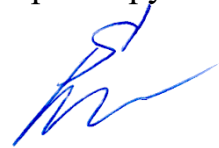


На правах рукописи



Рязанцев Александр Дмитриевич

**Совершенствование характеристик генераторов
на основе диодов с накоплением заряда**

1.3.4 – «Радиофизика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Усков Григорий Константинович

Официальные оппоненты: **Неровный Валерий Владимирович**,
доктор технических наук, доцент,
Акционерное общество научно-внедренческое
предприятие «ПРОТЕК», отдел перспективных
технологий и разработок, ведущий научный
сотрудник

Скрипаль Александр Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский национальный
исследовательский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского», институт физики,
кафедра физики твердого тела, заведующий
кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Волгоградский государственный
университет»

Защита состоится 15 декабря 2022 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.288.05 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, главный корпус, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Воронежского государственного университета по адресу: <http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3461>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степкин В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы.

В последнее время происходит стремительный рост интереса к сверхширокополосным (СШП) радиосистемам. С их помощью можно, например, отслеживать малоподвижные цели на небольших расстояниях, порядка единиц и десятков метров. Примером сигналов, используемых для этих целей, могут послужить сверхкороткие импульсы (СКИ), наиболее важными параметрами которых являются длительность и амплитуда. Чтобы сформировать такие сигналы, необходимы специальные генераторы, которые бы соответствовали поставленным задачам. Зачастую они содержат в своей основе два ключевых элемента: размыкатель тока и накопитель энергии.

В качестве размыкателей тока наиболее часто используются диоды с накоплением заряда (ДНЗ или SRD). Получить с их помощью мощные импульсы сверхмалой длительности практически невозможно из-за особенностей полупроводниковой структуры. Для достижения высоких значений амплитуд сигнала необходимо, чтобы полупроводниковые приборы могли выдерживать высокие напряжения смещения и пропускать большой прямой и обратной токи, а также перенаправлять энергию, накопленную в индуктивном накопителе в нагрузку за пико- или субнаносекундные интервалы времени. Добиться этого, не внося изменений в конструкцию диодов, можно путем соединения их в последовательные сборки.

Для генерации сверхкоротких импульсов с помощью такой сборки принципиально важное значение имеет синхронность работы диодов в ней. Для обеспечения оптимальных параметров формируемого импульса переключение всех диодов из открытого в закрытое состояние должно происходить одновременно. Однако, при производстве полупроводниковых приборов всегда имеет место некоторый разброс в значениях их параметров. Различия в уровнях концентраций примесей или размеров областей полупроводниковой структуры приводят к появлению задержки в переключении одних диодов в сборке относительно других. Требования к такой задержке ужесточаются с уменьшением длительности и увеличением крутизны фронтов импульса.

С практической точки зрения это означает, что разброс параметров приводит к тому, что моменты переключения таких диодов в последовательной сборке не будут совпадать, следовательно, энергетические характеристики ухудшатся, а длительность импульсов увеличится. На данный момент не существует единой и четко определенной методики отбора диодов с накоплением заряда, позволяющей компенсировать данный недостаток и обеспечить условия одновременного переключения ДНЗ в сборке.

Таким образом, практическая потребность в совершенствовании характеристик генераторов на основе диодов с накоплением заряда определяет актуальность тематики данной диссертации.

Степень разработанности проблемы.

В последние годы проводится большое количество качественных исследований диодов с накоплением заряда, однако количественному описанию процессов, протекающих в их полупроводниковой структуре во время переключения и генерации сверхкоротких импульсов уделяется мало внимания. На практике при использовании последовательныхборок ДНЗ в схемах генераторов СКИ сверхмалой длительности возникают проблемы, связанные с технологическим разбросом параметров ДНЗ. Зачастую их параметры могут

значительно отличаться даже в пределах одной партии. Проводя отбор диодов на основе предварительного измерения их параметров можно значительно улучшить формируемые импульсы. Однако, измерение для всего диапазона режимов работы означает большие временные и вычислительные затраты, которые можно значительно уменьшить, используя алгоритмы автоматизации и современное измерительное оборудование.

Существующие модели диодов с накоплением заряда описывают большинство особенностей работы ДНЗ, однако, зачастую, они не учитывают различные «паразитные» эффекты, происходящие в полупроводниковой структуре диода, например, накопление заряда вне его активной области. Величина этого заряда прямым образом влияет на затягивание процесса переключения, что отрицательным образом сказывается на характеристиках формируемых сигналов.

Повышение амплитуды и расширение спектра формируемых сигналов являются одними из основных ключевых задач в современной сверхвысокочастотной радиотехнике. Поэтому на данный момент разработка новых схемотехнических решений также является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка способов уменьшения длительности и увеличения амплитуды сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы, формируемых генераторами на основе диодов с накоплением заряда.

Задачи работы.

1. Исследовать процессы, протекающие в полупроводниковой структуре диодов с накоплением заряда, оказывающие влияние на их переключение.

2. Провести теоретическое и экспериментальное исследование характеристик ДНЗ в различных режимах его работы.

3. Разработать методику автоматизированного измерения параметров диодов с накоплением заряда на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, позволяющую измерять их параметры и определять зависимости этих параметров от режимов работы диода.

4. Провести теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров диодов с накоплением заряда и режимов их работы на параметры формируемых импульсных сигналов.

5. Разработать способы, позволяющие сократить длительность формируемых СКИ

6. Разработать способы, позволяющие повысить амплитуду формируемых СКИ.

Научная новизна работы.

В результате проведенных исследований и разработок был достигнут следующий ряд научных и технических результатов:

1. Разработан автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс (ПАИК), позволяющий экспериментально определять основные параметры диодов с накоплением заряда и их зависимости от режимов работы. Предложенный в работе измерительный модуль обеспечил согласование в сверхширокой полосе частот, что дало возможность выявить стадию медленного переключения ДНЗ, связанную с накоплением заряда вне его активной области.

2. Разработанная методика отбора диодов с накоплением заряда, позволила сократить длительность формируемого сверхкороткого импульса в генераторах с последовательным включением диодов за счет обеспечения их одновременного

переключения. Применение такого подхода позволило повысить амплитуду на 20% по сравнению с сборками ДНЗ, не удовлетворяющим условиям одновременного переключения, и на 30% по сравнению с одиночными диодами. Сформулированы требования, предъявляемые к параметрам ДНЗ, измеренным для различных режимов работы.

3. Предложен способ уменьшения величины заряда, инжектированного вне активной области диода, за счёт ограничения времени протекания тока накачки через его полупроводниковую структуру. Проведенное моделирование схемы генератора с импульсным накоплением позволило определить требования к параметрам импульса накачки.

