

На правах рукописи

Смирнов Артем Анатольевич

**КАРБИДОКРЕМНИЕВЫЕ РАЗМЫКАТЕЛИ ТОКА
И ГЕНЕРАТОРЫ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2015 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Научный руководитель: Иванов Борис Викторович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Селезнев Борис Иванович,
доктор технических наук, профессор, зав.
каф. физики твердого тела и
микроэлектроники, директор института
электронных и информационных систем
ФГБОУ ВПО Новгородский
государственный университет имени
Ярослава Мудрого

Стрельчук Анатолий Маркович,
кандидат физико-математических наук,
с.н.с. Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физико-
технический институт имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Радар ммс»

Защита состоится « 17 » декабря 2015 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан « 16 » октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04
д.т.н., профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание мощных полупроводниковых коммутаторов нано- и субнаносекундного диапазона вызвано современными потребностями локационной, лазерной, преобразовательной техники, экспериментальной физики, где в ряде важных случаев решающими являются требования по надежности, малогабаритности, мгновенной готовности к работе, высокой стабильности, синхронизируемости, устойчивости к внешним воздействиям и т.д.

На сегодняшний день одним из широко применяемых и перспективных полупроводниковых коммутаторов размыкающего типа, используемый в генераторах с индуктивным накопителем энергии, является дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ), созданный в 80-х годах под руководством академика И.В. Грехова в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН. Дрейфовые диоды с резким восстановлением изготавливаются из базового материала всей полупроводниковой электроники – монокристаллического кремния. В последние 10-15 лет появились предпосылки к созданию размыкателей тока на основе карбида кремния приборного качества. Карбид кремния 4Н-политипа (4Н-SiC) по своим основным электрофизическим параметрам, таким как ширина запрещенной зоны, напряженность электрического поля лавинного пробоя, максимальная рабочая температура, теплопроводность – значительно превосходит кремний. Одним из главных параметров ДДРВ является скорость переключения, определяемая напряженностью электрического поля лавинного пробоя материала и скоростью насыщенного дрейфа носителей. ДДРВ на основе кремния обеспечивают скорость переключения напряжения порядка 10^3 В/нс (на одном *p-n*-переходе), а частота повторения выходных импульсов ограничивается допустимым уровнем средней коммутируемой мощности, которая определяется максимальной рабочей температурой *p-n*-перехода. Простые теоретические оценки показывают, что ДДРВ на основе карбида кремния могут переключаться значительно быстрее кремниевых ДДРВ. Кроме того, карбид кремния отличается повышенной устойчивостью к механическим и радиационным воздействиям, что позволяет использовать приборы на его основе в жестких условиях эксплуатации.

Таким образом, применение карбида кремния для создания ДДРВ дает возможность улучшить их параметры – коммутируемую мощность, скорость переключения и тактовую частоту повторения формируемых импульсов напряжения, что открывает новые возможности при создании мощной импульсной техники. Очевидно, что разработка карбидокремниевых размыкателей тока, исследование процессов, влияющих на их работу и создание генераторов нано- и субнаносекундных импульсов напряжения на их основе, является актуальной научно-технической задачей.

Целью настоящей работы является разработка карбидокремниевых размыкателей тока на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением, исследование процессов при их переключении и создание генераторов

импульсов напряжения на их основе. Для ее достижения решались следующие задачи:

- проектирование оптимальной структуры карбидокремниевого ДДРВ;
- экспериментальное исследование процесса переключения карбидокремниевых размыкателей тока и сравнение с кремниевыми ДДРВ;
- сравнительный анализ факторов, влияющих на потери заряда в карбидокремниевом ДДРВ;
- разработка технологии создания высоковольтных диодных сборок, а также исследование синхронности срабатывания отдельных диодных структур в сборке;
- исследование последовательной компрессии энергии двумя каскадами карбидокремниевых ДДРВ;
- исследование работы кремниевого и карбидокремниевого размыкателей тока при их параллельном включении в структуре генератора импульсов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Основное влияние на скорость переключения карбидокремниевых ДДРВ оказывают эффекты неполной ионизации примеси и сужения запрещенной зоны при сильном легировании эмиттерных областей, что приводит к значительным потерям заряда и уменьшению максимальной скорости нарастания напряжения на диоде до 3-3,5 В/пс.

2. Разработанная технология последовательного соединения N карбидокремниевых ДДРВ при условии идентичности их параметров обеспечивает синхронное срабатывание всех диодов в сборке и увеличение скорости нарастания напряжения в N раз при условии равенства импедансов сборки и базовой диодной структуры.

3. На основе карбидокремниевых размыкателей тока возможно построение генераторов импульсов с последовательной компрессией энергии. Однако использование в предварительном каскаде сжатия кремниевого ДДРВ позволяет повысить коэффициент полезного действия генератора вследствие значительных потерь заряда в SiC-ДДРВ при сохранении амплитудно-временных параметров формируемых импульсов напряжения.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые экспериментально показана возможность формирования субнаносекундных импульсов напряжения со скоростью нарастания переднего фронта импульса 2-3,5 В/пс генератором с индуктивным накопителем энергии на основе разработанных карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением в качестве размыкателя тока.

2. Впервые экспериментально и при помощи компьютерного моделирования в программе TCAD Synopsys определены потери заряда в 4H-SiC-ДДРВ, а также проведена оценка коэффициента полезного действия генератора с размыкателем тока на основе 4H-SiC-ДДРВ. Осуществлен сравнительный анализ факторов, влияющих на потери заряда в 4H-SiC-ДДРВ. Показано, что наибольший вклад в увеличение потерь заряда вносят неполная ионизация легирующей примеси и эффект сужения запрещенной зоны в условиях сильного легирования эмиттерных областей.

3. Предложена методика разбраковки карбидокремниевых диодных структур на основании измерений их статических и динамических параметров.

4. Разработана технология соединения карбидокремниевых ДДРВ в высоковольтную сборку. Впервые экспериментально исследована работа этих сборок в качестве размыкателя тока в составе генератора импульсов напряжения. Показано, что диодные структуры в сборке срабатывают одновременно.

