Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники

Часть 4. Новые интегрированные в чипы материалы и технологии создания теплоотвода

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

В связи с ростом мощностей силовых ИЭТ и необходимостью снижения теплового сопротивления применения традиционных методов теплоотвода на уровне корпуса и электронных систем уже недостаточно, и требуются новые методы, а также материалы теплоотвода на уровне кристаллов (чипов) с максимальным приближением их к зонам с максимальной температурой. Интегрирование алмазных слоев в поверхность и объемную структуру кристаллов становится самым эффективным и перспективным способом теплоотвода. Новый материал тета-фазный нитрид тантала (θ-TaN) обладает теплопроводностью около 1100 Вт/(м·К), что почти втрое больше, чем у меди, – самого распространенного теплопроводящего материала. Интегрированное в супермощные чипы жидкостное охлаждение рассматривается как самое перспективное для ЦОД.

Введение

В полупроводниковой микроэлектронике для теплоотвода применяются металлические и керамические материалы [1].

Металлические теплоотводящие материалы являются частью охлаждающей конструкции в составе электронных систем.

Медь (теплопроводность 401 Вт/(м·К)) – один из лучших теплопроводников, широко используемый в высокоэффективных радиаторах и печатных платах. Это дорогой и тяжелый проводник, что делает его менее подходящим для применений, где важен вес.

Алюминий (теплопроводность 237 Вт/(м·К)) наиболее часто используется благодаря оптимальному сочетанию теплопроводности, малого веса и доступной цены. Используется в радиаторах, корпусах и охлаждающих ребрах.

Серебро (теплопроводность 429 Вт/(м·К) обладает самой высокой теплопроводностью, но это слишком дорогой материал для большинства применений.

Керамика (электроизоляционный материал с высокой теплопроводностью) обладает уникальным сочетанием высокой теплопроводности и электроизоляции. Керамические материалы отличаются высокой стабильностью, но могут становиться хрупкими в зависимости от температуры.

Нитрид алюминия (AlN, теплопроводность ~180 Вт/(м·К)) используется в подложках мощных светодиодов, микроэлектронике и авиакосмической отрасли.

Оксид бериллия (BeO, теплопроводность ~330 Вт/(м·К))) обладает высокой теплопроводностью, но токсичен при неправильном обращении, что ограничивает его широкое применение. Используется в специализированных областях, требующих превосходного теплоотвода.

Оксид алюминия (Al_2O_3, теплопроводность 20–35 Вт/(м·К) – простой дешевый материал, широко применяемый в микроэлектронике, но обладающий недостаточной теплопроводностью для текущих задач.

Последние достижения в области нанотехнологий позволили создать высокоэффективные углеродсодержащие материалы, которые расширяют границы возможностей в области управления тепловыми процессами.

Графен (~5000 Вт/(м·К) в плоскости) обладает самой высокой известной теплопроводностью, но его сложно интегрировать в электронные системы.

Углеродные нанотрубки (УНТ, ~3000 Вт/(м·К) имеет исключительные тепловые свойства, но его цена пока еще высока, и они находятся на ранних стадиях коммерческого внедрения.

Синтетический алмаз (~2200 Вт/(м·К)) характеризуется очень высокой теплопроводностью, используется в разных системах охлаждения мощных полупроводников. В последние годы интерес к нему сильно вырос.

В полупроводниковой микроэлектронике материалы первых двух типов применяются для пассивного охлаждения как в корпусах ИЭТ, так и в электронных блоках и системах, в которых применяются ИЭТ. Существуют и композитные материалы на основе смеси из металлов [2]. Одними из них являются CuW, CuMo, Cu-алмаз, Al-алмаз и металлические материалы с графитовым наполнением, применяемые для теплоотводящих фланцев СВЧ-транзисторов [3].

Повышение степени интеграции, количества и плотности размещения транзисторов, рабочей частоты, сопровождаемое снижением размера чипов в полупроводниковой микроэлектронике, приводит не только к повышению температуры поверхности чипа, но и к ее неравномерному распределению по площади. В самых горячих точках температура может на десятки градусов превышать остальную поверхность чипа, и они приобретают способность вызвать отказ микропроцессоров, драйверов или силовых дискретных приборов. В то же время все известные и применяемые для электронных систем методы принудительного пассивного и активного охлаждения становятся недостаточно эффективными, поскольку необходим отвод тепла непосредственно в самом чипе и в корпусе микросхемы или транзистора. Таким образом, требуется комбинированный мощный принудительный отвод тепла в самой системе, плате, корпусе в сочетании с новыми методами интегрированного теплоотвода в кристалле. Такая задача становится особенно актуальной для серверов и ЦОД, потребляющих большое количество электроэнергии и выделяющих большое количество тепла, а также для космических аппаратов, где избыточный вес охлаждающих радиаторов значительно снижает вес доставляемых в космос полезных грузов.

В статьях [4–5] отмечается, что одним из наиболее значительных результатов эволюции силовых полупроводников является рост мощности и средних рабочих токов кристаллов, и корпусированных приборов силовых ИЭТ. Задача снижения теплового сопротивления и улучшения теплоотвода стала одной из самых важных для всех категорий изделий, а не только для силовой электроники.

В текущих условиях разработка новых методов и материалов теплоотвода, особенно интегрированных в чип и корпус, становится новым направлением электронного материаловедения. Искусственный алмаз благодаря самой высокой теплопроводности является идеальным материалом для этой задачи.

Мировое распределение рынка и компаний искусственного алмаза

Если оценивать мировой рынок материалов искусственного алмаза, то его параметры могут сильно отличаться у некоторых маркетинговых компаний в зависимости от определения типа материала и его применения. Компания Diamond Semicon приводит следующий прогноз мирового рынка по типам продукции [6].

Алмазные теплораспределители: объем этого сегмента вырастет с примерно 0,35 млрд долл. (2025 г.) до примерно 0,56 млрд долл. (2030 г.).

Алмазные полупроводниковые подложки: объем рынка достигнет примерно 305,7 млн долл. к 2030 г.

Полупроводники на основе алмаза (более узкое определение): их объем вырастет с 61 млн долл. (2024 г.) до 139,1 млн долл. (2030 г.).

Подложки из нитрида галлия на алмазе: к 2031 г. объем этого сегмента составит примерно 142 млн долл., а среднегодовой темп роста – от 15 до 20%.

Количество компаний, занимающихся исследованиями и технологиями получения искусственного алмаза, а также продукцией на его основе в последние годы сильно выросло. Причем, эта продукция предназначена не только для полупроводниковой промышленности, но и для авиакосмической, оборонной, коммуникационной, атомной, морской отраслей.

Среди изделий и компаний для полупроводниковой промышленности можно выделить две группы: первая – пластины моно- и поликристаллического искусственного алмаза для активных слоев силовой и СВЧ-электроники, а также электронные компоненты на их основе; вторая – материалы для электронных компонентов и для пассивных функций снижения теплового сопротивления и теплоотвода. О компаниях, выпускающих продукцию всех типов, среди которых Akash Systems, Advent Diamond, Diamfab, см. [7]. В этой статье рассматриваются исследования и электронные компоненты с использованием алмазов компании Akash Systems. Ниже будут рассмотрены изделия этой компании для теплоотвода. Вторая группа компаний занимается только исследованием алмазных технологий и выпуском алмазной продукции, но не электронных компонентов на их основе.

Компания **Applied Diamond** относится к первой группе. Кроме пластин искусственного алмаза разного назначения, включая теплоотвод, она выпускает радиационно-стойкие детекторы на основе алмаза для экстремальных условий ядерной промышленности [8]. Компания также оказывает технологические услуги по изготовлению заказных электронных изделий по алмазной технологии.

Одной из компаний первой группы является также **Element Six** (E6), входящая в международный ювелирный холдинг De Beers Group. Она создает продукцию на основе искусственных алмазов для разных отраслей промышленности, включая полупроводниковую [9]. Еще в 2013 г. она приобрела активы и интеллектуальную собственность Group4 Labs – компании, занимающейся производством полупроводниковых материалов на основе нитрида галлия (GaN) для радиочастотных и мощных устройств [10]. В настоящее время компания выпускает алмазные инструменты, монокристаллические пластины алмаза диаметром 25 мм, поликристаллический алмаз для электронной, инструментальной промышленностей, материалы серии Diafilm TM100-TM220 с теплопроводностью 1000–2200 Вт/(м·К) и композиты из алмаза и меди для теплоотвода в изделиях силовой и СВЧ-электроники, серверах ЦОД. Эта продукция используется в качестве теплопроводящей подложки или верхнего теплоотвода кристаллов HEMT.

