Изготовление ГИС СВЧ на алюмонитридных подложках со сквозными отверстиями, заполненными поликристаллическим алмазом

Юрий Непочатов (nuk3d@mail.ru), **Владимир Свинаренко** (г. Новосибирск), **Игорь Белашов** (г. Троицк)

С увеличением мощности полупроводниковых приборов СВЧ, требующих эффективного рассеяния тепла, возникает необходимость использования материалов с высокой теплопроводностью. Такими материалами являются оксид бериллия, нитрид алюминия и алмаз. В настоящей статье представлены результаты разработки технологии изготовления гибридных интегральных схем СВЧ-диапазона (ГИС СВЧ) на подложке из алюмонитридной керамики с отверстиями, заполненными поликристаллическим алмазом. Полученная подложка может найти применение в СВЧ-микроэлектронике при создании мощных диодов, транзисторов из нитрида и арсенида галлия и устройств на их основе.

Введение

Твердотельная СВЧ-электроника начала интенсивно развиваться с появлением кремниевых, а затем арсенидгаллиевых и нитридгаллиевых СВЧ-транзисторов с приемлемыми параметрами по коэффициенту усиления, коэффициенту шума, КПД и выходной мощности в СВЧ-диапазоне. Большая номенклатура, многофункциональность, сложность реализации технических характеристик при небольшой потребности (в основном – в военной технике) изначально направили развитие твердотельной СВЧ-электроники по пути технологии гибридных интегральных схем (ГИС). Эта технология представляет собой изготовление отдельных активных и пассивных компонентов (транзисторов, конденсаторов, линий задержки, ключей) в виде отдельных элементов, объединённых в ГИС.

Внедрение гибридной технологии на первых этапах развития твердотельной СВЧ-электроники за счёт несложных технологических приёмов – разварки, пайки, склеивания – при резком увеличении функциональных возможностей СВЧ-аппаратуры обеспечило высокие технические характеристики и приемлемую надёжность, а также резко снизило вес, габариты и стоимость аппаратуры. Добиться этого получилось за счёт использования компонентов высокого качества и подстройки в процессе изготовления ГИС. С развитием технологии арсенида галлия появились монолитные СВЧ-интегральные схемы (МИС СВЧ), в которых активные и пассивные СВЧ-компоненты изготавливаются на одном кристалле и в едином технологическом цикле. Эта технология открыла перспективы создания более сложных СВЧ-систем с повышенной надёжностью, меньшим весом и габаритами, в том числе наземных и бортовых систем радиолокации с активными фазированными решетками (АФАР) [1].

Основным элементом конструкции ГИС СВЧ является металлизированная керамическая подложка, на которой запроектированы рисунок схемы, пассивные элементы (индуктивности, конденсаторы и резисторы) и полупроводниковые кристаллы. При этом подложка выполняет две основные функции. Во-первых, осуществляется электрическая изоляция токоведущих шин топологического рисунка, расположенных на одной стороне, друг напротив друга, а также от токоведущих шин на другой стороне. Во-вторых, подложка передаёт тепло, выделяемое активными элементами, на теплоотводы и радиаторы. Керамическая подложка имеет относительно высокую механическую и электрическую прочность, малый коэффициент теплового расширения и способна образовывать соединения с металлами. Также подложка обеспечивает низкие диэлектрические потери при высокой температуре. Значительная часть керамических подложек в радио- и электронной технике подвергается металлизации. Металлизационное покрытие наносят на подложку для создания токопроводящего слоя на определённой её части, к которой присоединяют полупроводниковый кристалл и выводы, соединяющие изделие с корпусом полупроводникового прибора. Металлизация может также служить в качестве электродов конденсаторов, витков катушек индуктивностей и промежуточным слоем для соединения подложки с металлическим основанием или арматурой корпуса с помощью пайки. Металлизационный слой создаёт смачивающуюся припоем поверхность и позволяет получить прочное паяное соединение керамической подложки с металлическим основанием [2].

Передовые достижения в СВЧ-электронике несколько последних десятилетий в значительной степени связываются с успехами, достигнутыми в области разработки новых материалов и материаловедении сложных полупроводниковых соединений и наногетероструктур. Использование новых материалов при изготовлении ГИС и МИС СВЧ позволяет увеличить мощность схем, расширить частотный диапазон разрабатываемых устройств, улучшить их тактико-технические характеристики и, что крайне важно в условиях требований постоянной миниатюризации, уменьшить их массогабаритные параметры. Можно существенно уменьшить габариты, если использовать бескорпусные кристаллы диодов и транзисторов, но при этом возникает проблема отвода тепла, выделяющегося при работе этих приборов. Дополнительная сложность заключается в том, что кристаллы, как правило, должны быть электрически изолированы от корпуса. В этом случае проблема эффективного отвода тепла решается путём использования теплоотводящего основания из меди, алюминия, керамики на основе оксида бериллия, нитрида бора и карбида кремния. В тех случаях, когда требуется одновременно обеспечить отвод тепла от кристалла полупроводникового прибора и

электрическое соединение с металлическими пластинами-теплоотводами или с корпусом, используются металлизированные отверстия, заполненные металлом с высокой теплопроводностью [1]. В случаях, когда необходима электрическая изоляция от корпуса прибора или устройства, применяются неметаллические теплоотводы в виде подложек из алюмонитридной керамики и алмаза [3].

В статье [4] описываются конструкции и методы изготовления ГИС СВЧ, использующих подложки с низкими значениями диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь (кварц, поликор, сапфир и другие), на которых по тонкоплёночной технологии формируются элементы линий передачи и согласования, пассивные элементы и контактные площадки для установки кристаллов активных элементов. Недостатком таких ГИС СВЧ является неэффективный отвод тепла от кристаллов активных элементов из-за низкого коэффициента теплопроводности указанных выше диэлектрических материалов, что не позволяет значительно снизить тепловое сопротивление и ограничивает возможности создания мощных ГИС СВЧ.

В статье [5] изложен способ изготовления интегральной СВЧ-схемы сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, заключающийся в формировании активных и пассивных элементов, элементов линий передачи и согласования на полуизолирующей подложке из арсенида галлия (GaAs) с выращенными на ней методом эпитаксии слоями заданной рабочей структуры. При этом пассивные элементы, элементы линий передачи и согласования формируются в едином технологическом цикле с активными элементами. После этого пластину разделяют на отдельные чипы, каждый из которых представляет собой монолитную интегральную СВЧ-схему. Такая технология изготовления позволяет повысить воспроизводимость электрических характеристик и снизить трудоёмкость изготовления благодаря исключению операции монтажа кристаллов активных элементов. Однако использование полуизолирующей подложки из арсенида галлия не обеспечивает эффективного отвода тепла от активных элементов из-за низкого коэффициента теплопроводности материала подложки из арсенида галлия, что не позволяет уменьшить тепловое сопротивление цепи «активный элемент – корпус интегральной схемы СВЧ» и создавать интегральные СВЧ-схемы повышенной мощности.

В патенте РФ [6] описан способ изготовления интегральной СВЧ-схемы, включающий в себя: формирование методами тонкоплёночной технологии на диэлектрической подложке микрополосковых линий передачи, согласующих элементов и выводов; разделение подложки на отдельные чипы, каждый из которых содержит пассивную часть интегральной схемы; монтаж навесных кристаллов активных элементов. Интегральную СВЧ-схему изготавливают на диэлектрической подложке из алмаза толщиной 100...200 мкм, на которую наносят металлизационное покрытие в виде сплошного слоя одинаковой толщины (3–7 глубин скин-слоя) на обратной и торцевых сторонах. На лицевую сторону диэлектрической подложки наносят покрытие в виде локального слоя, а заземление интегральной схемы осуществляют посредством упомянутого металлизационного покрытия. Конструкция ГИС СВЧ позволяет значительно улучшить электрические характеристики и, прежде всего, повысить выходную мощность (более 1 Вт).

