

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный Директор

АО «НПФ «Микран»

Доценко В.В.

2016 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»

Диссертация «Разработка технологии и создание монолитного GaAs СВЧ малошумящего усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu» выполнена в Научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» АО «НПФ «Микран».

В период подготовки диссертации соискатель Ишуткин Сергей Владимирович работал в Научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» АО «НПФ «Микран» в должности инженера-технолога I-категории.

В 2009 году Ишуткин Сергей Владимирович с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». Ему присуждена степень магистра техники и технологии по направлению по направлению «Электроника и микроэлектроника».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Кагадей Валерий Алексеевич, Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», первый заместитель генерального директора, доктор физико-математических наук, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Ишуткина Сергея Владимировича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты экспериментальных исследований и теоретических оценок, направленных на

разработку конструкции и технологии изготовления монокристаллических GaAs СВЧ малошумящих усилителей (МШУ) с металлизацией на основе пленок Al и Cu. Результаты, полученные в ходе исследования, могут использоваться в научно-исследовательских организациях, занимающихся разработкой современных GaAs и GaN СВЧ монокристаллических интегральных схем (МИС), а также на промышленных предприятиях, изготавливающих GaAs СВЧ МИС.

Актуальность диссертационной работы

GaAs СВЧ МИС традиционно изготавливаются с металлизацией контактов металл-полупроводник, межэлементной металлизацией и металлизацией обратной стороны пластины на основе тонких плёнок Au. В то же время в технологии Si интегральных схем (ИС) основными металлами межэлементной металлизации являются Cu или Al. В технологии GaAs СВЧ МИС металлизация на основе пленок Cu, вследствие более высокой проводимости, теплопроводности и стойкости меди к электродиффузии, перспективна для замены традиционной металлизации на основе Au. Низкая стоимость Cu и Al позволяет ожидать снижения себестоимости изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на их основе.

Опубликованные работы, с одной стороны, свидетельствуют об актуальности исследований в данном направлении, а с другой стороны – о нерешённости этой проблемы в целом. До настоящего времени не разработана полноценная технология производства GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu. Факторами, сдерживающими создание этой технологии, являются более высокая химическая активность Al и Cu в сравнении с Au, а также тот факт, что Cu является быстро диффундирующей примесью, формирующей глубокие акцепторные уровни в GaAs. Таким образом, разработка конструкции и технологии изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu является актуальной задачей.

Научная новизна заключается в том, что

1) Разработаны конструкции активных и пассивных элементов, осуществлена их интеграция в состав МИС, а также создана технология, изготовления GaAs СВЧ МИС малошумящего усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu, позволяющие изготавливать МИС с электрическими параметрами на уровне МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

2) Предложена конструкция и технология формирования методом обратной литографии межэлементной металлизации GaAs СВЧ МИС на

основе плёнки Cu с планарными и торцевыми диффузионными барьерами, расположенной между слоями Si_xN_y , которая характеризуется повышенной термостойкостью и термостабильностью параметров относительно металлизации, имеющей только планарные диффузионные барьеры.

3) Разработана методика формирования трехслойной резистивной маски T-образных затворов и затворных шин СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов с использованием методов электронно-лучевой и UV-литографий, позволяющая сократить время формирования резистивной маски, улучшить планарность затворных шин, а также упростить совмещение рисунка затворов с рисунком стоков/истоков транзистора при низкой контрастности знаков совмещения.

4) Предложена конструкция и технология формирования многослойной металлизации обратной стороны и сквозных отверстий пластины GaAs на основе плёнки Cu с выравнивающим слоем Ni, характеризующейся лучшей сплошностью плёнки диффузионного барьера, формируемой методом магнетронного осаждения, а также повышенной термостойкостью и термостабильностью.

5) По результатам испытаний на долговечность ($T = 125^\circ\text{C}$, $U = 5\text{ В}$, $t = 1000\text{ ч}$) показано, что GaAs СВЧ МИС малошумящих усилителей с металлизацией на основе пленок Al и Cu не уступают МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что:

1) Разработанные конструкции активных и пассивных элементов, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяют организовать серийный выпуск МИС на действующих технологических линиях, производящих МИС с металлизацией на основе плёнок Au.

2) Разработанная технология GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяет снизить себестоимость производства за счёт замены Au на Al и Cu, а также создаёт предпосылки для гетероинтеграции GaAs и Si интегральных схем.