5. Разработана схема генератора субнаносекундных импульсов напряжения, построенная на основе последовательного сжатия энергии двумя карбидокремниевыми ДДРВ-каскадами.

6. Предложена схема построения высоковольтных генераторов, использующая последовательное сжатие энергии кремниевым и карбидокремниевым ДДРВ-каскадами.

Объект исследований – генераторы нано- и субнаносекундных импульсов напряжения на основе карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением.

Предмет исследований – переключение карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением в генераторах нано- и субнаносекундных импульсов напряжения.

Методы исследований и использованная аппаратура

Моделирование физических процессов в карбидокремниевых ДДРВ проводилось при помощи программного продукта TCAD Synopsys. Для измерения статических характеристик использовались: характериограф Л2-56, LCR-измеритель Agilent E4980A, высоковольтные источники-измерители STABIST-20 и Keithley 2657A. Измерение динамических параметров 4H-SiC-ДДРВ проводилось на специально разработанном стенде с применением стробоскопического высокочастотного осциллографа Tektronix DSA8300.

Практическая значимость работы определяется основными результатами, которые могут быть использованы при разработке карбидокремниевых размыкателей тока и генераторов импульсов напряжения на их основе:

– представлена методика расчета структуры карбидокремниевых размыкателей тока на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением, позволяющих формировать в структуре генератора импульсы напряжения со скоростью нарастания переднего фронта в 2-3 раза большей, чем кремниевые ДДРВ;

– получены экспериментальные данные о потерях заряда в 4H-SiC-ДДРВ, позволяющие оценивать коэффициент полезного действия проектируемых генераторов импульсов напряжения на их основе;

– разработана методика разбраковки отдельных 4H-SiC-диодных структур, предназначенных для их сборки в высоковольтные диодные столбы;

– разработана технология, позволяющая осуществлять соединение карбидокремниевых диодных структур в высоковольтные сборки без паразитных активных и реактивных сопротивлений;

– разработаны схемы построения мощных генераторов нано- и субнаносекундных импульсов напряжения на основе отечественных полупроводниковых приборов.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием современного измерительного оборудования, результатами независимых измерений, а также повторяемостью экспериментальных данных, которые находятся в полном соответствии с результатами моделирования и теоретических расчетов.

Личный вклад автора состоит в том, что основные результаты диссертационной работы получены лично им или при его непосредственном участии. Лично автором были проведены расчет оптимальной структуры размыкателей тока на основе карбидокремниевых ДДРВ и моделирование их переходных процессов. Разработаны и изготовлены стенды для исследования динамических характеристик как одиночных, так и собранных в высоковольтную сборку 4H-SiC-ДДРВ, проведено их комплексное экспериментальное исследование. При участии автора была разработана технология соединения диодных структур в высоковольтные сборки, разработаны образцы генераторов субнаносекундных импульсов напряжения и проведено их экспериментальное исследование.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены в виде докладов и обсуждались:

на международных конференциях: 16th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials. Italy, 2015; III научно-техническая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего», Санкт-Петербург, 2015; V международная научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки молодых ученых», НГТУ, Новосибирск, 2015; 10th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, France, 2014.

На всероссийских конференциях: II, III, IV Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2013, 2014, 2015); 70-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, 2015).

На региональных и внутривузовских конференциях: 66, 67, 68-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ»; 68, 69-я Научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, 2013, 2014).

Внедрение научных результатов. Результаты диссертации использованы в научно-исследовательских работах по гос. контракту №21.2012-0110К/(12-19/ЦМИД-235) от 29.02.2012, №2013/306/(13-34/ЦМИД-255) от 20.05.2013, а также в опытно-конструкторской работе по гос. контракту №2013/305/(13/31/ЦМИД-253) от 06.05.2013, выполнявшихся в НОЦ «Центр микротехнологии и диагностики» СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Результаты диссертационной работы использовались на кафедре радиотехнической электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при подготовке бакалавров и магистров в рамках учебных дисциплин «Твердотельная электроника» и «Компьютерное моделирование и проектирование приборов и устройств

микроволновой и оптической электроники» соответственно направления подготовки «Электроника и наноэлектроника».

Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618794 – «Программа расчета напряжения пробоя планарных *p-n*-переходов с произвольным распределением примеси (PNprofile)».

Научные публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации. Перечень публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений. Общий объем работы составляет 140 страниц машинописного текста, включает 126 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 140 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы задачи диссертации, обоснована актуальность исследования физических процессов, связанных с работой карбидокремниевых размыкателей тока, рассматривается научная новизна и практическая значимость выносимых на защиту результатов.

Первая глава – обзорная. Рассмотрены основные теоретические и экспериментальные литературные данные, описывающие современное состояние проблемы и необходимые для решения поставленных задач.

В первом параграфе рассмотрены основные принципы формирования мощных импульсов нано- и субнаносекундной длительности. Проведен обзор коммутирующих элементов размыкающего (прерыватель тока) и замыкающего типов, на основании которого сделан вывод, что для построения мощных генераторов нано- и субнаносекундных импульсов напряжения, имеющих возможность работы в частотном режиме и обладающих стабильностью параметров во времени, необходимо использовать полупроводниковые коммутаторы размыкающего типа.

Во втором параграфе проведен обзор твердотельных размыкателей тока – SOS-диодов (Semiconductor opening switch) и дрейфовых диодов с резким восстановлением, которые нашли широкое применение в импульсной технике. Приводится описание принципа действия, конструкции SOS-диодов и ДДРВ, а также параметров генераторов, изготовленных на их основе. Показано, что именно использование ДДРВ позволяет разрабатывать высоковольтные генераторы субнаносекундных импульсов напряжения, способных работать в частотном режиме (десятки-сотни килогерц в непрерывном режиме, единицы мегагерц в пакетном режиме).