Однако возможности такой технологии изготовления с точки зрения получения более мощных ГИС СВЧ (мощных усилителей СВЧ, переключателей и умножителей) с выходной мощностью более 5 Вт весьма ограничены из-за низкой скорости осаждения алмаза и экономической нецелесообразности получения алмазного слоя толщиной больше 200 мкм. Ограничение толщины применяемых в теплоотводах алмазных пластин связано с тем, что их изготовление толщиной более 200 мкм сопряжено с определёнными трудностями. Пластины из монокристаллического алмаза ограничены по размерам и до́роги, а увеличение толщины пластин при сохранении скорости роста приводит к ухудшению теплопроводности. Снижение скорости роста приводит к резкому увеличению цены CVD-алмазной пластины.

Альтернативой дорогостоящим толстым пластинам полиалмаза в ряде случаев могут стать более тонкие (десятки микрометров) алмазные слои, нанесённые на стандартные диэлектрические подложки, например на AlN-керамику [7]. Это приводит к значительному (в 3–5 раз!) увеличению теплопроводности наиболее ответственного наружного слоя теплоотвода.

В связи с этим вопрос выбора материала для подложек стал особенно острым при создании современных мощных ГИС СВЧ с большой плотностью монтажа элементов. Подложки для таких приборов должны обладать высокой теплопроводностью, изоляционной способностью, механической прочностью, коэффициентом термического расширения (КТР), близким к КТР наиболее распространённых полупроводников: кремния, арсенида и нитрида галлия. Также подложки должны иметь низкие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, обеспечивать хорошую обрабатываемость (резку и полировку) и иметь невысокую стоимость. Из всех этих требований главным является значение теплопроводности, в наибольшей степени определяющей надёжность ГИС и МИС СВЧ, поскольку с увеличением температуры активных элементов резко возрастает скорость выхода их из строя (например, повышение температуры ГИС с +100 до +125°C увеличивает скорость возникновения в них дефектов в 5–6 раз). Значения теплопроводности некоторых неметаллических материалов подложек современных ГИС приведены в таблице 1.

Сопоставление перечисленных выше требований к подложкам с данными из таблицы 1 указывает на перспективность использования нитрида алюминия для подложек массовых ГИС СВЧ. Теплопроводность подложек из AlN определяется, как и для всех неметаллических материалов, фононным механизмом передачи тепла. Сравнение свойств подложек из AlN с подложками из Al_2O_3 и BeO приведено в таблице 2.

Теплопроводность керамики из AlN уменьшается с увеличением температуры (слабее, чем керамики из BeO), так что при +150°C она становится почти одинаковой с теплопроводностью BeO (см. рис. 1). Коэффициент термического расширения при комнатной температуре у AlN ($4{,}3\times10^{-6}$ 1/°C) близок к КТР кремния ($3{,}4\times10^{-6}$ 1/°C), арсенида галлия ($5{,}7\times10^{-6}$ 1/°C) и нитрида галлия ($4{,}0\times10^{-6}$ 1/°C), что позволяет получать

Таблица 1. Значения теплопроводности материалов, используемых в ГИС и МИС СВЧ

Материал	Теплопроводность, Вт /м•К	Примечание
Алмаз	2000–2200	Диэлектрик, высокая стоимость, трудно полируется
BN	1300	Диэлектрик, высокая стоимость, трудно полируется
SiC	380–490	Полупроводник, высокая стоимость
SiC+алмаз (скелетон)	380–600	Диэлектрик, трудно полируется
Si	140–150	Полупроводник
GaAs	46–50	Полупроводник
GaN	130	Полупроводник
BeO	240–280	Диэлектрик, высокая токсичность
AlN	160–240	Диэлектрик
Al_2O_3	20–40	Диэлектрик
Cu	380–400	Проводник
Al	180–220	Проводник

Таблица 2. Свойства подложек из AlN, Al_2O_3 и BeO

Свойства	Материал			
	AlN	92% Al_2O_3	99% Al_2O_3	BeO
Теплопроводность, Вт/м•К	180	17	25	260
Коэффициент термического расширения в диапазоне +20...+400°С, 10^{-6} 1/°С	4,3	6,5	6,8	7,5
Удельное электросопротивление, Ом•см	15×10^{13}	Более 10^{13}		
Диэлектрическая проницаемость при 1 МГц	8,9	8,5	9,7	6,7
при 10 МГц	8,0	8,9 (для 96% Al_2O_3)		6,6
Диэлектрические потери, ($\times10^4$) при 1 МГц	5	3	2	1
при 10 МГц	20	6 (для 96% Al_2O_3)		3
Прочность на изгиб, кгс/см^2	5000	3200	3100	2500
Твёрдость по Виккерсу, кгс/см^2	1200	2300–2700		1200

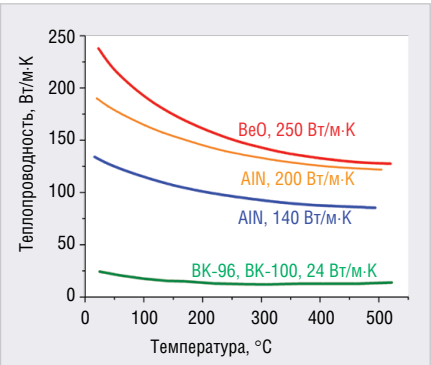


Рис. 1. Сравнительные характеристики теплопроводности керамических материалов

Таблица 3. Расчётная зависимость температуры p-n-перехода T_{p-n} транзисторов от температуры их фланцев $T_ф$ и влияние её на среднее время безотказной работы транзисторов t

$T_ф$, °С	Теплоотвод из BeO		Теплоотвод из алмаза	
	T_{p-n}, °С	t, годы	T_{p-n}, °С	t, годы
50	106	28,1	87	100,0
60	120	9,7	102	35,0
70	138	3,5	116	13,6

соединения деталей из этих материалов с низкими внутренними напряжениями.

При нанесении на подложки из AlN слоёв Ti-Pd-Au, NiCr-Pd-Au и Ti_2N-NiCr-Pd-Au методами магнетронного напыления или ионного распыления обеспечивается их высокая адгезия к подложке [8].

Постановка задачи

С учётом резкого увеличения мощности современных полупроводниковых приборов в мощных ГИС СВЧ отвод тепла от активной области прибора становится одной из важнейших проблем. В связи с этим в последнее время всё более пристальное внимание разработчиков ГИС и МИС СВЧ обращается на поликристаллический алмаз, выращиваемый в плазмохимическом реакторе на основе СВЧ-разряда на подложке из кремния методом CVD (CVD – Chemical Vapor Deposition – химическое осаждение из газовой фазы). Интерес к этому материалу вызван его уникальными физико-химическими свойствами и возможностью получения теплоотводящих подложек большой площади. Будучи изолятором, CVD-алмаз обладает существенно более высокой теплопроводностью, чем другие материалы с изолирующими свойствами (см. табл.1). Использование алмазных подложек в качестве изолирующего теплоотвода позволяет поднять мощностные характеристики приборов за счёт уменьшения теплового сопротивления и увеличения предельного тока и рассеиваемой мощности в 1,5–2 раза.

Целесообразность использования алмаза в качестве теплоотвода для полупроводниковых приборов обсуждалась в зарубежной технической литературе в начале 70-х годов. Однако с появлением в промышленности высокотеплопроводной бериллиевой керамики этот вопрос был забыт. В последние годы к нему снова вернулись в связи с миниатюризацией и повышением мощности полупроводниковых приборов. Алмаз – дорогой материал, но на высокую стоимость аппаратуры для военных и космических целей его применение не оказывает существенного влияния. Обладая превосходной изоляционной способностью, он имеет теплопроводность в 8 раз выше, чем у бериллиевой керамики, и в 4 раза выше, чем у чистой меди. В роли теплоотвода алмаз позволяет существенно снизить температуру основания (фланца) полупроводникового прибора, что приводит к уменьшению температуры p-n-перехода, благоприятно влияя на надёжность и долговечность прибора. Чтобы обеспечить требуемую для космических применений высокую надёжность аппаратуры, в которой для мощных транзисторов используются теплоотводы из BeO, приходилось «смягчать» режим работы транзисторов приблизительно на 20%, ухудшая при этом эксплуатационные свойства аппаратуры. Обозначенные проблемы решали путём усложнения схемы и применения тепловых труб. Качественный выигрыш от применения алмазных теплоотводов для одного из типов мощных транзисторов представлен в таблице 3 [9].

