УДК 621.382.026

DOI: 10.36845/2073-8250-2019-255-4-43-54

АЛЮМОНИТРИДНАЯ КЕРАМИКА В КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТАХ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Е.М. Савченко², А.Г. Чупрунов¹, В.А. Сидоров¹, И.А. Биларус¹

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27;

²МГТУ МИРЭА, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

Представлены конструкции и технология изготовления конструктивных теплоотводящих элементов в изделиях силовой электроники. Рассмотрены способы металлизации коммутационных плат силовых модулей, обеспечивающие минимальное электрическое сопротивление силовых цепей и высокую адгезию металлизации к поверхности платы. Обращено внимание на необходимость тщательной очистки поверхности подложек из алюмонитридной керамики перед тонкоплёночной металлизацией без нарушения их морфологического состояния.

Ключевые слова: алюмонитридная керамика, аппликация из меди, медная вставка, тонкоплёночная металлизация, силовой модуль, электрическое сопротивление.

Сведения об авторах: Савченко Евгений Матвеевич, к.т.н.; Чупрунов Алексей Геннадиевич; Сидоров Владимир Алексеевич, к.т.н., vlsidorov@pulsarnpp.ru; Биларус Илья Александрович

ALUMINITRIDE CERAMICS IN BACK PLANES OF POWER ELECTRONIC DEVICES

E.M. Savchenko², A.G. Chuprunov¹, V.A. Sidorov¹, I.A. Bilarus¹

¹S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy Pr., 27

²Russian Technological University MIREA, 119454, Moscow, Vernadsky Ave., 78

In this paper the designs and manufacturing method for the functional heat-sink elements of power electronic devices are presented. Metallization techniques for the back planes of power modules are described, which provide minimum electrical resistance of power circuits and high adhesion of metallization to the plane surface. Attention is drawn to the need for thorough cleaning of the surface of aluminitrider ceramic substrates without disrupting their morphological state before applying thin-film metallization.

Keywords: aluminitrider ceramics, application of copper, copper insert, thin-film metallization, power module, electrical resistance.

Authors: Savchenko Evgeniy Matveevich, Ph.D.; Chuprunov Aleksey Gennadievich; Sidorov Vladimir Alekseevich, Ph.D., vlsidorov@pulsarnpp.ru; Bilarus Ilya Aleksandrovich

Введение

Разработка приборов силовой электроники неразрывно связана с решением задачи отвода выделяемого тепла. Для решения этой задачи в конструкции приборов используют материалы с высокой теплопроводностью. Для фланцев используют медь и во многих случаях псевдосплавы, содержащие медь, вольфрам и молибден. В конструкциях приборов используются керамические материалы. Широкое применение нашла керамика на основе оксида бериллия (BeO), производство которой относится к высокотоксичным. Одним из материалов, который может быть альтернативой BeO керамике, является алюмонитридная (AlN) керамика, имеющая высокую теплопроводность – 170-230 Вт/м.К. За рубежом и в России проводится большой объём исследований по использованию AlN керамики в электронике. В частности, корпуса с AlN керамикой для силовой электроники предлагает фирма Куосега, мощные транзисторы в корпусах с алюмонитридной керамикой выпускает ФЗМП, силовые модули с коммутационными платами из AlN керамики разрабатывают АО «НПП Пульсар» и др. предприятия. Основным материалом для получения AlN керамики являются порошки нитрида алюминия, из которых производят керамику либо литъём керамических плёнок, либо прессованием заготовок с последующим спеканием в среде азота при температуре примерно 1850 °С. При этом могут использовать порошок нитрида алюминия и порошок оксида иттрия. Многие исследования направлены на повышение теплопроводности AlN керамики. Использование AlN керамики в качестве основы

корпусов силовых модулей, как правило, требует решения вопросов, связанных с металлизацией изготовленных из неё конструктивных элементов [1-5]. В мировой практике используются несколько основных методов металлизации керамики [6, 7]:

- толстоплёночная технология металлизации пастами на основе тугоплавких металлов;
- АМВ (Active Metal Braze – пайка активными металлами);
- DBC (Direct Bonded Copper – прямое медное соединение);
- ХГН (холодное газодинамическое напыление);
- плазменное напыление и реактивное распыление.

