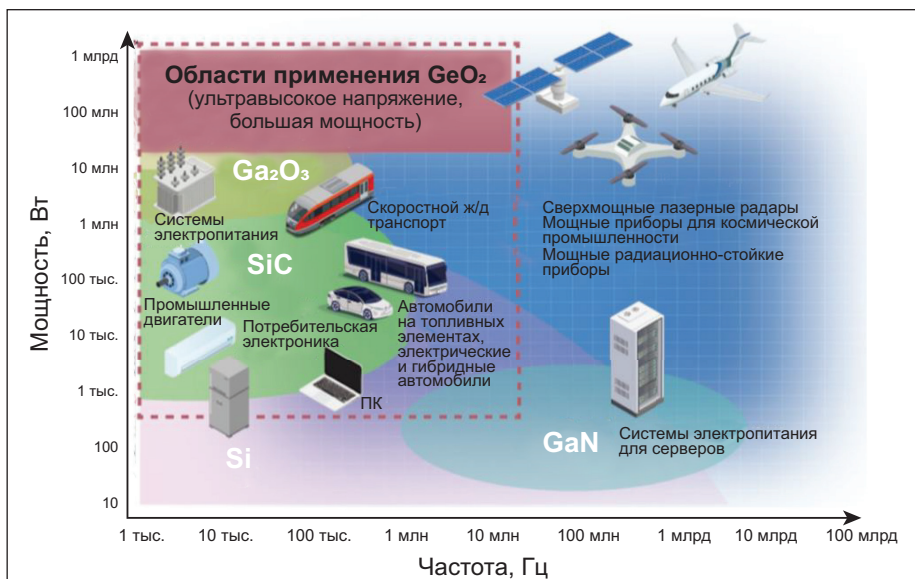


Рис. 9. Области применения  $\text{GeO}_2$



лического управления) и солнечные электрические двигатели (SEP) космических аппаратов. Разработанная НАСА система SEP, которая позволит осуществлять пилотируемые исследовательские миссии за пределами орбиты Земли, требует функциональных силовых устройств с высоким напряжением блокировки, высокой способностью к токовым нагрузкам и высокой устойчивостью к радиационным воздействиям. ШЗП и СШЗП также надежны для работы при высоких температурах, что является еще одним преимуществом для применения в космосе.

Устройства питания на основе GaN-транзисторов с напряжением 650 В пока недостаточно рассчитаны на высоковольтное преобразование энергии, предусмотренное НАСА. МОП-транзисторы на основе SiC удовлетворяют требованиям к напряжению, но чувствительны к разрушительным событиям, возникающим в космосе при попадании протонов и тяжелых ионов, при максимальном номинальном электрическом напряжении. На самом деле, из-за радиационной уязвимости устройств на основе карбида кремния СШЗП-устройства будут востребованы в любом приложении, которое эксплуатируется в условиях высокой радиации и при высоких температурах. Новое поколение СШЗП-устройств может стать критически важной технологией для следующего поколения ракет и космических кораблей.

Существуют два основных фактора, объясняющие радиационную стойкость технологий СШЗП [4]. Во-первых, у них более широкая энергетическая зона. Чтобы произошла ионизация электронов и дырок в полупроводнике, проходящие через материал фотоны или ионы должны обладать более высокой энергией. Во-вторых, некоторые СШЗП образуют гетероструктуры с использованием двух слоев материалов с разными запрещенными зонами для формирования области с двумерным электронным газом (2DEG). В результате в транзисторе образуется канал с высокой подвижностью электронов (HEMT). Электронная плотность канала в таких структурах относительно нечувствительна к уровню легирования примесями и, следовательно, к эффектам радиационно-индуцированного повреждения.

Существуют четыре основных вида эффектов полупроводникового излучения, и HEMT на основе гетероструктуры имеет преимущество перед MOSFET на основе кремния или карбида кремния для каждого вида эффектов излучения.

1. Общая ионизирующая доза (TID): вызывает накопление заряда в затворе или оксиде в результате прохождения фотонов или частиц через оксид, что приводит к сдвигам порогового напряжения или тока утечки. HEMT обычно имеют диод Шоттки, который устраняет большинство сдвигов параметров TID, наблюдаемых в MOSFET.

