

Для цитирования: Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, Ш.А. Юсуфов, Э. Казалиева. Метод формирования контактного слоя титан-германий для термостабилизации транзисторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4): 49-56. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56

For citation: T. A. Ismailov, A. R. Shakhmayeva, Sh. A. Yusufov, E. Kazalieva. Method for forming a titanium-germanium contact layer for thermostabilization of transistors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 49-56. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО СЛОЯ ТИТАН-ГЕРМАНИЙ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ

Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, Ш.А. Юсуфов, Э. Казалиева

Дагестанский государственный технический университет

367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является получение высококачественных и воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных металлических слоев от технологии формирования которых, зависит надежность и качество изделий микроэлектроники - кремниевых транзисторов. **Метод.** Предложен способ формирования двухслойной металлизации титан-германий для создания контакта и отвода тепла от коллекторного перехода мощных полупроводниковых транзисторов на обратной стороне пластин с сформированными структурами. Предложенный метод обеспечивает качество паяного соединения и термостабилизацию полупроводниковых приборов, увеличивая надежность работы исследуемых приборов в системах радиоэлектронной аппаратуры. **Результат.** Данное сочетание напыляемых металлов обеспечивает получение надежного контакта к коллекторной области при посадке кристалла на основание корпуса, которое приводит к уменьшению сопротивления омического перехода и увеличивает процент выхода годных приборов. **Вывод.** По результатам экспериментальных исследований были получены оптимальные толщины слоев металлов напыляемых на обратную сторону кристаллов транзисторов при формировании металлизации для посадки кристаллов на основание корпуса. Исследована стабильность системы Ti-Ge. Техническим результатом исследований является повышение качества посадки за счет получения равномерного распределения слоя Ti-Ge в едином технологическом цикле при заданной температуре с определенной толщиной отдельно каждого металла.

Ключевые слова: титан, германий, припой, мощный полупроводниковый транзистор, кристалл, термостабилизация, температура плавления, напыление, контакт

METHOD FOR FORMING A TITANIUM-GERMANIUM CONTACT LAYER FOR THERMOSTABILIZATION OF TRANSISTORS

T.A. Ismailov, A.R. Shakhmayeva, Sh.A. Yusufov, E. Kazalieva

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachka 367026, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to obtain high-quality and reproducible electrophysical parameters of thin-film metal layers, the formation technology of which determines the reliability and quality of microelectronic products – silicon transistors. **Methods.** A method for forming a two-layer titanium-germanium metallization to create a contact and remove heat from the collector junction of high-power semiconductor transistors on the reverse side of plates with formed structures is proposed. The proposed method ensures the quality of the soldered connection and thermal stabilization of semiconductor devices, increasing the reliability of the studied devices in radio-

electronic equipment systems. **Results.** This combination of sprayed metals provides a reliable contact to the collector area when the crystal is placed on the base of the case, which reduces the resistance of the ohmic transition and increases the output of suitable devices. **Conclusion.** Based on the results of experimental procedures, the optimal thicknesses of metal layers deposited on the reverse side of transistor crystals were obtained during the formation of metallization to fit crystals on the base of the case. The Ti-Ge system stability is studied. The technical result of the research is to improve the quality of planting by obtaining a uniform distribution of the Ti-Ge layer in a single technological cycle at a given temperature with a certain thickness for each metal separately.

Keywords: titanium, germanium, solder, high-capacity semiconductor transistor, crystal, thermal stabilization, fusion point, sputtering, contact

Введение. Получение качественных, воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных металлических слоев является одним из важнейших технологических процессов формирования структур кристалла полупроводниковых транзисторов. Надежность полупроводниковых приборов зависит в значительной степени от совершенства технологических процессов нанесения тонких пленок.

В технологии изучения полупроводниковых приборов широко используются тонкие пленки толщиной от микронных и субмикронных толщин. Такие пленки обычно получают вакуумным, магнетронным или электролитическим осаждением. Такие как: никель, золото, или серебро обладают антикоррозийными свойствами драгметаллов и имеют высокую электропроводность и обуславливают широкое применение их в качестве слоя, выполняющего функции проводника, а слой никеля используется в качестве диффузионного барьера между адгезионным слоем и драгметаллом.