Для соединения керамики с керамикой, керамики с металлом находит применение способ активной пайки [8-9]. Этот способ позволяет соединять металлическую фольгу с керамической подложкой, используя активные металлы – титан Ti или цирконий Zr, которые в результате химической реакции создают соединение припоя с керамикой и припоя с металлом. Находят применение платы, металлизированные методом DBC, где для обеспечения хорошей адгезии меди с керамикой поверхность AlN керамики предварительно окисляют, после чего керамику соединяют с медью, расплавленной при температуре 1064 °С эвтектикой Cu-CuO₂. Компания Semikron использует керамические основания на основе нитрида алюминия, металлизированные медью методом DBC [10, 11]. Испытания, проведённые фирмой Semikron, подтверждают, что надёжность силовых модулей, использующих керамическое основа-

ние на основе AlN, существенно выше, чем у силовых модулей с керамическим основанием из алюмооксидной керамики.

При вакуумном осаждении металлов на керамические подложки качественную металлизацию керамики можно получить при условии термомеханической и химической совместимости материала керамики и слоя металлизации. Для того чтобы возникла химическая реакция между напыляемым металлом и материалом керамики, необходимо обеспечить её возможность с точки зрения термодинамики. Реакция между напыляемым металлом и материалом диэлектрика термодинамически возможна в том случае, если величина изменения теплосодержания ΔH образования, например, окисла материала диэлектрика менее отрицательна, чем величина ΔH образования окисла напыляемого металла. Только в этом случае напыляемый металл будет отнимать кислород от окисла материала диэлектрика и могут образовываться промежуточные фазовые слои.

Применяя вышеизложенные рассуждения, при вакуумном осаждении металлизационной системы на подложку из AlN керамики предпочтение отдают, как правило, титану в качестве первого слоя системы, поскольку значение ΔH (ккал/моль) образования $TiN = -73,0$ и более отрицательно, чем значение ΔH образования $AlN = -57,7$ [12].

Для обеспечения высокой адгезии осаждаемой в вакууме металлизации к AlN керамике следует учитывать, что загрязнение на подложке с толщиной всего в несколько атомных слоёв может воспрепятствовать хорошему сцеплению металлизации с подложкой [13]. Таким образом,

важное значение имеет качество предварительной подготовки поверхности подложек, предназначенных для нанесения на них тонкоплёночной металлизации.

В ряде случаев в подложках из AlN керамики для силовых модулей необходимо формировать переходные металлизированные отверстия. Отверстия до металлизации обычно формируют лазером. При этом в местах формирования отверстий температура может превышать $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является причиной разложения AlN с образованием загрязняющего поверхность отверстий алюминия (рис. 1), который необходимо удалить перед тонкоплёночной металлизацией. При этом традиционные способы подготовки поверхности подложек из алюмонитридной керамики не приводят к положительному результату.

Рис. 1
Алюминий в отверстиях, сформированных лазером

Известный способ очистки поверхностей от масложировых загрязнений в радиоэлектронике, точном машиностроении, оптике и других областях техники [14], использующий фторуглерод, фторхлоруглеводород или предельный углеводород, направлен на расширение арсенала средств для очистки поверхностей, способных заменить озоноразрушающий хладон-113,

но не может быть использован для очистки подложек из алюмонитридной керамики с отверстиями, сформированными лазерной резкой, т. к. в составе предложенной смеси отсутствуют компоненты, способные удалить алюминий, образующийся на поверхности отверстий при резке лазером.

Известные процессы химической очистки поверхности изделий [15, 16] с использованием серной и ортофосфорной кислот, воздействие активированного раствора на поверхность пластин, промывку и сушку пластин не могут быть использованы для очистки подложек из алюмонитридной керамики, т. к. в результате взаимодействия серной и ортофосфорной кислот с подложкой из алюмонитридной керамики нарушается морфологическое состояние поверхности подложки, обуславливающее снижение адгезии тонкоплёночной металлизации к подложке.

