

Использование углеродных нанотрубок для отвода тепла от элементов интегральных схем

Юрий Непочатов (nuk3d@mail.ru), Дмитрий Городецкий, Александр Окотруб (г. Новосибирск)

Статья посвящена использованию механических и тепловых свойств углеродных нанотрубок для отвода тепла от мощных элементов гибридных интегральных схем (ГИС). В ней рассматриваются нанотрубчатые структуры, состоящие из пластины, выполненной из керамики на основе нитрида алюминия, с выращенным на её поверхностях слоем вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (УНТ), обладающих высокой теплопроводностью вдоль своей вертикальной оси, пропитанных кремнием с образованием карбида кремния на поверхностях УНТ и с нанесённым поверх пропитанных УНТ слоем металлизации. Полученные структуры предназначены для использования в качестве теплоотводящей электроизолирующей подложки при изготовлении мощных интегральных микросхем и силовых полупроводниковых приборов, позволяют снизить тепловое сопротивление, повысить кондуктивную теплопроводность структуры и эффективность отвода тепла от тепловыделяющего активного элемента к теплосъёмнику.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность создания высокотеплопроводящих материалов для теплонагруженных элементов конструкций электронных приборов и интегральных схем, способных работать при высокой температуре, обусловлена созданием нового поколения высокопроизводительных микропроцессоров и силовых приборов повышенной мощности. Большое количество работ в настоящее время посвящено разработкам композиционных материалов, предназначенных для изготовления на их основе конструкций для отвода тепла от теплонапряжённых элементов интегральных схем и участков электронных устройств. Постоянное увеличение плотности размещения транзисторов на чипах ведет к обострению связанной с этим проблемы теплоотвода, являющейся одной из важнейших при разработке ГИС и устройств повышенной мощности.

Активные элементы электронных устройств и интегральных схем являются источниками тепла. Для обеспечения надёжной работы таких устройств необходимо поддерживать устойчивые рабочие условия и температуру. Это достигается за счёт использования устройств отвода тепла, на которых расположены источники тепла.

Одним из важнейших моментов при создании и изготовлении мощных интегральных схем и приборов является разработка конструкции, обеспечивающей наилучший отвод тепла от наиболее нагреваемых частей микросхем и приборов. Как правило, это р-п-переходы, расположенные в объёме активных элементов, например в виде мощных кристаллов интегральных схем, силовых модулей и СВЧ-транзисторов.

Основными параметрами, от которых зависит охлаждение, являются: геометрия компонентов, коэффициенты теплопроводности используемых материалов и значения тепловых сопротивлений на границах раздела контактируемых поверхностей. В устройствах будущих поколений плотность мощности, которую необходимо будет рассеивать, составит порядка 100 Вт/см^2 и более. Отсюда очевидна потребность в разработке новых методов охлаждения и применения новых материалов, позволяющих более эффективно отводить тепло. Для оптимальной эффективности необходимо, чтобы теплоотводы имели максимально возможную теплопроводность, хороший тепловой контакт как с источником тепла, так и с его приёмником в виде корпусов и радиаторов. Для достижения этих целей в устройствах используют-

ся материалы с высокой теплопроводностью.

В последние годы для этих целей разрабатываются новые материалы с повышенной теплопроводностью на основе карбида кремния с добавкой алмазных порошков [1].

Из металлов к числу материалов с высокой теплопроводностью относятся алюминий ($180...220 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и медь ($370...410 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), а из диэлектриков лучшей теплопроводностью обладают нитрид алюминия ($180...240 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и окись бериллия ($200...260 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). В работе [2] описывается устройство для отвода тепла в виде пластины из анизотропного углерода, заключённого в герметизирующий изоляционный материал, нанесённый непосредственно на анизотропный углерод, причём анизотропный углерод является пирографитом, который имеет теплопроводность в одной плоскости в пределах от 1550 до $1850 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, а в другой – от 300 до $420 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Для образования электрических контактов на поверхности анизотропного углерода с герметизирующим изоляционным материалом наносят покрытия из металлов для размещения электрических устройств. Недостатком теплоотводящего устройства является низкая механическая прочность анизотропного углерода, сложность механической обработки тонких пластин из него. Нанесённые органические покрытия ограничивают способы металлизации конструкции из-за невозможности нагрева выше $+300^\circ\text{C}$.

Разновидностью графита являются углеродные нанотрубки, которые представляют собой протяжённые структуры, состоящие из свернутых в однослойную (ОСНТ) или многослойную (МСНТ) трубку графитовых слоев. Наименьший диаметр нанотрубки – $0,714 \text{ нм}$, что соответствует диаметру молекулы фуллерена C_{60} . Расстояние между слоями практически всегда составляет $0,34 \text{ нм}$, что соответствует расстоянию между слоями в графите. Длина таких образований достигает десятков микрон и на несколько порядков превышает их диаметр. Основные свойства нанотрубок: малые размеры,

электропроводность, механическая прочность, химическая стабильность и очень высокая теплопроводность, достигающая 6000 Вт/м·К, в то время как теплопроводность чистого алмаза составляет 3320 Вт/м·К (см. табл.).

В работе [3] в качестве анизотропного теплопередающего элемента используется анизотропный наноконпозиционный материал, в котором теплопроводящие углеродные нанотрубки ориентированы в заданном направлении – от тепловыделяющего элемента к теплопоглощающему элементу, т.е. наноконпозиционный элемент обладает направленной теплопроводностью.