В последнее время внимание разработчиков всё больше привлекают транзисторы на основе нитрида галлия (GaN), способные работать при высоких температурах и на более высоких частотах, чем кремниевые и арсенидгаллиевые приборы. Мощность GaN-транзисторов компании Nitronex (США) достигает 50 Вт на частоте 2,5 ГГц, транзисторов фирмы Eudina (Япония) – 180 Вт на частотах 2,11–2,17 ГГц [10]. Появились сообщения о формировании GaN-структур на тонких подложках из полиалмаза [6]. Реализация уникальных свойств таких структур (большие уровни

Рис. 2. Алюмонитридные тестовые подложки с отверстиями: а) исходная подложка после лазерной прошивки отверстий диаметром от 0,1 до 1,2 мм; б) подложка с отверстиями диаметром от 0,1 до 1,2 мм после наращивания слоя поликристаллического алмаза; в) алюмонитридная подложка с отверстиями диаметром 0,3 мм

мощности, способность работать при высоких температурах и на сверхвысоких частотах), вероятнее всего, возможна только с теплоотводом из полиалмаза.

Как видно из данных, приведённых в таблице 3, использование алмазных теплоотводов по сравнению с теплоотводом из бериллиевой керамики позволяет снизить на 18...22°С температуру на p-n-переходе мощных транзисторов при всех значениях температуры на фланце и в 3–4 раза увеличить среднее время безотказной работы транзисторов.

Применение алмаза затруднительно по причине того, что алмазные подложки большой толщины в связи с низкой скоростью осаждения имеют длительный процесс формирования, а из-за своей высокой твёрдости трудно поддаются механической обработке и поэтому являются дорогостоящими в изготовлении.

Возможности использования в качестве теплоотвода в ГИС СВЧ бериллиевой керамики ограничены её высокой стоимостью, чрезвычайной токсичностью, вследствие чего требуются дополнительные меры по обеспечению безопасности условий труда, и значительным снижением теплопроводности в диапазоне рабочих температур +100...+200°С.

КТР алюмонитридной керамики хорошо согласуется с кремнием, арсенидом галлия и нитридом галлия. Это особенно важно для приборов и устройств, выполненных на кристаллах больших размеров. Кроме того, в отличие от BeO-керамики теплопроводность AlN-керамики не уменьшается при нагреве кристаллов полупроводниковых приборов. Всё вышесказанное позволяет сделать вывод о целесообразности применения алюмонитридной керамики в качестве теплоотвода.

Учитывая преимущества AlN-керамики и полиалмаза, представляет интерес совместное использование уникальных свойств обоих материалов в конструкции теплоотводящей подложки для мощной ГИС СВЧ. Авторами было проведено исследование возможности создания конструкции мощной ГИС СВЧ с использованием алюмонитридной подложки со сквозными отверстиями различных размеров, на поверхность которой нанесён слой поликристаллического алмаза.

Объекты исследования, материалы и оборудование

Эксперименты по разработке и изготовлению ГИС СВЧ на подложке из алюмонитридной керамики (AlN) с отверстиями, заполненными поликристаллическим алмазом, осаждённым методом CVD, проводились на шлифованных пластинах AlN размером 30×24×0,25 мм с плотностью 3,32 г/см^3 и теплопроводностью 180 Вт/м·К. Для прошивки сквозных отверстий использовалась лазерная установка МЛ1-1, осаждение алмазной плёнки проводилось на установке Seki Technotron AX5250M, напыление металлизационной структуры – на установке магнетронного напыления «Оратория-9». Формирование топологического рисунка осуществлялось на оборудовании, входящем в состав специальной линии фотолитографии.

Экспериментальные исследования

Подложку из нитрида алюминия (AlN) шлифовали, обеспечивая шероховатость поверхности с размером микронеровностей 0,63 мкм. Отшлифованную подложку очищали от загрязнений в перекисно-аммиачном растворе, закрепляли на координатном столике технологической установки МЛ1-1 и выполняли лазерную перфорацию (см. рис. 2а).

Лазерное излучение фокусировали в пятно диаметром 10 мкм и проводили сканирование по поверхности подложки для прошивки отверстий в точках в соответствии с топологическим рисунком. Затем подложки трижды проходили очистку в деионизированной воде в ультразвуковой (УЗ) ванне при температуре +50°С. Прошивку проводили при частоте импульсов 0,3...2 Гц и общем числе импульсов от 5 до 20 в зависимости от размера отверстия. При энергии импульса, варьирующейся в пределах 2...3,8 Дж, образуются конусообразные отверстия диаметром от 100 мкм до 1,0 мм.

В результате воздействия светового импульса лазера материал керамической подложки, находившийся в фокусе луча, мгновенно расплавлялся и испарялся, при этом часть материала самой подложки выплёскивалась вокруг пятна луча. Стенки канала отверстий, сформированных при лазерной прошивке, имели оплавленную поверхность, а на поверхности подложки, обращённой к лазеру, имелись выплески материала. В керамической подложке были выполнены отверстия (см. рис. 2б) конусообразной формы и диаметром на входе лазерного луча в подложку от 100 мкм

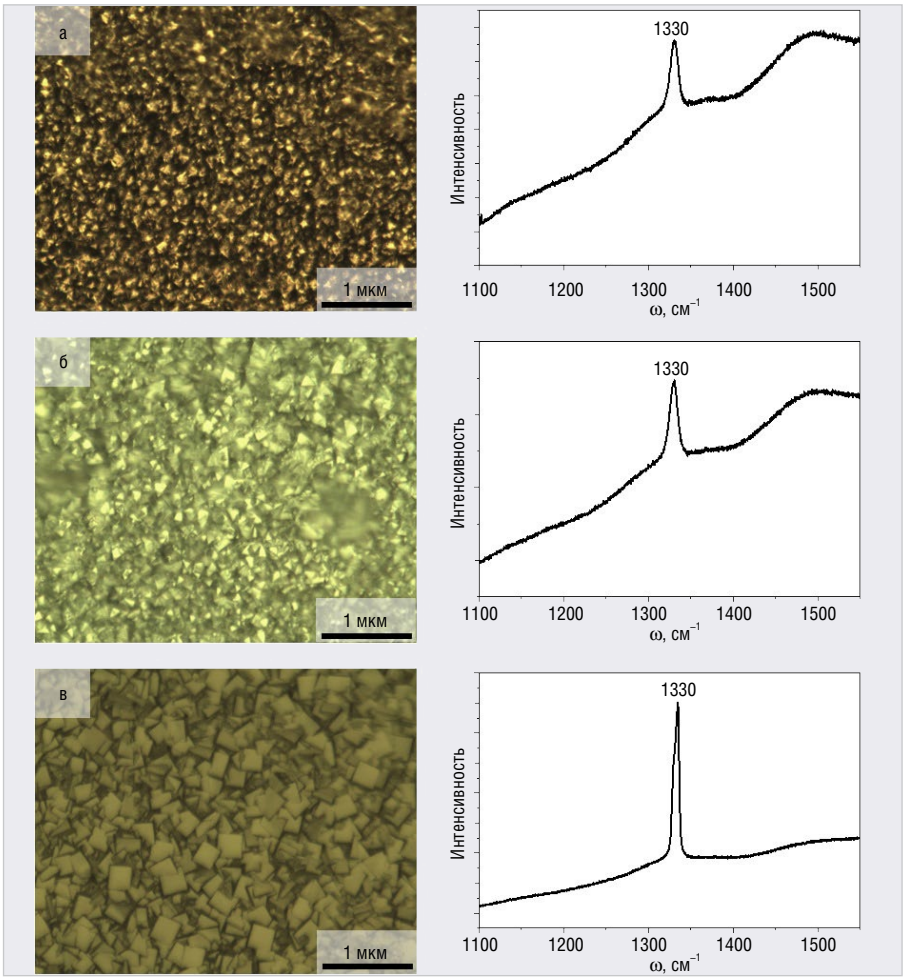


Рис. 3. Поверхности алмазных плёнок на подложках из AlN и соответствующие им спектры комбинационного рассеяния света для образцов № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в)

до 1 мм с шагом 100 мкм, они были выстроены друг за другом в ряды по всей площади подложки. Затем на подложках с прошитыми лазером сквозными отверстиями методом CVD выращивался слой поликристаллического алмаза в плазмохимическом реакторе на основе СВЧ-разряда.