4. На основе проведенного моделирования и экспериментального исследования эффектов, возникающих в нелинейной линии передачи, предложен метод управления длительностью сверхширокополосных импульсных сигналов. Результаты, полученные в ходе теоретического и экспериментального исследования нелинейной линии, обуславливают возможность реализации управления длительностью сверх коротких импульсов в пределах от 70% до 100% от исходной при неизменной амплитуде путем изменения напряжения смещения нелинейной емкости.

Теоретическая и практическая ценность заключается в том, что полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в различных областях науки и техники, связанных с проектированием полупроводниковой структуры и дальнейшим производством полупроводниковых диодов с накоплением заряда, синтезом формирователей сверхширокополосных импульсных сигналов. В частности:

1. Предложенная методика отбора ДНЗ может быть использована при селекции ДНЗ для объединения их в последовательные сборки. Она обеспечивает условие одновременного их переключения в таких сборках, и тем самым позволяет существенно улучшить характеристики формируемых с помощью этихборок СКИ.

2. Разработанный в диссертации автоматический программно-аппаратный измерительный комплекс для определения основных параметров диодов с накоплением заряда и их зависимостей от режимов работы диодов в купе с предложенной в работе методикой отбора ДНЗ может быть активно внедрен в процесс производства полупроводниковых диодов для организации их селекции по параметрам и уменьшения разброса этих параметров в пределах одной партии. Также использование данного комплекса позволяет учесть существующий разброс параметров ДНЗ при проектировании систем связи.

3. Полученные в работе аналитические выражения для схемы уменьшения длительности СКИ, основанной на использовании нелинейной линии передачи в качестве обострителя заднего фронта (спада) импульса, позволило управлять длительностью формируемых сверхкоротких импульсных сигналов в широких пределах при неизменной амплитуде. Это дает возможность использовать данное решение в качестве формирователя сигналов в передатчиках СШП сигналов.

4. В диссертационной работе предложены и разработаны схемотехнические решения, которые можно использовать для уменьшения длительности и увеличения амплитуды СШП сигналов квазигауссовой формы, формируемых «классическими» генераторами.

5. Проведенное в работе моделирование физических процессов, протекающих в полупроводниковой структуре диодов с накоплением заряда,

работающих в режиме переключения, позволило сформулировать требование к параметрам импульса накачки, что позволяет сократить процессы инжекции заряда в сильно легированные области, и, тем самым, сократить влияние инерционных процессов, происходящих в диоде при переключении его в непроводящее состояние.

Методы исследования.

В диссертации использованы методы математического и компьютерного моделирования, численные методы расчета и анализа, математический аппарат дифференциальных уравнений, методы радиофизики и физики полупроводников, а также современные методики экспериментальных исследований.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, определяется соответствием их известным экспериментальным данным и фундаментальным теоретическим представлениям, корректным применением математических методов и согласованностью экспериментальных данных с результатами моделирования. Высокая точность измерительной аппаратуры и обработки данных с использованием современных численных методов также обеспечивает достоверность полученных экспериментальных данных.

Внедрение научных результатов.

Результаты диссертации использованы в рамках научного проекта №19-37-90163 «Исследование методов формирования сверхкоротких импульсных сигналов для систем радиолокации и связи» при финансовой поддержке РФФИ, выполнявшегося на базе кафедры электроники физического факультета Воронежского государственного университета, а также проекта №21-19-00323, поддержанного Российским научным фондом.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Разработан автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс, предназначенный для измерения быстро текущих процессов в диодах с накоплением заряда, зависимостей параметров этих диодов от их режимов работы, а также обработки результатов измерения.

2. Выполнение критериев отбора, основанного на теоретическом и экспериментальном исследовании характеристик диодов с накоплением заряда, приводит к сокращению длительности и/или увеличению амплитуды формируемых генератором сверхкоротких импульсов.

3. Сокращение времени протекания тока накачки через полупроводниковую структуру диода влечет за собой уменьшение величины заряда, инжектированного в сильно легированные области. Моделирование физических процессов в схеме с импульсным накоплением позволило определить требования к параметрам импульса накачки.

4. Аналитические выражения, полученные на основе анализа нелинейной линии передачи, обуславливают возможность реализации управления длительностью сверхкоротких импульсов в диапазоне от 70% до 100% от первоначальной.

Апробация работы.

Основные материалы диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на XXI, XXII, XXIII, XXVI Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2015, 2016, 2017, 2020 г., соответственно; 25-й, 30-й, 31-й Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2015, 2020, 2021 г., соответственно; VII-й международной

заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2017)», г. Тольятти, 2017 г.

Личный вклад.

Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту и составляющих научную новизну работы, получены автором диссертации лично. В статьях и докладах, написанных в соавторстве, соискателю принадлежат проведение теоретических и экспериментальных исследований, а также анализ полученных результатов.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 4 из них опубликованы в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (включая две публикации, индексируемые базами Web Of Science и Scopus). В том числе один патент и два свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 123 наименования. Объем диссертации составляет 132 страницы, включая 47 иллюстраций и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и решаемые задачи исследования. Показана научная новизна работы и приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию параметров диодов с накоплением заряда (ДНЗ), работающих в режиме переключения.

В разделе 1.1 приводится описание физических процессов, протекающих в полупроводниковой структуре ДНЗ, при их переключении из проводящего в непроводящее состояние. Скорость этого переключения является одним из основных показателей скорости работы самого ДНЗ как электронного ключа и для современных моделей составляет величину порядка нескольких десятков пикосекунд. В тексте приводится упрощенная схема подключения ДНЗ и соответствующие этой схеме временные зависимости тока, протекающего через этот диод, и приложенное к нему напряжение. На основе данных зависимостей весь цикл работы диода в ключевом режиме можно условно разделить на три стадии. Первая стадия начинается с того момента, когда к аноду диода прикладывается напряжение положительной полярности. Он смещается в прямом направлении, находится в состоянии высокой проводимости, и через него от анода к катоду начинает протекать ток. Второй этап работы ДНЗ начинается в тот момент, когда напряжение на аноде диода меняет свою полярность. В этот момент ток через диод меняет свой знак. Далее в тексте приводится описание процессов, происходящих во время второй стадии работы ДНЗ. Финальная третья стадия работы ДНЗ ознаменуется его стремительным восстановлением высокого обратного сопротивления и резким обрывом обратного тока в цепи диода.

В разделе 1.2 приводится описание основных параметров диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения. Кратко описываются отличия реального ДНЗ от идеального. Приводится описание процессов утечки заряда, происходящих в p-i-n структуре, как одной из известных в настоящее время диодных структур, обладающей интересующим в данной работе

свойством резкого восстановления высокого обратного сопротивления. Также приводится вид измеренной переходной характеристики ДНЗ.

В разделе 1.3 настоящей диссертации описывается методика измерения некоторых параметров диодов с накоплением заряда. Приводится краткое изложение особенностей автоматизированного программно-аппаратного измерительного комплекса (ПАИК), использованного для экспериментального определения параметров ДНЗ. В данном разделе также представлен принцип работы измерительного модуля – основной части ПАИК.