Анизотропный элемент имеет форму плоского или круглого кабеля, тепло передается от одного конца кабеля в сторону другого конца, при этом минимальное количество тепла передается через боковые стороны или стенки кабеля. Теплопроводность вдоль одного направления в несколько раз больше, чем теплопроводность в перпендикулярном направлении, благодаря чему образуется эффективный теплопровод. При этом тепло направленно отводится от места расположения тепловыделяющих элементов, температура которых находится вблизи предельных рабочих температур.

Образование нанотрубками многократно скрученных между собой, случайным образом ориентированных спиралевидных структур приводит к возникновению внутри материала нанотрубок значительного количества полостей нанометрового размера, доступных для проникновения извне жидкостей или газов. В результате удельная поверхность материала, составленного из нанотрубок (в случае однослойной нанотрубки) составляет около 600 м²/г. Столь высокое значение удельной поверхности нанотрубок позволяет использовать их в качестве пористого материала. Нанотрубки с открытым концом проявляют капиллярный эффект и способны втягивать в себя расплавленные металлы и другие жидкие вещества, что открывает перспективу пропитки таких трубок металлами и неорганическими материалами. Очень высокая теплопроводность в сочетании с возможностью пропитки позволяет рассматривать углеродные нанотрубки в качестве основы для создания теплоотводящих элементов для микроэлектроники. До недавнего времени был известен только один материал, превосходящий перечисленные

Физико-механические характеристики углеродных нанотрубок

Характеристики \ Материал	Алюминий	Медь	Алмаз	Однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ)	Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ)
Модуль Юнга, ГПа	70	120	–	1054	1200
Прочность на изгиб, ГПа	0,07...0,15	0,14...0,28	–	150	200
Плотность, г/см ³	2,70	8,96	3,47...4,55	2,23...2,60	
Теплопроводность, Вт/м·К	180-220	370...410	900...3320	3000...6000	
Электропроводность, См/м	3,77×10 ⁷	5,95×10 ⁷	–	1×10 ⁵ ...1×10 ⁷	

выше материалы по теплопроводности – это алмаз со своим выдающимся значением ~ 3320 Вт/м·К, однако из-за высокой стоимости он использовался в электронных компонентах в основном в виде пленки, рассеивающей тепло. Поэтому перспективными материалами для замены алмаза являются специализированные анизотропные композиты на основе углеродных нанотрубок. По оценкам, отдельные углеродные нанотрубки обладают очень высокой теплопроводностью – 6000 Вт/м·К [4–7], что позволило создать к настоящему времени широкий ассортимент углеродных нанотрубок различных типов и форм.

В экспериментах с полимерными композициями, заполненными углеродными нанотрубками, при помощи метода лазерной вспышки обнаружено увеличение температуро- и теплопроводности при комнатной температуре [8]. Результаты показывают, что в полимерах, содержащих УНТ, теплофизические свойства зависят от ориентации. Если нанотрубки расположены параллельно одной плоскости, то теплопроводность в этой плоскости в 10 раз выше по сравнению с плоскостью, перпендикулярной всем УНТ.

Улучшение теплопроводности композитов на основе нанотрубок и полимеров произошло за счёт использования отличной теплопроводности углеродных нанотрубок, намного превышающей теплопроводность любых других материалов [9–12]. В одной из разработок для улучшения теплоотвода от транзистора высокой мощности применили микроканальную систему жидкостного охлаждения, использующую матрицу из углеродных нанотрубок. Применяя в качестве охлаждающей жидкости поток воды, удалось добиться улучшения эффективности охлаждения на 15 Вт·см² [13–14].

В работе [15] сообщается об использовании для охлаждения кремниевых чипов нанотрубок, интегрирован-

ных непосредственно на компонентах. Этот метод не мог быть реализован ранее из-за проблем, связанных с интеграцией нанотрубочных структур прямо на чипы. Данные проблемы вызваны тем, что обычные температуры выращивания нанотрубок намного превышают температуры, которые способны выдерживать функциональные кремниевые элементы микропроцессоров.

Целью настоящей работы является снижение теплового сопротивления, повышение кондуктивной теплопроводности и эффективности отвода тепла от тепловыделяющего активного элемента ГИС к теплоотводнику за счёт повышения уровня тепловых характеристик керамики из нитрида алюминия с помощью осаждённых на её поверхностях слоёв вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, пропитанных кремнием и покрытых металлизационными слоями.

Исходные материалы и методика эксперимента

В экспериментах использовались пластины из керамики на основе нитрида алюминия в виде диска диаметром 17,7 мм и толщиной 2,0 мм и толстые плёнки, состоящие из многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) высотой 0,5 мм. Эти плёнки были выращены методом каталитического химического осаждения из газовой фазы (CVD) при использовании смеси газов, состоящей из 2–5–10 мас.-%го раствора ферроцена в толуоле. Для пропитки МУНТ жидким кремнием (силицирования) использовались пластины монокристаллического кремния марки КЭФ. Для соединения элементов между собой напылялось многослойное металлизационное покрытие, состоящее из адгезионного подслоя хрома толщиной 0,3...0,5 мкм и слоя меди толщиной 7...8 мкм, которые покрывались гальваническим золотом толщиной 1...3 мкм.