Компания E6 возглавляет программу сверхширокозонных полупроводников, созданной Агентством перспективных оборонных исследований США (DARPA), с целью разработки полупроводниковых технологий следующего поколения [11]. Алмаз SC компании Element Six уже сыграл важнейшую роль в системах мониторинга Большого адронного коллайдера ЦЕРН, поспособствовав открытию бозона Хиггса. В партнерстве с компанией ABB, занимающейся производством мощных полупроводников, E6 создала первые высоковольтные диоды Шоттки на основе объемного алмаза.

E6 совместно с компанией Orbray успешно разработали воспроизводимый процесс получения монокристаллических алмазов WSC размером 3 дюйма. В настоящее время ведется разработка подложек размером 4 дюйма [12].

Компания **Diamond Semicon**, относящаяся ко в2-й группе, выпускает пластины искусственного алмаза для электроники, теплоотвода, оптики, инструментария [13]. Среди ее продукции – также композитные пластины алюминий–алмаз с теплопроводностью 350–500 Вт/(м·К) и медь–алмаз с теплопроводностью 500–700 Вт/(м·К) для силовой, СВЧ- и оптоэлектроники.

Одной из самых известных и крупных компаний 2-го типа является **Coherent Corp.** (ранее II–VI Incorporated). Кроме пластин SiC, искусственного монокристаллического и поликристаллического алмаза в качестве подложек и эпитаксиальных структур для силовой и СВЧ-электроники компания производит самые разнообразные теплопроводящие материалы из этих же материалов и их композитов. Среди них композит THERMADITE Grades 550, 700, 800 из алмаза-SiC-Si с содержанием алмаза 55–65% и теплопроводностью 550–800 Вт/(м·К), композиты SiCAM из SiC-Si и серии COGENTUM из AlSiC [14]. Эти теплопроводящие материалы предназначены для широкого применения в электронных системах, полупроводниковых приборах и в оборудовании для их производства.

В августе **Coherent** начала подготовку и поставку образцов 300-мм подложек из карбида кремния (SiC) с высокой теплопроводностью для теплового управления систем ИИ и HPC следующего поколения [15]. По данным Coherent, ее подложки с высокой теплопроводностью обеспечивают до 25% большее распространение тепла по сравнению с текущими решениями. Пока только две мировые компании обладают возможностями поставки 300-мм пластин SiC. Одной из них, которая в начале 2026 г. представила 300-мм пластины SiC с высокой теплопроводностью для современной сборки и интерпозеров в системах ИИ и HPC, является компания Wolfspeed [16].

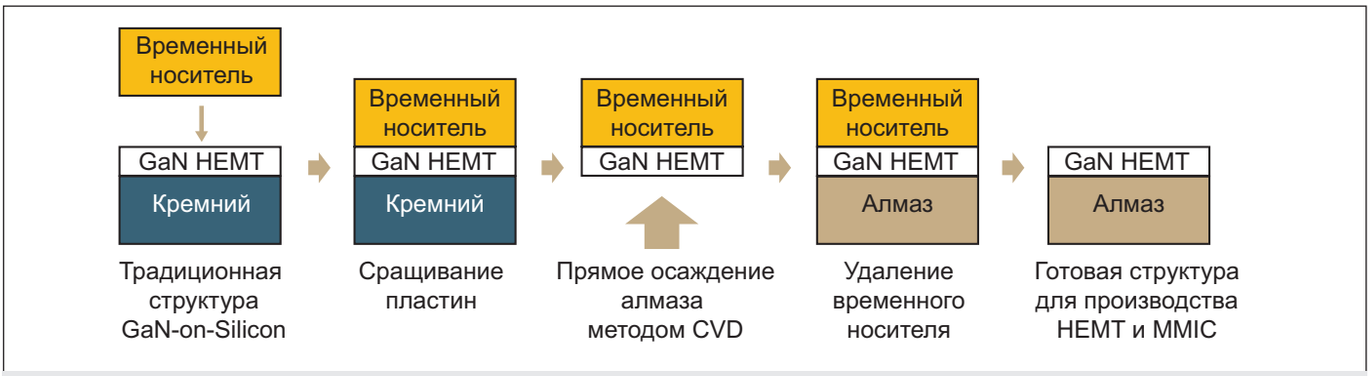


Рис. 1. Упрощенный процесс создания GaN-on-Diamond HEMT компании Akash Systems

Алмазный слой, интегрированный в подложку и поверхность кристаллов

Существуют два способа создания эффективного алмазного теплоотвода. Один из них – использовать алмаз в качестве теплового слоя на уровне корпуса или платы. Таким образом, это интеграция на уровне сборки. Другой способ – интеграция алмазного слоя в слои электрически проводящих полупроводниковых устройств чипов во время их производства.

Akash Systems. Эта компания является одним из мировых лидеров по разработке технологий GaN-на-алмазе и приборов на его основе для спутниковых, военных, радарных систем, серверов и т. д. [17].

Более высокая теплопроводность напрямую повышает производительность устройства. Например, сопротивление $R_{DS(on)}$ транзистора с высокой подвижностью электронов GaN (HEMT) увеличивается примерно в два раза при повышении температуры перехода устройства с 25 до 150°C.

При этом теплопроводность устройств снижается, что обусловлено, главным образом, уменьшением подвижности электронов и увеличением рассеяния носителей. По мнению компании, для заданной температуры перехода максимальная мощность устройства масштабируется в обратной зависимости от теплового сопротивления. Меньшее тепловое сопротивление позволяет либо повысить мощность для заданной температуры перехода, либо работать при меньшей температуре перехода при той же мощности. Повышение надежности и производительности достигается при втором подходе, тогда как первый позволяет повысить плотность мощности.

Кроме того, появляется возможность использовать более компактное устройство с более высоким значением $R_{DS(on)}$ и, следовательно, сэкономить на размере и стоимости, а улучшенная теплопроводность корпуса позволяет работать при более высоких температурах с той же системой охлаждения или использовать упрощенную систему охлаждения. В таких приложениях, как распределение электроэнергии спутников и радиосистемы, размер, вес и потери мощности являются важным показателем, и потому повышение плотности мощности и охлаждения крайне важны. Энергоемкие ЦОД с ИИ – еще один пример, где более высокая производительность устройств и термоуправление могут сэкономить системные затраты и повысить производительность вычислений.

Akash Systems разрабатывает оба упомянутых метода термоуправления с помощью алмаза [18–19]. В их серверах ЦОД алмазная пленка применяется на уровне платы на усовершенствованных ИЭТ обработки данных, что значительно улучшает производительность. Например, в демонстрации на мощных видеокартах Nvidia RTX 4070 сравнение с алмазным охлаждением и без него при тех же внешних условиях охлаждения показало, что температура горячей точки на чипе снизилась с 72,6 до 62,3°C или 42,8%. Такое снижение температуры может привести к увеличению вычислительной мощности на 200–400% [20].

На рис. 1 показан упрощенный процесс компании Akash Systems, используемый для создания устройств GaN-на-алмазе. GaN-на-Si является типичной технологией для устройств питания на основе GaN. На этом рисунке эпи-пластины GaN-на-Si HEMT сначала прикрепляются верхней стороной к временному кремниевому носителю. Подложка кремния и большая часть буферного слоя удаляются. Толщина буферного слоя зависит от номинала напряжения устройства; толщина 6–8 мкм является типовой для 650-В устройств.