2. Одиночные эффекты (SEE): они вызваны тем, что высокоэнергетические ионы проходят через полупроводник, отдавая энергию и создавая электронно-дырочные пары. Они разделяются и дрейфуют или диффундируют под действием электрического поля или градиента концентрации, соответственно. Область истощения HEMT обычно гораздо меньше (порядка 1 мкм при напряжении стока 100 В), чем у кремниевого или SiC MOSFET при том же приложенном напряжении (около 5 мкм при 100 В). Следовательно, в стоке HEMT накапливается меньше заряда, чем в стоке MOSFET при той же энергии ионов и напряжении смещения транзистора.
3. Аналогичным образом, могут быть важны эффекты дозы облучения. Поскольку объем области истощения HEMT меньше, чем у MOSFET, накапливается меньше заряда, а фототок HEMT меньше, что в меньшей мере нарушает поведение транзистора.
4. Последним эффектом излучения является смещение, при котором нейтроны или протоны вытесняют атомы полупроводника из кристаллической решетки, создавая ловушки и участки рекомбинации в устройстве или даже новые изотопы за счет деления исходных атомов в решетке. Смещение атомов увеличивает рассеяние носителей заряда и снижает подвижность носителей из предварительно облученного состояния. Было показано, что и SiC MOSFET, и GaN HEMT хорошо переносят нейтронное или протонное излучение с очень высокими уровнями – намного лучше, чем кремниевые MOSFET.

Наконец, есть два разрушительных эффекта, которые проявляются в кремниевых MOSFET, но не проявляются в HEMT. Однократное разрушение (SEB) происходит, когда заряд от энергичного иона создает устойчивую проводимость паразитного биполярного транзистора, присущего конструкции кремниевого MOSFET. Биполярная проводимость может привести к возрастанию тока и к термическому повреждению или разрушению транзистора. Однократное разрушение затвора (SEGR) возникает, когда накопленный заряд вблизи затвора вызывает пробой оксида затвора, что приводит к току затвора и потере электростатического контроля кремниевого MOSFET.

Все перечисленные преимущества HEMT относятся как к узкозонным (InGaAs), так и к широкозонным (GaN) устройствам. Тем не менее материалы СШЗП должны значительно повысить устойчивость HEMT-транзисторов к излучению благодаря их более высоким критическим полям, что должно уменьшить размеры устройств, тем самым сократив объем пространства для сбора радиационно-индуцированного заряда за счет ионов или фотонов в средах с одним событием или мощностью дозы.

**Датчики для экстремальных условий окружающей среды на основе СШЗП**

Основные сферы применения СШЗП включают силовую электронику, системы коммуникаций, экстремальную электронику и оптоэлектронику. Возможности применения СШЗП для силовой электроники