При объёмной химической очистке поверхности изделий [17], в процессе которой подложки последовательно подвергают очистке в щелочном растворе, обработке в кислотном растворе, активное взаимодействие растворов (особенно щелочных) с AlN приводит к недопустимому нарушению морфологического состояния поверхности подложек, подлежащих тонкоплёночной металлизации. Поверхность становится шероховатой и светлее (рис. 2).

При нагревании в результате реакции нитрида алюминия с соляной кислотой (HCl) на поверхности подложки из AlN керамики появляются соли – хлорид алюминия ($AlCl_3$) и хлорид аммония (NH_4Cl). Поверхность полированной подложки при этом мутнеет, т. е. становится шероховатой. Для получения качественной очистки поверхности подложек из AlN керамики

Рис. 2

*Полированная поверхность AlN керамики:
а – до обработки в щелочных растворах;
б – после обработки*

с отверстиями, сформированными лазерной резкой, можно рекомендовать стадию очистки в кислотных травителях при температуре тающего льда. В качестве травителя использовать раствор соляной кислоты в воде с соотношением 0,7-1,3 объёмных частей кислоты на 1 объёмную часть воды. Как показали проведённые эксперименты, кислотные растворы при температуре тающего льда весьма слабо взаимодействуют с нитридом алюминия или вообще не взаимодействуют. Кроме того, в производстве легко поддерживать температуру тающего льда, проводя процессы в сосуде с водой, в которой плавает лёд. Результаты проведённых экспериментальных процессов по удалению алюминия с поверхности отверстий в подложках из AlN керамики в различных кислотных растворах при температуре тающего льда показали, что предпочтительно использовать раствор соляной кислоты в воде с соотношением 0,7-1,3 объёмных частей кислоты на 1 объёмную часть воды. Составы с большим содержанием кислоты нецелесообразно использовать из экономических соображений. Составы с другими кислотами либо не до конца удаляют алюминий, либо нарушают морфологическое

состояние поверхности подложек, представляющее собой помутнение, связанное с подтравливанием AlN и с образованием на поверхности соединений, с которыми титан не вступает в химическую реакцию. В результате имеет место существенное снижение адгезии осаждённой в вакууме металлизации к подложке.

При тонкоплёночной металлизации AlN керамики в качестве первого, адгезионного слоя, может быть не только титан, но и другие металлы, такие как: ниобий, тантал, ванадий, особенно когда на AlN керамике надо проводить процессы, традиционные для алюмооксидной керамики, например, формирование резисторов. Перед этим необходимо на поверхности керамики создать тонкий плотный слой оксида алюминия α -Al₂O₃, с которым возможно химическое взаимодействие вышеуказанных металлов.

Известно, что при очистке в плазме тлеющего разряда после предварительной химической очистки алюмооксидных керамических подложек можно получить адгезию покрытий, сравнимую с когезионной прочностью подложек [18, 19]. Эффект очистки объясняется созданием на поверхности оксидных подложек активных центров адсорбции и адгезии, а также инициированием химического взаимодействия между материалом осаждаемого металла и оксидной подложки. Такая плазменная обработка поверхности подложек перед нанесением покрытий в вакууме не только удаляет поверхностные загрязнения, но и модифицирует свойства поверхности в направлении повышения её адсорбционной и адгезионной активности,