Личное участие автора

Диссертация является результатом исследований проводившихся автором совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и НОЦ «Нанотехнологии» ФГБОУ ВО ТУСУР. Ишуткиным Сергеем Владимировичем, совместно с научным руководителем формулировались цель и задачи исследования, обсуждались пути их достижения,

анализировались результаты экспериментов, а также проводилось обобщение полученных результатов исследования. Личный вклад Ишуткина Сергея Владимировича заключается в выборе направлений исследования, разработке и оптимизации технологических блоков и технологического маршрута изготовления GaAs СВЧ МИС, выполнении экспериментальных исследований, обработке и анализе результатов экспериментов. Соавторы, принимавшие участие в отдельных исследованиях, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Ишуткиным Сергеем Владимировичем самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения и сделаны выводы. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены Ишуткиным Сергеем Владимировичем лично.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются систематическим характером исследований, использованием современных экспериментальных методик, сопоставлением результатов эксперимента с литературными данными и теоретическими оценками, а также практической реализацией научных положений и выводов, достигнутой при разработке конструкций и создании технологии изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu.

Апробация

Основные результаты работы доложены на 20-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2010г.), 5th European Microwave Integrated Circuits Conference (Париж, Франция 2010г.), International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM (Эрлагол, 2011 г.), IX Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск 2012г.), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск 2012г.), XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2012г.), Юбилейной научно-технической конференции «СВЧ-электроника. 70 лет развития» (Фрязино 2013г.), V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» «АПР – 2013» (Томск 2013г.).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах, в том числе 6 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 4

статьи в зарубежных журналах, получено 3 патента РФ, сделана одна заявка на патент РФ.

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Ерофеев Е. В., Кагадей В. А., Ишуткин С. В., Носаева К. С. Разработка бездрагметалльного GaAs рHEMT транзистора с субмикронным Т-образным затвором // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2(22), часть 1. – С. 183-186.

2. Арыков В. С., Великовский Л. Э., Ишуткин С. В., Романенко С. В., Шестериков Е. В., Юнусов И. В. Технологии мелкосерийного производства GaAs СВЧ монолитных интегральных схем // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 130-135.

3. Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Формирование межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 201-204.

4. Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Оптимизация процесса «взрыва» фоторезистивной маски при формировании межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 198-201.

5. Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В. Формирование межэлементной металлизации GaAs монолитных интегральных схем на основе меди.// Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 4. – С. 282-289.

6. Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В., Арыков В. С. Конструктивно-технологические особенности изготовления СВЧ GaAs монолитной интегральной схемы малошумящего усилителя с медной металлизацией лицевой стороны // Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 6. – С. 428-436.

Патенты:

1. Пат. 2402103 РФ, МПК H01L21/316. Способ пассивации поверхности GaAs / Ерофеев Е. В. (РФ), Ишуткин С. В. (РФ), Кагадей В. А. (РФ), Носаева К. С. (РФ). – №2009133993; заявл. 10.09.2010; опубл. 20.10.2010.

2. Пат. 2442243 РФ, МПК H01L29/78, H01L21/336, B82B1/00. Транзистор на основе полупроводникового соединения / Ерофеев Е. В. (РФ), Кагадей В. А. (РФ), Анищенко Е. В. (РФ), Арыков В. С. (РФ), Ишуткин С. В. (РФ), Носаева К. С. (РФ). – №2010144198; заявл. 28.10.2010; опубл. 10.02.2012.

3. Пат. 2540234 РФ, МПК H01L29/72. Сверхвысокочастотный транзистор / Ерофеев Е. В. (РФ), Кагадей В. А. (РФ), Ишуткин С. В. (РФ), Арыков В. С. (РФ), Анищенко Е. В. (РФ). – №2013141864; заявл. 12.09.2013; опубл. 10.02.2015.

Статьи в сборниках статей и трудов конференций, российских и зарубежных журналах:

1. Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Носаева К. С. Создание 150 нм Т-образного затвора на основе Ti/Mo/Cu для р-HEMT // 20th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo' 2010). – 2010. – С. 754-755.

2. Anishchenko E. V., Erofeev E. V., Ishutkin S. V., Kagadei V. A., Nosaeva K. S. The formation of multilayer resist mask for transistor T-gate fabrication using electron-beam lithography // International Conference and Seminar EDM'2011. – 2011. – P. 146-149.

3. Erofeev E. V., Ishutkin S. V., Kagadei V. A., Nosaeva K. S. The influence of sulfur modification of preliminary oxidized GaAs surface on the ohmic contacts parameters // 10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – 2010. – P.598-601.