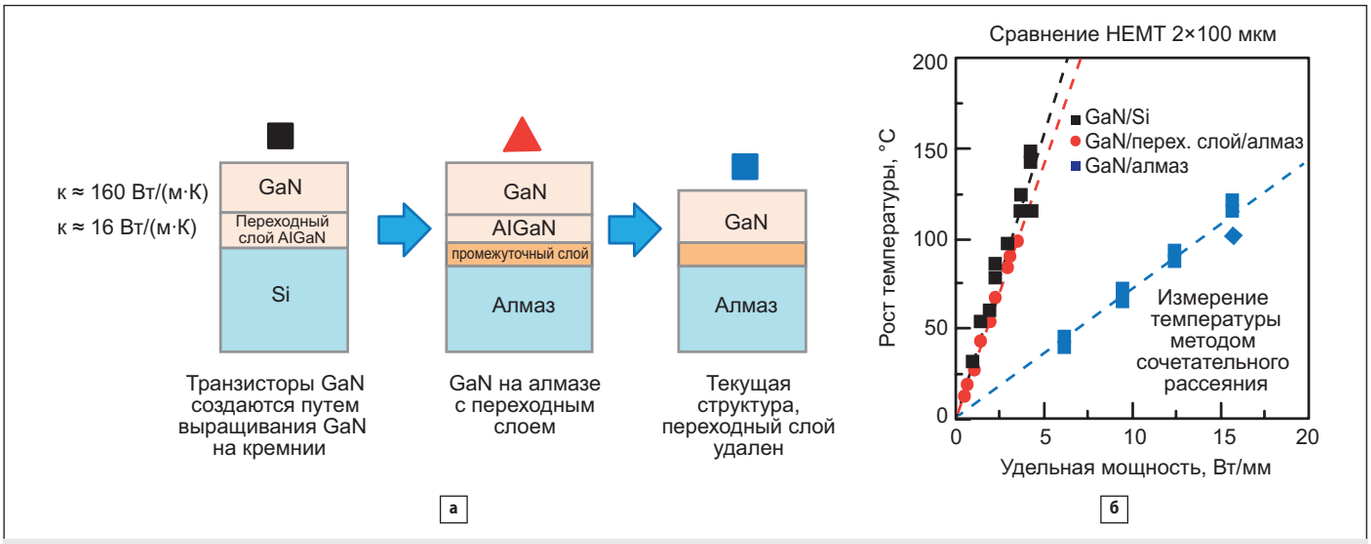


Рис. 2. а) сравнение GaN-Si HEMT и GaN-on-Diamond HEMT компании Akash Systems по максимальному приближению к электрически активным слоям транзистора; б) снижение температуры при разной мощности

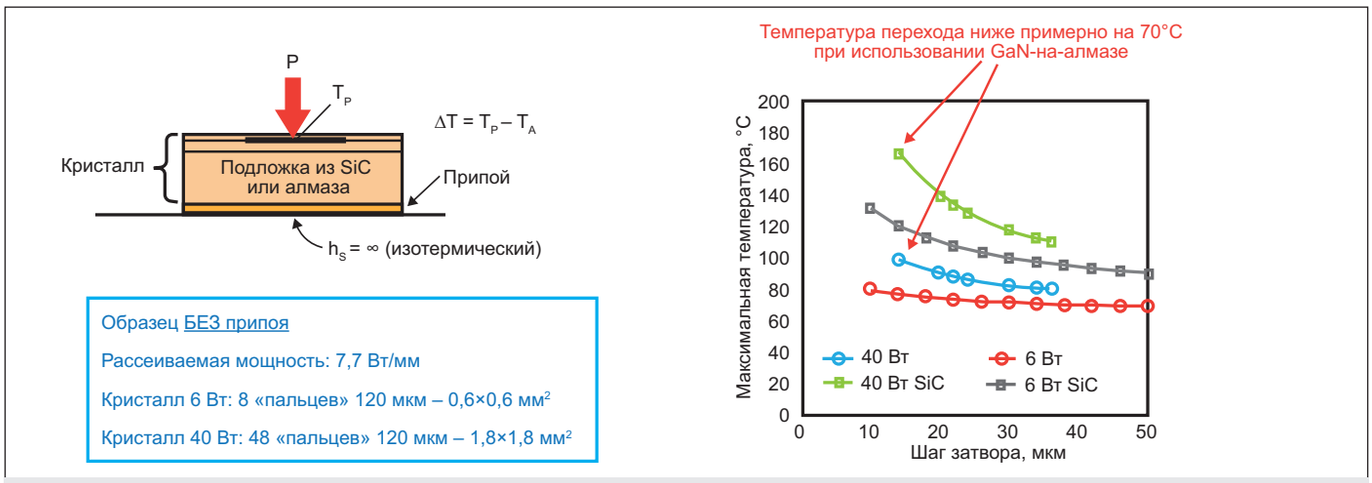


Рис. 3. Сравнение пикового повышения температуры GaN-SiC HEMT и GaN-на-алмазе HEMT компании Akash Systems при разных размерах затвора транзистора

Около 0,25 мкм буферного слоя GaN остается с высококачественной поверхностью, на которой методом CVD выращивается алмазная пленка. Алмазная подложка обеспечивает отличную электрическую изоляцию, позволяя создавать более тонкий буферный слой.

После завершения алмазного осаждения временный носитель с передней стороны можно убрать и продолжить остальную обработку устройства HEMT. Изготовление GaN-устройств после алмаза имеет свои сложности, к которым относятся изгиб пластины и оптические свойства, влияющие на автоматизированную обработку и инспекцию пластин в процессе изготовления. В настоящее время Akash Systems разрабатывает и производит 4-дюймовые пластины GaN-на-алмазе.

Значительное повышение теплопроводности композитного устройства GaN-на-алмазе обеспечивается путем удержания алмаза как можно ближе к электрически активным поверхностным слоям HEMT. Результаты моделирования и измерения температуры соединения в сравнении с плотностью мощности GaN-устройств HEMT показывают, что алмазная подложка наиболее эффективна при удалении буферного слоя AlGaN; при этом между активным каналом GaN и теплопроводящим алмазом имеется только тонкий промежуточный слой (рис. 2а). Понижение температуры канала на 70°C позволяет значительно повысить производительность устройства (рис. 2б). Например, промежуточный слой SiN толщиной 30 нм, оптимизированный для термической устойчивости, может использоваться в качестве исходного слоя перед CVD-ростом алмаза.

Технология GaN-на-SiC чаще используется в ВЧ твердотельных усилителях мощности на основе GaN. Использование GaN-на-алмазе создает еще один качественный скачок в тепловых и электрических характеристиках устройства. Из сравнения тепловой модели на рис. 3 видно, что снижение температуры перехода достигает 70°C при использовании технологии GaN-на-алмазе. В спутниковой системе, где возможности принудительного охлаждения ограничены, это улучшение дает важнейшие преимущества в размере и производительности системы.

Akash Systems провела долгосрочные исследования надежности своей технологии GaN-на-алмазе, которое показывает стабильное поведение токов утечки устройства при 290 и 350 °C при производительности, сопоставимой с традиционным GaN-на-SiC при той же температуре перехода.

Запатентованная технология GaN-на-алмазе от Akash позволяет использовать две системы, оптимизированные отдельно для электрических и тепловых характеристик. Повышение производительности устройств является прямым результатом оптимизированного интегрированного применения алмаза.

Например, эта технология позволяет повысить скорость спутниковой радиопередачи примерно в 3–5 раз или снизить энергопотребление на 50%. Повышение плотности мощности позволяет уменьшить размер радиостанции до 50%. По сравнению с традиционными технологиями GaN, технология GaN-на-алмазе позволяет повысить рабочую температуру более чем на 50 °C.

MIT. Команда Массачусетского технологического института (MIT) предложила необычное решение проблемы интеграции теплоотвода. Взамен использования традиционных методов охлаждения исследователи встроили миниатюрные GaN-транзисторы в монокристаллический алмазный интерпозер (рис. 4) [21]. Особенность технологии в том, что алмаз не выращивается непосредственно на поверхности транзистора, – кристаллы нитрида галлия вырезаются с помощью фемтосекундного лазера и встраиваются в специально подготовленные полости алмазной подложки. После термического соединения формируется единая структура с высокой теплопередачей и минимальными электрическими потерями.

Для демонстрации возможностей технологии исследователи изготовили усилитель мощности, у которого более высокие показатели выходной мощности, усиления и энергоэффективности по сравнению с аналогичными разработками, описанными в научной литературе.

По мнению авторов проекта, новая архитектура может найти применение в оборудовании для сетей 6G [22], спутниковой и космической связи, мощных радиолокационных системах, промышленных беспилотниках и центрах обработки данных. Особенно перспективным направлением считается использование алмазных тепловых интерфейсов в силовой электронике и системах преобразования энергии, где проблемы перегрева напрямую влияют на энергопотребление и надежность оборудования.

