

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям  
Томского государственного университета систем  
управления и радиоэлектроники, кандидат  
технических наук, доцент  
Дошилов Антон Геннадьевич



27 « 09 2019 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Мощные быстродействующие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия» выполнена на кафедре Физической электроники.

В период подготовки диссертации соискатель Федин Иван Владимирович работал в НОЦ «Нанотехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» в должности инженера, обучался в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

В 2015 г. И.В. Федин окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по специальности Электроника и наноэлектроника.

Справка об обучении выдана в 2019 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель – Троян Павел Ефимович, доктор технических наук, профессор, основное место работы: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой физической электроники.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной соискателем работы.**

Диссертация И.В. Федина является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи создания мощных быстродействующих диодов на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия, имеющей особенное значения для создания отечественной электронно-компонентной базы на основе GaN.

#### **Актуальность темы и направленность исследования.**

Силовая электроника – это показатель уровня экономики любого современного государства. Ее решающая роль в экономике развитых стран вытекает из того, что более 80% вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Первый конкурентноспособный мощный MOSFET был выпущен фирмой International Rectifier в 1978 г. под торговой маркой HEXFET. Это определило развитие рынка силовой электроники в сторону кремния на последующие 30 лет. Однако, не секрет, что кремниевая технология достигла своего теоретического предела.

В настоящее время перспективным путем развития силовой электроники в мире является переход к элементной базе на основе широкозонных полупроводников, таких как нитрид галлия (GaN). Нитрид галлия обладает целым рядом преимуществ над кремнием: большая ширина запрещенной зоны, высокая электрическая прочность, высокая подвижность электронов, высокая рабочая температура, высокая дрейфовая скорость насыщения электронов.

Одними из наиболее перспективных приборов на основе GaN являются различные преобразователи мощности, так как особенности GaN позволяют значительно улучшить характеристики преобразователей:

- 1) Большая ширина запрещенной зоны (в 3 раза больше, чем у кремния) обуславливает возможность работы преобразователя при высоких уровнях температуры и радиации.
- 2) Максимальная критическая напряженность электрического поля (в 10 раз большая, чем у кремния) позволяет реализовать высокие пробивные напряжения;
- 3) Малый заряд затвора позволяет отказаться от дополнительных фильтров на высоких частотах и тем самым снизить массогабаритные показатели преобразователя;
- 4) Сочетание высокой концентрации электронов проводимости и высокой подвижности электронов существенно снижает сопротивление GaN транзисторов в открытом состоянии, и, как следствие, потери мощности в преобразователях.

Впервые возможность создания транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенной на SiC подложке была продемонстрирована М.А. Ханом и др. в 1993 г. в работе. После этого исследования в области силового GaN стали набирать популярность и в 2004 г. компания Eudyna Corp (Япония) вывела на рынок радиочастотный нормально-открытый AlGaIn/GaN транзистор. Новой вехой в истории развития GaN электроники стала разработка компанией Efficient Power Conversion (EPC) нормально-закрытого (H3) 100 В транзистора в 2009 г., способного заменить устаревшие кремниевые MOSFET. В 2014 г. компания GaN Systems представила 650 В H3 GaN транзистор, что сильно укрепило положение GaN на рынке

силовой электроники. В настоящее время серийное производство транзисторов на основе GaN освоено такими компаниями, как Panasonic (Япония), Transphorm, EPC (США), GaN Systems (Канада), Infenion (Германия).

Для создания GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ) помимо транзисторов необходимы мощные диоды. Начиная с 2000 г. GaN диоды Шоттки стали объектом постоянных исследований. Исследования в данном направлении велись в институте Фердинанта Брауна, компании IMEC, Transphorm и множестве лабораторий по всему миру. Исследования GaN диодов разделились на 2 направления: вертикальные диоды, выполненные на естественной подложке (GaN) и квазивертикальные и планарные диоды, выполненные на подложках SiC, Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. Преимущества вертикальных диодов в большей плотности мощности, однако планарные значительно дешевле в производстве за счёт более дешёвых подложек. В настоящее время серийная технология планарных AlGaIn/GaN диодов Шоттки освоена компаниями Transphorm и Panasonic, однако в свободную продажу они не поступают.

Таким образом, создание GaN ЭКБ является актуальной и перспективной задачей, которую в настоящий момент решают как производственные фирмы, такие как Transphorm, EPC, GaN Systems поставляющие на рынок готовые решения, так и научно-исследовательские компании, такие как IMEC, Navitas, EXAGAN занимающиеся разработкой перспективных направлений микроэлектроники.