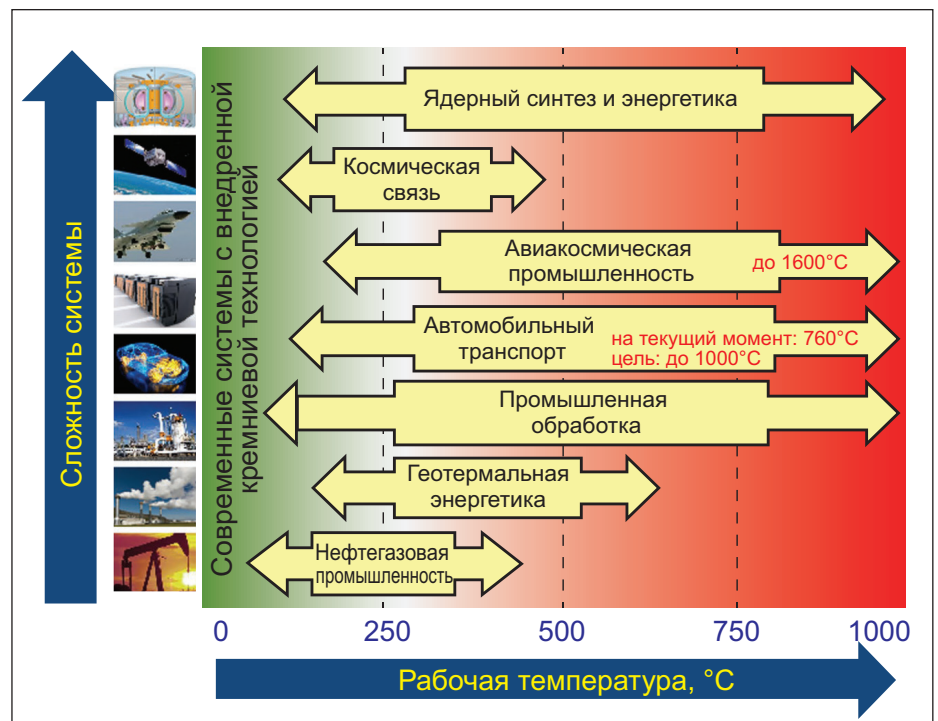


Рис. 10. Отрасли промышленности, в которых применяются сенсорные технологии в экстремальных условиях окружающей среды



и систем коммуникации рассматривались в предыдущих публикациях автора, поэтому в данной статье больше внимания уделено их возможностям в экстремальной электронике.

По своему назначению датчики эффективно собирают данные об окружающей физической среде в экстремальных условиях для обеспечения и повышения безопасности. К экстремальным условиям относятся высокая температура (350–1000°C), высокое давление (>1000 атмосфер), высокая ударная нагрузка (>1000 g), экстремальная механическая вибрация, высокая радиация (>100 Мрад), эрозионный поток, коррозионные среды, электростатический разряд и электромагнитные помехи. Такие экстремальные условия могут разрушить или ухудшить производительность датчиков, полупроводниковой электроники, диэлектриков и межсоединений, а также ускорить почти все механизмы старения и отказа, которые происходят при комнатной температуре, а также создать новые.

Отрасли промышленности, в которых в настоящее время используются сенсорные технологии для экстремальных условий окружающей среды, представлены на рис. 10 [4]. Технологии показаны с учетом требуемой рабочей температуры и возрастающей сложности сенсорной системы. Современные сенсорные системы на основе кремния могут работать при максимальной температуре около 200°C. В отличие от бытовых электронных устройств, которые включают в себя множество датчиков, микропроцессоров и беспроводных чипсетов, для использования в экстремальных условиях имеются только простые датчики. Нет микропроцессоров, беспроводной электроники или устройств питания (батареек), пригодных для эксплуатации при экстремальных температурах (>250°C). В сложной электронике в условиях высоких температур требуется активное охлаждение, но оно нецелесообразно в тех случаях, когда низкотемпературная окружающая среда недоступна (например, при разведке скважин или в авиационных двигателях). В этих случаях необходимо обеспечить длительную эксплуатацию при высоких температурах.

Для расширения возможностей эксплуатации при несколько более высоких температурах может применяться электроника с MOSFET по технологии кремний-на изоляторе (SOI), которая работает до 300°C. GaAs и его сплавы, например устройства на основе AlGaAs, работают выше 300°C, хотя и с ограниченной надежностью. Электроника на основе таких материалов ШЗП как SiC и GaN функционирует выше 600°C. Тем не менее плотность индуцированных температур собственных носителей в этих материалах при этих очень высоких температурах (выше 800°C для SiC и 1000°C для GaN) ухудшает работоспособность устройств.

Таким образом, существует потребность в разработке технологии СШЗП для упомянутых экстремальных условий, возможно, способной выдерживать рабочие температуры выше 1000°C. Первым аспектом этой технологии являются собственно датчики: электрохимические, оптические, механические (МЭМС) и датчики на основе заряженных частиц. Эти устройства могут быть дискретными или интегрированы с другими датчиками для многокомпонентного ортогонального зондирования в быстро меняющихся условиях наличия ряда химических или биологических сред. Вторым аспектом этой технологии является электроника – беспроводная передача данных и источники питания, расположенные рядом с датчиками.