Fraunhofer USA. Центр Фраунгофера в США, постоянно работая над дальнейшим расширением латерального размера пластин алма-

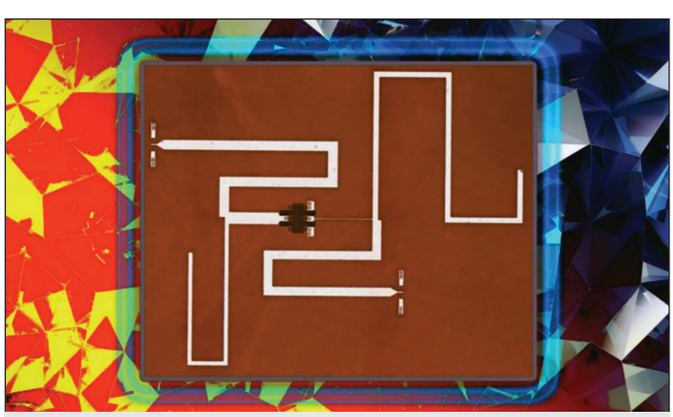


Рис. 4. Вырезанный чип транзистора GaN HEMT, встроенный в алмазную подложку учеными Массачусетского технологического института

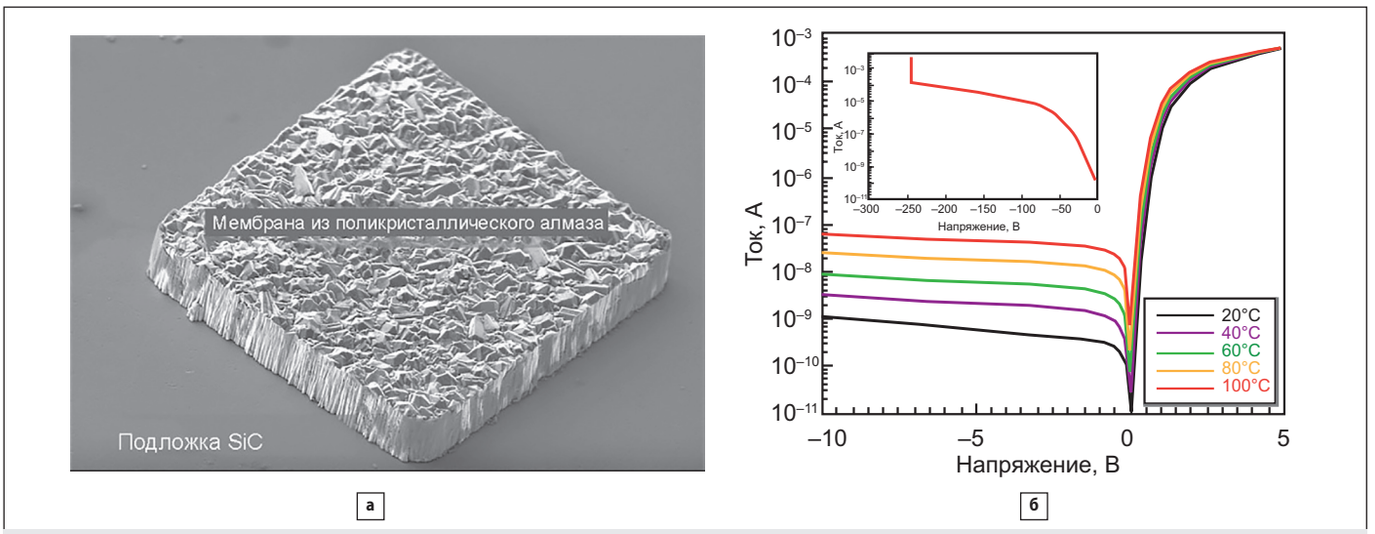


Рис. 5. а) монтаж алмазных мембран на поверхность подложки SiC, Ga_2O_3 в Институте Фраунгофера США; б) вольтамперные характеристики p-n-переходного диода алмаз-Ga_2O_3, демонстрирующие работу в прямом и обратном режимах

за SCD (Single-Crystal Diamond wafers), создал алмазные мембраны, которые преодолевают ограничения, присущие SCD-пластинам [23].

Полупроводниковые мембраны представляют собой листы полупроводникового материала толщиной всего в несколько микрон. У них те же свойства, что и у соответствующего объемного материала (пластины), но благодаря малой толщине они обладают гибкостью, что позволяет беспрепятственно переносить и интегрировать эти мембраны в другие полупроводниковые материалы. Для успешного переноса необходимы очень гладкие поверхности мембраны и пластины, что достигается с помощью **химико-механической полировки**, специально разработанной Центром Фраунгофера для таких технологий. Этот процесс сборки устройств из разных полупроводниковых материалов, который называется гетероинтеграцией, позволяет масштабировать их до размеров пластин большего диаметра.

В случае использования алмаза можно перенести активные алмазные элементы p-типа на предварительно обработанные пластины из нитрида галлия и нитрида алюминия, являющиеся материалами n-типа. В результате размеры устройства увеличиваются, поскольку все алмазные компоненты могут быть синтезированы и обработаны по существующей SCD-технологии, а затем интегрированы в пластины GaN или AlN большего размера, совместимые с промышленным оборудованием.

Институт Фраунгофера разработал метод «умной резки» для создания SCD-мембран, а также усилитель мощности GaN-на-Si в монокристаллическом алмазном интерпозере для систем 6G. Эти мембраны могут быть изготовлены с учетом индивидуальных размеров, формы, толщины и легирования.

Было успешно продемонстрировано соединение этих мембран SCD с полупроводниковыми материалами (Si, SiC, GaN, Ga_2O_3, AlN), стеклом и полимерами (рис. 5а). Институт Фраунгофера США получил диодные характеристики SCD-мембран p-типа, перенесенных на подложки из SiC и Ga_2O_3 (рис. 5б).

Поскольку изготовление SCD-мембран – довольно сложный и дорогостоящий процесс с технической точки зрения и их использование в качестве теплоотводящих материалов довольно неэкономично, была разработана альтернативная мембранная технология с использованием поликристаллического материала. Поликристаллические алмазные мембраны могут быть синтезированы и обработаны на подложках размером 4–8 дюймов, а также дополнительно утонены, например, для 3D-структур.

Алмазный теплоотвод в объемной структуре кристаллов

Применение алмаза в качестве подложки или верхнего покрытия над чипом стало довольно распространенным методом в исследованиях и разработках. Однако его интеграция в объем и структуру чипа было недостижимым из-за высокой температуры более 1000°C для выращивания. По этой причине метод химического осаждения из газовой фазы стал основным технологическим способом для выращивания алмазов при пониженных температурах.

Группа ученых из Стэнфордского университета ведет исследования и работы по интегрированию алмаза в объемную структуру транзисторов [24–25]. Их работы начались с выращивания монокристаллического алмаза при высоких температурах. Учитывая малые диаметры монокристаллических алмазных пластин 50–76 мм, выращивание алмазов стартовало при температурах свыше 900°C на кремниевых пластинах большего диаметра. В результате вначале были получены и сформированы не сплошная пленка алмаза, а наноколонны из алмаза, которые по мере роста формировали сплошную толстую пленку поликристаллического алмаза, что сопровождалось ее растрескиванием. Возникла идея интеграции наноколонн алмаза в кремниевые структуры с чередованием вертикальных алмазных и кремниевых вертикальных наноколонн. Благодаря обширным экспериментам был найден способ, позволяющий получить покрытия из крупнозернистого поликристаллического алмаза по всему устройству при 400°C (рис. 6). **Исследования транзисторов GaN HEMT показали, что температура их канала снижалась на 70°C, если алмазный слой полностью окружал эти приборы даже по бокам** (рис. 7).

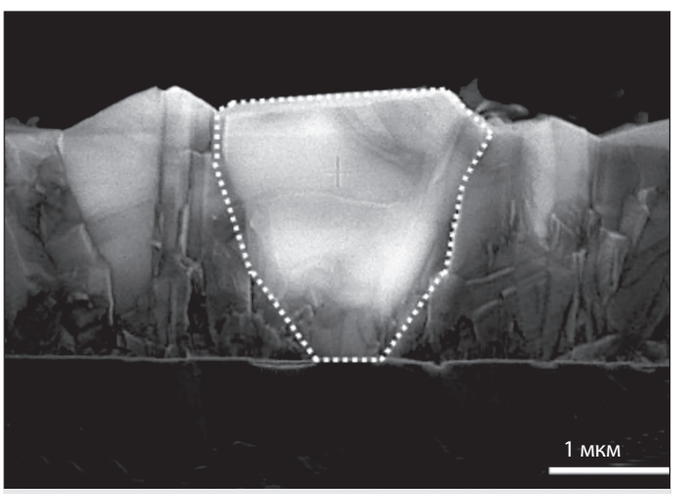


Рис. 6. Крупнозернистый поликристаллический алмаз в объемной структуре транзистора, разработанного учеными Стэнфордского университета

Были также проведены работы по использованию таких интегрированных структур в 3D-стеках. Критической проблемой 3D-стековых чипов являются узкие тепловые места, образующиеся внутри стека. В 3D-архитектурах традиционные радиаторы и другие методы, используемые для 2D-чипов, недостаточны. Крайне важно извлечение тепла из каждого слоя стека. Эксперименты по термическому пограничному сопротивлению GaN показали, что аналогичный подход сработает и в кремнии. Результаты интеграции алмаза с кремнием оказались впечатляющими: образовался промежуточный слой карбида кремния, что привело к алмазу с отличным тепловым интерфейсом.