Сначала проводилось выращивание алмазных плёнок на поверхности шлифованных подложек из нитрида алюминия с прошитыми рядами отверстий диаметром от 100 мкм до 1 мм с шагом 100 мкм, затем на основании этих экспериментов определялись размеры отверстий, заращиваемых алмазом, после чего изготавливались подложки со сквозными отверстиями выбранного размера (см. рис. 2в).

Структура шлифованных подложек с прошитыми рядами отверстий выбранного на основании предварительных экспериментов диаметра 0,3 мм представляет собой зернистую структуру со средним размером зерна около 200 нм. Рельеф ростовой поверхности и качество подготовки поверхности алюмонитридной керамической подложки оказывают значительное влияние на структуру синтезируемого алмазного слоя. Поэтому перед проведением синтеза подложки проходили очистку в ацетоне и изопропиловом спирте.

Осаждение алмазной плёнки проводилось методом плазменно-стимулированного осаждения из газовой фазы (PECVD) в микроволновом плазменном реакторе пониженного давления без автономного подогрева подложки, при генерации плазмы микроволновым излучением частотой 2,45 ГГц и мощностью до 5 кВт. Основным плазмообразующим газом служил водород, поступающий из электрохимического водородного генератора «Спектр-60» с объёмной скоростью 500 мл/мин. В качестве источника углерода использовался пентан.

По причине большого различия поверхностных энергий алмаза и нитрида алюминия плотность центров зародышеобразования алмаза мала, поэтому для роста сплошной плёнки использовали принудительную нуклеацию. Наилучшие результаты были достигнуты для нуклеационных смесей на основе водного раствора сахарозы и детонационных наноалмазов УДА-Ф9 (средний размер конгломератов около 20 нм), наносимых методом высушивания мениска. Эксперименты проводились при давлении в камере 120 мбар. Мощность СВЧ-генератора – 2000 Вт. Концентрация углеводорода и время синтеза варьировались. После проведения синтеза образцы были характеризованы методами оптической микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

По оптическим микрофотографиям (см. рис. 3) видно, что образцы после проведения синтеза приобрели более тёмный окрас. Образцы № 1, № 2 и № 3 были получены на шлифованных подложках из нитрида алюминия (см. рис. 2а). Алмазная плёнка на образце № 1 была получена при проведении синтеза в течение 4,5 ч и подаче источника углерода (пентан) с объёмной скоростью 10 мл/мин. При взвешивании образцов до и после синтеза было установлено, что толщина алмазной плёнки составила 50 мкм (скорость роста 11 мкм/ч). Структура поверхности состоит из мелких кристаллитов и наноалмазной фазы, что подтверждается оптическими микрофотографиями и КРС спектра. Спектроскопия комбинационного рассеяния света демонстрирует характерный для алмазной фазы отклик на 1330 см$^{-1}$. На рисунке 3 показан спектр по Раману алмазного покрытия, в котором пик, присущий алмазу, может быть также опознан при волновом числе 1330 см$^{-1}$. Никакого пика другого углеродного материала, например графита, не обнаружено.

С целью повышения качества алмазной плёнки (уменьшения наноалмазной фазы и увеличения доли алмазных кристаллитов) была снижена скорость роста плёнки за счёт уменьшения потока пентана до 5 мл/ч. Также было сокращено время синтеза до 3 ч. В результате толщина алмазной плёнки образца № 2 составляет около 27 мкм (средняя скорость роста 9 мкм/ч). Данный образец демонстрирует лучшую адгезию алмазной плёнки (по сравнению с образцом № 1) к поверхности подложки из нитрида алюминия. Структура схожа с образцом № 1, что, скорее всего, связано с пониженной концентрацией источника углерода во время синтеза.

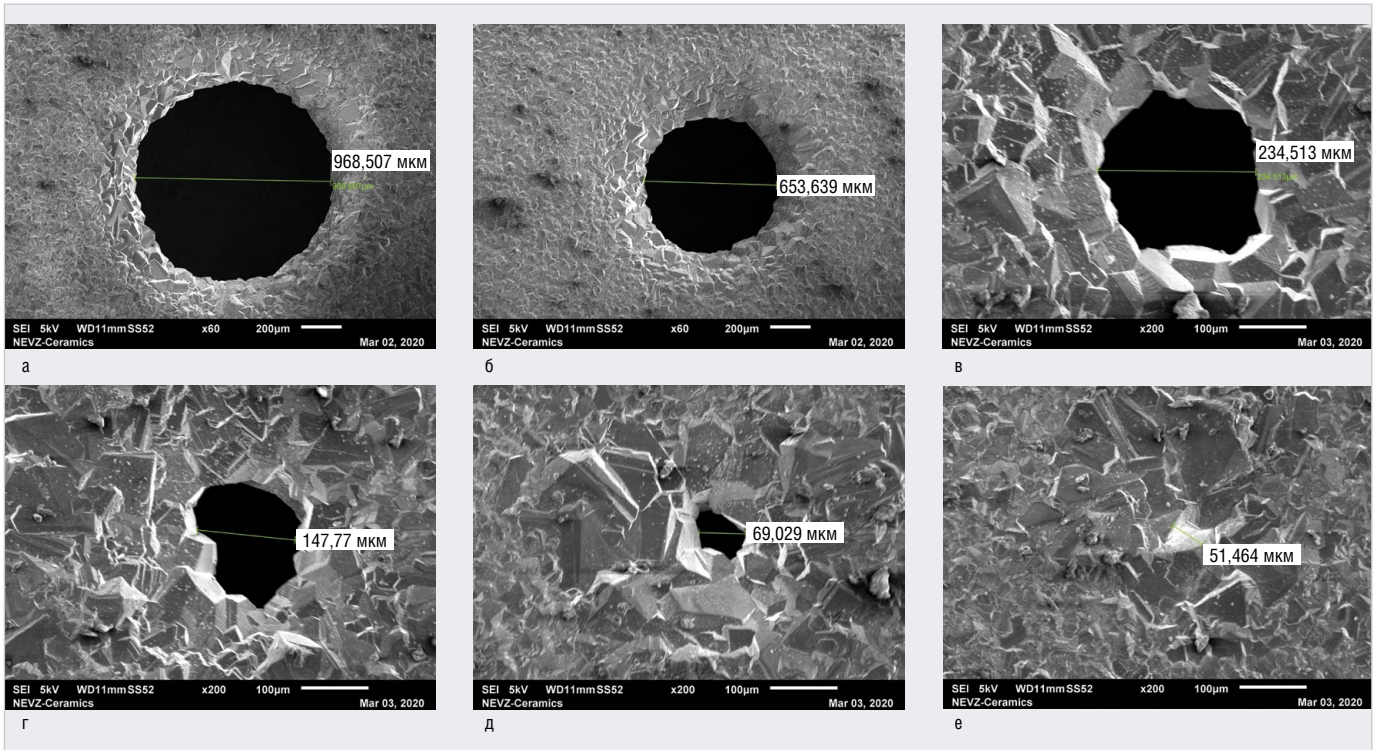


Рис. 4. Фрагменты заращивания поликристаллическим алмазом отверстий различных диаметров: а) 1 мм; б) 0,7 мм; в) 0,3 мм; г) 0,2 мм; д) 0,1 мм; е) 0,1 мм

При синтезе образца № 3 была установлена скорость подачи пентана на уровне 7 мл/мин, время синтеза составило 3 ч. Скорость роста алмазной плёнки составила 10 мкм/ч (общая толщина плёнки 30 мкм). На образце № 3 присутствует хорошо кристаллизованная алмазная плёнка со средним размером кристаллов около 500 нм. Спектроскопия КРС подтверждает высокое качество алмазной плёнки в этой области.