#### **Утверждение темы диссертации.**

Тема диссертации утверждена решением учёного совета факультета электронной техники томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники от 23 мая 2019 г.

#### **Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Автором составлялись топологии пластин с диодами, формирование и документирование технологического маршрута, осуществлялось ведение пластин по технологическому маршруту, химическая пред- и постоперационная обработка пластин, измерение DC характеристик диодов и анализ полученных результатов. Вклад основных соавторов заключался в проведении сложных технологических операций (напыление металлов, осаждение диэлектриков, плазмохимическое травление), в подготовке и проведении экспериментов, в обсуждении результатов исследований.

#### **Степень достоверности результатов проведённых исследований.**

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на применении физически обоснованных экспериментальных методик и современного высокоточного оборудования, воспроизводимости полученных результатов и их качественным согласием с результатами авторов других работ, проводимых в данном направлении.

#### **Новизна результатов проведённых исследований.**

1) Впервые показана возможность получения низкотемпературных омических контактов на основе Ta/Al к гетероструктуре AlGaIn/GaN, выращенной на кремниевой подложке;

2) Установлено, что для диодов Шоттки, изготовленных на основе pGaIn/AlGaIn/GaN гетероструктуры, применение анодного рецесса на глубину до 75% от толщины барьерного слоя на основе AlGaIn перед формированием барьера Шоттки увеличивает прямой и обратный ток диода;

3) Предложен технологический маршрут создания мощных AlGaIn/GaN диодов совместимый с технологией создания pGaIn/AlGaIn/GaN H3 транзисторов.

### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.**

1) Разработана технология создания AlGaIn/GaN диодов с барьером Шоттки на базе гетероструктуры pGaIn/AlGaIn/GaN.

2) Предложенная технология создания диодов с барьером Шоттки позволяет объединить в монолитной интегральной схеме (МИС) диоды и H3 транзисторы, что может быть использовано для снижения массо-габаритных показателей и улучшения характеристики высокоэффективных источников вторичного электропитания на основе GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ).

Результаты работы могут быть использованы предприятиями микроэлектронной промышленности для формирования GaN ЭКБ, находящей применение в создании перспективных энергоэффективных источников вторичного электропитания, AC/DC преобразователях, инверторах.

### **Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.**

По результатам научно-исследовательской деятельности Федина И.В. опубликовано 22 работы. Из них количество публикаций в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций – 5, публикаций, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Scopus: 6, материалы конференций: 11.

*Статьи, опубликованные в журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1) Федин И.В. AlGaIn/GaN диоды с барьерами Шоттки на основе Ta, Ni, WSi и TiN / И.В. Федин, Е.В. Ерофеев, В.В. Федина // Вестник СибГУТИ - 2018. - №3. С. 62-68.

2) Ерофеев Е.В. Низкотемпературные омические контакты на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN на кремниевых подложках / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина, А.П. Фазлеев // ФТП - 2018 - Т. 53, №2. - С. 249 - 252.

3) Ерофеев Е.В. Мощные GaN транзисторы с подзатворной областью на основе МДП-структур / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, А.В. Юрьева, В.В. Федина, М.В. Степаненко // ФТП - 2017 - Т. 51, №9. - С. 1278 - 1281.

4) Ерофеев Е.В. Увеличение порогового напряжения отпираания силовых GaN транзисторов при использовании низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, Ю.Н. Юрьев, И.В. Кутков // ФТП - 2017 - Т. 51, №2. - С. 253 - 257.

5) Ерофеев Е.В. Силовые коммутационные транзисторы на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, Ю.Н. Юрьев. // Микроэлектроника - 2017 - Т. 46, №3. - С. 224 – 230.

*Публикации, проиндексированные в БД Scopus:*

1) Fedin. I.V. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Diodes with Ni Schottky Barrier and Recessed Anodes / I.V. Fedin, E.V. Erofeev, V.V. Fedina // SibCon - 2019 - P. 1 - 4.

2) Erofeev E.V. High thermal stability ohmic contacts to nitride semiconductors with refractory metal sidewall diffusion barrier deposited by magnetron sputtering / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, V.V. Fedina // IOP Conf. Series - 2018 - V. 11115 №032068. - P. 1 - 6.

