

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Рязанцев Александр Дмитриевич

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

1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
доцент Г.К. Усков

Воронеж – 2022

## Содержание

Список используемых сокращений .....	4
Введение .....	5
ГЛАВА 1. Исследование параметров диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения .....	15
1.1.Переключение диодов с накоплением заряда с учётом процессов, протекающих в его полупроводниковой структуре .....	17
1.2.Параметры диодов с накоплением заряда .....	22
1.3.Методика измерения и экспериментальное исследование импульсных параметров диодов с накоплением заряда.....	29
1.4.Экспериментальное исследование параметров последовательных сборок диодов с накоплением заряда .....	39
Выводы.....	47
ГЛАВА 2. Формирование СШП импульсов квазигауссовой формы схемами на основе диодов с накоплением заряда.....	49
2.1.Обобщенная схема формирователя сверхширокополосных импульсных сигналов.....	50
2.2.Исследование влияния параметров диодов с накоплением заряда в схемах генераторов СКИ с длительным накоплением.....	55
2.3.Экспериментальное исследование влияния разброса параметров ДНЗ на формируемые СШП импульсы .....	67
Выводы.....	76
ГЛАВА 3. Схемотехнические методы сокращения длительности сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы.....	78
3.1.Генератор СКИ с обострителем фронта импульса .....	79
3.2.Генератор СКИ с импульсным накоплением заряда в ДНЗ .....	86
3.3.Обострение сверхкоротких импульсов с помощью нелинейной линии передачи.....	92
Выводы.....	101

ГЛАВА 4. Разработка автоматизированного программно-аппаратного измерительного комплекса параметров ДНЗ .....	102
4.1.Общая схема измерительного комплекса .....	103
4.2.Модули измерительного комплекса.....	106
4.3.Алгоритм работы измерительного комплекса .....	108
Выводы.....	115
Заключение .....	116
Список литературы .....	118

## Список используемых сокращений

ДНЗ – диод с накоплением заряда

ДРВ – диод с резким восстановлением обратного сопротивления

КПД – коэффициент полезного действия

НЛП – нелинейная линия передачи

ПАИК – программно-аппаратный измерительный комплекс

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований

СВЧ – сверхвысокие частоты

СКИ – сверхкороткие импульсы

СШП – сверхширокополосный

ЭВМ – электронная вычислительная машина

MOSFET – metal-oxide-semiconductor field effect transistor

NLTL – non-linear transmission line

SMA – subminiature version A

SCPI – standard commands for programmable instruments

SRD – step recovery diode

## Введение

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов, протекающих в полупроводниковой структуре диодов с накоплением заряда (ДНЗ) в режиме переключения. Также в работе описан процесс разработки автоматизированного программно-аппаратного комплекса по измерению характеристик и параметров ДНЗ, работающих в режиме переключения. Диссертация включает в себя исследование параметров и определение зависимостей этих параметров от режимов работы диодов с помощью данного комплекса. Под режимами работы ДНЗ в работе будут подразумеваться напряжения, которые в совокупности с номиналами элементов электронной схемы устройства и параметрами самого диода, вполне однозначно определяют его состояние на всех этапах работы. Также в диссертации исследуется влияние разницы значений параметров на работу генератора сверхкоротких импульсов пикосекундной длительности. Под генераторами же в данной работе будут подразумеваться именно генераторы на основе диодов с накоплением заряда и с магнитным накопителем энергии. Одновременно с этим предложена методика отбора ДНЗ для удовлетворения условия их одновременного переключения в последовательной сборке. Также в работе предлагаются схемотехнические методы усовершенствования генераторов на базе ДНЗ для улучшения энергетических параметров сверхширокополосных импульсных сигналов, формируемых ими.

### **Актуальность темы.**

В последнее время происходит стремительный рост интереса к сверхширокополосным (СШП) радиосистемам [20, 26, 34, 43, 50–53, 57, 76, 84, 97]. 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). Чтобы сформировать их, необходимы специальные генераторы, которые бы

соответствовали поставленным задачам [105]. Сформированные импульсы определяются набором параметров, наиболее важными из которых являются длительность и амплитуда импульса. Так, например, изменяя длительность в широких пределах, можно добиться изменения ширины спектра получаемого сигнала. Примером использования такого электронного управления длительностью импульсов в радиолокации является ситуация, когда для увеличения разрешающей способности требуется расширить, а для увеличения дальности – сузить спектр формируемого сигнала.