4. Erofeev E. V., Kagadei V. A., Nosaeva K. S., Ishutkin S. V. Multilayer low-resistance Ge/Au/Ni/Ti/Au based ohmic contact to n-GaAs // The European Microwave Integrated Circuits Conference. – 2010. – P. 290-294.

5. Гребнева Ю. Ю., Анищенко Е. В., Ишуткин С. В. Формирование многослойной резистивной маски с использованием термического оплавления для создания субмикронного Т-образного затвора транзистора // Сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ». – 2012. – Т. 2. – С. 347-348.

6. Анищенко Е. В., Ишуткин С. В., Кагадей В. А. Электрохимическое осаждение пленок меди для формирования второго уровня металлизации GaAs монолитных интегральных схем // IX международная конференция студентов и молодых ученых «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК». – 2012. – С. 388-390.

7. Анищенко Е. В., Гребнева Ю. Ю., Ишуткин С. В. Разработка резистивной маски с использованием термического оплавления для создания Т-образного затвора субмикронных размеров // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2012». – 2012. – ч. 2. – С. 336-339.

8. Доценко В. В., Ишуткин С. В., Хохол Д. С., Юнусов И. В. Разработка и изготовление СВЧ монолитных интегральных схем на основе GaAs //

Материалы IV общероссийской научно-технической конференции "Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ-2012)". – 2012. – С. 54-64.

9. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V., Kozhukhov A. S., Kosolobov S. S., Gavrilova T. A. The role of Euler buckling instability in the fabrication of nanoelectromechanical systems on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – no. 24. – P. 241916.

10. Арыков В. С., Ишуткин С. В., Юнусов И. В., Бакаров А. К., Журавлев К. С., Торопов А. И. Нормально-закрытый полевой СВЧ транзистор на основе GaAs // 3-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения». – 2013. – С. 21-22.

11. Бакаров А. К., Журавлев К. С., Торопов А. И., Арыков В. С., Ишуткин С. В., Юнусов И. В. Нормально-закрытый полевой СВЧ транзистор на основе GaAs // XI Российская конференция по физике полупроводников. – 2013. – С.426.

12. Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Формирование межэлементной металлизации на основе Cu в GaAs СВЧ МИС с использованием магнетронного осаждения слоев диффузионных барьеров // «Известия вузов. Физика». – 2013. – Т.56. – №8. – С. 135-138.

13. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V., Arakcheev A. S. High-amplitude dynamics of nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 103. – no. 13. – P. 131905.

14. Erofeev E. V., Arykov V. S., Anishchenko E. V., Kagadei V. A., Ishutkin S. V., Kazimirov A. I. A gold free aluminum metalized GaAs pHEMT with copper based air bridges and backside // *IEEE J. El. Dev. Soc.* – 2013. – Vol. 1. – no. 12. – P. 191-195.

15. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V., Kozhukhov A. S., Kosolobov S. S., Gavrilova T. A. Mechanical stresses and Euler buckling instability in nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // *The 7th Russian-French Workshop on Nanoscience and Nanotechnologies.* – 2013. – P. 71.

16. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V. The features of ballistic electron

transport in a suspended quantum point contact // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol. 104. – no. 20. – P. 203102(5).

17. Lysenko I., Zykov D., Ishutkin S., Meshcheryakov R.. The use of TCAD in technology simulation for increasing the efficiency of semiconductor manufacturing // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1772. – P.060012(7).

Диссертация «Разработка технологии и создание монолитного GaAs СВЧ малошумящего усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu» Ишуткина Сергея Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании научно-технического совета АО «НПФ «Микран», с привлечением научных сотрудников Научно-производственного комплекса «Микроэлектроника», департамента СВЧ электроники, департамента информационно-измерительных систем и департамента телекоммуникаций.

Присутствовало на заседании 25 чел., в том числе докторов наук – 3, кандидатов наук – 5. Результаты голосования: «за» – 25 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол №11 от 21 октября 2016 г.