т. е. в создании на поверхности подложки активных центров адсорбции и адгезии распылённых частиц, а также в упрочнении поверхности. При очистке поверхности в тлеющем разряде её активность по отношению к парам металла может сохраняться после разгерметизации камеры. Перед металлизацией такие подложки можно хранить на воздухе некоторое время. При последующем напылении без какой-либо очистки адгезия покрытий достаточно высока, например, ванадия, используемого часто в качестве первого слоя при тонкоплёночной металлизации Al₂O₃ керамики. С помощью рентгеновского дифрактометра XMD-300 установлено – обработкой в плазме тлеющего разряда на поверхности алюмонитридной керамики можно сформировать слой оксида алюминия α -Al₂O₃ (рис. 3), к которому тонкоплёночная система V-Cu имеет высокую адгезию. Кроме того, несмотря на то что значение ΔH (ккал/моль) образования VN = -41,0 несколько положительнее значения ΔH образования TiN = -73,0 [20], адсорбционная и адгезионная активность нитрида алюминия повышается также и к парам ванадия. На сформированных слоях тонкоплёночной металлизации, имеющих высокую адгезию к керамике, можно формировать металлические слои большей толщины гальваническим осаждением, напайкой аппликаций и т. п. в зависимости от назначения платы, что необходимо для формирования в коммутационных платах элементов электрических цепей с большой величиной тока.

Рис. 3

Дифрактограмма поверхности подложки из алумонитридной керамики после обработки в плазме тлеющего разряда

Коммутационная плата является одним из основных конструктивных элементов силовых модулей, обеспечивающая отвод тепла от активных элементов и электрическую разводку силовых и управляющих цепей.

В силовой электронике перспективны коммутационные платы из AlN керамики с токоведущими элементами из меди толщиной до 0,5 мм. Широкое использование в силовых модулях фирмы SEMIKRON, как уже указывалось ранее, нашли платы из AlN керамики, металлизированные методом DBC. Существенным недостатком плат, металлизированных методом DBC, является то, что процесс

требует очень точного температурного режима, поскольку проводится при температуре, близкой к температуре плавления меди равной 1084 °С. Кроме того, из-за повышенной хрупкости эвтектики Cu-CuO₂ следует ожидать низкую стойкость соединения в условиях циклического изменения температур. Также изделия из керамики, металлизированной по данному способу, нельзя паять высокотемпературными припоями в среде водорода из-за восстановления CuO₂ до меди, что приводит к нарушению соединения.

Одним из вариантов направления проведённой работы по металлизации медью была рассмотрена возможность использо-

вания тонкоплёночной металлизации, осаждённой в вакууме, с последующим гальваническим наращиванием слоя меди до требуемой толщины. По результатам проведённой работы можно рекомендовать данный метод при гальваническом наращивании меди толщиной до 50 мкм. Одной из причин ограничения толщины наращиваемой меди является длительность процесса.

Была получена высокая адгезия металлизации к керамике (близкая к когезионной) активной пайкой медной фольги.

Технологическая модель процесса металлизации AlN керамики активной пайкой медной фольги к керамике представлена на рис. 4.

Рис. 4

Технологическая модель процесса металлизации керамики активной пайкой медной фольги

В представленной технологической модели припоя на основе серебра размещали между медной фольгой и пластиной. При этом толщина прокладки припоя составляла 10-20 мкм. Хороший результат был получен без использования прокладки припоя посредством осаждения на медную фольгу 5-10 мкм серебра. При этом уже при температуре 778 °С образуется эвтектический припой ПСр72, содержащий

72 % серебра и 28 % меди. Изготовленные из таких подложек теплоотводящие элементы можно монтировать в среде водородо с помощью высокотемпературного припоя, например, на фланец. В металлизации будут отсутствовать какие-либо существенные механические напряжения, поскольку они релаксируются в отожжённой «мягкой» меди. Таким образом, были сформированы на пластинах из алюмонитридной керамики слои меди толщиной от 0,1 до 0,5 мм, что по электрическому сопротивлению вполне удовлетворяет требованиям силовой электроники.

Но вместе с тем при активной пайке формируется переходный слой между AlN керамикой и медью, представляющий

собой сложный сплав меди, серебра и титана, который трудноудалим при фотолитографическом травлении.