Ученые использовали концепцию «тепловых строительных лесов»: слои поликристаллического алмаза толщиной в несколько нанометров интегрируются в диэлектрические слои над транзисторами для распространения тепла (рис. 8). Эти слои соединяются вертикальными теплопроводниками (тепловыми столбами), изготовленными из меди или большего количества алмаза (рис. 9). Тепловые столбы подключаются к другому теплораспределителю, который, в свою очередь, соединяется с тепловыми столбами на следующем чипе в 3D-стеке и т. д., пока тепло не достигает радиатора или другого охлаждающего устройства. Для доказательства работоспособности этой концепции в сотрудничестве с Калифорнийским университетом использовались симуляции тепла, генерируемого реальными вычислительными нагрузками. Эта конструкция состояла из фиктивных обогревателей, имитирующих горячие точки, а также алмазных теплораспределителей и медных тепловых столбов. В результате удалось снизить температуру на 70°C (рис. 10). Трехмерное тепловое моделирование показало, что с усовершенствованными теплоотводами конструкция может вместить 15 сверхплотных ускорителей 3D AI (>1,3 кВт/см^2) с пиковой температурой ниже 125°C.

В настоящее время исследователи продвигаются в направлении интеграции в разные отрасли. Ученые работают в рамках программы оборонного Агентства передовых исследовательских проектов DARPA, которая направлена на использование теплового управления на уровне устройств для создания высокоэффективных и надежных усилителей мощности X-диапазона с плотностью мощности в 6–8 раз эффективнее современных устройств. Программа является критически важной платформой для проверки использования интеграции алмазов при низких температурах в производстве GaN HEMT.

Однако исследователи пытаются выйти за рамки GaN HEMT в сторону других материалов, особенно в направлении использования кремния для вычислительных чипов. У разработчиков техпроцесса установлено налаженное сотрудничество с компаниями TSMC, Applied Materials, Micron, Samsung и др. через Stanford SystemX Alliance и Semiconductor Research Corp. Это исключительный уровень сотрудничества, которое обещает быструю промышленную реализацию оборудования и самого техпроцесса.

Одни из первых практических результатов применения исследований ученым Стэнфордского университета принесло сотрудничество с военно-технической компанией Northrop Grumman [26], которая получила контракт от DARPA на сумму 7 млн долл. на разработку микрочипов с алмазным покрытием. Эта работа является вторым этапом программы DARPA по технологиям отвода тепла в электронике на уровне устройств (THREADS). Как заявил Бен Хейинг (Ben Heying), директор по микроэлектронике в Космическом парке компании Northrop Grumman, что температура долгое время ограничивала производительность полупроводников. «Встраивание алмаза непосредственно в чипы работает как система охлаждения с турбонаддувом, которая охлаждает чипы, позволяя увеличивать мощность без риска перегорания», – заявил Хейинг. **Используя разработку Стэнфордского университета в ходе первого этапа проекта THREADS, компания Northrop Grumman увеличила плотность мощности GaN-транзисторов для военных радаров в 3,3 раза**, а ее модель открытого доступа к производственным мощностям может сделать технологию доступной для всей микроэлектронной промышленности США, что может оказаться важным не только для одной оборонной программы.

Исследования Стэнфордского университета становятся основой для создания военными компаниями систем связи с увеличенной мощностью и дальностью для космического и наземного применения. **Военная компания BAE Systems, используя результаты разработки Стэнфордского университета, также успешно завершила первый этап программы THREADS** и получила предоставленную поддержку для перехода на второй этап [27]. Успешное тепловое управление, разработанное в рамках этой программы, почти утроит дальность радиочастотных систем, повысит безопасность и дальность ведения боя.

Стремительное внедрение еще недавно считавшейся лабораторной технологии Стэнфордского университета радикально меняет подходы к ее освоению, при которых крупные частные полупроводниковые компании по выпуску оборудования и чипов сами и без поддержки государства устремляются в эту область и ускоряют ее на всех уровнях. Именно так и работают инновации в электронике. Широкий прорыв будет очень скоро.

Селективное выращивание алмаза на пластине

Толчком к появлению этой технологии стала идея изготовления сувениров с рисунком совы как талисмана на пластине для почетных гостей университета Райса в Хьюстоне (США) [28]. Известные методы обработки алмазов используют подход «сверху вниз», при котором сначала выращивается полный слой алмаза, который затем

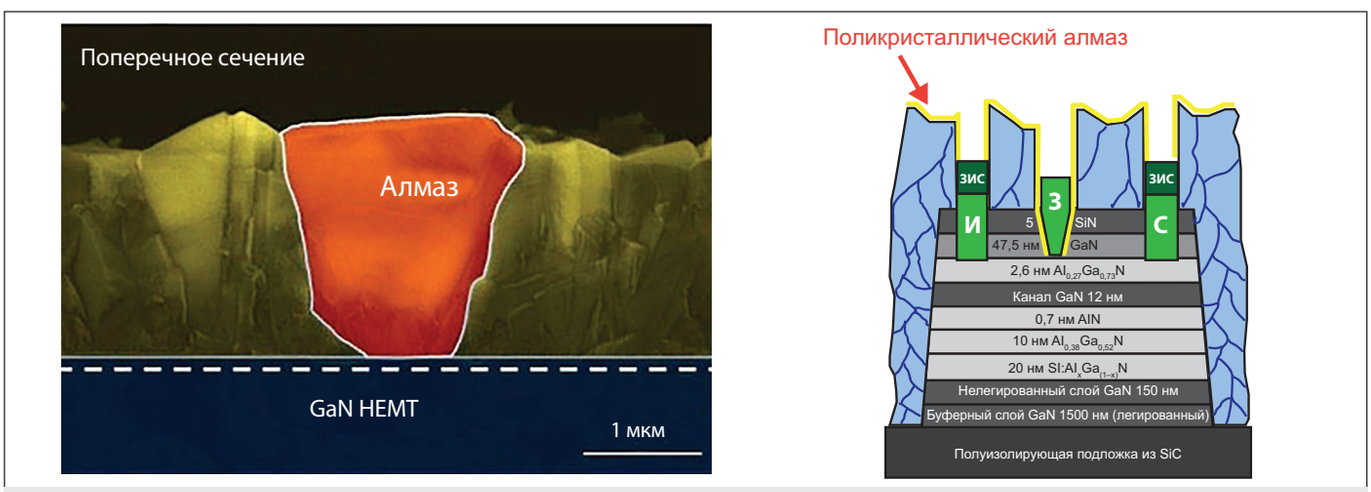


Рис. 7. Разработка ученых из Стэнфордского университета с формированием теплоотводящих вертикальных наноколонн из поликристаллического алмаза, выращенных низкотемпературным методом CVD в объеме HEMT-транзистора

вырезается или вытравливается. Поскольку алмаз обладает очень высокой твердостью и химической стойкостью, этот процесс сложный, медленный и может повредить материал. Противоположный подход «снизу вверх», который использовали сотрудники университета, предполагает подготовку алмазных узоров в процессе самого роста. Для формирования затравочных областей, на которых будет селективно выращиваться алмаз, используются два метода. Для создания мелких, детализированных узоров они применили фотолитографию. Для больших размеров процесс требует иного подхода. Сначала на пластину наносится серийно выпускаемая пленка, на которой лазер вырезает желаемый рисунок. Ненужные участки в обоих случаях удаляются, и на поверхность наносятся алмазные затравки. После удаления остальной части пленки остается чистый узорчатый шаблон для роста алмазов, полученный без использования агрессивных химикатов или сложной обработки. После подготовки подложек на их поверхность наносится жидкость, содержащая наноалмазы. Эти крошечные частицы служат затравкой для роста алмазов. Селективное выращивание алмаза на затравочных областях проводится методом химического осаждения с плазменной активацией.