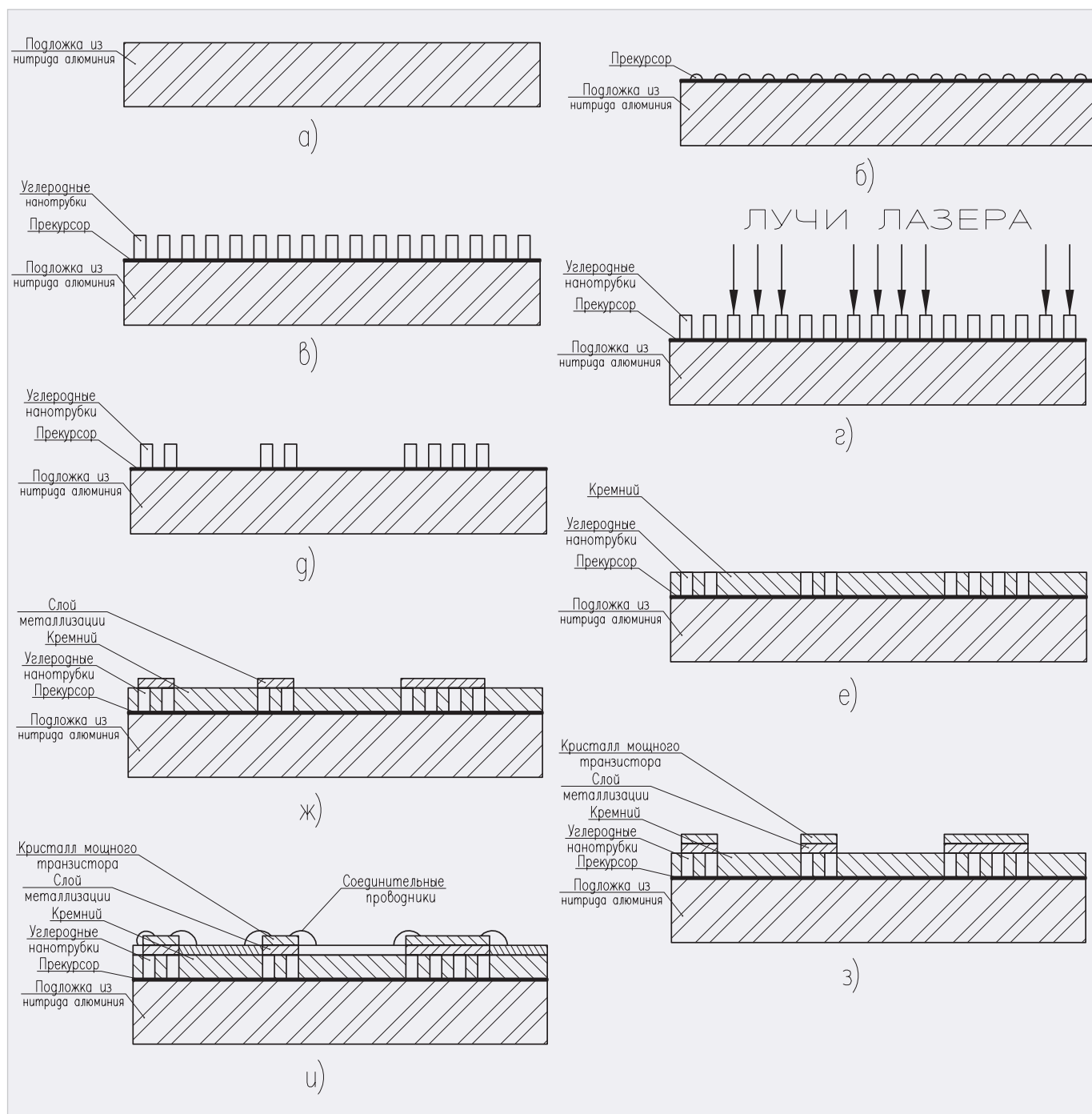


Рис. 1. Конструкция и последовательность операций изготовления гибридной интегральной схемы из осаждённого на поверхностях керамики из нитрида алюминия слоя вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, пропитанных кремнием и с нанесёнными на эти поверхности слоями металлов

Конструкция гибридной интегральной схемы из осаждённого на поверхностях керамики из нитрида алюминия слоя вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, пропитанных кремнием и с нанесёнными на эти поверхности слоями металлов, представлена на рисунке 1.

Конструкция гибридной интегральной схемы состоит из отшлифованной пластины из керамики на основе нитрида алюминия (а), на которую нанесён слой прекурсора (б) со сформировавшимися каталитическими центрами, из которых

выращен массив УНТ (в) (см. рис. 1). После обработки алюмонитридной пластины с нанесённым массивом УНТ лазерным излучением (г) по специальной программе с целью получения пробельных мест топологического рисунка схемы, часть массива УНТ (д) удалена за счёт сгорания на воздухе УНТ при воздействии на них луча лазера. В процессе пропитки расплавленным кремнием внутренние полости оставшихся УНТ и участки с удалёнными из массива УНТ (пробельные места) заполняются кремнием (е). После пропитки расплавленным кремнием на участки с не

удалёнными УНТ из массива для получения топологического рисунка схемы нанесён слой металлизации (ж). После травления слоя металлизации и получения топологического рисунка, на участки алюмонитридной пластины с УНТ, пропитанными кремнием и с нанесённым слоем металлизации, установлены кристаллы мощных транзисторов (з). Затем методом ультразвуковой сварки контактные площадки кристаллов мощных транзисторов соединялись алюминиевой проволокой с тонкоплёночными пассивными элементами гибридной интегральной схемы (и).