В коммутационных платах силовой электроники повышенной мощности в цепях коммутации имеются проводники, пропускающие токи в десятки и сотни ампер и они должны иметь минимальное электрическое сопротивление, а в слаботочных цепях, например, в цепях управления,

проводники могут иметь высокую плотность и размеры в несколько десятков микронетров. В таких платах топологический рисунок металлизации слаботорчных цепей может быть выполнен фотолитографическим травлением по тонкоплёночной металлизации. Перед пайкой на участках тонкоплёночного слоя, соответствующих электрическим цепям с повышенными токовыми нагрузками, размещали припой и аппликации из медной фольги. В переходных отверстиях, соединяющих силовые проводники на плате с силовыми выводами, расположенными на её внешней стороне, размещали медные вставки высотой меньшей толщины керамической пластины на величину не более оптимальной толщины припоя, что в десятки и сотни раз снижает электрическое сопротивление переходных отверстий. Пайку проводили эвтектическим припоем серебро-медь ПСр-72, оптимальная толщина в паяном шве которого составляет 45-75 мкм (22).

При высоте медных вставок в отверстиях меньшей толщины керамической пластины на величину не более 75 мкм в случае пайки припоем ПСр-72 зазор

между вставкой и аппликациями гарантированно заполняется припоем, обеспечивая надёжное электрическое соединение аппликация-вставка-вывод.

При термообработке достаточным является прижимающее давление, равное 0,01-0,03 кгс/мм². Пайку проводили при температуре 820 °С. Никель на поверхности осаждённого тонкоплёночного слоя исключает переход в состав припоя тонкоплёночной меди.

Были испытаны подложки из AlN керамики (рис. 5) с размерами 48х60 мм при толщине 1 мм. На тонкоплёночном слое осаждали никель толщиной 3мкм. Топологический рисунок был сформирован фотолитографическим травлением. В отверстиях размещали медные вставки высотой 0,93 мм и диаметром 2,9 мм. Использовали аппликации из медной фольги толщиной 0,3 мм. На внешней стороне платы под контактными площадками переходных отверстий размещали выводы. Пайку проводили припоем ПСр-72. Измеряли сопротивление между аппликациями и выводами, соединёнными через проходные отверстия, и проверяли наличие непропаев аппликаций.

Рис. 5

а – плата с рисунком металлизации по тонкоплёночной металлизации и аппликации до пайки;

б – плата с припаянными аппликациями и медными вставками;

в – корпус силового модуля с припаянными выводами

Вспучивание металлизации отсутствует, непропаев аппликаций нет, электрическое сопротивление переходных отверстий не превышало 10^{-4} Ом.

Заключение

Алюмонитридная керамика, отличающаяся экологической чистотой, высокой теплопроводностью и хорошими диэлектрическими свойствами, является одним из важнейших конструктивных материалов силовой электроники.

1. При вакуумном осаждении металлов на керамические подложки высокую адгезию металлизации к керамике можно получить при условии химического взаимодействия керамического материала с осаждаемым металлом.

2. При химической очистке поверхности AlN керамики, в процессе которой подложки последовательно подвергают очистке в щелочном растворе, обработке в кислотном растворе, смывке и промывке, активное взаимодействие щелочных растворов с AlN приводит к недопустимому нарушению морфологического состояния поверхности подложек, подлежащих тонкоплёночной металлизации. Поверхность подложек становится шероховатой с возможным присутствием нерастворимых солей, в результате чего тонкоплёночная металлизация имеет низкую адгезию к керамике.

3. Для получения качественной очистки поверхности подложек из AlN керамики с отверстиями, сформированными лазерной резкой, в процессе которой на поверхности отверстий образуется алюминий, подлежащий удалению, предпочтительно стадию очистки в кислотных травителях проводить при температуре тающего льда.

4. Очистка в плазме тлеющего разряда алюмонитридной керамики после предварительной химической очистки создаёт на поверхности подложек активные центры адсорбции и адгезии, а также инициирует химическое взаимодействие между материалом осаждаемого металла и материалом подложки. Кроме того, на поверхности AlN керамики создаётся слой α -Al₂O₃, на котором традиционная тонкоплёночная система V-Cu, осаждаемая на высокоглинозёмистую керамику, имеет высокую адгезию. При очистке в плазме тлеющего разряда адсорбционная и адгезионная активность нитрида алюминия повышается также не только к парам титана, но и к парам ванадия.

