Отзыв

ведущей организации АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» - на диссертацию Лебедевой Наталья Михайловны «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SIC диодов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — физика полупроводников.

Диссертационная работа Лебедевой Наталья Михайловны «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SIC диодов» посвящена вопросам защиты высоковольтных лавинных приборов на карбиде кремния от преждевременного краевого пробоя при работе в режиме импульсного лавинного пробоя. Данная тема представляет в настоящее время как научный, так и практический интерес.

Актуальность работы. Высоковольтные и лавинные диоды в настоящее время являются важнейшими элементами силовой полупроводниковой электроники, которая охватила практически все сферы жизнедеятельности человека. 4H-SiC по основным электрофизическим характеристикам намного превосходит кремний. Использование карбида кремния дает возможность снизить массогабаритные показатели силовых приборов и устройств на их основе и существенно повысить их эффективность. Несмотря на большое разнообразие приборов с характеристиками, выгодно отличающими приборы на основе 4H-SiC от аналогичных кремниевых приборов, по-прежнему существуют физические и конструктивные проблемы, не позволяющие полностью реализовать потенциальные возможности карбид-кремниевых приборов. Поиск решения таких проблем по-прежнему **актуален**.

Научная новизна заключается в том, что предложены и реализованы новые способы защиты высоковольтных карбид-кремниевых приборов от поверхностного пробоя, позволившие реализовать режим объемного однородного лавинного пробоя при напряжениях, практически совпадающих с теоретически предельными значениями. В частности, на основе новых конструктивно-технологических решений разработаны высоковольтные (~1500 В) диоды с *p-n*-переходом и высоковольтные (~2000 В) диоды Шоттки, способные функционировать в режиме мощного импульсного лавинного пробоя при высоких плотностях тока (~10^3А/см^2).

Достоверность и обоснованность полученных результатов, обусловлена применением компьютерного моделирования, изготовлением опытных диодов и сопоставлением полученных экспериментальных данных с теоретическими предельно возможными для данного материала. Результаты

опубликованы в реферируемых научных журналах и представлены на конференциях. Приведенные данные так же совпадают с имеющимися у нас экспериментальными результатами.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых универсальных методов защиты высоковольтных 4H-SiC приборов от поверхностного пробоя. Эти методы могут быть использованы в технологии изготовления как уже существующих, так и при разработке новых перспективных приборов. По сравнению с существующими, разработанные в диссертации методы относительно просты в реализации, поскольку не требуют проведения высокотемпературных процессов, применения прецизионной литографии и применения узкоспециализированного технологического оборудования. Следует отметить, что приведенные конструкции диодов с формированием металлических столбиков и полуизолирующих областей увеличит устойчивость к воздействию тяжелых заряженных частиц. Кроме того, предлагаемые технологические решения могут быть использованы при разработке силовых микросхем на карбиде кремния.

По тексту диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации обратные ВАХ диодов с p-n-переходом, измеренные с помощью цифрового характериографа, показаны в линейном масштабе от нуля до 4 мА. Интересно было бы видеть ВАХ в экспоненциальном масштабе, показывающем величину предпробойных утечек, начиная с наноамперных токов, как это сделано для диодов Шоттки.
2. В разделе диссертации, посвященном диодам Шоттки с краевой i-областью, не указана высота барьера Шоттки, хотя выбор по технологии небольшой, это Ti с высотой барьера 1.19 эВ.
3. Работа диодов с p-n-переходом рассматривается только в обратном направлении. В случае облучения p-n-диодов, в принципе, возможно некоторая трансформация прямых ВАХ и характеристик обратного восстановления из-за влияния проникающего облучения на время жизни инжектированных носителей.

Изложенные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в работе результаты могут быть использованы для ознакомления и использования специалистами в области силовой

электроники научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения и списка цитируемой литературы, включающего 143 наименования. Общий объем диссертации составляет 131 страниц, включая 69 рисунков и 3 таблицы.

Структура и содержание работы свидетельствуют о том, что в целом диссертация представляет собой завершенное научное исследование, в котором продемонстрирована актуальность, новизна и перспективность развиваемых подходов. Выводы и заключение обоснованы и имеют научную и практическую ценность для разработок в области создания новых силовых приборов.

Апробация работы выполнена при публикации 8 статей, результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 3 конференциях.

Заключение

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, защищаемые положения и выводы. Диссертационная работа Лебедевой Натальи Михайловны «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SIC диодов», отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Лебедева Наталья Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв подготовил Брюхно Н.А.

Доклад, отражающий основные результаты диссертационной работы был заслушан и обсуждался на заседании (протокол № 3 от «19» 02 2025 г.). На заседании присутствовало 11 человек.

Директор по развитию и новой техни рилин А.Н.

Сведения о ведущей организации.