Для исследования разброса параметров ДНЗ были проведены экспериментальные исследования переходных характеристик одиночных диодов модели из некоторой выборки в пределах одной партии. В качестве образцов для исследования были выбраны отечественные диоды 2А609Б и зарубежные диоды MAVR-044769 (Macom). Все диоды из выборки были пронумерованы и по очереди устанавливались в измерительный модуль. С помощью измерительного комплекса для каждого из режимов строилась переходная характеристика и определялся набор параметров ДНЗ. Полученные на данном этапе зависимости для диодов изображены на рисунках 1 и 2. Для большей наглядности в данном случае были отображены результаты только для некоторых ДНЗ модели MAVR-044769. Из рисунка 1 видно, что переходные характеристики диодов отличаются.

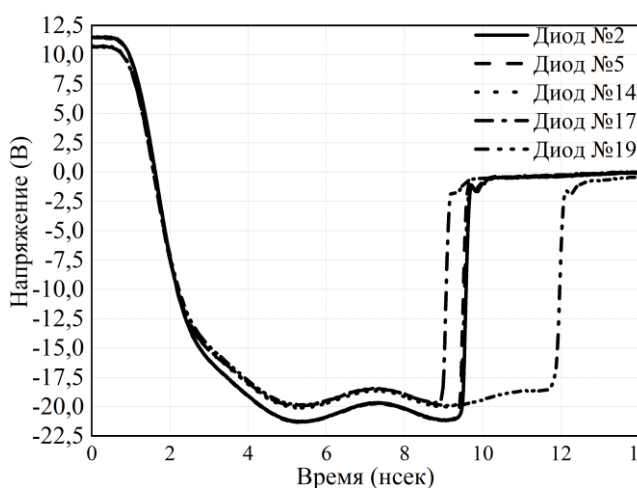


Рисунок 1 – Осциллограммы переходных характеристик пяти кремниевых диодов MAVR-044769 из общей выборки, работающих в одинаковых режимах

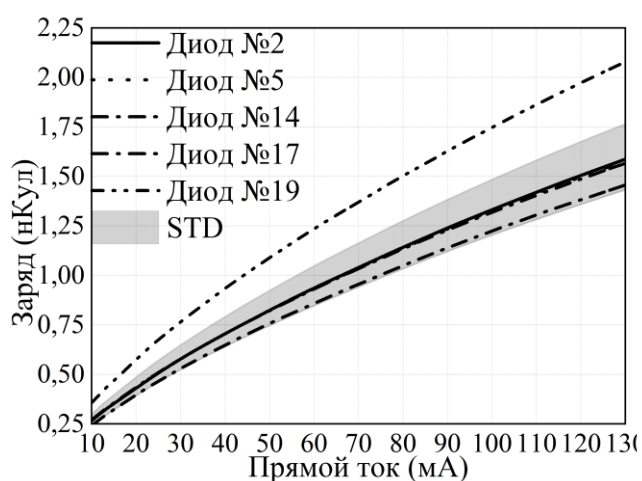


Рисунок 2 – Зависимости накопленного заряда от величины прямого тока накачки для пяти кремниевых диодов MAVR-044769 из общей выборки

Серая область на рисунке 2 соответствует среднеквадратическому отклонению накопленного заряда от усредненного значения. Здесь хорошо видно, что дисперсия накопленного заряда увеличивается с ростом тока накачки. Однако, отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию лежит в данном случае в пределах 9,6% — 9,8% для широкого диапазона режимов работы ДНЗ. Поведение зависимостей диодов 2А609Б совпадает с поведением аналогичных зависимостей для диодов Macom и подтверждает наличие технологического разброса параметров, поэтому отдельное рассмотрение графиков этих зависимостей в данном случае не вызывает интереса. Однако, важно отметить, что разброс параметров для диодов 2А609Б больше, чем у Macom, и составляет величину порядка 30% в исследуемом диапазоне напряжений.

Раздел 1.4 настоящей диссертации посвящен экспериментальному исследованию параметров последовательных сборок ДНЗ. Последовательное соединение диодов позволяет, в частности увеличить максимально допустимое пробивное напряжение, а также уменьшить суммарное время переключения в непроводящее состояние. Так, в данном разделе приводится описание преимуществ, которые дает последовательное соединение диодов, а также влияние параметров ДНЗ на ее работу в режиме переключения.

Проведено экспериментальное исследование параметров двух последовательно соединенных ДНЗ. Полученные результаты сравниваются с измеренными ранее одиночными ДНЗ. На рисунке 3 представлены зависимости величин накопленного заряда и времен переключения ДНЗ от прямого тока для диодов 2А609Б, так как они лучше всего демонстрируют интересующие в данной работе результаты. Так, из рисунка 3а отчетливо видно, что величина накопленного заряда для пары последовательно соединенных диодов определяется минимальной величиной заряда отдельного ДНЗ. Отсюда также следует, что суммарная величина накопленного заряда диодами из пары 2 и 4 оказывается больше, чем величина заряда, накопленная диодами 1 и 9. Зависимость же времени переключения от величины тока накачки для пары последовательно соединенных диодов, судя по всему, является среднеарифметическим от времен отдельных диодов.

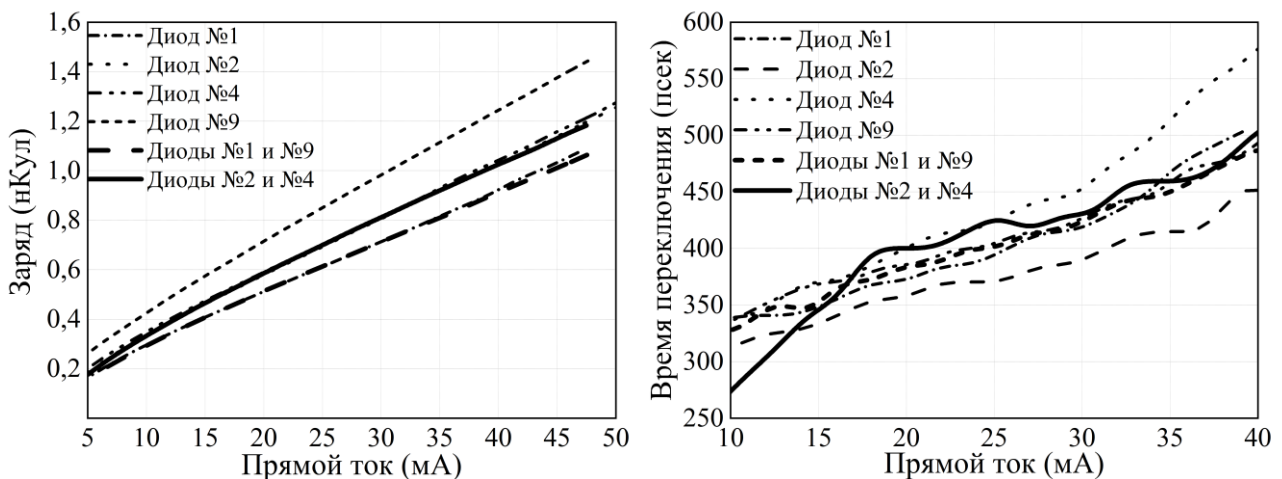


Рисунок 3 – Полученные экспериментальные зависимости параметров для последовательного соединения диодов с накоплением заряда 2А609Б от величины прямого тока: а) величины накопленного заряда, б) времени переключения диода