Стабильность свойств таких слоев в полной мере не изучена. Исследования стабильности системы Ti-Ge с толщинами соответственно - 1,0-2,0 (мкм), полученная методом магнетронным осаждением на импортной установке LEYBOLD AG Z-600, показали, что система остается стабильной при температурах 280-600⁰С в отличие от системы Cr-Ni-Cu-Au, которая остается стабильной лишь в течение нескольких минут при повышенных температурах от 400-500⁰С [1, 2, 9,10].

В производстве полупроводниковых приборов с повышением требований к точности, надежности приборов ожесточаются требования к контактам. Без знания функциональных свойств покрытий и их зависимости от различных факторов, от условий их осаждения трудно прогнозировать надежность контакта изучаемого прибора.

Важным этапом в технологии металлизации обратной стороны мощных кремниевых транзисторов является контроль параметров тонких металлических пленок - скорости напыления, толщины и ее равномерности, поверхностного сопротивления.

В результате соприкосновения с кремниевой поверхностью формируется адгезионное взаимодействие кремния и металлизации пленки, чем лучше адгезия, тем лучше это взаимодействие. У каждого материала свои функции: адгезионные, припойные, защитные, барьерные и др. Поэтому очень важен выбор материалов, обеспечивающих хорошую адгезию к кремнию [3].

Наивысшей адгезией к полупроводниковым приборам обладают переходные материалы, такие как хром, титан, железо, молибден [2,19,21,22]. Увеличение адгезии происходит и при напылении на подогретую подложку. Но, материал напыляемой пленки должен диффундировать внутрь полупроводника. Переходные металлы обладают высоким удельным сопротивлением, поэтому применяются для создания надежной металлизации поверхности полупроводника [5,6].

Постановка задачи. На базе научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств при Дагестанском государственном техническом университете были проведены экспериментальные работы по посадке БСИТ-транзисторов (КП-961) с различной технологией обработки и напыления обратной стороны

пластин. Анализ статистических данных показал зависимость брака транзисторных структур КП-961 по электрическим параметрам от технологии обработки и напыления обратной стороны, а также от технологии посадки кристалла на основание корпуса ТО-218.

Анализ транзисторов, вышедших из строя в результате вторичного пробоя, показал, что он появляется из-за концентрации тока в пределах малых областей активной площади прибора, возникает проблема равномерного токораспределения по структуре и отвода выделяющего тепла в транзисторах.

Задачей исследований является разработка оптимальной технологии формирования слоя Ti-Ge и посадки кристалла на основание корпуса, обеспечивающих надежную работу полупроводникового прибора [18].

Методы исследования. Исследован способ соединения полупроводникового кристалла с кристаллодержателем, сущность которого заключается в напылении на обратную сторону пластин слоя металлов титан-германий (Ti-Ge). Между поверхностями кристалла и кристаллодержателя размещают припойную прокладку оловянно-свинцовую, нагревают детали до формирования паяного соединения. Данный метод обеспечивает качество паяного соединения и термостабилизацию полупроводниковых приборов, увеличивая надежность работы полупроводниковых приборов.

Обсуждение результатов. Для обеспечения требуемых характеристик и параметров мощных кремниевых транзисторов разработана оптимальная технология двухслойной металлизации обратной стороны кремниевых пластин, обеспечивающая надежность работы полупроводникового прибора [4,17, 20].

Современные мощные транзисторные структуры (рис.1.) в основном изготавливаются на планарно-эпитаксиальных структурах вертикального типа, в которых контакт к коллектору осуществляется через сильнолегированную подложку, поскольку она является телом коллектора. В работе биполярного транзистора в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный в обратном. Неосновные носители заряда, инжектированные эмиттером, переносятся от эмиттера к коллектору с помощью диффузии и дрейфа в неоднородной базе.