### Радиочастотное применение

Радиочастотные силовые транзисторы необходимы для электронных систем, которые передают сигналы в воздух или космос и применяются в самых разных областях, начиная со связи и заканчивая визуализацией и зондированием. Для всех этих применений обычно требуется высокая выходная мощность, так как она улучшает соотношение сигнал/шум. Показатель добротности Джонсона часто применяется для сравнения перспективности материалов (см. табл.) и вместе с теплопроводностью является одним из ключевых показателей потенциала соответствующих материалов СШЗП для радиочастотного применения. Транзисторы на основе Si, GaAs, а в последнее время и GaN были основными для этих применений, но табличные показатели фундаментальных свойств Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlGa<sub>2</sub>N, AlN, BN и алмаза свидетельствуют о том, что у этих СШЗП – больше перспективы для работы на высоких частотах. Некоторые особенности применения алмаза и Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> автор уже рассматривал в [10–11], а более расширенное описание требует отдельной публикации.

### Выводы

1. СШЗП обладают некоторыми исключительными фундаментальными физическими свойствами и параметрами, превосходящими ШЗП, в том числе по напряжению электрического пробоя, теплопроводности, показателю Балиги, добротности Джонсона, электронной подвижности, что открывает такие перспективы для их применения в электронике, которые недоступны даже ШЗП.
2. В своем развитии СШЗП проходят те же этапы исследований, привлечения инвестиций и коммерциализации, что и ШЗП, но за счет имеющегося опыта их применения переход к промышленному освоению СШЗП будет быстрее.
3. Из материалов СШЗП по состоянию на 2024 г. наиболее продвинутыми для

электроники являются β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и особенно алмаз, с помощью которых уже созданы изделия для СВЧ- и силовой электроники, получившие реальное практическое применение.

4. Сплавы AlGa<sub>2</sub>N обладают исключительными физическими свойствами с возможностью варьирования ширины запрещенной зоны и совместимостью с материалами для производства структур и подложек. Сплавы AlN пока больше используются как вспомогательные материалы и слои, но благодаря одной из самых широких запрещенных зон и в сочетании с другими материалами имеют хорошие перспективы в силовой и СВЧ-электронике.
5. Нитрид бора BN является наименее исследованным из материалов СШЗП, в кубической форме обладающий максимальной шириной запрещенной зоны и высокой теплопроводностью. Этот материал может служить естественным продолжением нитридных полупроводников для применения не только в качестве активного слоя, но и барьера в гетероструктурах.
6. Благодаря своим уникальным физическим свойствам сферой применения СШЗП станет высоковольтная, сильноточная, устойчивая к внешним излучениям электроника, особенно для космоса и экстремального применения, значительно дополняющая изделия на основе ШЗП.
7. Новые исследования продемонстрировали сегнетоэлектрические свойства некоторых СШЗП-типов – в частности, нитрида иттрия-алюминия (AlYN) для создания энергонезависимой памяти.
8. Обладая более широкой запрещенной зоной и высокими значениями напряженности электрического поля, являющихся барьером для негативного воздействия высокоэнергетических фотонов и ионов и других частиц в условиях космоса, СШЗП обеспечивают более высокую радиационную стойкость не только в сравнении с кремнием, но и с материалами ШЗП.
9. Алмаз обладает самой высокой теплопроводностью и добротностью Джонсона среди материалов СШЗП и одним из лучших показателей Балиги, благодаря чему достигается высокая универсальность и лучшие перспективы его применения в разных сферах электроники, в том числе в квантовых компьютерах и гибридных самолетах. Благодаря значительному росту количества новых стартапов, занимающихся его исследованием, алмаз коммерциализируется ускоренными темпами, что позволит его использовать не только в электронике, но и в других областях.
10. Японские стартапы и компании совершают стремительный прорыв в разработке технологий не только в выращивании алмаза большего размера, но и в создании полупроводниковых приборов различного назначения на его основе.