3) Erofeev E.V. Power Switching Transistors Based on Gallium Nitride Epitaxial Heterostructures / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, Yu. N. Yuryev // Russian Microelectronics - 2017 - V. 46, №3. P. 206 - 211.

4) Erofeev E.V. High-Voltage MIS-Gated Ga<sub>N</sub> Transistors / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, V.V. Fedina, M.V. Stepanenko, A.V. Yuryeva // Semiconductors - 2017 - V. 51, №9. - P.1229 - 1232.

5) Erofeev E.V. Increase the Threshold Voltage of High Voltage Ga<sub>N</sub> Transistors by Low Temperature Atomic Hydrogen Treatment / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, I.V. Kutkov, Yu. N. Yuryev // Semiconductors - 2017 - V. 51, №2. - P. 253 - 257.

6) Fedin. I.V. Fast Switching Ga<sub>N</sub> Schottky Barrier Diodes / I.V. Fedin, E.V. Erofeev // EDM - 2016 - P. 44-47

*Материалы конференций:*

1) Федин. И.В. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> диоды с барьером Шоттки на основе Ni, Mo, Hf и Ti / И.В. Федин, Е.В. Ерофеев // Международная научно-практическая конференция (МНПК): ЭСиСУ. - Томск, 2018. - С. 50 - 53.

2) Федин. И.В. Исследование влияния рецесса на электрические характеристики низкотемпературных омических контактов к гетероэпитаксиальным структурам AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> / И.В. Федин, В.В. Федина // МНСК. - Новосибирск, 2019. - С. 31.

3) Ерофеев Е.В. Разработка макета дискретного быстродействующего драйвера управления силовыми GAN транзисторами / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // Материалы V

международного молодежного форума: «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2017. - С. 68-71.

4) Ерофеев Е.В. Разработка мощных GaN транзисторов с субмикронным затвором на основе пленок нитрида титана / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина, И.В. Юнусов // МНПК: ЭСиСУ. - Томск, 2017. - С. 97-100.

5) Ерофеев Е.В. Моделирование нормально-закрытых силовых GaN-HEMT в среде Silvaco TCAD / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина // МНПК: ЭСиСУ. - Томск, 2017. С. 100 - 102.

6) Ерофеев Е.В. Силовые быстродействующие диоды на основе нитрида галлия для создания энергоэффективной преобразовательной техники / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // Материалы всероссийской конференции: Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи. - Томск, 2016. - С. 228 - 231.

7) Ерофеев Е.В. Силовые диоды с барьером Шоттки на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // МНПК: НСТ. - Томск, 2016. - С. 115 - 118.

8) Ерофеев Е.В. Моделирование в среде Silvaco TCAD мощных GaN транзисторов, работающих в режиме обогащения / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина // МНПК: НСТ. Томск, 2017. С. 151 – 155

9) Ерофеев Е.В. Low temperature Ta/Al based ohmic contacts to high voltage GaN transistors for energy efficient power conversion / Сборник тезисов международной конференции: Микро- и нанoeлектроника (ICMNE). Москва-Звенигород, 2016. С. 81.

10) Ерофеев Е.В. Разработка мощных транзисторов на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия, работающих в режиме обогащения / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // МНПК: ЭСИСУ. Томск, 2016. С. 80-83.

11) Ерофеев Е.В. Создание компонентной базы силовой электроники на основе нитрида галлия для производства энергоэффективной преобразовательной техники нового поколения / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // Материалы IV международного молодежного форума: Интеллектуальные энергосистемы. Томск, 2016. С. 301 - 304.

В опубликованных работах достаточно полно отражены материалы диссертационного исследования.

#### **Соответствие диссертации избранной специальности.**

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.04 – Физическая электроника по областям исследования:

1) Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника.


2) Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях.

Диссертация «Мощные быстродействующие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия» Федина Ивана Владимировича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Заключение принято на заседании кафедры физической электроники факультета электронной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования «за» 10 чел., «против» нет, «воздержались» нет, протокол № 28 от 26.09.2019 г.

Председатель заседания:  
Зав. кафедрой ФЭ  
профессор, д.т.н.



---

Троян Павел Ефимович

Секретарь заседания  
Ст. преподаватель  
каф. ФЭ



---

Каранский Виталий  
Владиславович

Верно:  
Учёный секретарь ТУСУР



---

Прокопчук Елена  
Викторовна



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор АО «НПФ «Микран»  
Парамонова Вера Юрьевна

«27» 09 2019 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»

Диссертация «Мощные быстродействующие диоды на основе гетерозпитаксиальных структур нитрида галлия» выполнена в научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» АО «НПФ «Микран».