Председатель НТС

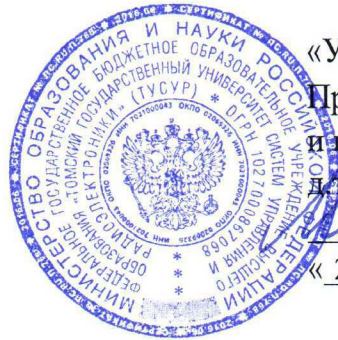
Кагадей Валерий Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
первый заместитель генерального директора
АО «НПФ «Микран»

Секретарь НТС

Мананко Евгений Евгеньевич

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
АО «НПФ «Микран» по НИОКР



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
и инновациям ТУСУРа
д.т.н., профессор

Р.В. Мещеряков

« 20 » 10 2016 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «Разработка технологии и создание монолитного GaAs СВЧ маломощного усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu» выполнена на кафедре физической электроники ТУСУР.

В период подготовки диссертации соискатель Ишуткин Сергей Владимирович работал в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» в Научно-образовательном центре «Нанотехнологии», в должности инженера.

В 2009 году окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по направлению «Электроника и микроэлектроника».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Кагадей Валерий Алексеевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, д.т.н., профессор, первый заместитель генерального директора АО «НПФ «Микран».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Ишуткина Сергея Владимировича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования, разработки и создания конструкции и технологии изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu, а также оценка надежности МИС малошумящих усилителей (МШУ), изготовленных по разработанной технологии. Разработанные конструкции активных и пассивных элементов, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяют организовать серийный выпуск МИС на действующих технологических линиях, производящих МИС с металлизацией на основе плёнок Au.

Актуальность диссертационной работы

Сверхвысокочастотные GaAs монолитные интегральные схемы (GaAs СВЧ МИС) традиционно изготавливаются с металлизацией контактов металл-полупроводник, межэлементной металлизацией и металлизацией обратной стороны пластины на основе тонких плёнок Au. В тоже время в технологии Si интегральных схем (ИС) основными металлами межэлементной металлизации являются Cu или Al. В технологии GaAs СВЧ МИС металлизация на основе пленок Cu, вследствие более высокой проводимости, теплопроводности и стойкости меди к электродиффузии, перспективна для замены традиционной металлизации на основе Au. Низкая стоимость Cu и Al позволяет ожидать снижения себестоимости изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на их основе. Опубликованные работы, с одной стороны, свидетельствуют об актуальности исследований в данном направлении, а с другой стороны – о нерешённости этой проблемы в целом. До настоящего времени не разработана полноценная технология производства GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu. Факторами, сдерживающими создание этой технологии, являются более высокая химическая активность Al и Cu в сравнении с Au, а также тот факт, что Cu является быстро диффундирующей примесью, формирующей глубокие акцепторные уровни в GaAs. Таким образом, разработка конструкции и технологии изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu является актуальной задачей.

Научная новизна заключается в том, что

1. Разработаны конструкции активных и пассивных элементов, осуществлена их интеграция в состав МИС, а также создана технология, изготовления GaAs СВЧ МИС малошумящего усилителя с металлизацией на

основе пленок Al и Cu, позволяющие изготавливать МИС с электрическими параметрами на уровне МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

2. Предложена конструкция и технология формирования методом обратной литографии межэлементной металлизации GaAs СВЧ МИС на основе плёнки Cu с планарными и торцевыми диффузионными барьерами, расположенной между слоями Si_xN_y , которая характеризуется повышенной термостойкостью и термостабильностью параметров относительно металлизации, имеющей только планарные диффузионные барьеры.

3. Разработана методика формирования трехслойной резистивной маски T-образных затворов и затворных шин СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов с использованием методов электронно-лучевой и UV-литографий, позволяющая сократить время формирования резистивной маски, улучшить планарность затворных шин, а также упростить совмещение рисунка затворов с рисунком стоков/истоков транзистора при низкой контрастности знаков совмещения.

4. Предложена конструкция и технология формирования многослойной металлизации обратной стороны и сквозных отверстий пластины GaAs на основе плёнки Cu с выравнивающим слоем Ni, характеризующейся лучшей сплошностью плёнки диффузионного барьера, формируемой методом магнетронного осаждения, а также повышенной термостойкостью и термостабильностью.

5. По результатам испытаний на долговечность ($T = 125\text{ }^\circ\text{C}$, $U = 5\text{ В}$, $t = 1000\text{ ч}$) показано, что GaAs СВЧ МИС малошумящих усилителей с металлизацией на основе пленок Al и Cu не уступают МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что

1. Разработанные конструкции активных и пассивных элементов, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяют организовать серийный выпуск МИС на действующих технологических линиях, производящих МИС с металлизацией на основе плёнок Au.