Таким образом, для синтеза оптимальная скорость роста составила 10 мкм/ч при подаче пентана со скоростью 7 мл/ч. В дальнейшем синтез алмазных плёнок на подложках из нитрида алюминия со сквозными отверстиями проводился в режиме синтеза с параметрами, полученными на опытных образцах № 3.

Дифракция рентгеновских лучей алмазного покрытия показала, что оно представлено алмазными кристаллическими фазами (111), (220), (311), (331) и (400). Что касается твёрдости по шкале Виккерса, то оценка метки от давления алмазной пирамидкой слоя алмаза была затруднена по причине высокой твёрдости слоя поликристаллического алмаза. Впрочем, было установлено, что твёрдость по Виккерсу составляет 8000 кг/см^2 и выше. Из приведённых данных можно сделать вывод, что синтезированный алмаз является поликристаллическим покрытием хорошего качества.

Процесс нанесения поликристаллического алмаза иллюстрируется микрофотографиями. Как показано на рисунке 4, на поверхностях подложки из нитрида алюминия и сквозных отверстий нанесено алмазное покрытие, которое состоит из алмазных кристаллов, сгруппированных вместе и расположенных как на поверхности подложки, так и на стенках отверстий различных диаметров.

При этом на стенках отверстий толщина осаждаемого слоя алмаза примерно равна толщине слоя, наносимого на плоские поверхности лицевой и обратной сторон алюмонитридной подложки. При толщине алмазного слоя 200 мкм полностью заращиваются отверстия диаметрами 0,1; 0,2 и 0,3 мм. Начиная с отверстия диаметром 0,4 мм, заращивания не происходит, и в отверстиях диаметром от 0,4 мм до 1,2 мм остаются просветы.

На рисунке 5 показан вид в разрезе алюмонитридной подложки со сквозными отверстиями с нанесённым алмазным покрытием, которое также состоит из алмазных кристаллов, сгруппированных вместе и расположенных на стенках отверстий диаметрами 1,0 и 0,6 мм. Видно, что алмазное покрытие имеет форму кольца, примыкающего к внутренней стенке отверстия, и обладает незначительной неровностью поверхности.

Синтез проводился в течение 20 ч, в этих условиях итоговая толщина алмазного покрытия в центральной части подложки составила 200 мкм и 180 мкм – на её периферийных участках. Фрагмент промежуточной фазы осаждения поликристаллического алмаза в конусообразном отверстии диаметром 0,3 мм представлен на рисунке 6.

Заращивание конусообразного отверстия начинается с узкой его части (см. рис. 6а). Сначала алмазный слой в течение 10 ч закрывает отверстие тонкой перегородкой, а затем в оставшееся время до окончания процесса, в течение 10 ч, полностью его заполняет (см. рис. 7).

Полученные образцы алюмонитридных подложек с отверстиями 0,3 мм, с нанесёнными на обе стороны алмазными слоями, характеризуются шероховатой поверхностью. Чтобы обеспечить последующее напыление металлизационной структуры, для уменьшения шероховатости алмазных плёнок подложку с алмазным слоем с помощью воско-канифольной мастики наклеивали на стальной диск-спутник. Затем осуществлялось механическое шлифование поверхности алмазных слоёв на вращающемся чугунном круге, шаржированном алмазным порошком, с частотой вращения диска 200 об/мин и нагрузкой 10 Н. Далее полировали, нанося на поверхность чугунного круга поли-

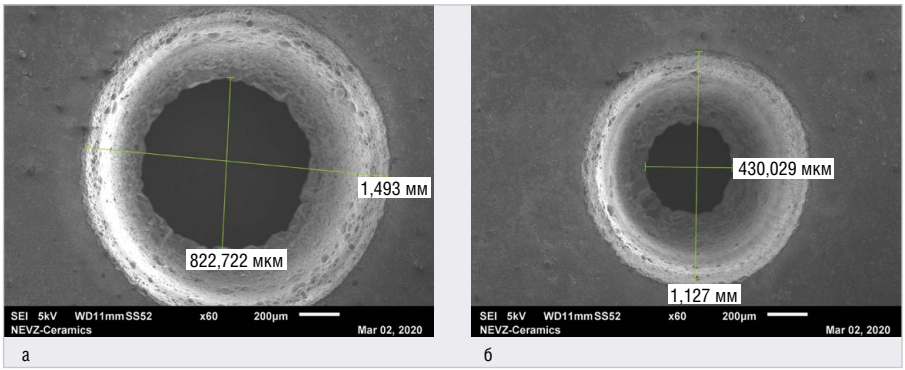


Рис. 5. Поверхность AlN-подложки с отверстиями разных размеров, покрытыми поликристаллическим алмазом со стороны входа лазерного луча: а) отверстие диаметром 1 мм; б) отверстие диаметром 0,6 мм

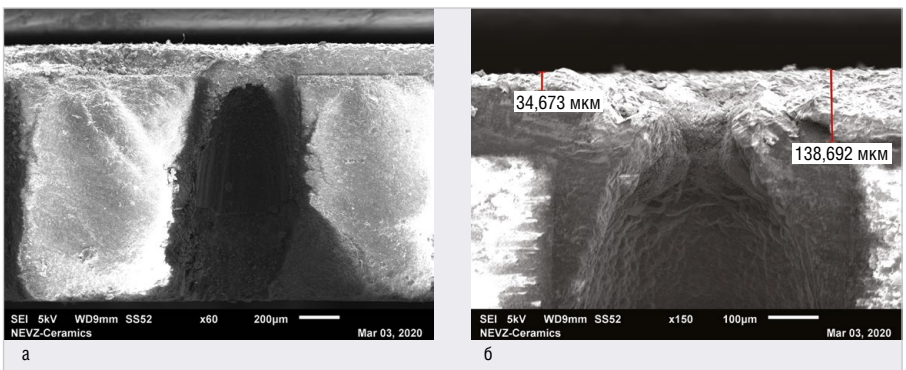


Рис. 6. Поверхность AlN-подложки с отверстиями разных размеров, покрытыми поликристаллическим алмазом со стороны выхода лазерного луча: а) отверстие диаметром 0,3 мм, увеличение ×60; б) отверстие диаметром 0,3, увеличение ×150

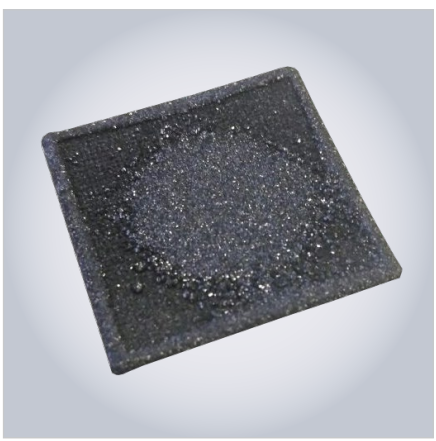


Рис. 7. Алюмонитридные подложки с отверстиями 0,3 мм, заполненными алмазом

ровальную эмульсию, состоящую из полиорганосилоксановой жидкости и мелкозернистого порошка искусственного алмаза. За счёт трения, возникающего при взаимодействии алмазной поверхности и полирующего чугунного круга при его вращении с частотой 100 об/мин, удалось уменьшить шероховатость поверхности алмазного слоя. Съём поверхности алмаза за 2 ч составил 10 мкм. Шероховатость поверхности не превышала 0,02 мкм.

Для проверки возможности изготовления ГИС СВЧ и обеспечения требуемых электрофизических параметров устройства на алюмонитридной подложке с отверстиями, заполненными алмазом, была разработана плата-усилитель мощности СВЧ в диапазоне частот 9...10,5 ГГц с использованием мощных нитридгаллиевых транзисторов. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость нитрида алюминия составляет 8, а у алмаза при комнатной температуре в диапазоне частот 0...3 кГц – 5,6 [7], были проведены измерения диэлектрической проницаемости слоистой структуры, после чего рассчитали размеры микрополосковых линий и изготовили фотошаблоны. Последовательность операций и вся разработанная технологическая схема изготовления платы усилителя мощности СВЧ показана на рисунке 8.