Третий параграф посвящен обзору перспективных полупроводниковых материалов, применение которых позволяет повысить коммутационные параметры размыкателей тока на основе ДДРВ. Основное внимание уделено карбиду кремния (SiC), обладающему уникальными электрофизическими параметрами. Приведено сравнение параметров кремния и карбида кремния, влияющих на характеристики размыкателей тока. На основе теоретических

оценок показано, что применение карбида кремния 4H-политипа позволяет значительно увеличить скорость срабатывания ДДРВ по сравнению с Si-ДДРВ, повысить коммутируемую мощность и частоту следования формируемых генераторами импульсов напряжения.

В четвертом параграфе рассмотрены как теоретические, так и экспериментальные работы, посвященные 4H-Si-ДДРВ. По приведенным оценкам размыкатели тока на основе SiC могут переключаться значительно быстрее кремниевых. Имеющиеся в научной литературе экспериментальные данные подтверждают возможность субнаносекундного обрыва тока карбидокремниевыми ДДРВ в составе так называемой двухконтурной схемы накачки. Однако отсутствуют экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности формирования импульсов напряжения карбидокремниевыми ДДРВ со скоростью нарастания переднего фронта импульса, большей или хотя бы сравнимой с кремниевыми коммутаторами в индуктивном контуре, т.е. в структуре генератора импульсов напряжения. Кроме того, отсутствуют сведения о разработке высоковольтных диодных сборок на основе 4H-SiC-ДДРВ, без использования которых невозможно построение мощных генераторов импульсов напряжения.

Вторая глава посвящена разработке структур карбидокремниевых ДДРВ, их теоретическому и экспериментальному исследованию. Рассмотрена последовательность расчета основных параметров ДДРВ от простых формул до компьютерного моделирования в TCAD Synopsys.

В первом параграфе представлен предварительный расчет диодных структур. Приведены полученные значения площади, диаметра, плотности обратного тока, уровня легирования и толщины базовой области диодных структур, рассчитанных на разные рабочие напряжения. Показано использование разработанной программы для экспресс-расчета напряжения лавинного пробоя планарных структур.

Во втором параграфе описывается разработанная адекватная модель физических процессов, основанная на диффузионно-дрейфовом приближении. Модель, в частности, учитывает эффекты неполной ионизации, сильной инжекции, лавинной генерации, характерные для приборов на основе карбида кремния.

В третьем параграфе рассматриваются вопросы проектирования и оптимизации структуры ДДРВ с использованием современного пакета TCAD Synopsys, который позволяет проводить одно-, двух- и трехмерное моделирование физических процессов в различных полупроводниковых приборах. Отмечено, что наиболее оптимальной (обеспечивающей наименьшее время переключения) является несимметричная структура с градиентно-легированной *p*-базой (вследствие сильного различия в значениях подвижностей электронов и дырок в карбиде кремния). На рисунке 1 показаны профили легирования карбидокремниевых диодов после оптимизации, рассчитанных на переключение напряжения 1 кВ (рисунок 1, а) и 1,8 кВ (рисунок 1, б) соответственно.

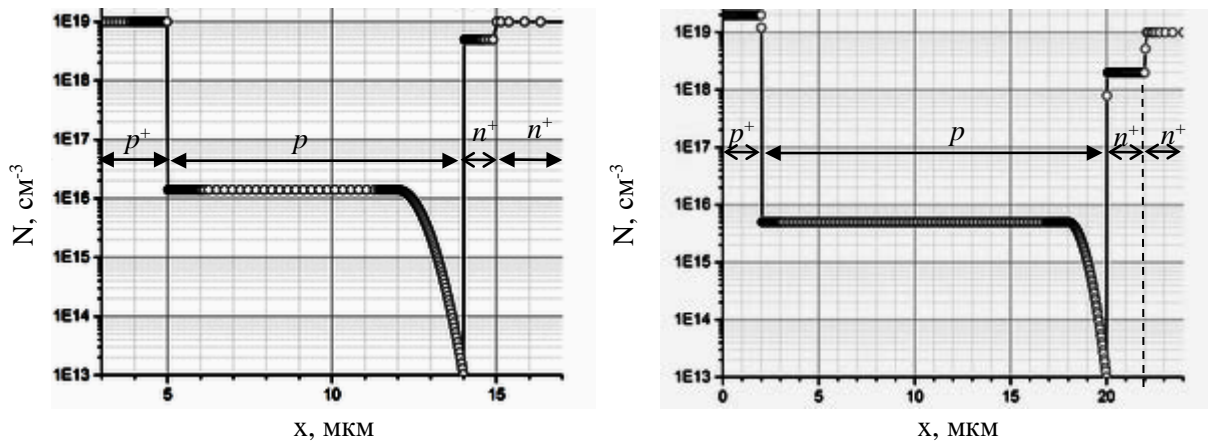


Рисунок 1 – Профили легирования оптимизированных структур, рассчитанных на переключение напряжения 1 кВ (а) и напряжения 1,8 кВ (б)

Диодные структуры, рассчитанные на 1 кВ предназначены для создания генераторов на одиночных ДДРВ и по результатам моделирования обеспечивают скорость нарастания переднего фронта импульса напряжения на нагрузке порядка 2 В/пс. Площадь рабочей области оптимизированной диодной структуры составляет 0,5 мм². Структуры, рассчитанные на 1,8 кВ, предназначены для разработки мощных генераторов, построенных на карбидокремниевых высоковольтных сборках и способных формировать импульсы напряжения амплитудой единицы-десятки киловольт. По результатам моделирования единичный диод с площадью рабочей области 1 мм² способен формировать в структуре генератора импульсы напряжения со скоростью нарастания переднего фронта на уровне 3-3,5 В/пс.