В генерации сверхкоротких импульсов принципиальное значение имеет синхронность переключения всех диодов в сборке. Поэтому в данном разделе диссертации предложена методика отбора диодов с накоплением заряда, применение которой позволяет обеспечить синхронность переключения последовательно соединенных ДНЗ. Основная идея данной методики заключается в том, чтобы подбирать диоды на основе выполнения трех условий. Первое условие предполагает равенство времен переключения диодов, второе – синхронный момент начала переключения при идентичных режимах работы и, наконец, третье условие подразумевает равенство накопленных зарядов в активной области каждого диода.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию генераторов сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы, а также исследованию зависимостей их характеристик от параметров диодов с накоплением заряда, лежащие в основе данных формирователей.

Так, в разделе 2.1 приводится обобщенная схема формирователя импульсных сигналов на основе ДНЗ (Рисунок 4). Как видно из рисунка генератор представляет собой соединение цепи диода с цепью удаления заряда и цепью нагрузки в одной общей точке. Соотношение токов в узле определяется с помощью первого правила Кирхгофа:

$$I_L - I_R - I_D = 0. \quad (1)$$

От соотношения этих токов будут зависеть амплитуда и длительность формируемых диодом с накоплением заряда сверхширокополосных импульсов. Импульс, формируемый в цепи нагрузки, наблюдается при достижении нулевой концентрации носителей заряда в активной области диода.

Чтобы сформировать импульсный сигнал большой амплитуды, необходимо создать условия, при которых обратный ток, протекающий через цепь диода, должен достигнуть максимального значения до того, как диод перейдет в непроводящее состояние. Как следствие можно установить, что улучшение характеристик формируемых сверхширокополосных импульсных сигналов может быть достигнуто не только схемотехническими решениями, но и путем подбора диодов.

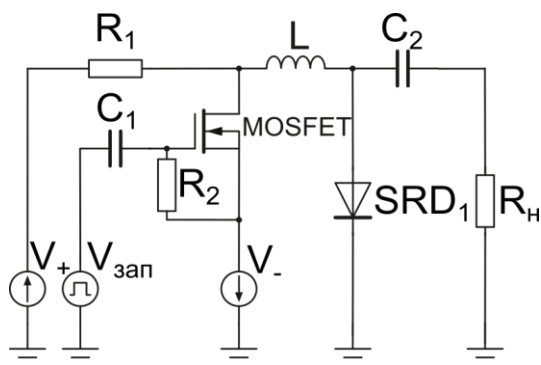


Рисунок 5 – Схема генератора импульсов положительной полярности на основе ДНЗ и магнитного накопителя энергии

Первая стадия (или фаза) представляет собой длительное накопление заряда в ДНЗ. Величина тока накачки определяется решением дифференциального уравнения:

$$L \frac{dI_{SRD}}{dt} = V^+ - I_{SRD} (R_1 + R_{SRD}), \quad (2)$$

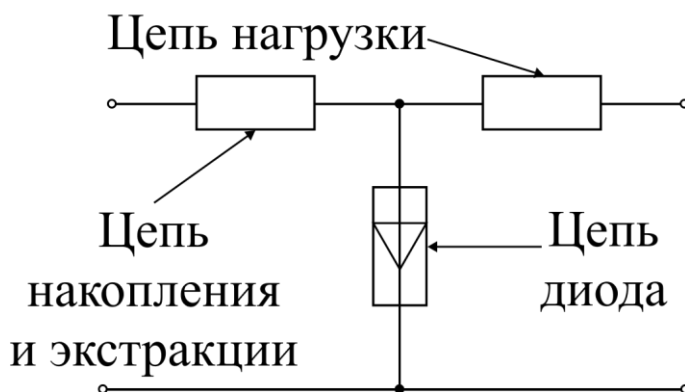


Рисунок 4 – Эквивалентная схема генератора сверхкоротких импульсов на основе ДНЗ

В разделе 2.2 проводится теоретическое исследование влияния разброса параметров ДНЗ на формируемые с помощью генераторов квазигауссовы сигналы. Генераторы на базе диодов с накоплением заряда и магнитных накопителях энергии, описанные в данном разделе, работают в режиме длительного накопления заряда (см. рисунок 5). Несмотря на кажущуюся простоту, в такой схеме можно получить импульсы различной полярности путем перестановки элементов. Рассмотрим работу генератора СКИ положительной полярности, в работе которой можно выделить несколько стадий. Первая

где R_{SRD} – сопротивление диода с накоплением заряда, который смещён в прямом направлении, протекающим через него током $I_{SRD}(t)$. Решением предыдущего выражения является временная зависимость тока в цепи $R_I-SRD-L-R_H$:

$$I_{SRD}(t) = \frac{V^+ (1 - \exp(-\frac{R_1 + R_{SRD}}{L} t))}{R_1 + R_{SRD}}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что это решение растёт экспоненциально и стремится к значению V^+/R_{sum} , где R_{sum} представляет собой суммарное сопротивление резистора R_I и сопротивления диода R_{SRD} .

Протекание описанного выше тока приводит к инжекции носителей обоих знаков, что описывается выражением:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{SRD}(t) - \frac{Q(t)}{\tau}, \quad (4)$$

где τ соответствует времени жизни неосновных носителей заряда в I -области ДНЗ, а $Q(t)$ представляет собой величину заряда электронно-дырочной плазмы, накопленную там же. Второе слагаемое отвечает за рекомбинацию заряда.

Второй фазой работы генератора является фаза экстракции заряда из активной области, которая описывается уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t) - \frac{Q(t)}{\tau}. \quad (5)$$

Первое слагаемое соответствует обратному току через диод, который удаляет из активной области накопленный за предыдущую фазу заряд.

Далее следует третья фаза работы генератора. Она ознаменуется резким переключением диода с накоплением заряда в непроводящее состояние. Время этого переключения t_{nep} определяется параметрами самого диода, такими как коэффициент диффузии носителей заряда D_p , коэффициентом диффузии D , временем диффузии t_{diff} , площадью полупроводникового перехода A , толщиной кристалла полупроводника W , а также концентрацией примесей N_0 и эффективным временем жизни носителей заряда τ_p . Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$t_{nep} = \frac{1}{D_p} \left(\frac{I_{np} \frac{\tau_p}{A}}{2eN_0 \left(\frac{W}{4Dt_{diff}} \right)^2} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где e – элементарный заряд.