Такой метод позволяет селективно выращивать алмаз на 2-дюймовых пластинах (рис. 11). **Этот подход позволяет формировать локальные области алмаза, максимально приближенные к активной области кристалла, а исследователям удалось снизить температуру на 23°C.**

Тета-фазный нитрид тантала (θ-TaN) – новый металл с рекордной теплопроводностью выше меди

Команда Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) из Инженерной школы Самуэли при UCLA, работая с исследователями из других учреждений, обнаружила металлический материал с самой высокой теплопроводностью, когда-либо измеренной среди металлов [29–30]. Он известен как тета-фазный нитрид тантала (θ-TaN); его теплопроводность составляет около 1100 Вт/(м·К), что почти втрое больше, чем у меди.

В металлических материалах тепло переносится как свободно движущимися электронами, так и атомными колебаниями (фононами). Сильные взаимодействия между электронами и фононами ограничивают эффективность передачи тепла в металлах.

Теоретическое моделирование показало, что нитрид тантала в тета-фазе обладает необычайно эффективным теплопереносом благодаря уникальной атомной структуре, при которой атомы тантала перемежаются атомами азота в гексагональном порядке.

Исследователи применяли разные методы, включая электронную дифракцию, рамановскую спектроскопию, однокристаллическую рентгеновскую дифракцию, высокоразрешающую электронную ми-

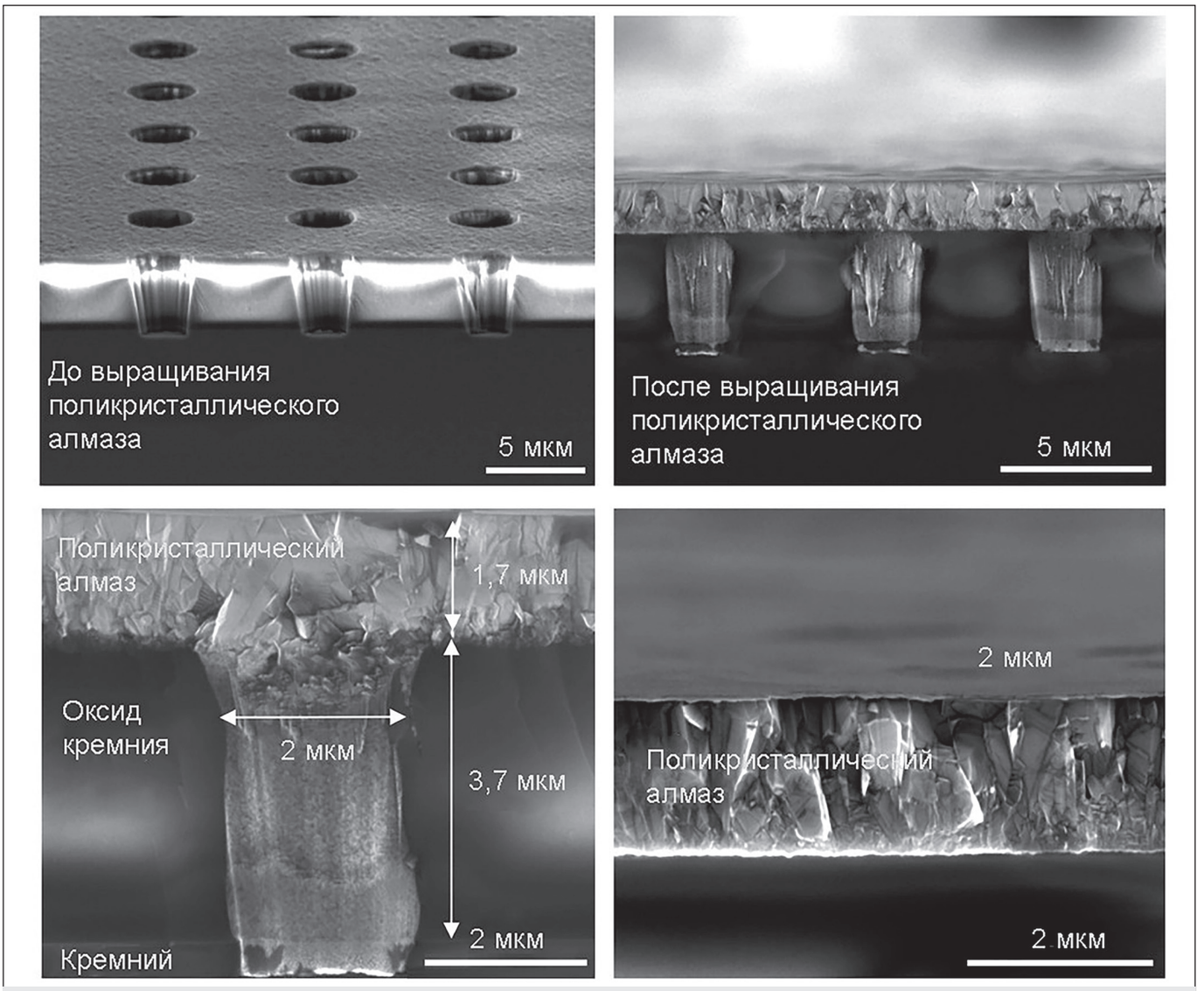


Рис. 8. Слои поликристаллического алмаза, интегрированные в диэлектрические слои

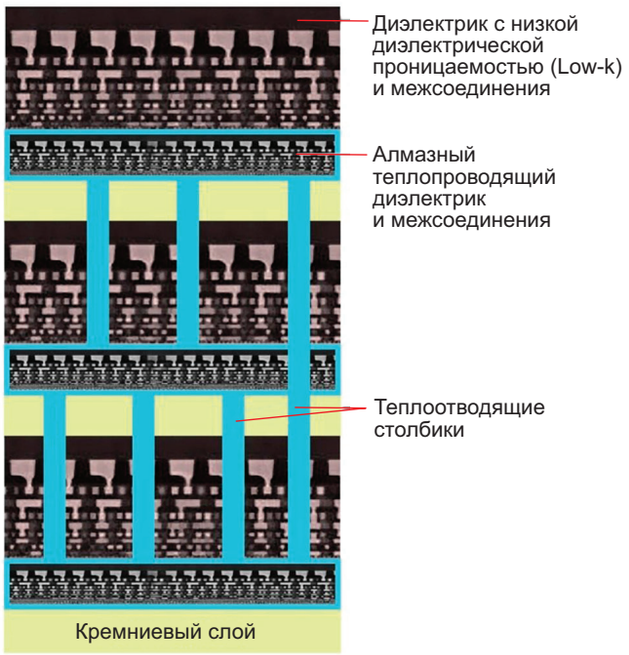


Рис. 9. Применение вертикальных наноколонн из поликристаллического алмаза для теплоотвода в 3D-стеке

кроскопию и спектроскопию потерь энергии электронов, чтобы подтвердить характеристики материала.

Ключевым инструментом, которым воспользовалась команда для проверки свойств нового материала, стал мощный источник синхротронного излучения 3-го поколения APS (Advanced Photon Source) Управления науки Министерства энергетики США в Аргоннской национальной лаборатории DOE. Применение неупругого рентгеновского рассеяния с высоким разрешением обнаружило крайне слабые взаимодействия между электронами и фононами, что позволило теплу распространяться гораздо эффективнее, чем в обычных металлах (рис. 12).

Затем исследователи измерили теплопроводность θ-TaN при 150–600°K с помощью сверхбыстрого метода оптического насоса-зонда на основе термоотражательной способности во временной области – стандартного подхода, уже применявшегося для измерения характеристик таких материалов с высокой теплопроводностью, как алмаз, фосфид бора, нитрид бора и металлы.

Исследователи также обнаружили, что теплопроводность оставалась равномерно высокой по всему кристаллу, что отражает высокую степень кристаллизации образцов, а также подтверждает, что измеренная ультравысокая теплопроводность обусловлена свойствами решетки, что соответствует теоретическим расчетам на основе фундаментальных физических законов.