В период подготовки диссертации соискатель Федин Иван Владимирович работал в акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» в должности инженера-технолога.

В 2015 г. был принят на работу в НПК «Микроэлектроника» в лабораторию «Усилительные МИС». В том же году окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Электроника и нанoeлектроника». В 2019 г. получил диплом об окончании аспирантуры.

Научный руководитель – Троян Павел Ефимович, доктор технических наук, профессор, основное место работы: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой физической электроники.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Оценка выполненной соискателем работы.**

Диссертация И.В. Фебина является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи создания мощных быстродействующих диодов на основе гетерозпитаксиальных структур нитрида галлия, имеющей особенное значения для создания отечественной электронно-компонентной базы на основе GaN.

### **Актуальность темы и направленность исследования.**

Силовая электроника – это показатель уровня экономики любого современного государства. Ее решающая роль в экономике развитых стран вытекает из того, что более 80% вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Первый конкурентноспособный мощный MOSFET был выпущен фирмой International Rectifier в



1978 г. под торговой маркой HEXFET. Это определило развитие рынка силовой электроники в сторону кремния на последующие 30 лет. Однако, не секрет, что кремниевая технология достигла своего теоретического предела.

В настоящее время перспективным путем развития силовой электроники в мире является переход к элементной базе на основе широкозонных полупроводников, таких как нитрид галлия (GaN). Нитрид галлия обладает целым рядом преимуществ над кремнием: большая ширина запрещенной зоны, высокая электрическая прочность, высокая подвижность электронов, высокая рабочая температура, высокая дрейфовая скорость насыщения электронов.

Одними из наиболее перспективных приборов на основе GaN являются различные преобразователи мощности, так как особенности GaN позволяют значительно улучшить характеристики преобразователей:

1) Большая ширина запрещенной зоны (в 3 раза больше, чем у кремния) обуславливает возможность работы преобразователя при высоких уровнях температуры и радиации.

2) Максимальная критическая напряженность электрического поля (в 10 раз большая, чем у кремния) позволяет реализовать высокие пробивные напряжения;

3) Малый заряд затвора позволяет отказаться от дополнительных фильтров на высоких частотах и тем самым снизить массогабаритные показатели преобразователя;

4) Сочетание высокой концентрации электронов проводимости и высокой подвижности электронов существенно снижает сопротивление GaN транзисторов в открытом состоянии, и, как следствие, потери мощности в преобразователях.

Впервые возможность создания транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенной на SiC подложке была продемонстрирована М.А. Ханом и др. в 1993 г. в работе. После этого исследования в области силового GaN стали набирать популярность и в 2004 г. компания Eudyna Corp (Япония) вывела на рынок радиочастотный нормально-открытый AlGaIn/GaN транзистор. Новой вехой в истории развития GaN электроники стала разработка компанией Efficient Power Conversion (EPC) нормально-закрытого (H3) 100 В транзистора в 2009 г., способного заменить устаревшие кремниевые MOSFET. В 2014 г. компания GaN Systems представила 650 В H3 GaN транзистор, что сильно укрепило положение GaN на рынке силовой электроники. В настоящее время серийное производство транзисторов на основе GaN освоено такими компаниями, как Panasonic (Япония), Transphorm, EPC (США), GaN Systems (Канада), Infenion (Германия).

Для создания GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ) помимо транзисторов необходимы мощные диоды. Начиная с 2000 г. GaN диоды Шоттки стали объектом постоянных исследований. Исследования в данном направлении велись в институте Фердинанта Брауна, компании IMEC, Transphorm и множестве лабораторий по всему миру. Исследования GaN диодов разделились на 2 направления: вертикальные диоды, выполненные на естественной подложке (GaN) и квазивертикальные и планарные диоды,

выполненные на подложках SiC, Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. Преимущества вертикальных диодов в большей плотности мощности, однако планарные значительно дешевле в производстве за счёт более дешёвых подложек. В настоящее время серийная технология планарных AlGaN/GaN диодов Шоттки освоена компаниями Transphorm и Panasonic, однако в свободную продажу они не поступают.

Таким образом, создание GaN ЭКБ является актуальной и перспективной задачей, которую в настоящий момент решают как производственные фирмы, такие как Transphorm, EPC, GaN Systems поставляющие на рынок готовые решения, так и научно-исследовательские компании, такие как IMEC, Navitas, EXAGAN занимающиеся разработкой перспективных направлений микроэлектроники.