Следующее выражение соответствует импульсу напряжения, формируемого генератором на нагрузке R согласно схеме, изображенной на рисунке 5:

$$\frac{d^2 U_R}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{LC} = -R \frac{d^2 I_D}{dt^2}. \quad (7)$$

Ток через диод на стадии переключения определяется как:

$$I_{SRD}(t) = I_{\text{о6п}} \exp\left(-\frac{t}{t_e}\right), \quad (8)$$

где t_e представляет собой временной интервал, за которой ток диода падает в e раз. С учетом этого выражения решением выражения (9) можно записать в виде:

$$U_R = (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) - A \exp\left(-\frac{t}{t_e}\right), \quad (9)$$

где

$$A = \frac{I_{\text{о6п}} RLC}{t_e^2 - RCt_e + LC}, \quad \omega = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}, \quad B = \frac{-A}{\omega} \sqrt{\frac{1}{t_e} - \frac{R}{2L}}. \quad (10)$$

Выражение (9) с учетом введенных обозначений позволяет определить форму и параметры импульсов, генерируемых формирователем импульсов при заданном режиме работы. На основании вышеизложенного и, используя выражения (9) и (10), в работе было проведено теоретическое исследование схемы генератора СКИ, на основании которого было установлено, что характеристики формируемых импульсов зависят от параметров ДНЗ, в частности от величины накопленного в них заряда. Изменение величины заряда на величину более 10% приводит к заметному сдвигу момента начала формирования импульса и к некоторому изменению длительности. Чем больше накопленный в ДНЗ заряд, тем позже начинается формирование импульса в схеме генерации. При этом в аналитической модели амплитуда формируемых импульсов практически не зависит от величины накопленного в ДНЗ заряда.

В следующем разделе 2.3 диссертации было проведено экспериментальное исследование влияния разброса параметров ДНЗ на формируемые импульсы. Для этого в измерительном комплексе измерительный модуль был заменен на формирователь импульсов квазигауссовой формы на основе ДНЗ и магнитного накопителя энергии. Для каждого диода из выборки (двух моделей) были получены зависимости осциллограмм импульсов на выходе генератора от режима работы. Затем аналогичные измерения были проведены для определенных комбинаций пар последовательно соединенных диодов.

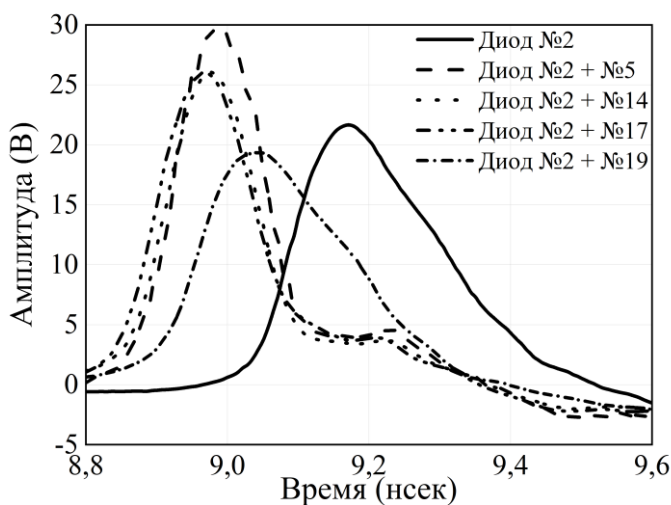


Рисунок 6 – Осциллограммы СКИ, полученные для пар ДНЗ MAVR-044769

Последовательное соединение пары диодов с накоплением заряда, имеющих максимально похожие переходные характеристики, позволило получить на нагрузке импульсы с максимальным размахом. Так, были сформированы импульсы (Рисунок 6) с амплитудой, превосходящей амплитуду импульсов, полученных схемами с одиночными диодами, на величину порядка 30% и длительностью на 40% меньше, чем в схеме с одиночным диодом.

Третья глава настоящей диссертации посвящена описанию схемотехнических методов сокращения длительности сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы, формируемых генераторами СКИ с магнитным накопителем энергии. Сокращение длительности формируемого СКИ возможно за счет уменьшения значения индуктивности, которое ведет к ухудшению его энергетических характеристик. При этом падение амплитуды импульса происходит из-за уменьшения накапливаемой энергии в индуктивности во время второй стадии работы генератора. То есть, чем меньше индуктивность в цепи удаления заряда, тем меньше длительность формируемого импульса, но и меньше его амплитуда. Для устранения данных проблем, в частности для уменьшения длительности формируемых импульсов без существенного падения его амплитуды в данной работе предложено три решения.

Раздел 3.1 посвящен первому такому решению – обострителю спада (заднего фронта) импульса на основе генератора СКИ. Принципиальная схема предложенного устройства представлена на рисунке 7. Обострителем в данном случае является второй каскад на основе диода с накоплением заряда, который включается в цепь нагрузки первого каскада. Идея данной схемы состоит в том, чтобы удалять накопленный заряд из диода-обострителя импульсом, формируемым с помощью первого каскада. В данном разделе диссертации приводится подробное описание принципа работы этой схемы. Отличительной особенностью данного генератора при этом является возможность уменьшения длительности этого импульса путем подбора соответствующего режима и диода-обострителя.

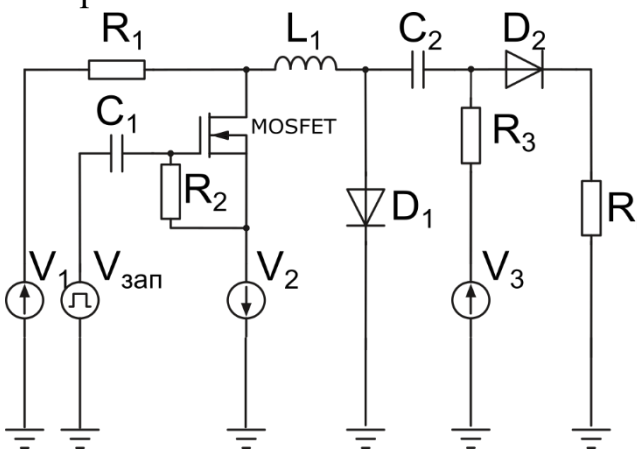


Рисунок 7 – Схема генератора СКИ на основе ДНЗ с обострителем фронта импульса

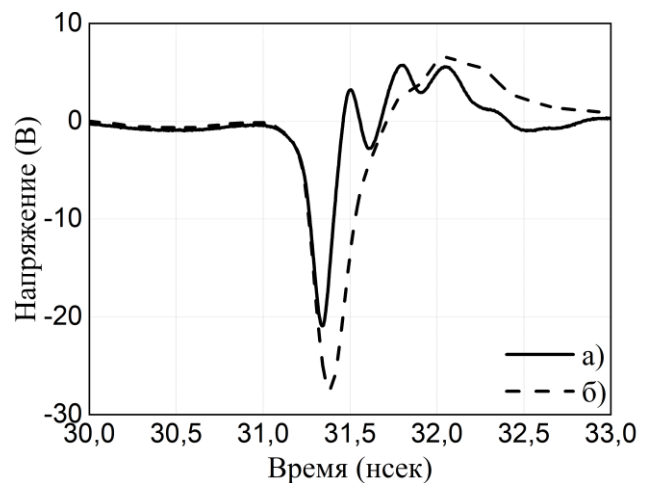


Рисунок 8 – Осциллограммы импульса на выходе генератора
а) длительностью 120 пс,
б) длительностью 230 пс