Гибридную интегральную схему на основе керамики из нитрида алюминия с вертикально ориентированными углеродными нанотрубками, пропитанными кремнием, изготавливали следующим образом.

Пластину в виде диска из нитрида алюминия (AlN) диаметром 17,7 мм и толщиной 2,0 мм перед нанесением углеродных нанотрубок (УНТ) шлифовали до обеспечения шероховатости поверхности с размером микронеровностей 0,63 мкм, после чего производилась очистка от загрязнений, которая проводилась в три цикла в деионизированной воде в УЗ-ванне при температуре +50°C. Затем изготавливался структурированный массив вертикально ориентированных УНТ методом CVD-синтеза при термическом разложении углеводородов. Синтез УНТ осуществлялся на шлифованных подложках из нитрида алюминия (AlN) и проходил при атмосферном давлении, температуре +800°C и скорости потока газа носителя 600 мл/мин. В качестве прекурсора использовался 2, 5 и 10%-й раствор ферроцена в толуоле.

Теплопроводные характеристики слоя из вертикально ориентированных нанотрубок обеспечивались структурой массивов УНТ. Так как длина нанотрубки влияет на тепловое сопротивление, то высота массива УНТ является важным параметром. Поэтому необходимо было точно контролировать основные параметры синтеза, влияющие на высоту массива (температуру синтеза, скорость подачи газа носителя и время синтеза), а также осуществлять визуальный контроль процесса роста УНТ. При выращивании нанотрубок в толуол добавляли ферроцен, который являлся прекурсором катализатора роста слоя из вертикально ориентированных УНТ. При изготовлении массива УНТ использовался CVD-реактор, для которого были определены условия синтеза массивов УНТ на алумонитридных подложках из паров 2, 5 и 10 мас.%-го раствора ферроцена в толуоле.

Скорость подачи прекурсора в реактор составляла 0,1 мл/мин. В ходе работы были уточнены следующие параметры: температура синтеза – +800°C; скорость потока газа носителя – 200 мл/мин, время синтеза – 1 ч. После проведения часового CVD-синтеза высота массива УНТ составляла порядка 500 мкм. УНТ в полученном массиве равномерно распределены по поверхности алумонитридной пласти-

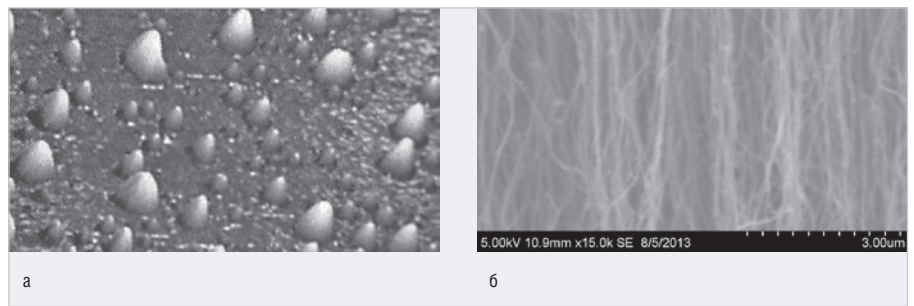


Рис. 2. Микрофотографии дисков из нитрида алюминия с осаждёнными УНТ с использованием прекурсора в виде раствора ферроцена в толуоле: вид слоя прекурсора со сформировавшимися каталитическими центрами УНТ (а) и вид в поперечном сечении массива из вертикально ориентированных УНТ (б)

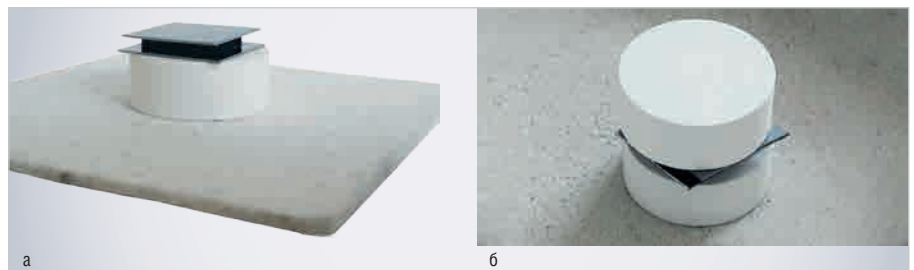


Рис. 3. Пластина из нитрида алюминия с выращенными УНТ, размещённая между 2-х пластин кремния, установленных на цилиндре из гексагонального нитрида бора (а) и на плите из огнеупора (б)

ны, что подтверждает одинаковую скорость роста УНТ на всей её поверхности. Полученный массив УНТ (см. рис. 2) состоял из многослойных УНТ (плотность трубок в массиве со средним диаметром 30–60 нм, выборка и подсчёт диаметра проводятся более чем по 10 микрофотографиям, включающим более 100 нанотрубок) и расстояние между ними в виде образовавшихся пор размером 3–5 нм. В связи с тем, что УНТ являются проводниками, для обеспечения электрической изоляции элементов друг от друга при формировании топологического рисунка проводилась обработка поверхности массива УНТ с помощью излучения ИК-лазера. Обработка образцов массивов на алумонитридных пластинах с вертикально ориентированными УНТ осуществлялась лазерным излучением на установке лазерного профилирования. Основываясь на измеренном спектре поглощения массива УНТ, была выбрана длина волны лазера ~10 мкм. При проходе лазера мощностью несколько десятков ватт по поверхности массива луч выжигал часть углеродного материала. Скорость прохождения луча составляла 17 мм/с. В результате массив УНТ приобретал чётко структурированный узор в виде участков топологического рисунка, на которые в дальнейшем после пропитки кремнием будут установлены кристаллы мощных транзисторов. Затем на обра-