5. В силовой электронике коммутационные платы на основе керамики из нитрида алюминия с переходными отверстиями целесообразно проводить по следующему технологическому процессу:

- формирование тонкоплёночного слоя металлизации вакуумным осаждением в виде системы титан-медь;
- покрытие химическим никелем слоя меди;
- формирование фотолитографическим травлением рисунка металлизации;
- размещение в переходных отверстиях медных вставок высотой меньшей толщины керамической пластины на величину не более оптимальной толщины припоя;
- прижим аппликаций к покрытым медью участкам тонкоплёночного слоя, предназначенным для работы при повышенных токовых нагрузках, под давлением 0,01-0,03 кгс/мм²;
- пайка припоем на основе серебра, например, ПСр-72.

Литература

1. Савченко, Е.М. Металлокерамический корпус ТО-254 для изделий силовой электроники с рабочим напряжением до 2200 В и током до 50 А / Е.М. Савченко, В.А. Сидоров, А.Г. Чупрунов, И.А. Биларус // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – № 4 (251). – С. 53-59.
2. Будяков, А.С. Кремниевые СВЧ смесители на основе диодов Шоттки в монолитном и гибридном исполнении / А.С. Будяков, А.В. Вагин, А.Г. Васильев, С.А. Мельничук, Е.М. Савченко // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – Вып. 2(225). – С. 28-33.
3. Савченко, Е.М. Пассивные СВЧ аттенюаторы фиксированного номинала на основе нитрида алюминия / Е.М. Савченко, М.В. Гладких, А.А. Пронин, А.Д. Першин, Е.В. Шишкунова // Материалы международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012». Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 3-7 декабря 2012, Москва. – Москва, 2012. – С.103-106.
4. Мельничук, С.А. Обзор СВЧ симметрирующих устройств на основе технологии LTCC / С.А. Мельничук, А.С. Будяков, Е.М. Савченко // Материалы VIII научно-технической конференции молодых специалистов. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА, 21-23 октября 2009, Дубна. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2009. – С.60-62.
5. Интегральные индуктивности и трансформаторы аналоговых микросхем СВЧ-диапазона / В.Г. Сапогин, С.Г. Крутчинский, Н.Н. Прокопенко, А.С. Будяков, Е.М. Савченко. – Шахты: Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса. – 2010. – 272 с.
6. Способы формирования медной металлизации алюмонитридной керамики для корпусов мощных силовых твердотельных модулей / Е.М. Савченко, А.Г. Чупрунов, В.А. Сидоров, А.С. Гришаева. – Текст: электронный // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: материалы Российской научно-технической конференции с международным участием. – М.: РТУ МИРЭА, 2019. – Т. 2. – С. 351-354.
7. Рот, А. Вакуумные уплотнения / А. Рот, перевод с английского. – М.: Энергия, 1971. – 464 с.
8. Патент 682331 Союз Советских Социалистических республик, В 23К 1/20. Способ пайки керамики с металлом: заявл. 02.04.1974: опубл. 30.08.1979 / Бушков А.А., Хейфец В.С. – 2 с.
9. Костин, А.М. Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром / А.М. Костин, Ал.В. Лабарткава, В.А. Мартыненко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2014. – Т. 36. – № 6. – С. 816–827.
10. Колпаков, А. Интеллектуальные модули SEMIKRON с улучшенными тепловыми характеристиками / А. Колпаков // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8. – С. 52.
11. Шульц-Хардер, Юрген. Медно-керамические подложки – основа современной силовой электроники. Новые возможности технологии DBC, перспективы и проблемы создания нового поколения изделий силовой электроники / Юрген Шульц-Хардер // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3. – С. 72.
12. Катаев, С.В. Корпуса изделий мощной СВЧ и силовой твердотельной электроники с теплоотводами из новых материалов с высокой теплопроводностью: специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Катаев Сергей Владимирович; Московский государственный технологический университет. – Москва, 2018. – 143 с.
13. Шмаков, М. Школа производства ГПИС. Очистка поверхности пластин и подложек / М. Шмаков, В. Паршин, А. Смирнов // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 5. – С. 77-78.
14. Патент № 2293800, Российская Федерация, МПК C23G 5/028. Состав для очистки поверхностей от масложировых загрязнений: 2005114943: заявл. 1.05.2005: опубл. 20.02.2007 / Орехов В.Т., Скачедуб А.А., Раченок И.Г., Павлюкевич Е.; заявитель ВНИИХТ.
15. Патент № 2118013 Российская Федерация, МПК H01L021/306. Способ непрерывной жидкостной химической очистки поверхности полупроводниковых пластин: опубл. 01. 20. 1999 / Хяханина Т.И., Ключева Т.Б., Селиванова И.Н., Савельев В.А., Красников Г.Я., Просий А.Д.; заявитель Федеральный институт промышленной собственности.