На рисунке 8 изображены осциллограммы СКИ наименьшей длительности, полученные с помощью схемы генератора с обострителем фронта импульса (а) и с помощью «классической» схемы генератора (б). Таким образом, в ходе эксперимента удалось уменьшить длительность импульса почти в 2 раза, по сравнению с классической схемой. Также предложенное решение может быть успешно использовано для управления длительностью формируемых импульсов в широких пределах путем изменения режима работы обострителя.

Как уже было экспериментально установлено ранее, время переключения диода пропорционально величине прямого тока накачки, что связано с

процессами, протекающими в полупроводниковой структуре диода и накоплением в ней электронно-дырочной плазмы. При этом с увеличением прямого тока накачки происходит рост заряда активной области и паразитного заряда, накапливаемого вне активной области. Именно рассасывание паразитного заряда приводит к замедлению процесса переключения ДНЗ. Однако скорость его инжекции значительно ниже, чем скорость накопления заряда в активной I-области. Поэтому суммарная величина накопленного заряда увеличивается с ростом тока накачки и времени протекания этого тока. При этом увеличивается и ширина генерируемого импульса. В разделе 3.2 предлагается схемотехническое решение для улучшения характеристик, получаемых импульсных сигналов, которое основано на уменьшении времени накопления заряда в ДНЗ. Исходя из вышесказанного, уменьшить величину паразитного заряда можно либо, уменьшив амплитуду тока накачки, либо, уменьшив время протекания этого тока через диод. Однако, первый метод приводит к уменьшению амплитуды генерируемого импульса, что является нежелательным. Второй метод можно осуществить, используя для накачки диода вместо постоянного тока с длительным временем протекания импульсные сигналы. В данном разделе для минимизации накапливаемого паразитного заряда предлагается использовать в качестве таких импульсных сигналов сверхкороткие импульсы.

Используя схему формирователя СКИ положительной полярности с магнитным накопителем и ДНЗ, была построена модель генератора, являющаяся своего рода блоком накачки. Для моделирования ДНЗ в режиме переключения была использована SPICE-модель, которая позволяет оценивать величины накапливаемых паразитного заряда и заряда в активной области.

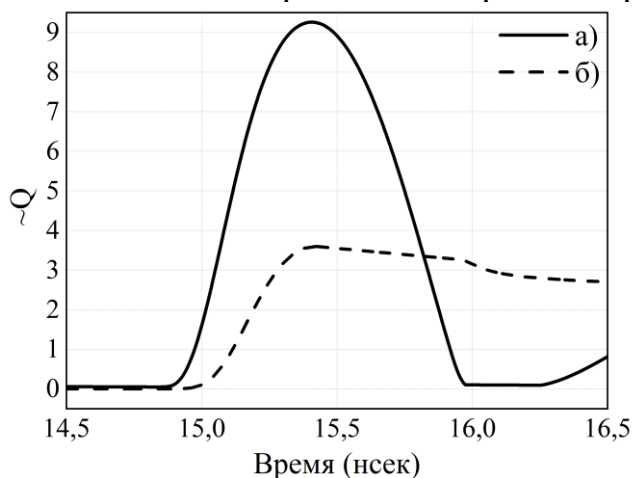


Рисунок 9 – Временные зависимости величин, пропорциональных накопленным зарядам а) в активной области, б) вне активной области

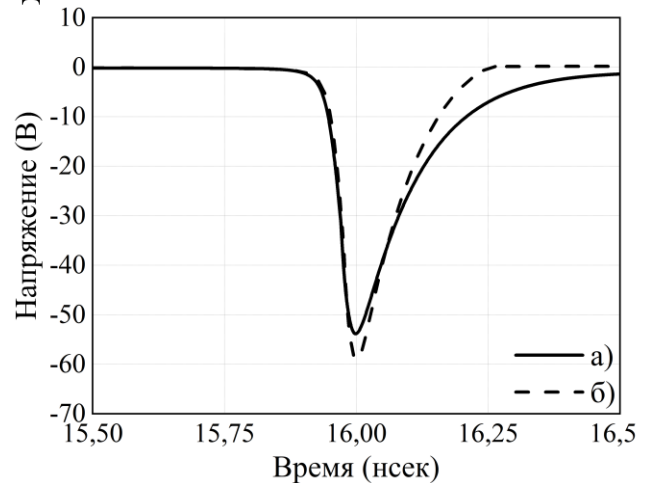


Рисунок 10 – Осциллограммы импульсов, сгенерированных а) классической схемой генерации СКИ, б) предложенной схемой

На рисунке 9 изображены временные зависимости, пропорциональные накопленным зарядам в активной области ДНЗ и вне ее (паразитный заряд) для схемы классического генератора. На рисунке 10 изображены аналогичные зависимости для схемы с последовательным возбуждением. Зависимости, характеризующие паразитный заряд, изображены в масштабе для удобства их анализа. Видно, что предложенная схема с последовательным возбуждением дает выигрыш по амплитуде импульса около 5 В по сравнению с классической

схемой, и при этом величина паразитного заряда практически в два раза меньше, чем в той же классической схеме.

В разделе 3.3 настоящей диссертации представлено схемотехническое решение, позволяющее обострять СКИ, используя эффекты, возникающие при распространении сигнала в нелинейных линиях передачи. Нелинейная линия передачи представляет (НЛП) собой лестничную цепь, состоящую из нескольких секций. Каждая такая секция состоит из параллельно соединенных нелинейных индуктивностей и/или емкостей. В данной работе используются только НЛП с линейными индуктивностями и нелинейными емкостями. Скорость распространения фазы импульса напряжения по НЛП выражается как:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC(V)}}, \quad (11)$$

где L представляет собой индуктивность линии передачи, а $C(V)$ – емкость линии, зависящая от напряжения.

Уменьшение времени нарастания широкого импульса с помощью NLTL может быть рассчитано по выражению:

$$\Delta t = n(\sqrt{LC_0} - \sqrt{LC(V_{\max})}), \quad (12)$$

где C_0 емкость при нулевом смещении, $C(V_{\max})$ – емкость при максимальном приложенном напряжении, равном амплитуде распространяющего импульса, n – количество секций НЛП. Сжатие импульса происходит при условии, что время нарастания восходящего фронта t_{r1} больше, чем величина сжатия импульса Δt .