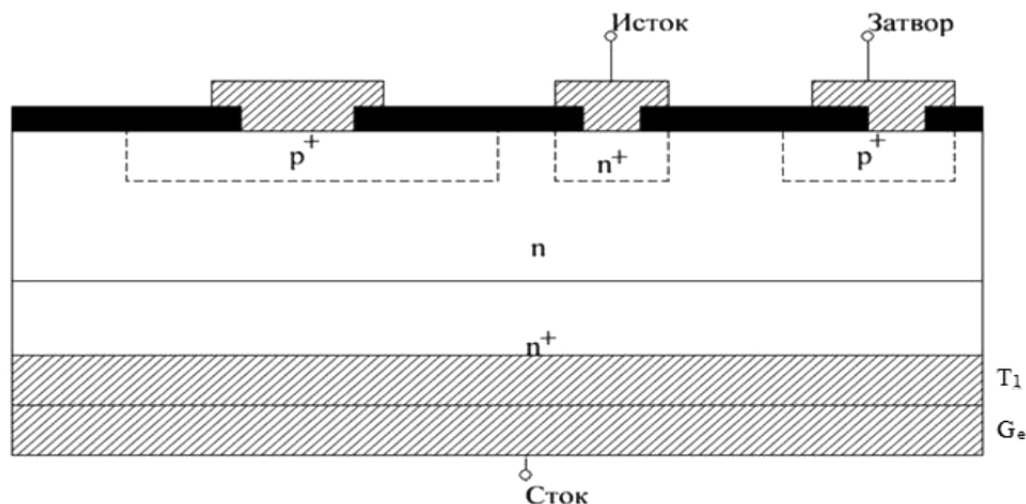


Рис.1. Структура исследования мощного кремниевого транзистора
Fig.1. Research structure of a high-power silicon transistor

В объеме базы происходит рекомбинация неосновных и основных носителей. При тонкой базе большая часть неосновных носителей, инжектированных эмиттером, доходит до границы коллекторного перехода и ускоряющим полем этого перехода переносится в область коллектора, образуя поток основных носителей. Режим отличается тем, что оба перехода находятся под прямым смещением. При этом инжекция осуществляется как эмиттерным, так и коллекторным переходами.

Одной из основных характеристик мощного транзистора является его сопротивление насыщения. Эта величина представляет собой напряжение, падающее между коллектором и эмиттером открытого транзистора при заданном значении коллекторного тока и достаточно большой степени насыщения. Благодаря наличию у транзистора не равного нулю сопротивления насыщения, его предельный ток в области малых напряжений зависит от величины приложенного напряжения. Действительно, для каждого значения напряжения коллектора ток в транзисторе не может быть больше, чем отношение этого напряжения к сопротивлению насыщения.

Техническим результатом изобретения является повышение надежности контакта кристалла с кристаллодержателем и стабильности процесса его присоединения. При посадке прибора на основание корпуса основной целью является защита поверхности полупроводника в нужных местах от проникновения примесей. Качество полученного маскирующего покрытия тщательно контролируют: измеряют его толщину, определяют однородность, наличие дефектных мест (проколов, кристаллических включений, инородных частиц), которые приводят к появлению участков с высоким тепловым сопротивлением и к выходу прибора из строя. Если площадь дефектов мала относительно площади кристалла и не влияет на активную структуру транзисторов, то основная часть изделия характеризуется низким уровнем теплового сопротивления. При длительной эксплуатации в неблагоприятных условиях надежность таких изделий снижается тем, что рост дефектов может привести к отказу элементов микросхемы [8].

Для образования паяного соединения необходимо смачивание поверхности металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. Паяное соединение должно иметь низкое переходное электрическое сопротивление, герметичность и требуемую прочность при различных условиях работы. В полупроводниковой технологии существуют различные способы монтажа кристаллов на подложку: пайка припоями, пайка эвтектическими сплавами, приклеивание токопроводящими клеями на органической основе, присоединение с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол. Каждый из способов должен обеспечивать максимальный отвод тепла, высокую механическую прочность соединения, малое сопротивление контакта [1].

Для способа посадки кристалла на эвтектические сплавы, помимо технологических трудностей, характерны высокая температура, значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов и снижению надежности приборов, отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов [11]. Пайка считается единственным из всех перечисленных способом, обеспечивающим электрические и тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов, так как припой обладает лучшей теплопроводностью и электропроводностью, чем стекла и клеи.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. В приборах, мощность рассеяния кристалла в которых невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу устройства, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию. Качество пайки кристалла во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. При размещении прокладки припоя непосредственно под кристаллом существует вероятность, что в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении останутся в зоне шва, ухудшая смачиваемость припоем поверхности кристалла и приводя к образованию непропаев, что нарушает сплошность шва, ведет к ухудшению его теплопроводности и снижению надежности полупроводниковых изделий [10].