Описываются результаты исследования влияния физических процессов на потери заряда и скорость переключения карбидокремниевых ДДРВ. Проведенные теоретическое и экспериментальное исследования показали, что наибольший вклад в увеличение потерь заряда и снижение скорости переключения вносят эффекты неполной ионизации примеси и сужения запрещенной зоны при сильном легировании эмиттерных областей. Теоретическое исследование переходного процесса проводилось в схеме с генератором напряжения (рисунок 2, а). За отправную точку была принята идеализированная модель карбидокремниевых диода, в которой учитывались только насыщение скорости носителей в сильном поле, а также влияние на подвижность носителей рассеяния на фонах и на полностью ионизированных примесях. При наличии указанных моделей наблюдается отсутствие потерь заряда (рисунок 2, б, кривая 1). Затем в расчет последовательно включались модели следующих физических эффектов:

- сужение запрещенной зоны в условиях сильного легирования (кривая 2);
- рекомбинация носителей по механизму Шокли-Рида-Холла (кривая 3);
- Оже-рекомбинация (кривая 4);
- ударная ионизация (кривая 5);
- неполная ионизация легирующей примеси (кривая 6);
- поправка на неполную ионизацию к примесному рассеянию (кривая 7).

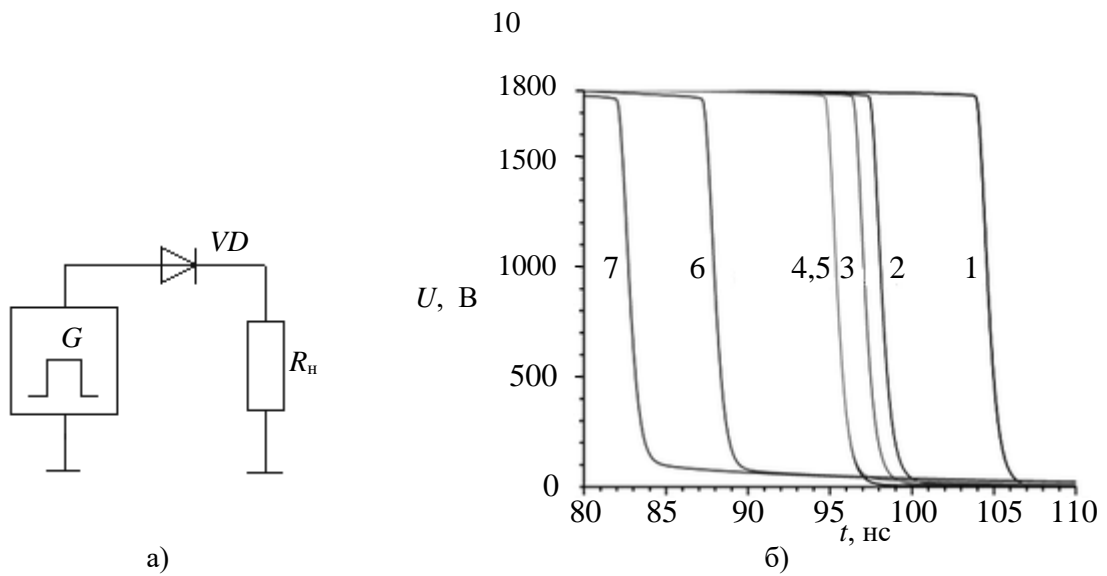


Рисунок 2 – Измерительная схема с генератором напряжения (а) и переходные характеристики напряжения на карбидокремниевой структуре с учетом различных моделей физических эффектов (б)

По мере подключения моделей физических эффектов в карбиде кремния, переходные характеристики сдвигаются влево по шкале времени (рисунок 2, б), что свидетельствует о наличии потерь заряда в структуре, т.к. ДДРВ срабатывает ранее достижения обратным током через диод своего максимального значения $j_s = qNv_s$. Неполная ионизация легирующей примеси (кривая б) и сужение запрещенной зоны при высоких концентрациях примеси (кривая 2) приводят к существенным потерям заряда, а рекомбинация носителей по механизмам Оже и Шокли-Рида-Холла вносят меньший вклад.

В четвертом параграфе описываются основные этапы полного технологического цикла по изготовлению диодных структур. На рисунке 3, а, б представлены два типа эпитаксиальных структур, используемых для изготовления карбидокремниевых ДДРВ, рассчитанных на переключение напряжения 1000 В (а) и 1800 В (б).

р ⁺ -эмиттер ($1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 5 мкм)	р ⁺ -эмиттер ($2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 2 мкм)
р-база ($1,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 9 мкм)	р-база ($5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 18 мкм)
п ⁺ -согласующий слой ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 1 мкм)	п ⁺ -согласующий слой ($2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 мкм)
п ⁺ -4Н-SiC подложка (<26 Ом-см, 350 мкм)	п ⁺ -4Н-SiC подложка (<26 Ом-см, 350 мкм)

Рисунок 3 – Типы для изготовления 4Н-SiC-ДДРВ, рассчитанных на переключение напряжения 1000 В (а) и 1800 В (б)

Карбидокремниевые ДДРВ, рассчитанные на переключение напряжения 1000 В, имеют конструкцию в виде меза структуры (рисунок 4). Площадь рабочей области структур составляет $0,5 \text{ мм}^2$.

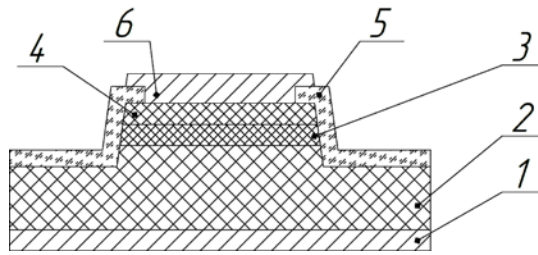


Рисунок 4 – Конструкция карбидокремниевого ДДРВ на основе меза структуры.
 1 – омический контакт к n^+ -SiC подложке; 2 – n^+ -SiC подложка с согласующим слоем;
 3 – p -SiC-слой; 4 – p^+ -SiC-слой; 5 – окисел SiO_2 ; 6 – омический контакт p^+ -SiC-слою

Для диодов, предназначенных для изготовления высоковольтных сборок, была использована конструкция траншейного типа (типа «канавки»), которая обеспечивает планарность ДДРВ со стороны p^+ -эмиттера, что повышает технологичность изготовления сборок при соединении диодов. Площадь рабочей области изготовленных ДДРВ, рассчитанных на переключение напряжения 1,8 кВ, составила 2 мм² и 4 мм². Увеличение площади по сравнению с базовой структурой, полученной по результатам моделирования в TCAD Synopsys, обусловлено необходимостью обеспечения оптимальной плотности обрываемого диодами тока. Так, получение расчетных скоростей переключения для структуры площадью 1 мм² обеспечивается последовательным соединением двух 4H-SiC-ДДРВ площадью 2 мм² или четырех 4H-SiC-ДДРВ площадью 4 мм². Другими словами, сборка из четырех последовательно соединенных диодов площадью 4 мм² по величине емкости, сопротивления и плотности обрываемого тока эквивалента базовой структуре площадью 1 мм². При этом амплитуда переключаемого напряжения будет выше в 4 раза.