В данной работе в качестве нелинейной емкости использовались полупроводниковые диоды, смещенные в обратном направлении. Нелинейная вольт-фарадная характеристика р-п перехода диода может быть аппроксимирована следующей функцией:

$$C(V) = \frac{C_0}{(1 + V/V_j)^M}, \quad (13)$$

где M – порядок нелинейности, V_j и V представляют собой контактная разность потенциалов и прикладываемое к диоду напряжение, соответственно. Для того, чтобы предотвратить разложение импульса на солитонные волны, нелинейная линия передачи формируется из нескольких последовательно соединенных секций.

Добавив возможность изменять напряжение смещения, выражение (13) можно переписать в виде:

$$\Delta t = n(\sqrt{LC(U)} - \sqrt{LC(V_{\max} + U)}). \quad (14)$$

Из (14) следует, что рост напряжения смещения U приводит к уменьшению Δt . Данный подход обеспечивает удобный и быстрый способ управления коэффициентом сжатия импульсов на выходе НЛП без внесения изменения в печатную плату.

В данной диссертации было проведено SPICE моделирование четырехкаскадной нелинейной линии передачи на основе копланарной волноводной линии и варикапов. Параметры модели данных варикапов были выбраны в соответствии с документацией на диоды ВВ131. С использованием полученной модели на печатной плате была реализована нелинейная линия

передачи. Входной импульс, подаваемый на НЛП, формировался с помощью генератора СКИ, описанного в предыдущих главах.

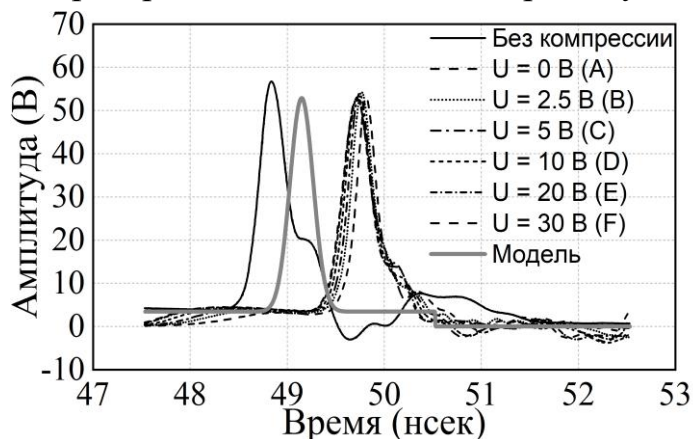


Рисунок 11 – Осциллограммы импульсов, получаемые на выходе НЛП при различных значениях напряжения смещения U

полученных результатов был сделан вывод, что существует минимальная длительность импульса, меньше которой спроектированные линии не позволяют сжать входной сигнал.

Четвертая глава посвящена разработке автоматизированного программно-аппаратного измерительного комплекса, который позволяет практически без участия человека получить переходные характеристики диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения и по ним определить основные параметры этих диодов и их зависимости от режима работы. Компьютерная программа, написанная с помощью ПО MATLAB, в режиме реального времени определяет список параметров, перечисленный в первой главе данной диссертации, и выводит зависимости этих параметров от прямого тока на панель пользовательского интерфейса. Использование такого измерительного комплекса позволяет в разы ускорить процесс измерения больших партий ДНЗ, уменьшает ошибку, связанную с человеческим фактором, и значительно упрощает селекцию диодов в соответствии с методикой их отбора, описанной также к первой главе. Раздел 4.1 описывает общую схему данного измерительного комплекса. В него входят измерительный модуль, сверхвысокочастотный установочный модуль (колодка), стробоскопический осциллограф с полосой пропускания 20 ГГц Agilent DCA-X 86100D, генератор импульсов Agilent 81104A, программируемый источник напряжения Rigol DP832A и персональный компьютер с установленным пакетом прикладных программ MATLAB (см. рисунок 12).

Использование данного схмотехнического решения позволило уменьшить длительность импульса с 350 пс до 210 пс, сохраняя при этом его амплитуду практически неизменной, а также обеспечить возможность плавного управления длительностью с помощью изменения напряжения смещения (см. рис. 11). Если на вход НЛП подавать более короткий импульс, то в таком случае эффективность его сжатия была ниже. Из