Качество посадки контролируется методом отрыва с определенным усилием и визуально под микроскопом. При проведении контроля посадки кристалла с двухслойной металлизацией кристалл не отрывается от кристаллодержателя при приложении соответствующего усилия, а при приложении большего усилия разламывается сам кремний. Это объясняет то, что посадка

кристалла качественная. При визуальном контроле под микроскопом со всех сторон кристалла по периметру проступает припой на 0,5-1,0 мм от края, что показывает удовлетворительное распределение припоя по всей площади кристалла.

Более того, контроль площади распределения припоя по основанию кристалла с помощью рентгеновского микроскопа показал 100% распределение припойного слоя по площади кристалла без пор, что улучшает тепловые свойства прибора [13-16]. Использование данного способа позволяет повысить надежность контакта кристалла с кристаллодержателем при проведении процесса напыления двух металлов: титан-германий в едином технологическом цикле.

Контроль толщины пленки металла проводился на импортной установке «Alpha-Step». Основными контролируруемыми параметрами при проведении экспериментов на определение оптимальных технологических режимов на получение заданных толщин являются: мощность катода, скорость движения полета, давление вакуума в камере. Система Ti-Ge с толщинами соответственно- 1,0-0,5 (мкм) напыляемой пленки зависит от задаваемых значений мощности и скорости движения полета.

Время предварительной очистки пластин в блоке плазмотравления устанавливаем на 1 мин. Расход аргона -185 - 220 см³/ч, давление вакуума в камере 5х10⁻³мбар. Определяем зависимость толщины напыляемой пленки от мощности катода и скорости движения полета для каждого металла (рис.2- 3).

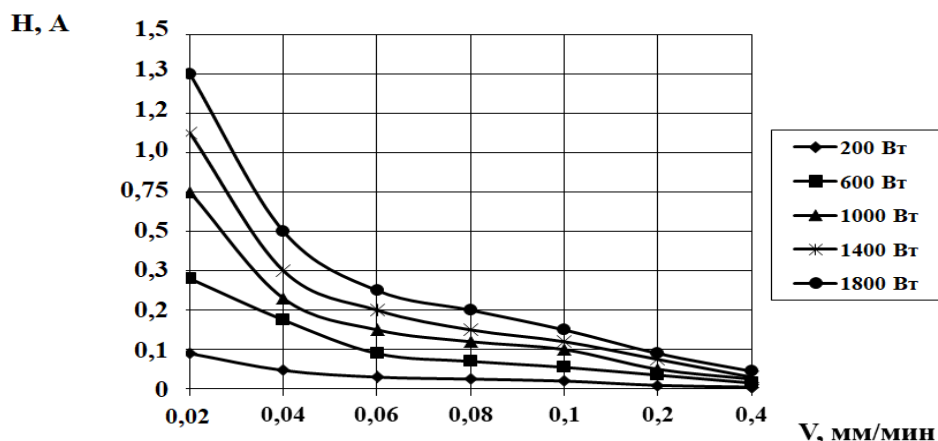


Рис.2. Зависимость толщины пленки титана от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig.2. Dependence of the titanium film thickness on the flight speed at different cathode power

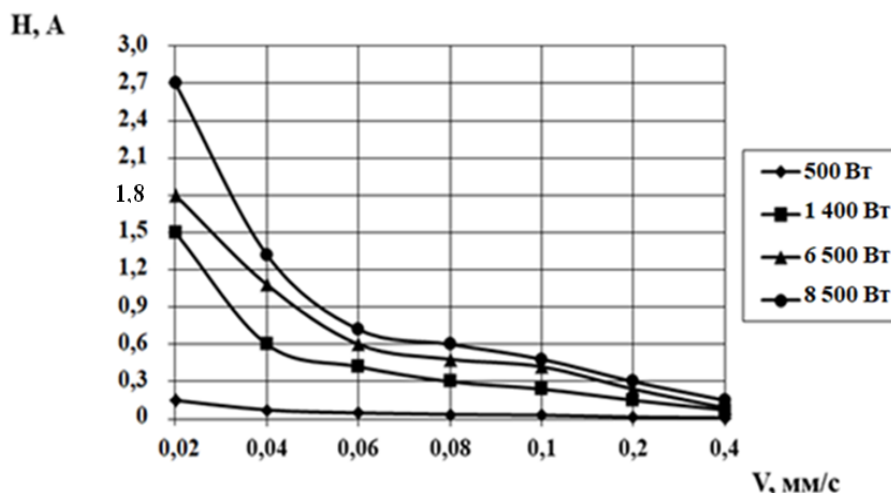


Рис.3. Зависимость толщины пленки германия от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig.3. Dependence of the germanium film thickness on the flight speed at different cathode power