Третья глава посвящена исследованию характеристик изготовленных карбидокремниевых ДДРВ.

В первом параграфе представлены результаты измерений статических параметров диодов: прямой и обратной ветвей вольт-амперной характеристик, измерений вольт-фарадных характеристик и определение на их основе профиля легирования диодов. Показано, что изготовленные диодные структуры обладают приборным качеством и по своим параметрам соответствуют расчетным данным.

Во втором параграфе изложено описание разработанного стенда для измерения динамических характеристик карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением, представляющего собой формирователь импульсов напряжения на испытуемых диодных структурах. Показано, что диоды способны формировать в одноконтурной схеме импульсы напряжения, амплитудно-временные параметры которых соответствуют расчетным значениям, полученным по результатам моделирования в TCAD Synopsys. Так, при использовании карбидокремниевых ДДРВ, рассчитанных на переключение напряжения 1000 В, были сформированы киловольтные импульсы напряжения с длительностью на полувысоте порядка 700 пс и скоростью нарастания переднего фронта импульса 2 В/пс.

В третьем параграфе приводятся результаты экспериментального исследования температурной зависимости времени жизни неравновесных

носителей заряда (НЗ) карбидокремниевых ДДРВ, знание которой необходимо для определения оптимального времени “накачки” диода прямым током при его работе в структуре генератора импульсов напряжения. Измерение времени жизни НЗ проводилось по спаду послеинжекционной электродвижущей силы. Было установлено, что время жизни неравновесных носителей заряда в 4Н-SiC-ДДРВ (сотни наносекунд) значительно меньше, чем в Si-ДДРВ (единицы микросекунд). В исследованном температурном диапазоне (300...673 К) наблюдался рост времени жизни НЗ от 230 до 1300 нс.

В четвертом параграфе описываются результаты по определению потерь заряда в 4Н-SiC-ДДРВ при работе в качестве размыкателя тока в структуре генератора импульсов напряжения, а также результаты анализа эффективности (коэффициента полезного действия) генератора в целом. КПД генератора на основе 4Н-SiC-ДДРВ по данным компьютерного моделирования и по результатам эксперимента составили 26% и 29% соответственно.

Четвертая глава посвящена описанию разработанных генераторов субнаносекундных импульсов напряжения с использованием 4Н-SiC-ДДРВ в качестве размыкающего ключа.

В первом параграфе представлено описание разработанного генератора на одиночном карбидокремниевом диоде. Генератор имеет следующие характеристики: амплитуда формируемых импульсов на нагрузке 50 Ом составляет 1000 В, скорость нарастания переднего фронта по уровню 0,1-0,9 от амплитуды равна 2 В/пс. Частота следования формируемых импульсов в непрерывном режиме составляет 1 МГц, в пакетном режиме – до 10 МГц при десяти импульсах в пачке.

Во втором параграфе рассмотрены принципы построения мощных генераторов на основе высоковольтных карбидокремниевых ДДРВ-сборок и каскадов последовательной компрессии энергии.

Приводится описание разработанной методики разбраковки карбидокремниевых диодных структур для создания высоковольтных диодныхборок. Описывается разработанная технология последовательного соединения диодов в высоковольтные сборки (рисунок 5).

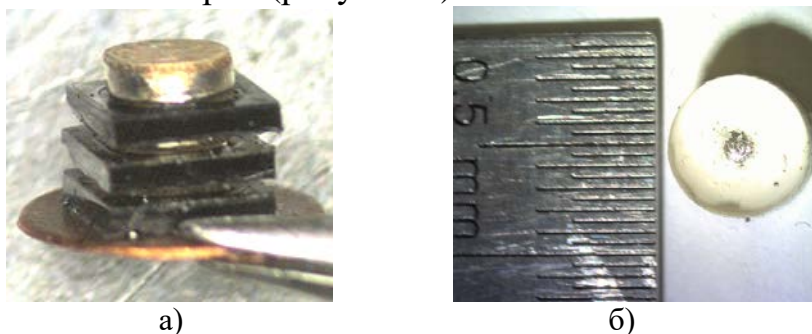


Рисунок 5 – Карбидокремниевые ДДРВ-сборки: три последовательно соединенных диода с рабочей областью 2 мм² (а) и готовая сборка (б)

На рисунке 6 представлена осциллограмма импульса напряжения, переключаемого двумя параллельно работающими сборками из восьми последовательно соединенных карбидокремниевых ДДРВ площадью 4 мм². Указанные сборки работают как единый коммутатор.

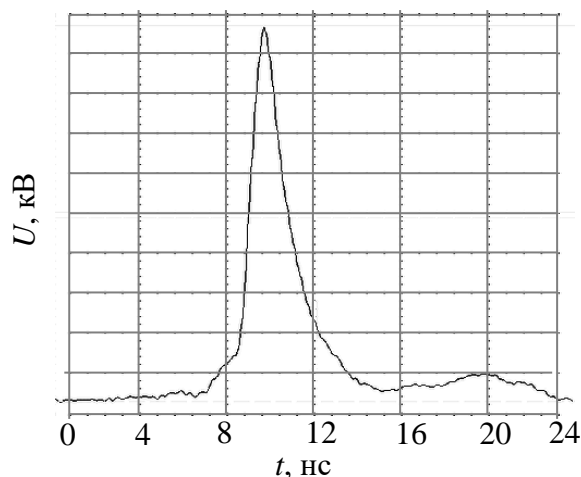


Рисунок 6 – Осциллограмма импульса напряжения, переключаемого высоковольтной диодной сборкой на основе карбидокремниевых ДДРВ площадью 4 мм². Масштаб по оси OX – 4 нс/дел; масштаб по оси OY – 1340 В/дел

Результаты измерений статических и динамических параметров ДДРВ-сборок показали, что напряжение, переключаемое сборкой, пропорционально количеству диодов в ней и все структуры срабатывают синхронно, в результате чего отсутствует затягивание переднего фронта формируемого диодной сборкой импульса напряжения в структуре генератора.