В соответствии с технологической схемой изготовления на подготовленные поверхности подложек с алмазными слоями с обеих сторон наносили металлизационную структуру сначала путём последовательного напыления в вакууме резистивного слоя, а затем двухслойного покрытия, состоящего из адгезионного подслоя титана и электропроводного слоя палладия, которое в дальнейшем покрывалось защитным слоем гальванического золота. Подложки предварительно проходили ионную очистку при средней энергии ионов аргона 1 кэВ в течение 3–5 мин. Напыление проводилось с использованием установки магнетронного напыления «Ораторія-9». На полированные поверхности поликристаллического алмаза сначала напыляли через маску резистивные элементы из сплава РС-3710 адгезионный подслой титана толщиной 0,002...0,003 мкм, затем проводящий слой палладия толщиной 2...3 мкм и никеля толщиной 0,2...0,3 мкм, после чего гальваническим методом наносили слой золота толщиной 1...3 мкм. Топологический рисунок проводящих плёночных элементов, контактных площадок, технологических проводников и экранной заземляющей металлизации ГИС СВЧ формировали методом фотолитографии. Такая металлизационная структура позволила обеспечить контакт структуры к алмазу с высокой адгезией: среднее значение усилия отрыва структуры от слоя алмаза составило 734 кгс/см^2.

На подготовленные подложки с алмазными слоями и металлизационной структурой на лицевой стороне подложки с топологическим рисунком схемы на контактные площадки, расположенные над отверстиями и заполненные алмазом, монтировали навесные конденсаторы и кристаллы мощных СВЧ-транзисторов из GaN. Помимо электрического контакта с элементами схемы обеспечивался ещё и тепловой контакт с алмазным столбиком, размещённым в отверстии подложки, для высокоэффективного отвода тепла. Такая многослойная структура из алмазных слоёв, нанесённых с обеих сторон алюмонитридной подложки и находящихся друг с другом в двойном тепловом контакте (через керамику из нитрида алюминия и столбики алмаза в отверстиях), позволяет эффективно отводить тепло от кристаллов мощных СВЧ-транзисторов из GaN. Отвод тепла осуществляется независимо от линейных размеров, так как в данном конструктивном варианте подложки при увеличении размеров кристаллов мощных СВЧ-транзисторов из GaN (источников тепла) не нужно пропорционально увеличивать толщину алмазного

слоя. Для увеличения времени работы кристаллов мощных транзисторов подложку размещают на металлическом основании, прикреплённом к массивному корпусу усилителя мощности, что позволяет реализовать как импульсный, так и непрерывный режим работы.

Измеренные электрофизические параметры изготовленных устройств показали, что разработанная технология совместима с типовыми процессами изготовления ГИС СВЧ и позволяет получать высокодобротные усилители мощности СВЧ в диапазоне частот 9...10,5 ГГц.

Заключение

Проведённые исследования позволили определить оптимальные условия формирования алмазной плёнки методом плазменного CVD с микроволновым возбуждением на поверхности керамической подложки из AlN со сквозными отверстиями. Такая комбинация технологий нитрида алюминия и поликристаллического алмаза позволяет обеспечить отвод тепла от кристаллов мощных транзисторов СВЧ из GaAs и GaN. Тонкие алмазные слои, нанесённые на нитрид алюминия и алмаз, заполнивший сквозные отверстия, позволяют повысить теплопроводность подложек минимум в 7 раз. Это достигается за счёт того, что тепло от источника при контакте с поверхностью алмазного слоя и столбиком алмаза в отверстии под ним отводится перпендикулярно и параллельно поверхности алмазного покрытия, таким образом, рассеивается на бóльшую площадь, что повышает эффективность отвода тепла.

Использование в качестве схемного элемента и теплоотвода ГИС подложки из нитрида алюминия с тонким алмазным слоем на обеих её поверхностях и со сквозными отверстиями, заполненными алмазом, позволяет улучшить характеристики СВЧ-устройств. Помимо этого обеспечивается снижение стоимости по сравнению с монолитной алмазной подложкой такой же толщины, как и AlN-подложка. Наличие на алюмонитридной подложке одновременно отверстий диаметром 0,1...0,3 мм, полностью заполненных алмазом, и отверстий диаметром более 0,3 мм, у которых алмазом покрыты только стенки, значительно расширяет возможности проектирования СВЧ-устройств. Такое сочетание позволяет

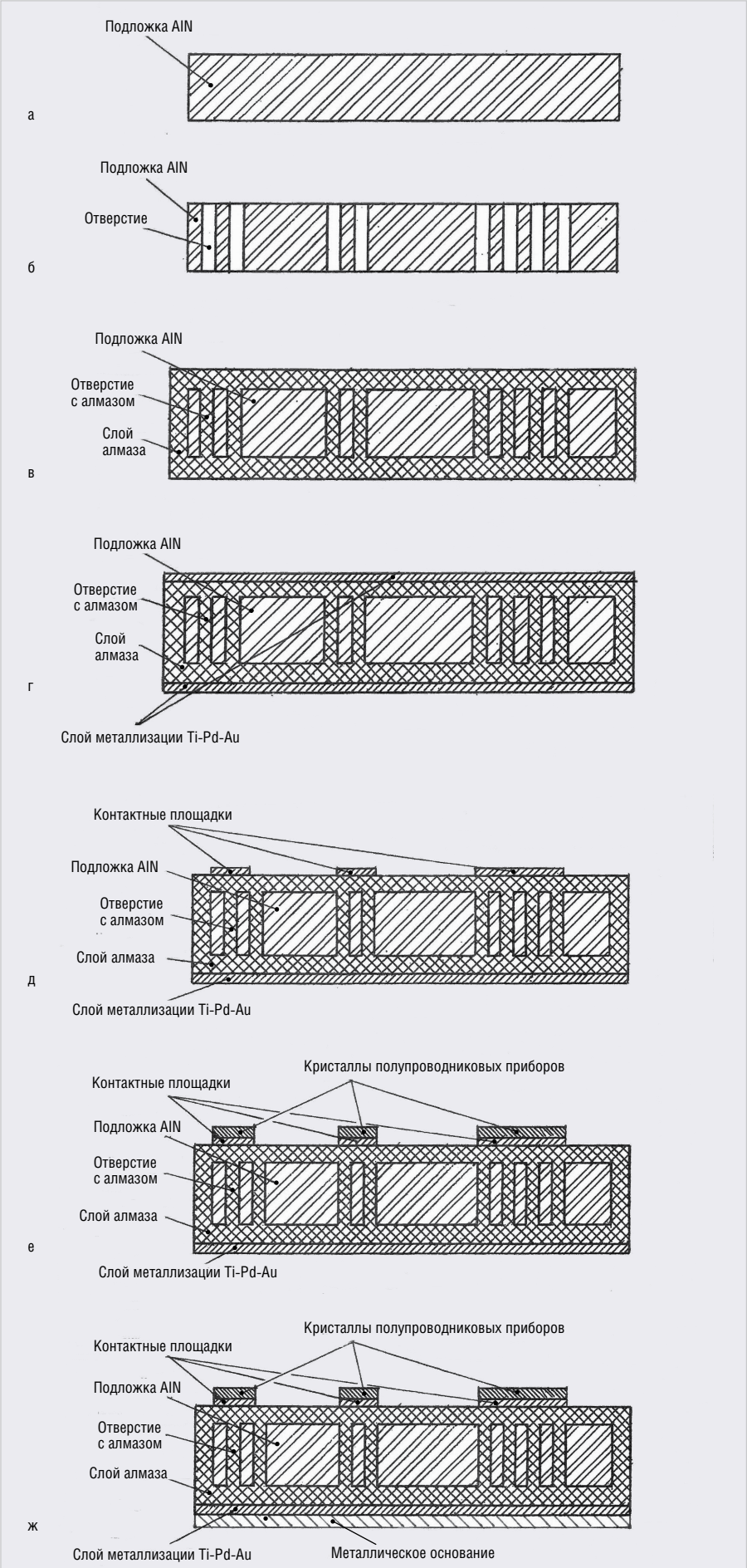


Рис. 8. Технологическая схема изготовления усилителя мощности СВЧ на основе алюмонитридной подложки с отверстиями, заполненными алмазом

на одной плате размещать кристаллы полупроводниковых приборов, требующие изоляции от заземлённой экранной стороны подложки, и кристаллы активных элементов, которым необходимо соединение с заземлённой стороной. Также сочетание позволяет покрывать стенки отверстий с алмазным слоем диаметром более 0,3 мм слоями металлических плёнок или полностью заполнять металлом, например сплавом вольфрама и меди. Таким образом можно получить короткозамыкающие перемычки для соединения элементов топологии схемы с одной стороны подложки с элементами топологии, расположенными на обратной стороне, и улучшить электрические характеристики за счёт уменьшения паразитной индуктивности соединений.