Вывод. На основании полученных результатов разработана оптимальная технология формирования контактного слоя Ti-Ge для термостабилизации кремниевых транзисторов. Сущность способа заключается в том, что на обратную сторону кремниевой пластины со стороны БСИТ-транзисторов КП-961 наносят в среде аргона последовательно в едином технологическом цикле два металла: титан и германий.

Для получения необходимых толщин их слоев получают следующие технические режимы напыления: титан при мощности катода-1400Вт и скорости движения полета - 0,03мм/мин, а германий при той же мощности скорость движения полета - 0,06 мм/мин. Затем по технологии разделяют пластину со структурами на кристаллы и производят пайку кристаллов к кристаллодержателю при температуре 280-300⁰С в течение 2-4 с. Данное сочетание напыляемых слоев обеспечивает получение надежного контакта кристалла с кристаллодержателем, 100% распределение припоя по поверхности кристалла, отсутствие пор в припое, улучшение выходных характеристик прибора и увеличение на 10% выхода годных изделий.

Библиографический список:

1. Алиев Ш. Д., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А. Современные технологические методы контроля пайки // Сб. тезисов докл. XXIV итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 21-24 апр., 2003. Махачкала: ДГТУ, 2003. С. 87.
2. Белов А.Н., Голишиников А.А., Костюков Д.А., Шевяков В.И.// Металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе сплава вольфрама с титаном. Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019.Т.24. №1. С.22-29.
3. Бурмаков А.П., Кулешов В.Н.//Высоко адгезионная металлизация керамики пленками оксида титана изменяющего толщине состава. Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2007. №1. С. 24-28.
4. Ванюхин К.Д., Захарченко Р.В., Сейдман Л.А., Пашков М.В., Воронова А.А., Блинов П.А., Евсеева Е.М., Миннебаев С.В.// Исследование структуры и морфологии поверхности двухслойной металлизации Ti/Al. В книге: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов: в 3-х томах.О.Н. Голотук. 2014. С.85.
5. Горлов М.И., Мешкова М.А. // Формирование металлизации на обратной стороне кремниевых пластин. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 1. С. 95-97.
6. Громов Д.Г., Мочалов А.И./ Материалы и процессы формирования систем металлизации кремниевых интегральных схем// Уч. пособие. М.: МИЭТ, 2006. С. 180.
7. Исмаилов Т.А., Алиев Ш.Д., Шахмаева А.Р.,ШангерееваБ.А. Контроль качества посадки кристалла на основание корпуса (тезисы докладов). Измерение, контроль, информатизация: сборник трудов Международной научно-технической конференции. Барнаул: АГТУ, 2004. С. 55-56.
8. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Транзисторные структуры силовой электроники. СПб.Политехника, 2011. 125 с.
9. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Экспериментальное исследование и оптимизация технологического процесса формирования контакта к коллекторной области кремниевых транзисторов// Базовые процессы формирования активных областей структуры мощных кремниевых транзисторов. СПб.:Политехника, 2009. С. 119.
10. Колпаков А. Новые технологии расширяют горизонты силовой электроники//Компоненты и технологии. 2007. № 4.
11. Ланин В. Паяемость выводов электронных компонентов//Технологии в электронной промышленности. 2010. № 4.
12. Климачев И.И., Литвинова Т.В., Сидоренко С.И. Исследование стабильности системы Cr-Cu-Ni-Au, со слоями, полученными электролитическим осаждением. Микроэлектроника. 1994, Т.23. Вып.2. с. 91-95. Мазель Е.З., Пресс Ф.П. Планарная технология кремниевых приборов. Москва, «Энергия», 1974 г., стр. 318-321.
13. Мазель Е.З., Пресс Ф.П. Планарная технология кремниевых приборов. Москва, «Энергия», 1974 г., стр. 318-321.
14. Патент 2460168 (RU), Н 01 L 21/52. Способ пайки кристаллов на основе карбида кремния / В. В. Зенин, В. И. Бойко, А. В. Кочергин, Б. А. Спиридонов, А. В. Строгонов; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 19.
15. Патент РФ №2375787 «Способ посадки кремниевого кристалла на основание корпуса»/Т.А. Исмаилов, Б.А. Шангереева, А.Р. Шахмаева. Опубл.10.12.2009. Бил. №34.
16. Патент 2007127165/28 РФ, МПК H01L 21/283. Способ формирования контактного слоя титан-германий / Т. А. Исмаилов, А. Р. Шахмаева, Б. А. Шангереева. Опубл.10.01.2009. Бюл. №1.
17. Сенько С.Ф., Белоус А.И., Плебанович В.И.// Способ изготовления системы металлизации кремниевых полупроводниковых приборов. Патент на изобретение RU 2335568 C1, 10.09.2008. Заявка №200614979/28 от 04.12.2006.
18. Шахмаева А.Р. Оптимизация технологии посадки кристалла кремниевого транзистора на основание корпуса // Проектирование и технология электронных средств, 2006. №4. С.26-27.
19. Jacobs, B. Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures. / B. Jacobs, M. C. J. C. M. Kramer, E. J. Geluk, F. Karouta // J. Cryst. Growth. 2002. Vol. 241. pp. 15-18.
20. Liu, Q. Z. A review of the metal-GaN contact technology / Q. Z. Liu, S. S. Lau // Solid State Electron. 1998. Vol. 42, No 5. pp. 677-691.
21. Wang C., Cho S.-J., Kim N.-Y. Optimization of ohmic contact metallization process for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor.Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2013, Vol.14, № 1, pp. 32-35.
22. Yoon S., Bang J., Lee H., Oh J. Interfacial AlN formation of Si/Ti/Al/Cu Ohmic contact for AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors. Microelectronic Engineering. 2016, No. 151, pp. 60-63.