При использовании карбидокремниевыхборок в качестве размыкателя тока был разработан ряд генераторов напряжения. На рисунке 7 показана электрическая схема генератора на основе последовательной компрессии энергии карбидокремниевыми ДДРВ-каскадами. В первом каскаде компрессии используется одиночный 4H-SiC-ДДРВ площадью 4 мм² (VD1), в выходном каскаде – диодная сборка из двух последовательно соединенных ДДРВ площадью 2 мм² (VD2). Принцип работы схемы заключается в следующем. С задающего генератора G на вход транзисторных ключей VT1-VT4 поступает импульс заданной длительности ΔT . В результате чего транзисторы открываются и осуществляется накачка диодов VD1 и VD2 прямым током. После окончания импульса запуска ключи VT1-VT4 замыкаются, происходит перезарядка с периодом колебаний, определяемым значениями индуктивностей L_4-L_8 и емкостей C_1-C_4 , в результате чего накопленный в диодах заряд выводится обратным током. Источники питания $U_{смещ1}$ и $U_{смещ2}$ необходимы для выбора оптимального режима работы карбидокремниевых диодов, путем изменения величины внесенного заряда на стадии протекания прямого тока. При достижении максимального обратного тока через структуру ДДРВ происходит последовательное восстановление обратного сопротивления диодов VD1 и VD2 и энергия, накопленная в L_{11} , резко переходит в нагрузку R_n , на которой формируется импульс напряжения.

Разработанный генератор формирует импульсы напряжения амплитудой 3,5 кВ и длительностью на полувысоте 1,7 нс. Частота следования выходных импульсов напряжения в непрерывном режиме составляет 100 кГц.

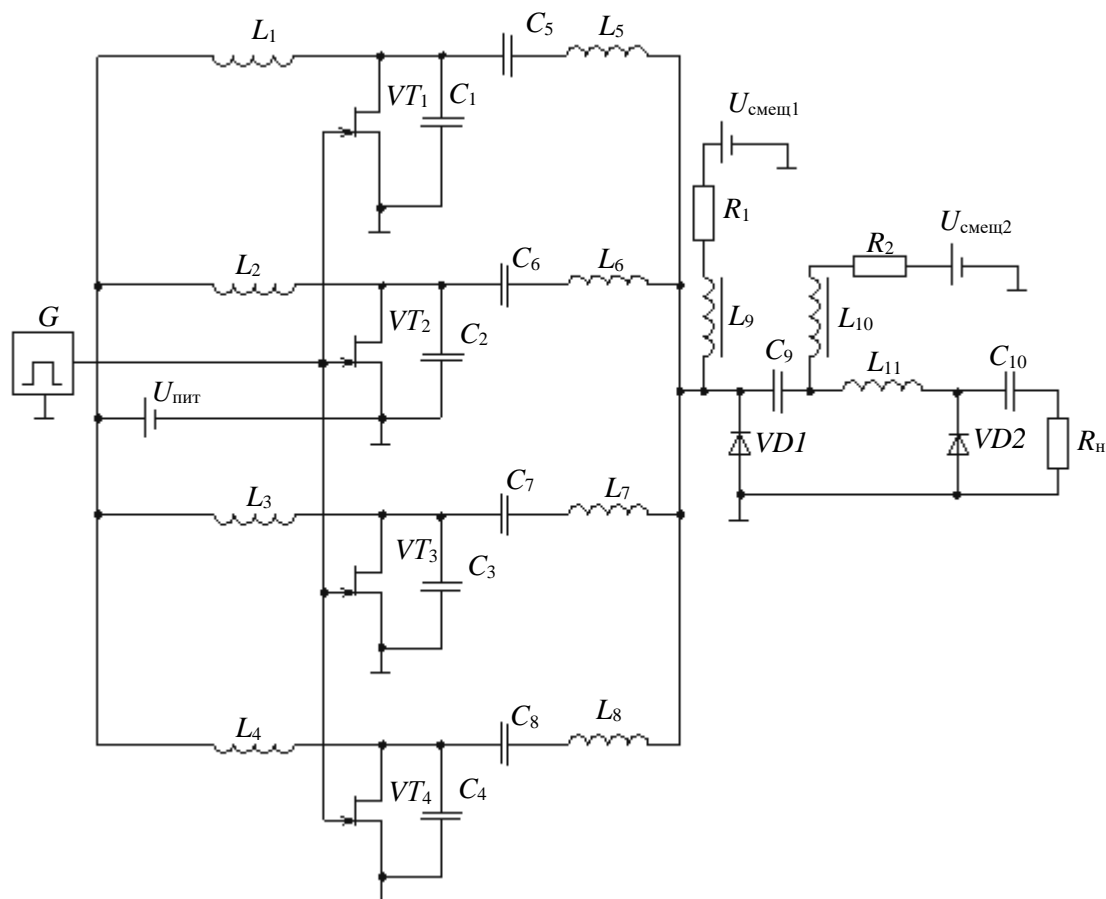


Рисунок 7 – Электрическая схема генератора импульсов напряжения на основе параллельного включения карбидокремниевых ДДРВ-коммутаторов

При разработке мощных генераторов, характеризующихся выходной импульсной мощностью на уровне единиц-десятков мегаватт, использование карбидокремниевых ДДРВ в предварительном каскаде компрессии нецелесообразно. Для увеличения энергии, отбираемой за один такт от источника постоянного напряжения, необходимо менять условия работы первичного ключа (транзистора) путем понижения резонансной частоты колебательного контура, в котором он работает. При значительном расширении импульса напряжения на первичном ключе (свыше 60-100 нс на полувысоте) карбидокремниевый ДДРВ будет срабатывать значительно раньше, чем энергия, накопленная в индуктивном контуре с транзистором, перейдет в контур с 4H-SiC-ДДРВ.