зец методом напыления наносили многослойную металлизацию и формировали методом фотолитографии рисунок в соответствии с принципиальной электрической схемой, а также схемой монтажа и присоединения выводов тонкоплёночных элементов ГИС к выводам на кристаллах транзисторов.

После лазерной обработки для пропитки жидким кремнием (силицирования) участков из вертикально ориентированных УНТ сверху и снизу диска из алумонитридной керамики устанавливали пластины из монокристаллического кремния марки КЭФ, а всю эту сборку помещали на шайбу из гексагонального нитрида бора (см. рис. 3), которую прижимали грузом из такой же шайбы.

Силицирование вертикально ориентированных УНТ проводили в вакуумной печи Camso (см. рис. 4) с использованием монокристаллического кремния марки КЭФ в качестве реакционного источника. Пластины из нитрида алюминия с участками УНТ с размещёнными на них сверху образцами монокристаллического кремния устанавливали в специальный тигель (см. рис. 5) и помещали в реактор, расположенный в рабочей зоне вакуумной печи и представляющий собой многослойный стакан из листов молибдена и с молибденовыми нагревателями, смонтированными на внутренней



Рис. 4. Установка Самсо для пропитки УНТ кремнием



Рис. 5. Тигель без крышки для проведения пропитки УНТ кремнием, установленный в керамической огнеупорной лодочке



Рис. 6. Вакуумная камера установки Самсо с установленным диском из нитрида алюминия с УНТ и пластинами кремния перед пропиткой

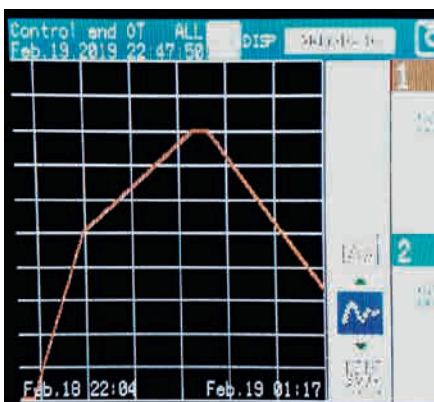


Рис. 7. График пропитки УНТ кремнием

поверхности стакана (см. рис. 6). Пропитку (силицирование) проводили при +1500...1600°C и остаточном давлении в вакуумной камере $10^{-3}...10^{-1}$ Па в течение 15 мин с последующим охлаждением печи до комнатной температуры. График пропитки УНТ представлен на рисунке 7. Особенностью пропитки является быстрый нагрев образцов с УНТ от начальной температуры +20°C до +1550°C в течение 45 мин. со скоростью 33 градуса/минуту для того, чтобы не произошло полного растворения УНТ в жидком кремнии.

В ходе пропитки протекала реакция силицирования, в результате чего поверхность вертикально ориентированных УНТ насыщалась кремнием с формированием кремнийсодержащей фазы – SiC, количественное соотношение которой к кремнию определялось продолжительностью термической обработки. В результате взаимодействия жидкого кремния с углеродом УНТ на их поверхностях образовывался карбид кремния, при этом на пробельных местах оставался кремний. Наибольшей адгезией обладал слой с пропитанными кремнием УНТ, синтез которых осуществлялся на шлифованных подложках из нитрида алюминия, и в качестве прекурсора использовался 10%-й раствор ферроцена в толуоле.

После силицирования пропитанная кремнием поверхность диска из нитрида алюминия шлифовалась и полировалась до уровня шероховатости 0,02 мкм, очищалась от загрязнений в перекисно-аммиачном растворе, и на эту подготовленную поверхность напылялись на установке магнетронного напыления «Оратория-5» последовательно адгезионный подслоя хрома толщиной 0,3...0,5 мкм и слой меди толщиной 7–8 мкм, которые покрывались гальваническим золотом толщиной 1–3 мкм. Затем на участки с УНТ, пропитанными

кремнием, монтировались кристаллы мощных транзисторов методом пайки припоем из сплава золото-кремний при температуре +500°C, после чего контактные площадки кристаллов соединялись алюминиевой проволокой с тонкоплёночными пассивными элементами гибридной интегральной схемы.