АО «Группа «КРЕМНИЙ-ЭЛ»

Адрес: 241050, г. Брянск, ул. Красноармейская,

Телефон: 8(4832)414885 E-mail: referent@sitsemi.ru

Список работ и патентов АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» по карбидокремниевой тематике

1. Н. Брюхно, В. Громов, И. Куфтов, М. Степанов, А. Фроликова Отечественные карбидокремниевые диоды Шоттки на токи до 10 А и напряжения 1 200 В ЭЛЕКТРОНИКА наука, технология, бизнес №7 (00178) 2018. – С. 1-3.

2. Громов В., Брюхно Н., Демидов А., Дракин А, Зотин В., Кульченков Е., Рыбалка С. 2018. Исследование стойкости SiC-диодов Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» к скорости нарастания обратного напряжения. Силовая электроника. 71(2) 2018. - С.10-12.

3. Н. Брюхно, В. Громов, И. Куфтов, М. Степанов, А. Фроликова. Устойчивость карбидокремниевых диодов Шоттки к воздействию тяжелых заряженных частиц. КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ № 1 2019.- С. 68 -70.

4. Алехин С.С. Формирование микротрещин в поверхностных слоях карбидокремниевых пластин при финишной абразивной обработке [Текст] / С.С. Алехин // Сб. ст. «LVIII Международные научные чтения (Памяти Б.Г. Галеркина)». – Москва: ЕФИР, 2019. – С. 16-19.

5. Бишутин С.Г. Выбор технологических режимов алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния / С.Г. Бишутин, С.С. Алехин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2020. – №12(114). – С. 3-6.

6. Маска для ионного легирования в пластины карбида кремния (патент № 140712).

7. Кассета для постимплантационного отжига слоев карбида кремния (патент №145241).

8. Кассета для высокочастотного отжига и активации ионно-легированных слоев в карбид-кремниевых пластина (патент №147302).

9.Мощный высоковольтный карбидкремниевый прибор (патент №156624).

10. Силовой диод Шоттки на карбиде кремния (патент №157852).

11. Мощный биполярный транзистор на основе карбида кремния (патент №156549).

12. Высоковольтный диод на основе карбида кремния (патент №165463).

13. Способ контроля качества контактов Шоттки (патент № 2632173).

14. Устройство для зондового контроля параметров кристаллов высоковольтных приборов (патент № 172838).

15. Контейнер для отжига и активации ионно-легированных слоёв карбидкремниевых пластин (патент №179406).

16. Диод с барьером Шоттки на основе карбида кремния (патент № 172837).

17. Защитное покрытие полупроводниковых приборов на основе SiC (патент № 166441).

Директор по развитию и новой технике Гаврилин А.Н.

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА
заседания НТС № 3 АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»

г. Брянск « 19 » февраля 2025 г.

Слушали:

Доклад по поступившей диссертации Лебедевой Натальи Михайловны «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SiC диодов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — физика полупроводников.

Диссертация объёмом 131 страница, иллюстрированная 70 рисунками, 3 таблицами и состоящая из введения, 6 разделов, заключения, списка основных публикаций, тезисов докладов и трудов конференции, списка литературы.

Диссертационная работа рассмотрена при участии представителей:

АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»

директора по развитию и новой технике – Гаврилина А.Н.

заместителя директора по развитию и новой технике - начальника Дизайн центра – Данцева О.О.
главного технолога Дизайн центра – Брюхно Н.А.
заместителя главного технолога Дизайн центра – Лапутина С.В.
начальника отдела силовых приборов – Алехина С.С.
инженера-конструктора отдела силовых приборов – Чайкина А. А.
начальника технического отдела – Куфтова И.В.
заместителя директора ПК СПК-17 по основному производству – Мироненко Е.В.
руководителя группы ПК СПК-17 – Квасова С.С.
старшего технолога ПК СПК-17 – Копаевой О.В.
начальника бюро Дизайн центра – Шер Т.Б.

Рассмотрены актуальность работы, научная новизна, достоверность и обоснованность, практическая значимость, в процессе рассмотрения были сформулированы вопросы и замечания по тексту диссертации.

ПОСТАНОВИЛИ:

Считать диссертацию Лебедевой Н.М. «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SiC диодов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — физика полупроводников самостоятельной и завершенной.

В научном исследовании продемонстрирована актуальность, новизна и перспективность развиваемых подходов. Выводы и заключение обоснованы и имеют научную и практическую ценность для разработок в области создания новых силовых приборов.

Апробация работы выполнена при публикации 8 статей. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 3 конференциях.

Диссертационная работа Лебедевой Н.М. «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SiC диодов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников» в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Председатель – Директор по развитию и новой технике _____ А.Н. Гаврилин

Главный технолог Дизайн центра _____ Н.А. Брюхно

Секретарь – Начальник технического отдела _____ И.В. Куфтов