На рисунке 8 показаны осциллограммы импульса напряжения на стоке транзисторного ключа $U_{тр}$, на кремниевом $U_{Si-ДДРВ}$ и карбидокремниевом диодах $U_{SiC-ДДРВ}$ при одних и тех же параметрах схемы. Видно, что кремниевый ДДРВ смещен значительно правее по шкале времени относительно импульса на стоке транзистора, чем карбидокремниевый ДДРВ. Вследствие этого существенная часть энергии, накопленной в индуктивном контуре с транзистором, будет потеряна.

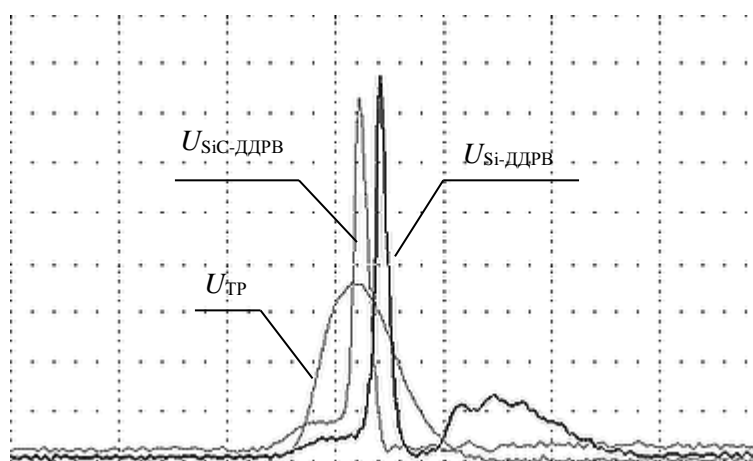


Рисунок 8 – Осциллограммы напряжения на транзисторном ключе, карбидокремниевом и кремниевом ДДРВ. Масштаб по оси ОХ – 15 нс/дел; масштаб по оси ОУ – 200 В/дел

Таким образом, применение в предварительном каскаде компрессии ДДРВ на основе кремния позволяет повысить коэффициент полезного действия генератора и значительно снизить требования к первичному ключу, путем понижения резонансной частоты контура и увеличивая тем самым энергию, запасаемую от источника питания за один такт.

На основе описанного принципа последовательной компрессии энергии был разработан генератор, в предварительном каскаде сжатия которого использовалась сборка из кремниевых ДДРВ, а в выходном каскаде – сборка из карбидокремниевых ДДРВ. Генератор формирует импульсы напряжения амплитудой 14 кВ с длительностью на полувывоте – 1,7 нс. Частота следования импульсов напряжения в непрерывном режиме составляет более 20 кГц. Как показали предварительные испытания, использование кремниевого размыкателя тока в предварительном каскаде вместо карбидокремниевого, не ухудшает амплитудно-временных параметров формируемых импульсов напряжения.

Разработанные генераторы на 3,5 кВ и на 14 кВ были испытаны при работе на реальную нагрузку, в качестве которой выступила антенна апертурного типа на основе четырех согласованных ТЕМ рупоров. Волновое сопротивление каждого рупора было равным 200 Ом, размер апертуры составлял 50х50 см. На рисунке 9 показаны осциллограмма импульса напряжения амплитудой 14 кВ, формируемого генератором с последовательной компрессией энергии кремниевым и карбидокремниевыми ДДРВ-каскадами, и излученный импульс напряжения (б), представленный в терминах $FOM = R \times E(t)$, где $R, м$ – расстояние между излучателем и точкой наблюдения (в дальней зоне излучения), $E(t)$ – напряженность электрического поля импульса излучения, кВ/м.

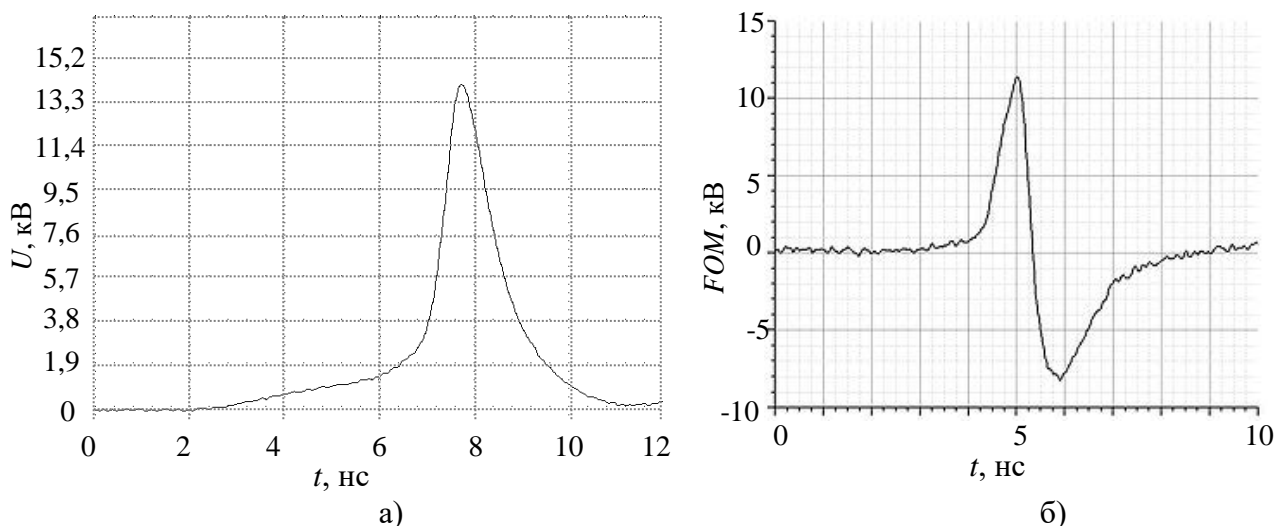


Рисунок 9 – Осциллограмма напряжения, формируемого генератором с последовательной компрессией энергии кремниевым и карбидокремниевым ДДРВ-каскадами (а) и электродинамический потенциал излучателя при работе от генератора (б)