References:

1. Aliyev SH. D., Shakhmayeva A. R., Shangereyeva B. A. Sovremennyye tekhnologicheskiye metody kontrolya payki // Sb. tezisev dokl. XXIV itogovoy nauch.-tekhn. konf. prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, 21-24 apr., 2003.

- Makhachkala: DGTU, 2003. S. 87. [Alev sh. D., Shakhmayeva A. R., Shangereeva B. A. Modern technological methods of soldering control // Collection of abstracts of the XXIV final scientific and technical conference of teachers, employees, post-graduates and students of DSTU, 21-24 APR., 2003. Makhachkala: DSTU, 2003. p. 87. (In Russ)]
2. Belov A.N., Golishnikov A.A., Kostyukov D.A., Shevyakov V.I.// Metallizatsiya vysokotemperaturnykh kremniyevykh IS na osnove splava vol'frama s titanom. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika. 2019.T.24. №1. S.22-29. [Belov A. N., Golishnikov A. A., Kostyukov D. A., Shevyakov V. I.// Metallization of high-Temperature silicon ICS based on a tungsten-titanium alloy. Newsofhighereducationalinstitutions. Electronics. 2019.T.24. No. 1. pp. 22-29. (In Russ)]
 3. Burmakov A.P., Kuleshov V.N. // Vysoko adgezionnaya metallizatsiya keramiki plenkami oksida titana izmenyayushchego tolshchine sostava. Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika. 2007. №1. S. 24-28. [Burmakov A. P., Kuleshov V. N. // Highly adhesive metallization of ceramics With titanium oxide films of thickness-changing composition. Bulletin of BSU. Series 1, Physics. Mathematics. Computerscience. 2007. No. 1. pp. 24-28. (In Russ)]
 4. Vanyukhin K.D., Zakharchenko R.V., Seydman L.A., Pashkov M.V., Voronova A.A., Blinov P.A., Yevseyeva Ye.M., Minnebayev S.V.// Issledovaniye struktury i morfologii poverkhnosti dvukhsloynnoy metallizatsii TI/AL. V knige: Nauchnaya sessiya NIYAU MIFI-2014. Annotatsii dokladov: v 3-kh tomakh.O.N. Golotyuk. 2014. S.85. [Vanyukhin K. D., Zakharchenko R. V., Seidman L. A., Pashkov M. V., Voronova A. A., Blinov P. A., Evseeva E. M., Minnebaev S. V.// Investigation of the structure and morphology of the surface of two-layer metallization TI/AL. In the book: scientific session of MEPhi-2014. Abstracts of reports: in 3 Vol.O. N. Golotyuk. 2014. p. 85. (In Russ)]
 5. Gorlov M.I., Meshkova M.A. // Formirovaniye metallizatsii na obratnoy storone kremniyevykh plastin. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. T. 5. № 1. S. 95-97. [Gorlov M. I., Meshkova M. A. // formation of metallization on the reverse side of silicon plates. Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2009. Vol. 5.No. 1. pp. 95-97. (In Russ)]
 6. Gromov D.G., Mochalov A.I./Materialy i protsessy formirovaniya sistem metallizatsii kremniyevykh integral'nykh skhem. // Uch. posobiye. M.: MIET, 2006. S.180. [Gromov D. G., Mochalov A. I. / Materials and processes of formation of metallization systems of silicon integrated circuits//Uch. manual. Moscow: MIET, 2006. p.180. (In Russ)]
 7. Ismailov T.A., Aliyev SH.D., Shakhmayeva A.R., Shangereyeva B.A. Kontrol' kachestva posadki kristalla na osnovaniye korpusa (tezisy dokladov). Izmereniye, kontrol', informatizatsiya: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Barnaul: AGTU, 2004. S. 55-56. [Ismailov T. A., Aliyev sh. D., Shakhmayeva A. R., Shangereeva B. A. quality Control of crystal landing on the base of the case (abstracts). Measurement, control, Informatization: proceedings of the International scientific and technical conference. Barnaul: AGTU, 2004, pp. 55-56. (In Russ)]
 8. Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R. Tranzistornyye struktury silovoy elektroniki. SPb: Politehnika, 2011. 125 s. [Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R. Transistor Structures of power electronics. Saint Petersburg: Politehnika, 2011. 125 p. (In Russ)]