Маловероятно, что однокристаллические устройства из θ-TaN заменят медные или алюминиевые теплопроводники, но **этот материал может стать привлекательным выбором для реализации теплового слоя между источником тепла и соответствующими охлаждающими компонентами, подобно использованию алмазных пленок.**

По мнению исследователей, это открытие может найти применение не только в микроэлектронике и оборудовании для искусственного интеллекта, но и повлиять на широкий ряд технологий, все больше ограничиваемых тепловыделением, включая ЦОД, авиакосмические системы и развивающиеся квантовые платформы.

По мнению TSMC, будущее – за жидкостным охлаждением чипов

Все рассмотренные выше технологии и способы интегрированного охлаждения с максимальным приближением к области кристалла не решают текущую проблему с гигантским ростом мощности и тепловыделения в ЦОД для ИИ, где водяное охлаждение на уровне стоек дополняется охлаждением на уровне компонентов с максимальным приближением к тепловым зонам не только на уровне корпуса, но и в области чипа. Количество исследований и компаний, разрабатывающих способы и инструменты такого теплоотвода, стремительно растет [31–34].

Некоторые интегрированные типы охлаждения и отвода тепла с приближением к чипу и с использованием жидкостных потоков показаны на рис. 13а–б [31]. Традиционный тип охлаждения мощных радиочастотных чипов и его структура и схема теплоотвода показаны на рис. 13а. В тракте теплопередачи *чип* → *радиатор* → *корпус* → *охлаждающая пластина* имеются три интерфейсных слоя. Этот тип охлаждения называется архитектурой дистанционного охлаждения. К ее недостаткам относятся длинный тракт теплопередачи, большое количество интерфейсов и высокое тепловое сопротивление.

Интегрированная замкнутая система охлаждения для отвода тепла от мощных микросхем показана на рис. 13б. Микронасос и теплообменник интегрированы в архитектуру охлаждения вблизи контакта, образуя полную замкнутую систему с высокой устойчивостью к примесям и высокой надежностью системы. Отвод тепла в такой системе осуществляется путем ее соединения с оконечным теплообменником через внешний трубопровод. Была разработана конструкция со структурно-жидкостно-электрическим соединением корпусных подложек и микроустройств, а также микросистемного охлаждения, величина теплового потока которой составила 500 Вт/см^2 для охлаждения мощных микросхем с повышением температуры до менее 50°C.

TSMC представила вариант решения проблемы теплоотвода в ближайшем будущем [35]. По мере дальнейшего роста вычислительной производительности ИИ общее энергопотребление системы может

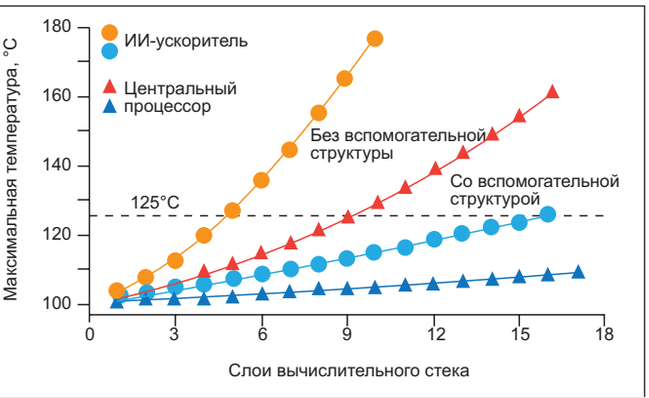


Рис. 10. Тепловое моделирование пиковой температуры в 3D-стеке с использованием вертикальных наноколонн из поликристаллического алмаза и без них



Рис. 11. Селективное выращивание алмаза на 2-дюймовых пластинах в университете Райса в США

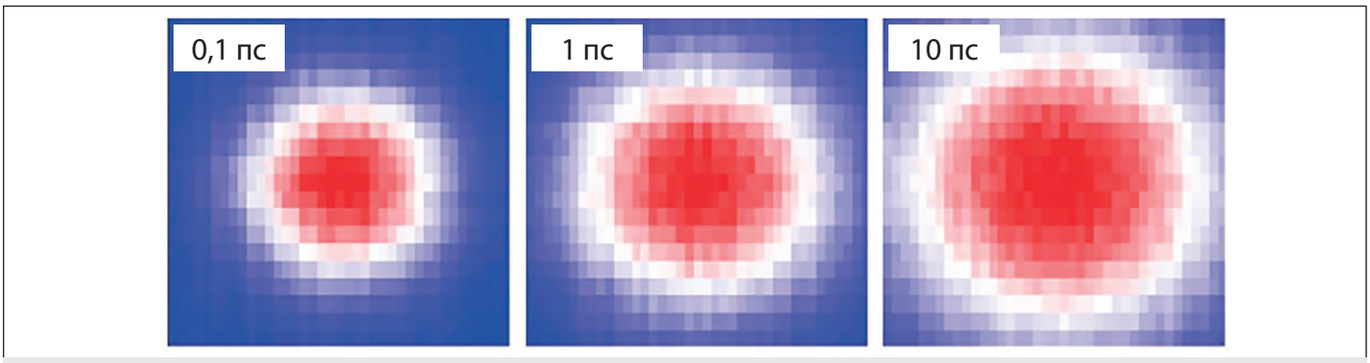


Рис. 12. Распространение тепловой энергии, переносимой электронами, через тета-фазу нитрида тантала после воздействия на металлический материал светового импульса длительностью от 0,1 до 10 пс

увеличиться примерно в шесть раз в течение следующих пяти лет, а общая пропускная способность HBM на один корпус вырастет более чем в 34 раза. Согласно прогнозу, энергопотребление корпуса вырастет примерно с 600 до 4100 Вт, размер корпуса CoWoS от TSMC за период 2024–2029 гг. увеличится в 3,3 раза, а потери при передаче энергии могут увеличиться более чем в пять раз.

Таким образом, электропитание и управление тепловыми процессами становятся двумя ключевыми проблемами для дальнейшего масштабирования систем ИИ следующего поколения. Специалисты TSMC считают, что для улучшения теплоотвода необходимо видоизменять водяное охлаждение корпусов микросхем. В современных конструкциях жидкостного охлаждения обычно используется пластина, расположенная поверх корпуса микросхемы. Идеальным долгосрочным направлением является интеграция жидкостного охлаждения непосредственно в корпус или структуру чипа. Микроканальное охлаждение использует крошечные каналы для протекания жидкости внутри чипа или корпуса, позволяя ей эффективнее поглощать и отводить тепло. Создание каналов в чипе для циркуляции охлаждающей жидкости сопряжено со значительными производственными и сборочными проблемами и потребует изменений конструкций корпуса и чипа. Компания TSMC, включив эту технологию в свою программу исследований и проектирования, в настоящее время работает над ее интеграцией с передовыми технологиями производства чипов и сборки.

Выводы

1. В связи с ростом мощностей современных силовых и цифровых полупроводниковых изделий существующих методов теплоотвода на уровне электронных систем и корпусов недостаточно для эффективного отвода тепла. Требуются новые комбинированные методы и теплопроводящие материалы, интегрированные в структуру кристалла.
2. В результате эволюции технологий заметный рост мощности и рабочей температуры полупроводниковых ИЭТ вызвал необходимость максимального приближения теплоотвода к зоне максимальной температуры в составе чипов.
3. Алмаз является самым эффективным и перспективным материалом теплоотвода не только в электронных системах, корпусах ИЭТ, но и непосредственно в самих чипах. Разработка технологий низкотемпературного CVD-выращивания алмаза при температуре около 400°C значительно расширила возможности его интеграции в чип.
4. Применение алмазной подложки чипа и нанесение алмазного покрытия поверх готового чипа являются самыми распространенными методами его интеграции в чип, позволяющими до 80% снизить температуру чипов.
5. Компания Akash Systems, один из мировых лидеров технологии и приборов GaN-на-алмазе, разрабатывает процессы выращивания алмаза и технологии его интеграции в чипы, позволяющие значительно снизить его температуру и повысить эффективность спутниковых, радиочастотных, серверных систем.
6. Ученые Массачусетского технологического института для снижения температуры чипов вырезают кристаллы нитрида галлия с помощью фемтосекундного лазера и интегрируют их в специально подготовленные полости алмазной подложки взамен выращивания алмаза непосредственно на поверхности подложки.
7. Центр Фраунгофера в США разработал интегрированную в чипы мембранную технологию с использованием монокристаллического и поликристаллического алмаза, позволяющую не только отводить тепло, но и создавать с их помощью диодные структуры на основе гетероинтеграции алмазных мембран с подложками GaN, AlN, Ga_2O_3.
8. Разработанная учеными Стэнфордского университета технология интеграции поликристаллического алмаза в объемную структуру кристалла с формированием вертикальных теплоотводящих областей в рабочей области транзисторов снижает температуру на 70°C