16. Патент РФ № 2395135, МПК H01L 21/46.
Способ очистки поверхности сапфировых подложек: 2009105201: заявл. 16.02.2009: опубл. 20.07.2010 / Денисов А.В., Дерябин А.Н., Тихонов Е.О., Чистякова С.И.; заявитель ООО «Нанометр».
17. Ефимов, И.Е. Микроэлектроника / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь и Ю.Н. Горбунов. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.
18. Лучкин, А.Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А.Г. Лучкин, Г.С. Лучкин. – Вестник Казанского технологического университета. – 2002. – Т. 15. – С. 208-210.
19. Шидловский, И.И. / И.И. Шидловский, И.А. Иванов // Материалы XII Республиканской научно-практической конференции молодых учёных и студентов. – Минск: БНТУ, 2016. – 210 с.
20. Справочник химика: в 2-х томах. Т. 1. Общие сведения строения вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника. – Химия: Ленинград-Москва, 1962. – 1071 с.

Reference

1. Savchenko E.M., Sidorov V.A., Chuprunov A.G., Bilarus I.A. Metallokeramicheskiy korpus TO-254 dlya izdeliy silovoy elektroniki s rabochim napryazheniyem do 2200 V i tokom do 50 A [Metal-ceramic TO-254 case for 2200 W 50 A power electronic devices]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, no.4 (251), pp. 53-59.
2. Budyakov A.S., Vagin A.V., Vasilyev A.G., Melnichuk S.A., Savchenko E.M. Kremniyevyye SVCH smesiteli na osnove diodov Shottki v monolitnom i gibridnom ispolnenii [Monolithic and hybrid silicon microwave mixers based on Schottky diodes]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2010, no.2 (225), pp. 28-33.
3. Savchenko E.M., Gladkikh M.V., Pronin A.A., Pershin A.D., Shishkunina E.V. Passivnyye SVCH attenuatory fiksirovannogo nominala na osnove nitrida alyuminiya [Passive microwave nominal attenuators based on AlN]. *Materialy konferentsii INTERMATIC-2012. Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya*, Moscow, 2012, pp.103-106.
4. Melnichuk S.A., Budyakov A.S., Savchenko E.M. Obzor SVCH simmetriruyushchikh ustroystv na osnove tekhnologii LTCC [Overview of microwave baluns based on LTCC technology]. *Materialy konferentsii Tverdotel'naya elektronika, slozhnyye funktsional'nyye bloki REA*, Moscow, S&PE PULSAR, 2009, pp. 60-62.
5. Sapogin V.G., Krutchinskiy S.G., Prokopenko N.N., Budyakov A.S., Savchenko E.M. Integral'nyye induktivnosti i transformatory analogovykh mikroskhem SVCH-diapazona [Integrated inductors and transformers of microwave analog circuits]. *Shakhty, Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i servisa*, 2010, 272 p.
6. Savchenko E.M., Chuprunov A.G., Sidorov V.A., Grishaeva A.S. Sposoby formirovaniya mednoy metallizatsii alyumonitridnoy keramiki dlya korpusov moshchnykh silovykh tverdotel'nykh moduley [Methods for the formation of copper metallization of aluminitrideramics for power solid-state modules packaging]. *Materialy konferentsii Informatika i tekhnologii. Innovatsionnyye tekhnologii v promyshlennosti i informatike*, Moscow, Russian Technological University MIREA, 2019, vol. 2, pp. 351-354.
7. Roth A. Vakuurnyye uplotneniya [Vacuum Sealing Techniques], Moscow, Energiya, 1971, 464 p.
8. Bushkov A.A., Heifetz. Sposob payki keramiki s metallom [Method of brazing ceramics with metal]. Patent Russian Federation no. 68233 (1979).
9. Kostin A.M., Labartkava A.V., Martynenko V.A. Issledovaniye protsessov vzaimodeystviya titanosoderzhashchikh pripyev s oksidnoy keramikoy i kovarom [Research on the processes of interaction of titanium-containing solders with oxide ceramics and kovar]. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii*, 2014, vol. 36, no. 6, pp. 816-827.
10. Kolpakov A. Intellectual'nyye moduli SEMIKRON s uluchshennymi teplovymi kharakteristikami [Smart SEMIKRON modules with improved thermal performance]. *Komponenty i tekhnologii*, 2003, no. 8, 52 p.
11. Schulz-Harder J. Medno-keramicheskiye podlozhki – osnova sovremennoy silovoy elektroniki. Novyye vozmozhnosti tekhnologii DBC, perspektivy i problemy sozdaniya novogo pokoleniya izdeliy silovoy elektroniki [Copper-ceramic substrates - the basis of modern power electronic devices. New features of DBC technology, prospects and issues of creating a new generation of power electronic devices]. *Komponenty i tekhnologii*, 2005, no. 3, 72 p.
12. Kataev S.V. Korpusa izdeliy moshchnoy SVCH i silovoy tverdotel'noy elektroniki s teplootvodami iz novykh materialov s vysokoy teploprovodnost'yu