 9. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R. Eksperimental'noye issledovaniye i optimizatsiya tekhnologicheskogo protsessa formirovaniya kontakta k kollektornoy oblasti kremniyevykh tranzistorov// Bazovyie protsessy formirovaniya aktivnykh oblastey struktury moshchnykh kremniyevykh tranzistorov. Spb.:Politehnika, 2009. S. 119. [Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R. experimental research and optimization of the technological process of forming a contact to the collector region of silicon transistors// Basic processes of formation of active regions of the structure of high-power silicon transistors. SPb.:Politehnika, 2009, P. 119. (In Russ)]
 10. Kolpakov A. Novyye tekhnologii rasshiryayut gorizonty silovoy elektroniki//Komponenty i tekhnologii. 2007. № 4. [Kolpakov A. New technologies expand the horizons of power electronics//Components and technologies. 2007. № 4. (In Russ)]
 11. Lanin V. Payayemost' vyvodov elektronnykh komponentov//Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti. 2010. № 4. [Lanin V. Solderability of electronic component leads//Technologies in the electronics industry. 2010. № 4. (In Russ)]
 12. Klimachev I.I., Litvinova T.V., Sidorenko S.I. Issledovaniye stabil'nosti sistemy Cr-Cu-Ni-Au, so sloyami, poluchennymi elektroliticheskimi osazhdeniyem. Mikroelektronika. 1994, T.23. Vyp.2. s. 91-95. [Klimachev I. I., Litvinova T. V., Sidorenko S. I. stability study of the Cr-Cu-Ni-Au system with layers obtained by electrolytic deposition. Microelectronics, 1994, Vol. 23, issue 2, pp. 91-95. (In Russ)]
 13. Mazel' Ye.Z., Press F.P. Planarnaya tekhnologiya kremniyevykh priborov. Moskva, «Energiya», 1974 g., str. 318-321. [Mazel E. Z., Press F. P. Planar technology of silicon devices. Moscow, Energia, 1974, pp. 318-321. (In Russ)]
 14. Patent 2460168 (RU), H 01 L 21/52. Sposob payki kristallov na osnove karbida kremniya / V. V. Zenin, V. I. Boyko, A. V. Kochergin, B. A. Spiridonov, A. V. Strogonov; opubl. 27.08.2012. Byul. № 19. [Patent 2460168 (RU), H 01 L 21/52. Method for soldering crystals based on silicon carbide / V. V. Zenin, V. I. Boyko, A. V. Kochergin, B. A. Spiridonov, A. V. Strogonov; publ. 27.08.2012. Byul.no. 19. (In Russ)]
 15. Patent RF №2375787 «Sposob posadki kremniyevogo kristalla na osnovaniye korpusa»/T.A. Ismailov, B.A. Shangereyeva, A.R. Shakhmayeva. Opubl.10.12.2009. Bil. №34. [Patent of the Russian Federation No. 2375787 "Method for planting a silicon crystal on the base of the case" /T. A. Ismailov, B. A. Shangereeva, A. R. Shakhmayeva. Publ.10.12.2009. Bill.No. 34. (In Russ)]
 16. Patent 2007127165/28 RF, MPK H01L 21/283. Sposob formirovaniya kontaktnogo sloya titan-germaniy / T. A. Ismailov, A. R. Shakhmayeva, B. A. Shangereyeva. Opubl.10.01.2009. Byul. №1. [Patent 2007127165/28 of the Russian Federation, IPC H01L 21/283. A method of forming a contact layer of titanium-germanium / T. A. Ismailov, A. R. Shakhmaeva, B. A. Shangareeva.Publ.10.01.2009. Byul.No. 1. (In Russ)]
 17. Sen'ko S.F., Belous A.I., Plebanovich V.I.// Sposob izgotovleniya sistemy metallizatsii kremniyevykh poluprovodnikovyykh priborov. Patent na izobreteniy RU 2333568 C1, 10.09.2008. Zayavka №200614979/28 ot 04.12.2006. [Senko S. F., Belous A. I., Plebanovich V. I.// Method for manufacturing a metallization system for silicon semiconductor devices. The patent for the invention EN 2333568 C1, 10.09.2008. Application no. 200614979/28 dated 04.12.2006. (In Russ)]
 18. Shakhmayeva A.R. Optimizatsiya tekhnologii posadki kristalla kremniyevogo tranzistora na osnovaniye korpusa // Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv, 2006. №4. S.26-27. [Shakhmayeva A. R. Optimization of the technology for plac-