Проведенные испытания разработанных генераторов на 3,5 кВ и 14 кВ в Объединенном институте высоких температур (ОИВТ РАН) в лаборатории мощных электромагнитных воздействий показали стабильность параметров при их работе в составе излучателей электромагнитных импульсов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны структуры карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением, рассчитанных на переключение напряжения амплитудой 1 кВ и 1,8 кВ и способные формировать импульсы напряжения в структуре генератора со скоростью нарастания переднего фронта 2 В/пс и 3-3,5 В/пс соответственно.
2. Определены основные физические эффекты в 4H-SiC-ДДРВ, приводящие к увеличению потерь заряда при переключении диодов. Показано, что основное влияние на скорость переключения карбидокремниевых ДДРВ оказывают эффекты неполной ионизации легирующей примеси и сужения запрещенной зоны при сильном легировании эмиттерных областей.
3. Разработана методика разбраковки отдельных диодных 4H-SiC-ДДРВ чипов по статическим и динамическим параметрам для изготовления на их основе высоковольтных диодных сборок, а также предложена технология соединения отдельных диодных структур в высоковольтные сборки без паразитных активных и реактивных сопротивлений.
4. Разработан генератор на одиночном карбидокремниевом дрейфовом диоде с резким восстановлением, формирующий на нагрузке 50 Ом импульсы напряжения амплитудой 1 кВ, скоростью нарастания переднего фронта 2 В/пс и частотой следования импульсов в непрерывном режиме 1 МГц.
5. Разработан генератор, формирующий субнаносекундные импульсы напряжения амплитудой 3,5 кВ на основе последовательной компрессии энергии двумя карбидокремниевым ДДРВ-каскадами.

6. Разработан генератор субнаносекундных импульсов напряжения импульсной мощностью 4 МВт на основе последовательной компрессии энергии кремниевым и карбидокремниевым ДДРВ-каскадами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Афанасьев А.В., Демин Ю.А., Иванов Б.В., Ильин В.А., Кардо-Сысоев А.Ф., Лучинин В.В., Смирнов А.А. Высоковольтный миниатюрный карбидокремниевый источник наносекундных импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений // Нано- и микросистемная техника. 2013. №2. С.30-32.
2. Афанасьев А.В., Иванов Б.В., Ильин В.А., Кардо-Сысоев А.Ф., Лучинин В.В., Смирнов А.А. Анализ эффективности 4H-SiC дрейфового диода с резким восстановлением в схеме генератора сверхкоротких импульсов. Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. 2013. С.23-27.
3. Смирнов А.А. Экспериментальное исследование полупроводникового генератора наносекундных импульсов на базе дрейфового диода с резким восстановлением // 66-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. С.39-43.
4. Афанасьев А.В., Иванов Б.В., Ильин В.А., Кардо-Сысоев А.Ф., Смирнов А.А. В.И. Тихомиров. Компактный автономный генератор субнаносекундных импульсов для сверхширокополосных систем. // Нелинейный мир. 2014. №5. С.54 – 57.
5. Иванов Б. В., Кардо-Сысоев А. Ф., Смирнов А. А., Шевченко С. А. Определение скорости носителей заряда в карбидокремниевом диоде по переходной характеристике // 69-я Научно-техническая конференция СПб НТО РЭС, посвященная Дню радио. Сборник трудов конференции. С. 43-45.
6. Смирнов А.А., Иванов Б.В. Карбидокремниевые дрейфовые диоды с резким восстановлением как основа перспективных нано- и субнаносекундных генераторов импульсов // 67-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. С.43-46.
7. А.В. Афанасьев, С.С. Борисенко, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.В. Лучинин, К.А. Сергушичев, А.А. Смирнов. Трехкиловольтный генератор наносекундных импульсов напряжения на 4H-SiC-диодных сборках. Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. 2014. С. 407-412.
8. A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, V.A. Ilyin, A.F. Kardo-Sysoev, V.V. Luchinin, S.A. Reshanov, A. Schöner, A.A. Smirnov. Temperature dependence of minority carrier lifetime in epitaxially grown p⁺-p-n⁺ 4H-SiC drift step recovery diodes. 10th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Grenoble. Materials Science Forum. Vols 821-823 (2015). PP 632-635.
9. Смирнов А.А. Оптимизация схемы формирователя наносекундных импульсов напряжения на карбидо-кремниевом дрейфовом диоде с резким восстановлением.

Сборник материалов III научно-технической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015 г. С.151-153.

10. Смирнов А.А. Методика измерения высоковольтных сверхкоротких импульсов напряжения. Сборник докладов V-ой международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки молодых ученых». Новосибирск. НГТУ. 2015. С.148-151.
11. Смирнов А.А. Измерение динамических параметров дрейфовых диодов с резким восстановлением. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». №7. 2015. №7. С.7-9.
12. Иванов Б.В., Смирнов А.А., Шевченко С.А, Кардо-Сысоев А.Ф. Формирование наносекундных импульсов напряжения дрейфовыми диодами с резким восстановлением. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. №3. 2015. С.25-29.
13. Иванов Б.В., Смирнов А.А., Шевченко С.А, Кардо-Сысоев А.Ф. Исследование процесса формирования субнаносекундных перепадов напряжения карбид-кремниевыми дрейфовыми диодами с резким восстановлением // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/141TVN415.pdf>.
14. Афанасьев А.В., Демин Ю.А., Иванов Б.В., Ильин В.А., Кардо-Сысоев А.Ф., Лучинин В.В., Смирнов А.А. Мегаваттный генератор наносекундных импульсов на основе карбидо-кремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. №3. 2015. С.21-24.
15. А.В. Афанасьев, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.В. Лучинин, А.А. Смирнов. Исследование процесса переключения карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением. Сборник статей IV Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015.
16. А.В. Афанасьев, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, А.А. Смирнов. Исследование карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением и разработка на их основе генераторов сверхкоротких импульсов. 68-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. С.50-54.