Результаты эксперимента

Согласно разработанной технологии изготовления ГИС участки вертикально ориентированных УНТ подвергаются химическому модифицированию путем их обработки расплавленным кремнием Si при температуре выше +1500°C, после чего поверхности силицированных углеродных нанотрубок покрываются карбидом кремния (SiC). После пропитки УНТ кремнием были изготовлены аншлифы для проведения исследований полученной микроструктуры в поперечном сечении (см. рис. 8). Как видно на микрофотографии, массив УНТ (средний слой чёрного цвета) расположен между пластиной из нитрида алюминия (верхний слой) и пластиной кремния (нижний светлый слой). В микроструктуре массива УНТ (см. рис. 9), пропитанного кремнием, на границе с нитридом алюминия наблюдаются отдельные белые вкрапления кремния и многочисленные микропоры, расположенные между нанотрубками. Микроструктура массива УНТ на границе с пластиной кремния более плотная за счёт кремния, заполнившего микропоры каркаса массива УНТ. Строение и расположение нанотрубок на рисунке 10 то же, что и на рисунке 9, но участки между сероватыми нанотрубками, покрытыми карбидом кремния, заполнены кремнием, имеющим более светлую окраску. При более сильном увеличении микроструктуры пропитанных УНТ серые участки карбида кремния на нананотрубках и светлые участки кремния становятся хорошо различимы, что позволяет на основании исследований приведенной микроструктуры сделать вывод о полном проникновении кремния в массив УНТ, качественном сцеплении кремния с УНТ за счёт образования на поверхности УНТ карбида кремния.

Проведение силицирования при +1500...+1600°C позволяет вскрыть большую часть закрытых пор в массиве УНТ и сформировать на их стенках слой SiC при минимальном заполнении объема пор свободным кремнием, который удерживается в мелких порах только в силу капиллярного эффекта,

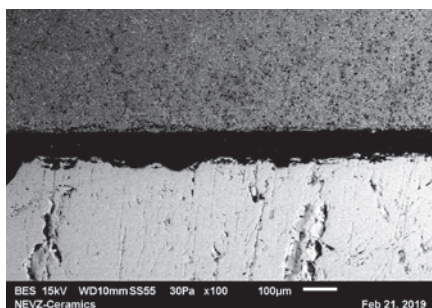


Рис. 8. Микрофотография массива УНТ (средний слой чёрного цвета), выращенных на пластине из нитрида алюминия (верхний слой), после пропитки кремнием (нижний слой)

и таким образом получить слой вертикально ориентированных УНТ с низкой пористостью, в котором углеродные нанотрубки сохраняются некарбидизированными и обеспечивают высокую теплопроводность вдоль своей оси.

Появляется новое свойство разработанной конструкции ГИС – способность обеспечить введение в УНТ сравнительно небольшого количества Si и при этом перевести часть кремния в карбид кремния, не допустив карбидизации всего тела многослойных углеродных нанотрубок. Новое свойство позволяет повысить теплопроводность в продольном и поперечных сечениях участков ГИС с УНТ.

Разработанная технология позволяет при использовании для силицирования пластины из монокристаллического кремния марки КЭФ за счёт сравнительно высокой открытой пористости участков из вертикально ориентированных УНТ получить слой с высоким содержанием SiC как внутри УНТ, так и на их внешних поверхностях. Большая часть избыточного кремния Si после силицирования остаётся на пробельных местах ГИС между участками с УНТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание технологического процесса пропитки УНТ кремнием обеспечивает получение теплопроводящего слоя с содержанием SiC на внешних поверхностях УНТ и малым содержанием свободного Si внутри трубок, что позволяет повысить общую теплопроводность за счёт высокой теплопроводности УНТ и теплопроводности Si, которая в 2 раза выше теплопроводности SiC.

Проведение силицирования при +1500...+1600°C позволяет также вскрыть большую часть закрытых пор углеродного материала и сформировать на их стенках слой SiC при минимальном заполнении объёма пор свободным кремнием, который удерживается в мелких порах только в силу капиллярного эффекта, и таким образом получить высокотеплопроводящие участки на поверхности пластины из нитрида алюминия.

Для получения различных топологических рисунков ГИС проводилось лазерное профилирование образцов алюмонитридных пластин с исходной высотой УНТ в массивах 500 мкм. Для применения в ГИС теплоотводящих элементов на основе профилированных массивов УНТ важным является определение влияния размера и высоты УНТ на

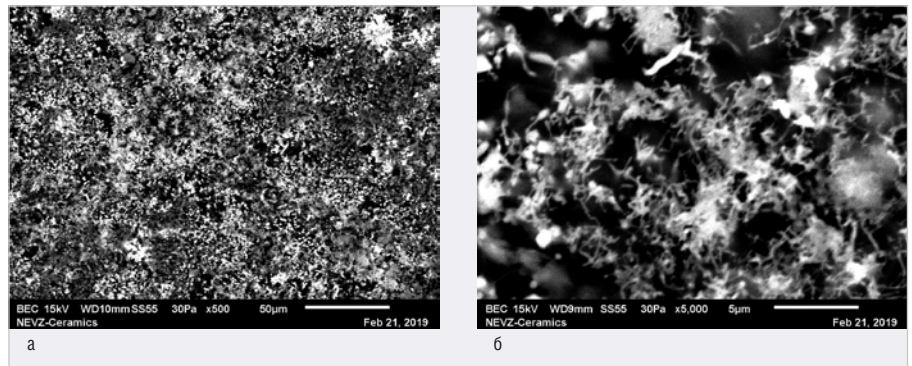


Рис. 9. Микрофотография УНТ, пропитанных кремнием, на границе с нитридом алюминия при увеличении: а) $\times 500$; б) $\times 5000$