Авторами статьи разработаны конструкция и технология ГИС СВЧ с использованием подложки из нитрида алюминия со сквозными отверстиями, заполненными алмазом, с проводящей металлизационной структурой, позволяющей формировать топологический рисунок, включающий пассивные элементы и микрополосковые линии, а также создавать СВЧ-устройства повышенной мощности, обладающие улучшенными электрофизическими характеристиками.

Применение алмазного слоя на подложке из нитрида алюминия со сквозными отверстиями, заполненными алмазом, позволяет увеличить предельную выходную мощность, обеспечить эффективный отвод тепла от кристаллов полупроводниковых приборов и повысить срок службы усилителей мощности приёмопередающих устройств СВЧ.

Литература

1. *Мякишев Ю., Гуляев В., Журавлёв К.* Квазимонолитные интегральные схемы: технология и приборы. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 6.
2. *Непочатов Ю.* Металлизация керамических подложек с использованием лазера и теплового переноса металлизационного слоя. Современная электроника. 2019. № 4.
3. *Непочатов Ю., Городецкий Д., Абраамян А., Самусов И., Окотруб А.* Теплоотводы на основе нитрида алюминия с алмазным покрытием. Современная электроника. 2017. № 6.
4. *Темнов А. М. и др.* Гибридно-монолитные интегральные приборы СВЧ: конструирование и технология изготовления. Обзоры по электронной технике. 1987. Вып. 20 (1319).
5. *Juan L. T., Asher P. G.* A.W. – band monolithic balanced mixer. JEEE 1985 microwave and millimeter-wave monolithic circuits Symp. Digest of papers. Ed. M. Cohn. New Jork. 1985. P. 71.
6. Патент РФ № 2474921 МПК H01L 27/00, H05K 1/00. Приоритет 30.08.2011. Опубл. 10.02.2013.
7. *Ральченко В. Г., Савельев А. В. и др.* Двухслойные теплоотводящие диэлектрические подложки алмаз-нитрид алюминия. Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 4. С. 243.
8. IEEE Transaction on Components. Hybrids and Manufacturing Technology. 1985. Vol. CHMT-8. No 2. P. 247.
9. Microwave and RF. 1984. Vol. 23. No 7. P. 74.
10. *Васильев А., Данилин В., Жукова Т.* Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 4. С. 68.

Реклама

PROSOFT®
WWW.PROSOFT.RU
ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

НОВОСТИ МИРА

ABB Ability™ Augmented Field Procedures – безопасность работников и эффективность процессов предприятий ТЭК

Компания ABB разработала инновационную технологию на основе дополненной реальности, направленную на оцифровку действий технического специалиста на объекте и улучшение обмена информацией между ним и центральным диспетчерским пунктом.

Решение полностью отвечает потребностям технических специалистов, находящихся на объекте, проводит интеграцию полевых и распределённых систем управления, что повышает безопасность, снижает риски, связанные с человеческим фактором, и повышает эффективность работы.

По данным исследования Vanson Bourne, считается, что более 20% промышленных простоев обусловлены человеческим фактором. Решение ABB Ability™ с технологиями дополненной реальности обеспечивает согласованность действий при проведении операций, выполняемых вручную, при стандартизации методик работы, обслуживании и ремонте на объекте. Оно также применяется для цифровой регистрации и использования системных данных.

В отличие от традиционных печатных инструкций по эксплуатации решение ABB позволяет вести работы в интерактивном режиме с помощью мобильного устройства, чтобы последовательно, эффективно и безопасно направлять каждое действие оператора.

Используя промышленные планшеты, смартфоны или интерактивный комплекс Microsoft HoloLens, операторы смогут получать доступ к данным производственного оборудования, процессам или процедурам в режиме реального времени, что значительно улучшит взаимодействие и позволит мгновенно регистрировать данные с объекта через пользовательский интерфейс.

Система, разработанная в сотрудничестве с ведущими компаниями отрасли, может быть использована в любой промышленной среде, как на новых, так и на уже существующих проектных площадках, для пуско-наладочных работ, планового технического обслуживания и при простое производства.

Применение решения ABB в нефтегазовой, химической, обрабатывающей отраслях, а также в области энергетики и водоснабжения поможет трансформировать производственные процессы на предприятии, предоставив техническим специалистам, находящимся на объекте, возможность воспользоваться всеми преимуществами цифровых технологий, мобильной передачи данных и дистанционного взаимодействия.

Данное решение является примером того, как ABB помогает персоналу заказчика работать с производственными приложениями, предоставляя сотрудникам доступ к системе вне зависимости от того, где они находятся.

Департамент корпоративных коммуникаций ООО «АББ»

МОСКВА
(495) 234-0636
info@prosoft.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
(812) 448-0444
info@spb.prosoft.ru

ЕКАТЕРИНБУРГ
(343) 356-5111
info@prosoftsystems.ru
(912) 620-8050
ekaterinburg@regionprof.ru

Реклама

Об использовании искусственного интеллекта для борьбы с COVID-19

До сих пор нет лекарства от коронавирусной инфекции COVID-19, над этой задачей работают все страны и специализированные лаборатории. Многие компании предоставляют для этих исследований ресурсы и средства. Не остался в стороне и Сбербанк. Александр Ведяхин, первый заместитель Председателя Правления Сбербанка так прокомментировал ситуацию: «У Сбербанка есть несколько направлений использования искусственного интеллекта (ИИ) для борьбы с COVID-19.

Во-первых, наши эксперты разработали ИИ-модель диагностики коронавируса, которая с помощью технологий компьютерного зрения выделяет на компьютерной томограмме (КТ) лёгких области изменения – характерные затемнения, вызванные вирусной пневмонией (в том числе из-за COVID-19), и вычисляет объём этих изменений. Это нужно, чтобы определить степень тяжести протекания заболевания. Уже сейчас модель определяет по КТ заболевших с точностью выше 90%, то есть на уровне хороших рентгенологов. В начале мая мы бесплатно предоставили доступ первым клиникам. В ближайшие две недели число стационаров, подключённых к этой системе, достигнет десяти. Доступна как облачная версия данной модели, так и её установка на компьютеры непосредственно к аппаратам КТ.

Мы разрабатываем множество подобных инструментов для врачей на основе ИИ: анализ ЭКГ, определение инсульта по КТ, определение новообразований на маммограммах, анализ медицинских карт для помощи в постановке диагноза и контроля качества оказания медпомощи и так далее.

Во-вторых, на основе вероятностной модели ИИ и мировых медицинских данных Сбербанк разработал онлайн-тест (симптомчекер), который позволяет по симптомам и внешним факторам оценить риск заболевания коронавирусом и вероятность лёгкого протекания болезни. К настоящему моменту тест прошли более 177 тысяч россиян, в том числе более 40 тысяч москвичей и 9 тысяч петербуржцев. Высокий риск заболевания коронавирусом выявлен у 9% респондентов.

В-третьих, на основе эпидемиологического симулятора мы построили модель, которая прогнозирует распространение в стране коронавируса. Ещё в марте она предсказала, что пик заболевания в России придётся на первую декаду мая.

Наконец, у Сбербанка есть несколько прикладных решений для помощи в борьбе с коронавирусом – от роботов-дезинфекторов до системы распознавания лиц, в том числе в масках, с удалённым измерением температуры тела».