2. Разработанная технология GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяет снизить себестоимость производства за счёт замены Au на Al и Cu, а также создаёт предпосылки для гетероинтеграции GaAs и Si интегральных схем.

Личное участие автора

Диссертация является результатом исследований, проводившихся автором совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и НОЦ «Нанотехнологии» ФГБОУ ВО ТУСУР. Автором, совместно с научным руководителем, формулировались цель и задачи исследования, обсуждались пути их достижения, анализировались результаты экспериментов, а также проводилось обобщение полученных результатов исследования. Личный вклад автора заключается в выборе направлений исследования, разработке и оптимизации конструкции МИС, операций, технологических блоков и технологического маршрута изготовления GaAs СВЧ МИС, выполнении экспериментальных исследований, обработке и анализе результатов экспериментов. Разработка технологического блока формирования защиты фронтальной стороны GaAs СВЧ МИС пленками нитрида кремния и бензоциклобутена проводилась Краснослободцевой Т. В. Организация изготовления пластин GaAs СВЧ МИС осуществлялась автором совместно с Анищенко Е. В.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются систематическим характером исследований, использованием дублирующих экспериментальных методик, сопоставлением результатов эксперимента с теоретическими оценками и результатами численного моделирования, а также практической реализацией научных положений и выводов.

Апробация. Основные результаты работы доложены на 20-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2010 г.), 5th European Microwave Integrated Circuits Conference (Париж, Франция 2010 г.), International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM (Эрлагол, 2011 г.), IX Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2012 г.), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2012 г.), XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2012 г.), Юбилейной научно-технической конференции «СВЧ-электроника. 70 лет развития» (Фрязино, 2013 г.), V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» «АПР – 2013» (Томск, 2013 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах, в том числе 6 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 4 статьи в зарубежных журналах, 3 патента РФ, одна заявка на патент РФ.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Ерофеев Е. В., Кагадей В. А., Ишуткин С. В., Носаева К. С. Разработка бездрагметалльного GaAs рНЕМТ транзистора с субмикронным Т-образным затвором // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2(22), часть 1. – С. 183-186.

2. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V., Kozhukhov A. S., Kosolobov S. S., Gavrilova T. A. The role of Euler buckling instability in the fabrication of nanoelectromechanical systems on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 101. – no. 24. – P. 241916.

3. Арыков В. С., Великовский Л. Э., Ишуткин С. В., Романенко С. В., Шестериков Е. В., Юнусов И. В. Технологии мелкосерийного производства GaAs СВЧ монолитных интегральных схем // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 130-135.

4. Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Формирование межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 201-204.

5. Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Оптимизация процесса «взрыва» фоторезистивной маски при формировании межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 198-201.

6. Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Формирование межэлементной металлизации на основе Cu в GaAs СВЧ МИС с использованием магнетронного осаждения слоев диффузионных барьеров // «Известия вузов. Физика». – 2013. – Т.56. – №8. – С. 135-138.

7. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V., Arakcheev A. S. High-amplitude dynamics of nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 103. – no. 13. – P. 131905.

8. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V. The features of ballistic electron

transport in a suspended quantum point contact // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol. 104. – no. 20. – P. 203102(5).

9. Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В. Формирование межэлементной металлизации GaAs монокристаллических интегральных схем на основе меди // Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 4. – С. 282-289.

10. Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В., Арыков В. С. Конструктивно-технологические особенности изготовления СВЧ GaAs монокристаллической интегральной схемы малошумящего усилителя с медной металлизацией лицевой стороны // Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 6. – С. 428-436.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. Пат. 2402103 РФ, МПК H01L21/316. Способ пассивации поверхности GaAs / Ерофеев Е. В. (РФ), Ишуткин С. В. (РФ), Кагадей В. А. (РФ), Носаева К. С. (РФ). – №2009133993; заявл. 10.09.2010; опубл. 20.10.2010.

2. Пат. 2442243 РФ, МПК H01L29/78, H01L21/336, B82B1/00. Транзистор на основе полупроводникового соединения / Ерофеев Е. В. (РФ), Кагадей В. А. (РФ), Анищенко Е. В. (РФ), Арыков В. С. (РФ), Ишуткин С. В. (РФ), Носаева К. С. (РФ). – №2010144198; заявл. 28.10.2010; опубл. 10.02.2012.

3. Пат. 2540234 РФ, МПК H01L29/72. Сверхвысокочастотный транзистор / Ерофеев Е. В. (РФ), Кагадей В. А. (РФ), Ишуткин С. В. (РФ), Арыков В. С. (РФ), Анищенко Е. В. (РФ). – №2013141864; заявл. 12.09.2013; опубл. 10.02.2015.