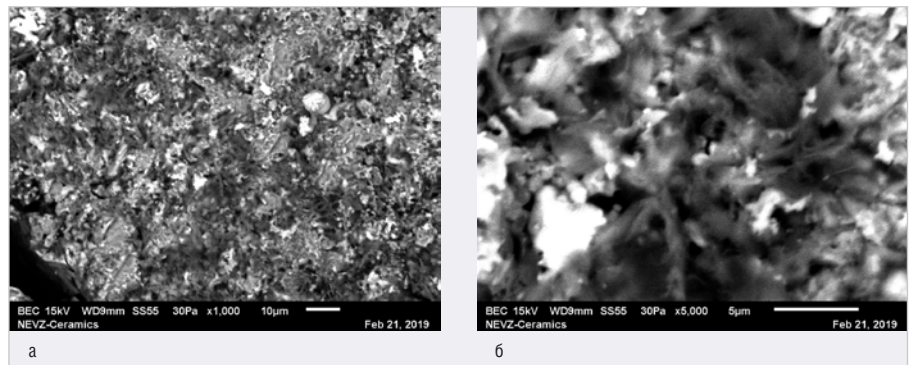


Рис. 10. Микрофотография УНТ на границе с пластиной кремния после пропитки при увеличении: а) $\times 1000$; б) $\times 5000$

тепловые характеристики теплоотвода. Размеры УНТ из массивов и расстояние между ними также были выбраны, исходя из условий обеспечения электрической и тепловой изоляции одиночных участков УНТ. Увеличение расстояния между одиночными участками УНТ, на которых размещаются тепловыделяющие элементы (кристаллы мощных транзисторов), значительно снижает взаимный нагрев соседних с нанотрубками участков, что позволяет использовать такие профилированные теплоотводящие элементы для многокристалльных микросборок ГИС.

Измерения коэффициента теплопроводности методом лазерной вспышки участков с вертикально ориентированными УНТ, пропитанных кремнием, показали, что значение коэффициента теплопроводности находится в диапазоне 2000...2770 Вт/м·К.

После профилирования массива УНТ на поверхности подложки образовались теплопроводные участки, расположенные в соответствии с топологическим рисунком схемы ГИС, на которых затем монтировались кристаллы мощных транзисторов. Таким образом, профилирование массива вертикально ориентированных УНТ позволяет локализовать участки

для размещения активных элементов, выделяющих тепло, обеспечить электрическую изоляцию элементов схемы друг от друга, исключить суперпозицию тепловых полей и влияние теплового поля одного активного элемента на тепловое поле и работу другого активного элемента. Данная технология полностью совместима с технологией интегральных схем (ИС) и позволяет создавать ИС в 3D-конфигурации с формированием активных и пассивных элементов как в объёме кремния, так и на его поверхности в виде навесных компонентов, соединённых с помощью топологического рисунка из слоёв металлизации и алюминиевой проволоки.

Таким образом, появляется перспектива создания нового класса монолитных микросхем со структурой УНТ, пропитанных кремнием, аналогичных микросхемам со структурой «кремний на сапфире», но только значительно более мощных и сочетающих технологии монолитных и гибридно-интегральных схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ 2270821 Теплопроводящий материал, кл.С04В35/528, заявл. 10.09.2001, опубл. 20.11.2004.

2. Патент РФ № 2256307 Устройство отвода тепла (варианты), электрическая система, содержащая устройство отвода тепла (варианты), способ изготовления устройства отвода тепла (варианты) и способ изготовления электрического компонента (варианты), кл.Н05К7/20, G06F1/20, H01L23/373, заявл. 08.07.1999, опубл. 10.07.2005
3. Патент РФ № 2516078 Применение композитов с выровненными нанотрубками для теплопередачи в скважинах, кл. F28F21/02, B81B1/00, E21B 12/00, заявл. 10.09.2011, опубл. 20.05.2014
4. M. S. Dresselhaus, and P. C. Eklund. Phonons in carbon nanotubes, Adv. Phys. 49, 705-814 (2000).
5. A. Y. Cao, V. Veedu, X. S. Li, Z. Yao, M. N. Ghasemi-Nejhad and P. M. Ajayan. Multifunctional brushes made of carbon nanotubes, Nature Mater. 4, 540 (2005).
6. X. S. Li, A. Y. Cao, Y. J. Jung, R. Vajtai and P. M. Ajayan. Bottomup growth of carbon nanotube multilayers: Unprecedented growth Nano Lett. 5, 1997(2005).
7. S. Talapatra, S. Kar, S. K. Pal, R. Vajtai, L. Ci, P. Victor, M. M. Shaijumon, S. Kaur, O. Nalamasu and P. M. Ajayan. Direct growth of aligned carbon nanotubes on bulk metals, Nature Nanotech., 1, 112 (2006).
8. Erwin Kaisersberger. Определение теплофизических характеристик наноматериалов. NETZSCH-Geraetebau GmbH, Wittelsbacherstr. 42,95100 Selb, Germany www.netzsch-thermal-analysis.com.
9. M. J. Biercuk, M. C. Llaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hyun, A. T. Johnson, and J. E. Fischer. Carbon nanotube composites for thermal management, Appl. Phys Lett. 80, 2767 (2002).
10. Y. Wu, C. H. Liu, H. Huang and S. S. Fan. Effects of surface metal layer on the thermal contact resistance of carbon nanotube arrays, Appl. Phys. Lett. 87, 213108(2005).
11. C-W. Nan, Z. Shi and Y. Lin. A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites, Chem. Phys. Lett. 375, 666 (2003).
12. J. Hone, M. C. Liaguno, M. J. Biercuk, A. T. Johnson, B. Batlogg, Z. Benes and J. E. Fischer. Thermal properties of carbon nanotubes and nano-tube-based materials, Appl. Phys. A 74, 339 (2002).
13. M. Zbimin, R. Morjan, J. Anderson, E. E. B. Campbell and J. Liu. Integrated nanotube microcooler for microelectronics applications, IEEE 55 Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, FL, 31 May 2005. Proa, pp. 51-54 (2005).
14. M. Zbimin, J. Anderson and J. Liu. Integrating nano carbontubes with microchannel cooler, IEEE 6 High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis Conference, Shanghai, China, 30^June 2004. Proa, pp. 373 - 376 (2004).
15. K. Kordas, G. Toth, P. Moilanen, M. Kumpumaki, A. Uusimaki, J. Vabakangas, R. Vajtai, P.M. Ajayan. Chip cooling with integrated carbon nanotube microfin architectures, Appl. Phys. Lett. 90, 123105 (2007).