Пресс-служба Сбербанка

Немецкая Infineon поглотила американского разработчика полупроводников Cypress

Немецкий производитель микросхем для телекоммуникационного оборудования Infineon Technologies AG объявил о завершении сделки по приобретению американской компании Cypress Semiconductor Corp, которая занимается разработкой и производством полупроводниковой продукции.

Как полагает Infineon, сделка позволит расширить её возможности для структурного роста и увеличения ассортимента предлагаемых продуктов.

«Приобретение Cypress является знаковым шагом в стратегическом развитии Infineon», – отметил генеральный директор Infineon Рейнхард Плосс (Reinhard Ploss). По его словам, сделка позволит предложить клиентам самый объёмный в отрасли портфель решений для связи реального мира с цифровым и формирования цифровых технологий, одной из самых важных мировых тенденций. «Мы являемся надёжным партнёром для клиентов и дистрибьюторов, и мы превращаемся из лидера по поставкам компонентов в лидера в области системных решений для автомобильного, промышленного и IoT-рынков», – добавил Плосс.

В Infineon также заявили, что поглощение Cypress ускорит рост прибыли компании. Выпускаемые Cypress продукты пополнят её портфель микроконтроллеров, компонентов связи, программных экосистем и высокопроизводительных модулей памяти. Всё это хорошо сочетается с силовыми полупроводниками Infineon, автомобильными микроконтроллерами, датчиками и решениями для обеспечения безопасности.

Объединение этих технологических активов позволяет создавать передовые решения для быстрорастущих приложений, таких как системы помощи водителю нового поколения ADAS и AD, Интернет вещей и мобильная инфраструктура 5G, подчеркнули в Infineon, добавив, что возможности Cypress в области НИОКР и её позиции в США и Японии позволят укрепить связи Infineon с клиентами по всему миру.

3DNews

Контрактное производство электроники в России в 2019 году показало взрывной рост, но может рухнуть из-за COVID-19

Российский рынок контрактного производства электронного оборудования по итогам 2019 г. продемонстрировал 26% рост в сравнении с показателями 2018 г. Его суммарный объём, согласно отчёту консалтинговой компании «Центр современной электроники» (ЦСЭ) составил около $300 млн или 20 млрд руб.

По данным ЦСЭ, рост рынка во многом обеспечили крупные проекты по импортозамещению в сфере вычислительной техники. Немалую роль в этом сыграло и расширение спектра услуг контрактного производства, в том числе и за счёт комплектации производства – перехода с давальческой (предоставляемой заказчиками) комплектации на снабжение производства по собственным каналам закупок. Объёмы физического производства без услуг по комплектации по итогам 2019 г. выросли примерно на 15%, включая проекты по импортозамещению, и примерно на 4% – без них.

По итогам 2019 г. в сфере контрактного производства электроники в России задействовано более 50 предприятий. При этом свыше 50% всего рынка в стоимостном исчислении приходятся на пять крупных производителей, четверо из которых расположены в столичных регионах России.

Предварительный список пяти крупнейших российских контрактных производите-

лей электроники, предоставленный ЦСЭ, включает компании: ООО «Микролит» (г. Зеленоград Московской области, входит в группу компаний «Резонит»); НПО «Цифровые телевизионные системы (ЦТС) (г. Гусев Калининградской области, входит в холдинг GS Group); «А-Контракт» (Санкт-Петербург); Производственная компания «Альтоника» (Москва); НПО «Старлайн» (Санкт-Петербург»). Компании расположены в порядке уменьшения их рыночных долей.

Согласно статистике, компании ЦТС и «Старлайн», занявшие вторую и пятую строчки рейтинга соответственно, за 2019 г. продемонстрировали двукратный рост объёмов своего контрактного производства в сравнении с итогами 2018 г.

Компания ЦТС, по её оценке, является крупнейшим в Восточной Европе производителем цифровых ТВ-приставок. Помимо них компания выпускает промышленную, автомобильную и бытовую электронику, а также электронику для ЖКХ и систем безопасности. Мощность производства, реализованного ЦТС, составляет 17 млн готовых изделий в год.

«Старлайн» предлагает своим клиентам полностью автоматизированное и роботизированное производство электроники. Объём выпускаемых компанией электронных компонентов может достигать 1,5 млн в час.

Представленная в статистике ЦСЭ информация не включает данные за I квартал 2020 г. и не учитывает влияние пандемии коронавируса на мировую экономику, в том числе и на производство электроники.

На российскую экономику в настоящее время влияет не только коронавирус, но и резкое ослабление национальной валюты – по информации Центробанка, с 15 января 2020 г. по 14 апреля 2020 г. курс доллара вырос с 61,4 руб. до 72,9 руб. с пиком на уровне 80,8 руб., пришедшимся на 18 марта 2020 г.

Несмотря на всё перечисленное, эксперты ЦСЭ прогнозируют примерно 10% рост объёма контрактного производства электроники по итогам I квартала 2020 г. Между тем, они не отрицают, что эпидемиологические ограничения из-за коронавируса, ставшие причиной существенных перебоев в снабжении, всё же могут отрицательно сказаться на объёмах производства.

Режим самоизоляции, введённый по указу Президента России Владимира Путина, на развитии рынка контрактного производства электроники в I квартале 2020 г. практически не отразится.

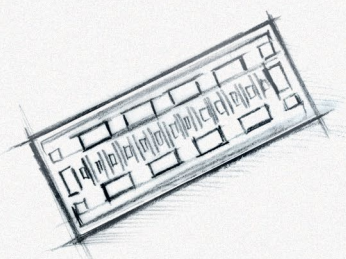
Как сообщил руководитель ЦСЭ Иван Покровский, участники рынка уверены в его сокращении по итогам всего 2020 г. По самым оптимистичным их прогнозам, сокращение общего объёма производства электроники в России в 2020 году составит 10%, а само контрактное производство сократится значительно сильнее – на 15…20%. Некоторые участники прогнозируют сокращение общего объёма производства электроники более чем на 30%, а контрактного производства – на 50%.

Падение курса рубля, по мнению Ивана Покровского, в итоге пойдёт рынку контрактной электроники на пользу, но случится это не в ближайшее время: «Ослабление рубля приведёт к повышению конкурентоспособности российских контрактных производителей. Но чтобы это перешло в увеличение объёма заказов, нужно время. Производственные цепочки не перестраиваются за один день, это многие месяцы и даже годы. Чтобы воспользоваться ценовым преимуществом, в будущем нужно ещё выжить».

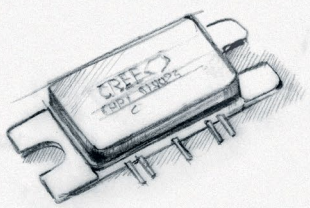
Время электроники

CREE Wolfspeed

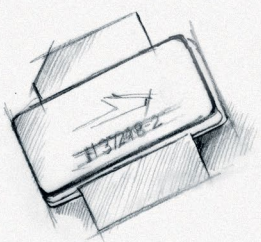
НОВЫЕ МОЩНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



Кристаллы СВЧ-транзисторов GaN/SiC
- Диапазон частот: DC...6,0 ГГц
- Выходная мощность: 8, 15, 30, 40 Вт
- Типовое усиление: 15–17 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40, 50 В



Широкополосные GaN HEMT-транзисторы общего назначения
- Диапазон частот: L, S, C, X
- Выходная мощность: 800 Вт – L-диапазон, 180 Вт – S-диапазон, 6 Вт – X-диапазон
- Типовое усиление: 13–20 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40, 50 В



LDMOS-транзисторы
- Диапазон частот: 400...1400 МГц, 420...960 МГц, 700...2200 МГц, 1800...2000 МГц, 2000...2200 МГц, 2300...2400 МГц, 2500...2700 МГц
- Выходная мощность: до 600 Вт
- Типовое усиление: 16–30 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 30, 48, 50 В

ProChip POWERED BY ProSoft

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

(495) 232-2522 ▪ INFO@PROCHIP.RU ▪ WWW.PROCHIP.RU

Реклама