Статьи в сборниках статей и трудов конференций:

1. Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Носаева К. С. Создание 150 нм Т-образного затвора на основе Ti/Mo/Cu для p-HEMT // 20th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo' 2010). – 2010. – С. 754-755.

2. Erofeev E. V., Ishutkin S. V., Kagadei V. A., Nosaeva K. S. The influence of sulfur modification of preliminary oxidized GaAs surface on the ohmic contacts parameters // 10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – 2010. – P.598-601.

3. Erofeev E. V., Kagadei V. A., Nosaeva K. S., Ishutkin S. V. Multilayer low-resistance Ge/Au/Ni/Ti/Au based ohmic contact to n-GaAs // The European Microwave Integrated Circuits Conference. – 2010. – P. 290-294.

4. Anishchenko E. V., Erofeev E. V., Ishutkin S. V., Kagadei V. A., Nosaeva K. S. The formation of multilayer resist mask for transistor T-gate fabrication using electron-beam lithography // International Conference and Seminar EDM'2011. – 2011. – P. 146-149.

5. Гребнева Ю. Ю., Анищенко Е. В., Ишуткин С. В. Формирование многослойной резистивной маски с использованием термического оплавления для создания субмикронного T-образного затвора транзистора // Сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ». – 2012. – Т. 2. – С. 347-348.

6. Анищенко Е. В., Ишуткин С. В., Кагадей В. А. Электрохимическое осаждение пленок меди для формирования второго уровня металлизации GaAs монолитных интегральных схем // IX международная конференция студентов и молодых ученых «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК». – 2012. – С. 388-390.

7. Анищенко Е. В., Гребнева Ю. Ю., Ишуткин С. В. Разработка резистивной маски с использованием термического оплавления для создания T-образного затвора субмикронных размеров // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2012». – 2012. – ч. 2. – С. 336-339.

8. Доценко В. В., Ишуткин С. В., Хохол Д. С., Юнусов И. В. Разработка и изготовление СВЧ монолитных интегральных схем на основе GaAs // Материалы IV общероссийской научно-технической конференции "Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ-2012)". – 2012. – С. 54-64.

9. Арыков В. С., Ишуткин С. В., Юнусов И. В., Бакаров А. К., Журавлев К. С., Торопов А. И. Нормально-закрытый полевой СВЧ транзистор на основе GaAs // 3-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения». – 2013. – С. 21-22.

10. Бакаров А. К., Журавлев К. С., Торопов А. И., Арыков В. С., Ишуткин С. В., Юнусов И. В. Нормально-закрытый полевой СВЧ транзистор на основе GaAs // XI Российская конференция по физике полупроводников. – 2013. – С.426.

11. Erofeev E. V., Arykov V. S., Anishchenko E. V., Kagadei V. A., Ishutkin S. V., Kazimirov A. I. A gold free aluminum metalized GaAs pHEMT with copper based air bridges and backside // IEEE J. El. Dev. Soc. – 2013. – Vol. 1. – no. 12. – P. 191-195.

12. Shevyrin A. A., Pogosov A. G., Budantsev M. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ishutkin S. V., Shesterikov E. V., Kozhukhov A. S., Kosolobov S. S., Gavrilova T. A. Mechanical stresses and Euler buckling instability in nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // The 7th Russian-French Workshop on Nanoscience and Nanotechnologies. – 2013. – P. 71.

13. Lysenko I., Zikov D., Ishutkin S., Meshcheryakov R. The use of TCAD in technology simulation for increasing the efficiency of semiconductor manufacturing // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1772. – P. 060012(7).

Диссертация «Разработка технологии и создание монолитного GaAs СВЧ малошумящего усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu» Ишуткина Сергея Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара кафедры физической электроники, с привлечением сотрудников кафедры физики ТУСУР, кафедры электронных приборов ТУСУР, сотрудников НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР, сотрудников АО «НПФ «Микран».

Присутствовало на заседании 42 чел., в том числе докторов наук – 7, кандидатов наук – 15. Результаты голосования: «за» – 42 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 5 от «14» 10 2016 г.

Председатель семинара



Троян Павел Ефимович
д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой физической
электроники ТУСУР

Секретарь семинара



Саврук Елена Владимировна
канд. техн. наук, доцент кафедры
физической электроники ТУСУР