#### **Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Автором составлялись топологии пластин с диодами, формирование и документирование технологического маршрута, осуществлялось ведение пластин по технологическому маршруту, химическая пред- и постоперационная обработка пластин, измерение DC характеристик диодов и анализ полученных результатов. Вклад основных соавторов заключался в проведении сложных технологических операций (напыление металлов, осаждение диэлектриков, плазмохимическое травление), в подготовке и проведении экспериментов, в обсуждении результатов исследований.

#### **Степень достоверности результатов проведённых исследований.**

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на применении физически обоснованных экспериментальных методик и современного высокоточного оборудования, воспроизводимости полученных результатов и их качественным согласием с результатами авторов других работ, проводимых в данном направлении.

#### **Новизна результатов проведённых исследований.**

1) Впервые показана возможность получения низкотемпературных омических контактов на основе Ta/Al к гетероструктуре AlGaN/GaN, выращенной на кремниевой подложке;

2) Установлено, что для диодов Шоттки, изготовленных на основе pGaN/AlGaN/GaN гетероструктуры, применение анодного рецесса на глубину до 75% от толщины барьерного слоя на основе AlGaN перед формированием барьера Шоттки увеличивает прямой и обратный ток диода;

3) Предложен технологический маршрут создания мощных AlGaN/GaN диодов совместимый с технологией создания pGaN/AlGaN/GaN H<sub>3</sub> транзисторов.

#### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.**

Разработана технология создания AlGaN/GaN диодов Шоттки (ДШ) на базе гетероструктуры pGaN/AlGaN/GaN.

Предложенная технология создания диодов Шоттки позволяет объединить в монолитной интегральной схеме (МИС) диоды и H3 транзисторы, что позволяет снизить массо-габаритные показатели и улучшить характеристики высокоэффективных источников вторичного электропитания на основе GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ).

Предложенная технология получения омических контактов к AlGaIn/GaN защищена патентом, а разработанные в ходе выполнения диссертации технологические режимы и процессы используются на производстве в НПК "Микроэлектроника" АО "НПФ "Микран"

Результаты работы могут быть использованы предприятиями микроэлектронной промышленности для формирования GaN ЭКБ, находящей применение в создании перспективных энергоэффективных источников вторичного электропитания, AC/DC преобразователях, инверторах.

**Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.**

По результатам научно-исследовательской деятельности Федина И.В. опубликовано 22 работы. Из них количество публикаций в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций – 5, публикаций, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Scopus: 6, материалы конференций: 11.

*Статьи, опубликованные в журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1) Федин И.В. AlGaIn/GaN диоды с барьерами Шоттки на основе Ta, Ni, WSi и TiN / И.В. Федин, Е.В. Ерофеев, В.В. Федина // Вестник СибГУТИ - 2018. - №3. С. 62-68.

2) Ерофеев Е.В. Низкотемпературные омические контакты на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN на кремниевых подложках / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина, А.П. Фазлеев // ФТП - 2018 - Т. 53, №2. - С. 249 - 252.

3) Ерофеев Е.В. Мощные GaN транзисторы с подзатворной областью на основе МДП-структур / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, А.В. Юрьева, В.В. Федина, М.В. Степаненко // ФТП - 2017 - Т. 51, №9. - С. 1278 - 1281.

4) Ерофеев Е.В. Увеличение порогового напряжения отпираания силовых GaN транзисторов при использовании низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, Ю.Н. Юрьев, И.В. Кутков // ФТП - 2017 - Т. 51, №2. - С. 253 - 257.

5) Ерофеев Е.В. Силовые коммутационные транзисторы на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, Ю.Н. Юрьев. // Микроэлектроника - 2017 - Т. 46, №3. - С. 224 – 230.

*Публикации, проиндексированные в БД Scopus:*

1) Fedin. I.V. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Diodes with Ni Schottky Barrier and Recessed Anodes / I.V. Fedin, E.V. Erofeev, V.V. Fedina // SibCon - 2019 - P. 1 - 4.

2) Erofeev E.V. High thermal stability ohmic contacts to nitride semiconductors with refractory metal sidewall diffusion barrier deposited by magnetron sputtering / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, V.V. Fedina // IOP Conf. Series - 2018 - V. 11115 №032068. - P. 1 - 6.