11. Оксид германия  $\text{GeO}_2$  следующим из оксидных СШЗП после  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  переходит на этап прикладных исследований для применения в мощной силовой электронике, но пока еще не готов к коммерциализации. ■

## Литература

1. From Wide to Ultrawide-Bandgap Semiconductors for High Power and High Frequency Electronic Devices. *J. Phys. Mater.* 7 (2024) 022003.
2. A Review of Ultrawide Bandgap Materials: Properties, Synthesis and Devices. *Oxford Open Materials Science.* 2022. 2 (1): itac 004.
3. Ultrawide-Bandgap Semiconductors: An Overview. *Journal of Materials Research.* 2021. DOI:10.1557/s43578-021-00458-1.
4. Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges. *Advanced Electronic Materials.* 2018. 4. 1600501.
5. (Ultra)Wide-Bandgap Semiconductors for Electric Vehicles. *MRS BULLETIN.* Vol. 49. July 2024.
6. Will Darwinian Evolution Allow Ultra-Wide Bandgap (UWBG) Semiconductors to Displace Current Wide Bandgap (WBG) Materials? *Power Electronics News.* 13.11.2023.
7. Y. Oshima, E. Ahmadi. *Appl. Phys. Lett.* 121 (26). 260501 (2022) // <https://doi.org/10.1063/5.0126698>.
8. German Research Cluster Announces AlN Success. *Compound Semiconductor.* July 24. 2024 // [compoundsemiconductor.net](http://compoundsemiconductor.net).
9. AlYN: The Future for More Efficient And Powerful Electronics? *Compound Semiconductor.* August 20. 2024 // [compoundsemiconductor.net](http://compoundsemiconductor.net).
10. Д. Боднар. Полупроводниковая микроэлектроника – 2020 г. Часть 5. Широкозонные полупроводники как главный инструмент повышения энергоэффективности электроники. *Электронные компоненты.* 2021. №4.
11. Д. Боднар. Полупроводниковая микроэлектроника – 2023 г. Часть 1. Широкозонные полупроводники раздвигают горизонты достигнутого. *Электронные компоненты.* 2023. №11.
12. Diamond Breakthroughs Shape Future of High-Performance Electronics. *EE Times.* April 23. 2024 // [www.eetimes.com](http://www.eetimes.com).
13. Applications of Diamond Technology in Power Electronics. *Diamond Quanta* // [diamondquanta.com](http://diamondquanta.com).
14. Diamfab Announces €8.7M of Funding. *Compound Semiconductor.* March 28. 2024 // [compoundsemiconductor.net](http://compoundsemiconductor.net).
15. Diamond's Sparkle Is in More Than Gemstones. *Physics Today.* March 2022.
16. Radiation-Resistant Diamond Components. *DIAMFAB* // [diamfab.com](http://diamfab.com).
17. Quantum Networks Based on Color Centers in Diamond. *Journal Appl Phys.* 2021;130:070901.
18. Augsburg Diamond Technology // [audiatec.de](http://audiatec.de).
19. RTX and DARPA to Revolutionize Gallium Nitride Technology for Improved Radio Frequency Sensors. *RTX.* November 16. 2023 // [www.rtx.com](http://www.rtx.com).
20. RTX to Develop Ultra-Wide Bandgap Semiconductors for DARPA. *RTX.* October 02. 2024 // [www.rtx.com](http://www.rtx.com).
21. Power Diamond Systems // [powerdiamondsys.com](http://powerdiamondsys.com).
22. Orbray Co. // [orbray.com](http://orbray.com).
23. Ookuma Diamond Device Co. // [ookuma-dd.com](http://ookuma-dd.com).
24. EDP Corporation // [www.d-edp.jp](http://www.d-edp.jp).
25. Novel Crystal Technology // [www.novelcrystal.co.jp](http://www.novelcrystal.co.jp).
26. FLOSFIA and JSR Progress toward Practical Use of the World's First P-Type Semiconductor, Iridium Gallium Oxide. *FLOSFIA.* March 15. 2023 // [flosfia.com](http://flosfia.com).
27. BN transistor has 'superlative properties'. *Compound Semiconductor.* August 7. 2024 // [compoundsemiconductor.net](http://compoundsemiconductor.net).
28. Next-Generation Power Semiconductor: GeO2. *Patentix Inc.* // [www.patentix.co.jp](http://www.patentix.co.jp).