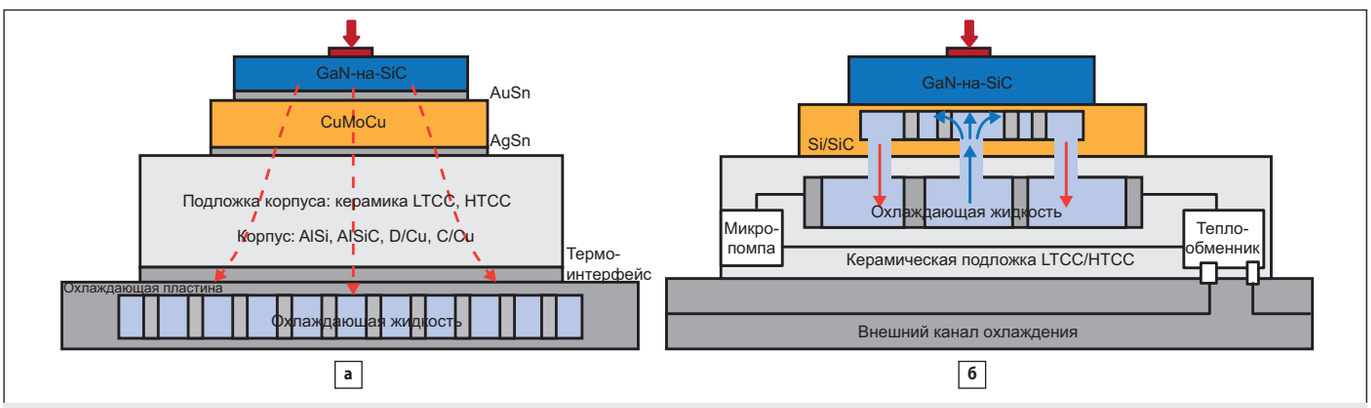


Рис. 13. Примеры интегрированной: а) дистанционной; б) замкнутой архитектур жидкостного охлаждения чипов

и создает уникальную возможность теплопередачи не только в чипе, но и в сборочных 3D-стеках. Технология уже получила практическое применение в оборонных программах.

9. Сотрудники университета Райса в США разработали технологию низкотемпературного селективного выращивания алмаза для его интеграции в объем кристаллов.
10. Теплопроводность разработанного учеными Калифорнийского университета тета-фазного нитрида тантала (θ-TaN) почти втрое больше, чем у меди – самого распространенного металла теплоносителя – и наравне с алмазом может стать самым эффективным материалом теплоотвода.
11. Компания TSMC считает, что для отвода тепла в системах большой мощности ЦОД самым перспективным является жидкостное охлаждение, интегрированное в корпус и структуру чипов супермощных ИЭТ.
12. Некоторые из описанных в этой статье методов и технологий на первый взгляд выглядят экзотически, но применение искусственного алмаза для нужд полупроводниковой микроэлектроники совсем недавно воспринималось как далекая перспектива. Однако стремительные темпы развития микроэлектроники за 60 лет свидетельствуют о том, что ее будущее гораздо ближе, чем кажется.

Литература

1. Emerging Advanced Electronic Packaging Materials for Thermal Management in Power Electronics. Advanced Science. Feb. 2026.
2. “Revolutionary” New Thermal Management Materials. Electronics Cooling. May 1. 2005 // www.electronics-cooling.com.
3. Боднарь Д. Металлические и композитные теплопроводящие материалы для мощных полупроводниковых корпусов. Компоненты и технологии. №12. 2014.
4. Боднарь Д. Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники. Часть 1. Технологии производства пластин и кристаллов. Электронные компоненты. №7. 2026.
5. Боднарь Д. Эволюция технологий и материалов силовой полупроводниковой микроэлектроники. Часть 2. Корпуса, материалы и технологии сборки. Электронные компоненты. №8. 2026.
6. Global Market Outlook for Diamond Semiconductor Materials Through 2030. Diamond Semicon. December 18. 2025 // www.diamondsemicon.com.
7. Боднарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника – 2024 г. Часть 3. Сверхширокозонные полупроводники как новый класс и этап развития полупроводниковых материалов и приборов. Электронные компоненты. №11. 2024.
8. Applied Diamond Inc. // www.usappliedddiamond.com.
9. Element Six UK Ltd. // www.e6.com.
10. Element Six Acquired Group4 Labs for the Production of Power Semiconductors Based on Gallium Nitride on a Diamond Substrate (GaN-on-Diamond). EEPower. June 2. 2013 // www. eepower.com.
11. Element Six wins U. S. Department of Defense UWBGS program. Element Six UK Ltd. September 3. 2024 // www.e6.com.
12. Element Six and Orbray Accelerate Wafer-Scale Single Crystal Diamond for Volume Production. Orbray Co. June 16. 2026 // www.orbray.com.
13. Diamond Semicon // www.diamondsemicon.com.
14. Enabling Advanced Thermal Management Solutions. Coherent Corp. // www.coherent.com.
15. Coherent Begins Customer Sampling Of 300mm High Thermal Conductivity Silicon Carbide Substrates for Ai Infrastructure. Coherent Corp. August 17. 2026 // www.coherent.com.
16. Wolfspeed’s 300 mm Silicon Carbide Technology as a Materials Foundation for Next-Generation AI and HPC Advanced Packaging. Wolfspeed. March 10. 2026 // www.wolfspeed.com.
17. Akash Systems // www.akashsystems.com.
18. Thermal Boundary Resistance Reduction by Interfacial Nanopatterning for GaN-on-Diamond Electronics Applications. ACS Applied Electronic Materials. (2025) 7 (7): 2939–2946.
19. Integrated Diamond Cooling for Enhanced Semiconductor Device Performance. Power Electronics News. February 12. 2025 // www.powerelectronicsnews.com.
20. Akash Systems Delivers World’s First Diamond Cooled NVIDIA GPU Servers to NxtGen AI Pvt Ltd. Akash Systems. February 23. 2026 // www.akashsystems.com.
21. Improving the Performance of High-Power Electronics. Massachusetts Institute of Technology. June 8. 2026 // web.mit.edu.
22. A 4 W Heterogeneous Power Amplifier with GaN-on-Si Dielets in Single-Crystal Diamond Interposer for 6G FR3 Applications. Massachusetts Institute of Technology // web.mit.edu.
23. Diamond Membranes. Fraunhofer USA Center Midwest CMW // www.cmw.fraunhofer.org.
24. A Diamond “Blanket” Can Cool the Transistors Needed for 6G. IEEE Spectrum. November 28. 2022 // www.spectrum.ieee.org.
25. Diamond Blankets Will Keep Future Chips Cool. IEEE Spectrum. October 20. 2025 // www.spectrum.ieee.org.
26. Diamond-cooled Microchips Boost Power Density 3.3× for Military Radar Signals. Interesting Engineering. August 27. 2026 // www.interestingengineering.com.
27. BAE Systems Advances to Phase 2 of DARPA’s THREADS Program. BAE Systems. August 12. 2026 // www.baesystems.com.
28. Diamond owl swoops in with new method to keep electronics cool. Rice University. February 23. 2026 // www.news.rice.edu.
29. UCLA-Led Team Discovers Metallic Material with Record Thermal Conductivity. UCLA Samueli School of Engineering. January 16. 2026 // www.samueli.ucla.edu.
30. 3New Material Beats Copper’s Thermal Conductivity. EETimes. July 17. 2026 // www.eetimes.com.
31. Integrated Closed Cooling System for High-Power Chips. Case Studies in Thermal Engineering. Volume 26. August. 2021. 100954.
32. The Future is Liquid: How In-Rack and Direct-to-Chip Cooling are Revolutionizing Data Centers. Cyrus One // www.cyrusone.com.
33. In-Package, Direct-on-chip Liquid Cooling with Lid-Compatible Manifold for Efficient AI Chip Thermal Management. Electronics Cooling. November 5. 2025 // www.electronics-cooling.com.
34. What Is Direct-to-Chip Liquid Cooling? Super Micro Computer, Inc. // www.supermicro.com.
35. TSMC Eyes Chip-Level Microchannel Cooling as AI System Power Could Rise 6× in Five Years. TrendForce. September 02. 2026 // www.trendforce.com.