НОВОСТИ МИРА

Новостной телетайп

Министерство обороны США инвестирует \$170 млн в производителя микроэлектроники Skywater Technology для совершенствования технологии производства RadHard-полупроводников. Данный завод был построен ещё в 80-х годах прошлого века известной компьютерной компанией Control Data. В 1991 году фабрика была куплена компанией Cypress Semiconductor и, эволюционировав из топологических норм 350 нм в 65 нм, была в 2017 году куплена частным инвестфондом Oxbow Industries. Фабрика имеет аккредитацию категории А от DMEA (Defense Microelectronics Activity – лаборатория Минобороны США), что позволяет ей выпускать продукцию для нужд обороны и космоса. Можно отметить, что в 2017 году 78 полупроводниковых компаний США имели такой статус.

Победой компании Power Integration завершается многолетний патентный спор, начатый в далёком 2004 году иском к компании Fairchild по нарушению 4-х патентов на ШИМ-контроллеры. После покупки Fairchild в 2016 году компанией ON Semiconductor последняя подавала встречные иски, но теперь, по данным SEC, компании договорились о мировом соглашении, по которому ON Semiconductor выплатит компенсацию в размере \$175 млн. Что составляет, примерно, половину годового оборота Power Integration.

Как стало известно, компания Texas Instruments (TI) после 25-ти лет сотрудниче-

ства решила прекратить дистрибьюторское соглашение с компанией Avnet. Для TI, являющейся многолетним лидером рынка аналоговых микросхем, такое решение закономерно – начиная с 2017 года компания методично оптимизирует свои дистрибьюторские каналы (около 6 соглашений о дистрибуции было расторгнуто), отдавая предпочтение прямым поставкам конечным потребителям. Для Avnet это решение довольно болезненно – доля продукции TI в линейке 2019 года составляла около 10%. Таким образом, через год в регионе EMEA у TI, вероятно, останется 8 дистрибьюторов. И что удивительно, два из них российские: «Компэл» и «МТ-Системс».

Достаточно редкую модель трансформации бизнеса продемонстрировала компания CUI, ведущая свою родословную с 1989 года. Начиналось всё с осциллографических щупов и электро-механических компонентов. Позднее компания освоила нишу AC/DC- и DC/DC-преобразователей, которые в настоящее время составляют 64% оборота подразделения P&EM. Начиная примерно с 2009 года, компания стала активно развиваться в секторе системной электротехники, создавая сетевые платформы для разных отраслей, и постепенно это стало основным бизнесом компании CUI Global. По этой причине компания решила продать часть своего P&EM-подразделения руководителям и основателям направлений: соединители, аудио компоненты, термокомпоненты и датчики, вклад которых в оборот компании достиг \$30 млн

в 2018 году. Сумма сделки составила \$15 млн и по её условиям 40 сотрудников переходят в новую компанию CUI Devices, которая сохранит тесные производственные отношения с «родительской».

Появилась информация о планах компании Panasonic продать свой полупроводниковый бизнес (Panasonic Semiconductor Solutions) тайваньской компании Nuvoton Technology. В последние годы японский вендор старается перейти на лайт-модель бизнеса, свидетельством чему было и создание в 2017 году СП с израильским производителем Tower Jazz, в которое было передано три японских завода.

Dialog Semiconductor покупает за \$100 млн небольшую немецкую компанию-разработчика Creativechips. Фирма ведёт свою историю с 1999 года, когда 7 первых сотрудников начали разработку заказных ИС в городке Бинген-на-Рейне (Германия). Сейчас в компании работают 64 сотрудника, а сама фирма имеет два филиала (в США и Японии). Есть ещё офис в Дрездене, где в 80-е годы учился и получил докторскую степень один из основателей компании Лутц Поромбка. Компания специализируется на разработке ASIC (аналого-цифровых, интерфейсных), а также датчиков, главным образом для промышленных и автомобильных применений. Покупателю интересны опыт компании в сфере промышленного Интернета вещей.

Новостная рассылка проекта «Мониторинг рынка электроники»



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



Главное событие отрасли
в России и странах СНГ

ФОТОНИКА МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ

31 марта – 3 апреля 2020

При поддержке Министерства
промышленности и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ



Реклама 12+



15-я юбилейная международная
специализированная выставка
лазерной, оптической
и оптоэлектронной техники

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»
www.photonics-expo.ru



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

60 ЭКСПОЦЕНТР