3) Erofeev E.V. Power Switching Transistors Based on Gallium Nitride Epitaxial Heterostructures / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, Yu. N. Yuryev // Russian Microelectronics - 2017 - V. 46, №3. P. 206 - 211.

4) Erofeev E.V. High-Voltage MIS-Gated Ga<sub>N</sub> Transistors / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, V.V. Fedina, M.V. Stepanenko, A.V. Yuryeva // Semiconductors - 2017 - V. 51, №9. - P.1229 - 1232.

5) Erofeev E.V. Increase the Threshold Voltage of High Voltage Ga<sub>N</sub> Transistors by Low Temperature Atomic Hydrogen Treatment / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, I.V. Kutkov, Yu. N. Yuryev // Semiconductors - 2017 - V. 51, №2. - P. 253 - 257.

6) Fedin. I.V. Fast Switching Ga<sub>N</sub> Schottky Barrier Diodes / I.V. Fedin, E.V. Erofeev // EDM - 2016 - P. 44-47

*Материалы конференций:*

1) Федин. И.В. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> диоды с барьером Шоттки на основе Ni, Mo, Hf и Ti / И.В. Федин, Е.В. Ерофеев // Международная научно-практическая конференция (МНПК): ЭСиСУ. - Томск, 2018. - С. 50 - 53.

2) Федин. И.В. Исследование влияния рецесса на электрические характеристики низкотемпературных омических контактов к гетероэпитаксиальным структурам AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> / И.В. Федин, В.В. Федина // МНСК. - Новосибирск, 2019. - С. 31.

3) Ерофеев Е.В. Разработка макета дискретного быстродействующего драйвера управления силовыми Ga<sub>N</sub> транзисторами / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // Материалы V международного молодежного форума: «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2017. - С. 68-71.

4) Ерофеев Е.В. Разработка мощных Ga<sub>N</sub> транзисторов с субмикронным затвором на основе пленок нитрида титана / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина, И.В. Юнусов // МНПК: ЭСиСУ. - Томск, 2017. - С. 97-100.

5) Ерофеев Е.В. Моделирование нормально-закрытых силовых Ga<sub>N</sub>-HEMT в среде Silvaco TCAD / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина // МНПК: ЭСиСУ. - Томск, 2017. С. 100 - 102.

6) Ерофеев Е.В. Силовые быстродействующие диоды на основе нитрида галлия для создания энергоэффективной преобразовательной техники / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин //

Материалы всероссийской конференции: Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи. - Томск, 2016. - С. 228 - 231.

7) Ерофеев Е.В. Силовые диоды с барьером Шоттки на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // МНПК: НСТ. - Томск, 2016. - С. 115 - 118.

8) Ерофеев Е.В. Моделирование в среде Silvaco TCAD мощных GaN транзисторов, работающих в режиме обогащения / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина // МНПК: НСТ. Томск, 2017. С. 151 – 155

9) Ерофеев Е.В. Low temperature Ta/Al based ohmic contacts to high voltage GaN transistors for energy efficient power conversion / Сборник тезисов международной конференции: Микро- и нанoeлектроника (ICMNE). Москва-Звенигород, 2016. С. 81.

10) Ерофеев Е.В. Разработка мощных транзисторов на основе эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия, работающих в режиме обогащения / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // МНПК: ЭСИСУ. Томск, 2016. С. 80-83.

11) Ерофеев Е.В. Создание компонентной базы силовой электроники на основе нитрида галлия для производства энергоэффективной преобразовательной техники нового поколения / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин // Материалы IV международного молодёжного форума: Интеллектуальные энергосистемы. Томск, 2016. С. 301 - 304.

В опубликованных работах достаточно полно отражены материалы диссертационного исследования.

#### **Соответствие диссертации избранной специальности.**

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.04 – Физическая электроника по областям исследования:

1) Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника.

2) Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях.

Диссертация «Мощные быстродействующие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия» Федина Ивана Владимировича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Заключение принято на расширенном заседании научно-технического совета АО «НПФ «Микран» с привлечением научных сотрудников НПК «Микроэлектроника».

Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования «за» 20 чел., «против» нет, «воздержались» нет, протокол № 11 от «23». 09.2019 г.



---

Ерофеев Евгений Викторович

к.т.н, главный конструктор

НПК «Микроэлектроника»

АО «НПФ «Микран»



---

Аксёнов Андрей Александрович

директор

НПК «Микроэлектроника»

АО «НПФ «Микран»