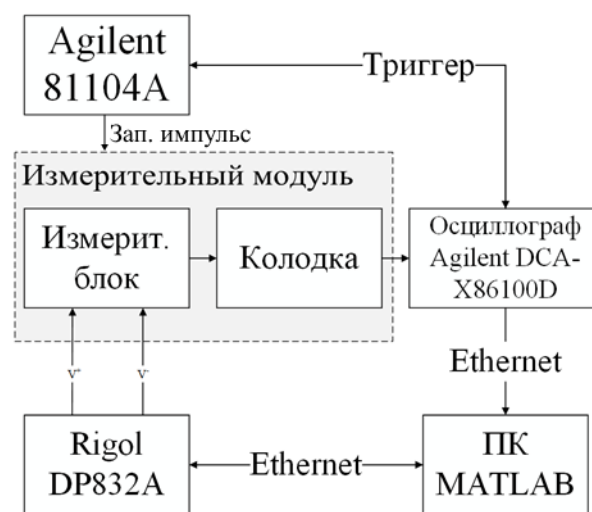


Рисунок 12 – Блок-схема ПАИК ДНЗ

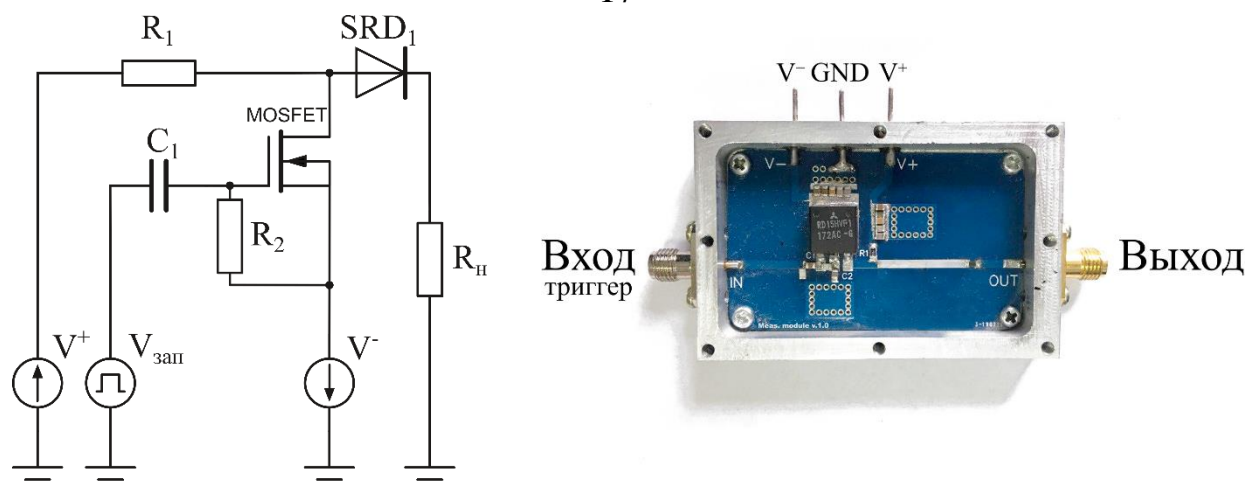


Рисунок 13(а) – Принципиальная схема (а) и фотография (б) измерительного модуля

В главе также описан принцип работы модулей и способы их взаимодействия. Ключевыми элементами установки являются измерительный модуль и установочный модуль (колодка). На рисунке 13(а) изображена принципиальная схема измерительного модуля, а на рисунке 13(б) - его внешний вид. Этот блок создает перепад напряжения для установочного модуля, в который непосредственно устанавливаются исследуемые диоды. Разнесение



Рисунок 14 – Фото установочного модуля (колодки)

измерительного и установочного блоков, а также оригинальная конструкция последнего, в свою очередь, обеспечивают согласование 50-омной линии, что позволило выделить стадию медленного переключения ДНЗ. Фото колодки представлено на рисунке 14.

Также в данной главе диссертация приводится подробное описание алгоритма работы комплекса по измерению параметров ДНЗ.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование процессов, происходящих в полупроводниковой структуре диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения, способов генерации СКИ на основе данных диодов.

2. Разработан автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс (ПАИК ДНЗ), позволяющий экспериментально определять основные параметры диодов с накоплением заряда и их зависимости от режимов работы. Разработанный измерительный модуль обеспечил согласование в сверхширокой полосе частот, что дало возможность выявить стадию медленного переключения ДНЗ, связанную с накоплением заряда вне его активной области.

3. Разработанная методика отбора диодов с накоплением заряда, позволила сократить длительность формируемого сверхкороткого импульса и увеличить его амплитуду в генераторах с последовательным включением диодов за счет

обеспечения их одновременного переключения. Применение такого подхода позволило повысить амплитуду на 20% по сравнению с сборками ДНЗ, не удовлетворяющим условиям одновременного переключения. Сформулированы требования, предъявляемые к параметрам ДНЗ, измеренным для различных режимов работы.

4. На основе эффектов, возникающих в нелинейной линии передачи, предложен метод управления длительностью сверхширокополосных импульсных сигналов. Предложенное решение позволяет регулировать длительность импульса в пределах от 70% до 100% от исходной при неизменной амплитуде путем изменения напряжения смещения нелинейной емкости.

5. Предложены методы уменьшения величины заряда, инжектированного вне активной области диода, за счёт ограничения времени протекания тока накачки через его полупроводниковую структуру. Проведенное моделирование схемы с импульсным накоплением также показало, что использование в качестве импульса накачки СКИ позволяет получить выигрыш в амплитуде и длительности генерируемого импульса по сравнению с классической схемой генерации.

Публикации по теме диссертации

Публикации, опубликованные в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Генератор сверхкоротких импульсов с длительным накоплением и обострителем на основе диода с накоплением заряда / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // Радиотехника. – 2018. – № 3. – С. 75-79.

2. Последовательное включение двух диодов с накоплением заряда в схеме генерации сверхкоротких импульсов / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // Радиотехника. – 2017. – № 10. – С. 139-143.

Публикации, индексируемые базами Web Of Science и Scopus:

3. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, A. D. Ryazantsev, V. A. Stepkin and G. K. Uskov, "Improvement of ultrashort pulses by serial connection of step recovery diodes," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 31, no. 2, pp. 204-206, Feb. 2021, doi:10.1109/LMWC.2020.3046925.

4. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, A. D. Ryazantsev, V. A. Stepkin and G. K. Uskov, "Application of nonlinear transmission lines for picosecond pulse sharpening," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, doi:10.1109/LMWC.2022.3150617.

Публикации, опубликованные в сборниках международных конференций:

5. Использование нелинейных линий передачи для сжатия пикосекундных импульсных сигналов / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова, Воронеж, 28–30 сентября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2021. – С. 150-157.

6. Обострение сверхкоротких импульсов с помощью нелинейной линии передачи / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 309-310.

7. Исследование влияния параметров диодов с накоплением заряда на генерируемые СКИ / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] //

Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т., Воронеж, 29 сентября – 01 2020 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – С. 30-39.

8. Исследование разброса параметров диодов с накоплением заряда / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 257-258.

9. Последовательное включение диодов с накоплением заряда при генерации сверхкоротких импульсов / А. М. Бобрешов, А. Д. Рязанцев, А. С. Жабин [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Воронеж, 18–20 апреля 2017 года. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", 2017. – С. 533-540.

10. Характеристики переключения двух диодов с накоплением заряда при их последовательном соединении / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2017. – № 7. – С. 80-87.

11. Экспериментальное исследование генератора сверхкоротких импульсов с обострителем фронта на основе диодов с накоплением заряда / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : XXII Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 19–21 апреля 2016 года. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2016. – С. 361-365.

12. Электронное управление длительностью сверхкоротких импульсов, формируемых генератором на базе SRD / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015) : Материалы докладов 25-ой Международной Крымской конференции. В 2-х томах, Севастополь, 06–12 сентября 2015 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2015. – С. 85-86.

13. Генератор сверхкоротких импульсов с электронным управлением длительностью / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : XXI Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 14–16 апреля 2015 года. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2015. – С. 908-912.

Патенты:

14. Патент на полезную модель № 167292 U1 Российская Федерация, МПК Н03К 3/02. Генератор сверхкоротких импульсов с обострителем фронта : № 2016111376/08 : заявл. 28.03.2016 : опубл. 27.12.2016 / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет" (ФГБОУ ВО "ВГУ"), Общество с ограниченной ответственностью "НаноИмпульс" (ООО "НаноИмпульс").

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

15. Бобрешов А. М. Программа "SRD-switch: controlled sources version (SRD-CS V2.05)": свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019661731 Рос. Федерация / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков .- Москва, 2019 .- (заявка №2019660522, дата поступления 27.06.2019, опубл. 05.09.2019, Бюл. №9).

16. Бобрешов А. М. Программа автоматизированного измерительного комплекса для измерения параметров диодов с накоплением заряда "ПАИК ДНЗ V.1.4.3": свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017662962 Рос. Федерация / А.М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. Д. Рязанцев, В. А. Степкин, Г. К. Усков .- Москва, 2017 .- (заявка № 2016616005, дата поступления 08.06.2016, опубл. 05.09.2016, Бюл. № 2).