- ing a silicon transistor crystal on the base of the case // Design and technology of electronic means, 2006, No.4.pp. 26-27. (In Russ)]
19. Jacobs, B. Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures. / B. Jacobs, M. C. J. C. M. Kramer, E. J. Geluk, F. Karouta // J. Cryst. Growth. 2002. Vol. 241. pp. 15-18.
 20. Liu, Q. Z. A review of the metal–GaN contact technology / Q. Z. Liu, S. S. Lau // Solid State Electron. 1998. Vol. 42, No 5. pp. 677-691.
 21. Wang C., Cho S.-J., Kim N.-Y. Optimization of ohmic contact metallization process for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2013, Vol.14, № 1, pp. 32-35.
 22. Yoon S., Bang J., Lee H., Oh J. Interfacial AlN formation of Si/Ti/Al/Cu Ohmic contact for AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors. Microelectronic Engineering. 2016, No. 151, pp. 60-63.

Сведения об авторах:

Исмаилов Тагир Абдурашидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ, Президент ДГТУ; e-mail: dstu@dstu.ru

Шахмаева Айшат Расуловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: frk12@mail.ru

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: yshirali@yandex.ru

Казалиева Эльмира, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: kazanova.em@mail.ru

Information about the authors:

Tagir A. Ismailov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical Engineering. Honored Worker of Science of the Russian Federation, President DSTU; e-mail: dstu@dstu.ru

Aishat R. Shakhmaeva, Cand.Sci. (Technical), Prof., Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; e-mail: fpk12@rambler.ru

Shirali A. Yusufov, Cand.Sci. (Technical), Prof., Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; e-mail: yshirali@yandex.ru

Elmira Kazalieva, Post-graduate student of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: kazanova.em@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.10.2020.

Принята в печать 02.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 09.10.2020.

Accepted for publication 02.11.2020.