- Power microwave and solid-state electronic devices packaging with heat-sinks made of new materials with high thermal conductivity]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2018, 143 p.
13. Shmakov M., Parshin V., Smirnov A. Shkola proizvodstva GPIS. Ochistka poverkhnosti plastin i podlozhek [School of semiconductor HIC manufacturing. Wafers and substrate surface cleaning]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2008, no. 5, pp. 77-78.
 14. Orekhov V.T., Skachedub A.A., Rachenok I.G., Pavlyukevich Ye. Sostav dlya ochistki poverkhnostey ot maslozhirovykh zagryazneniy [Composition for cleaning surfaces from oil and grease contaminants]. Russian Federation patent no. 2293800 (2005).
 15. Khakhanina T.I., Klyuyeva T.B., Selivanova I.N., Savel'yev V.A., Krasnikov G.YA., Prosiy A.D. Sposob nepreryvnoy zhidkostnoy khimicheskoy ochistki poverkhnosti poluprovodnikovyykh plastin [Method for continuous liquid chemical surface cleaning of semiconductor wafers]. Russian Federation patent no. 2118013 (1999).
 16. Denisov A.V., Deryabin A.N., Tikhonov Ye.O., Chistyakova S.I. Sposob ochistki poverkhnosti sapfirovykh podlozhek [The method for sapphire substrates surface cleaning]. Russian Federation patent no. 2395135 (2009).
 17. Efimov I.E., Kozyr I.Ya., Gorbunov Yu.N. Mikroelektronika [Microelectronics], Moscow, Vyshaya Shkola, 1986, 416 p.
 18. Luchkin A.G., Luchkin G.S. Ochistka poverkhnosti podlozhek dlya naneseniya pokrytiy vakuumno-plazmennymi metodami [Substrate surface cleaning for the vacuum-plasma coating techniques]. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, Kazan, 2002, vol. 15, pp. 208-210.
 19. Shidlovskiy I.I., Ivanov I.A. *Materialy XII Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchonykh i studentov*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2016, 210 p.
 20. Spravochnik khimika. T. 1. Obshchiye svedeniya stroyeniya veshchestva, svoystva vazhneyshikh veshchestv, laboratornaya tekhnika [Chemist's Handbook. Vol. 1. General structure of matter, properties of essential matters, laboratory equipment]. Leningrad – Moscow, Khimiya, 1962, 1071 p.