В связи с большими возможностями сверхширокополосных радиосистем области применения СШП сигналов постоянно расширяются [15, 18, 94, 95, 108, 109, 120, 121]. Это в свою очередь предъявляет большие требования к генераторам таких сигналов (повышение их коэффициента полезного действия, уменьшение длительности генерируемых сверхкоротких импульсов, увеличение частоты их повторения). 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) [6, 49, 60, 61, 73, 100, 101]. Генераторы, использующие такие диоды, работают на нелинейных эффектах, происходящих в их полупроводниковой структуре (эффекты накопления и удаления заряда из, так называемой, активной области). При этом существуют ограничения, связанные с физикой работы полупроводников, которые являются существенной преградой для получения мощных импульсов сверхмалой длительности. 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 сверхмалые интервалы времени. Уменьшения времени переключения диода в закрытое состояние можно добиться, укорачивая его обедненную область. Однако, при этом снижается пробивное напряжение, так как оно пропорционально ширине обедненной области p-n перехода. В то же время увеличение напряжения прямого смещения приводит к избыточному накоплению

заряда вне активной области диода, который также замедляет процессы переключения диода и негативно влияет на амплитуду, длительность и частоту повторения формируемых импульсов. Этот заряд носит название «паразитного», и проблемы, связанные с его накоплением, до сих пор не исследованы в полной мере. Разрешить описанные выше противоречия можно путем соединения диодов в последовательную сборку.

Однако, для правильной 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. Основным параметром ДНЗ, который характеризует переходные процессы, связанные с его работой в режиме переключения, является время жизни неосновных носителей заряда. Однако, при производстве полупроводниковых приборов всегда имеет место некоторый разброс в значениях их параметров, так как технологический процесс производства полупроводников в результате эпитаксии не позволяет достичь абсолютной точности параметров по всей площади кремниевой пластины, даже не смотря на высокие требования к качеству наращивания слоев полупроводника. Различия в уровнях концентраций примесей или размеров областей полупроводниковой структуры приводят к появлению задержки в переключении одних диодов в сборке относительно других. Требования к задержке ужесточаются с уменьшением длительности и крутизны фронтов импульса.

С практической точки зрения это означает, что этот разброс параметров полупроводниковой структуры даже в пределах одной партии диодов приведет к тому, что моменты переключения таких диодов в последовательной сборке не будут совпадать. Это становится причиной заметного ухудшения энергетических характеристик и увеличения длительности импульсов, формируемых с помощью реальных генераторов. 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 решении перечисленных выше задач 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 последовательных сборок ДНЗ в схемах генераторов СКИ сверхмалой длительности возникают некоторые проблемы, связанные с недостаточной точностью параметров ДНЗ для данных целей. Зачастую параметры ДНЗ могут значительно отличаться даже в пределах одной партии. Эту неточность можно компенсировать, проводя отбор диодов на основе предварительного измерения их параметров. Однако, их 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 является актуальной задачей.



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

**Основные задачи** данной диссертационной работы вытекают непосредственно из её цели:

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 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 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 [1, 2, 71, 72, 74, 75, 79, 81, 82, 85, 86, 90, 102, 114, 116, 117], в том числе 4 из них [1, 2, 71, 116] опубликованы в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (включая две публикации [1, 2], индексируемые базами Web Of Science и Scopus). В том числе патент [114] и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [8182 и 82].

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 123 наименования. Объем диссертации составляет 131 страницу, включая 47 иллюстраций и 1 таблицу.

## **ГЛАВА 1. Исследование параметров диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения**

Сверхкороткие импульсы используются в различных областях радиофизики, и их параметры вносят значительный вклад в характеристики и производительность той системы, в которой они используются. По этой причине сегодня в области генерации сверхширокополосных импульсов прикладываются значительные усилия, направленные на улучшение их параметров, а именно: на увеличение выходной мощности и частоты повторения импульсов, длительности этих импульсов, времени нарастания и спада их фронтов, а также уровня паразитных колебаний.

Высокая амплитуда импульсов является важным параметром для обеспечения большой дальности передачи, а также в случаях выполнения задач, связанных с проникновением в плотную среду с потерями. В то же время скорость передачи данных систем связи и разрешающая способность радара зависят от полосы пропускания сигнала. Полоса пропускания, в свою очередь, связана с длительностью импульса и временем его нарастания.

Самыми распространёнными на данный момент устройствами, которые активно используются для генерации сверхширокополосных импульсов квазигауссовской формы являются формирователи на основе быстродействующих полупроводниковых размыкателей тока. Чаще всего в качестве таковых размыкателей используются диоды с накоплением заряда (ДНЗ), и предназначены они как правило для генерации импульсного сигнала в маломощных передатчиках. Если стоит задача обеспечить высокую амплитуду генерируемых импульсов, то в таком случае следует использовать диоды с высоким напряжением пробоя. Однако такие диоды имеют более длительное время восстановления, что приводит к увеличению длительности фронтов импульса, и, следовательно, к увеличению суммарной длительности импульсов, формируемых с их помощью. Это приводит к

тому, что разработчики вынуждены постоянно искать компромисс между формированием импульсов малой длительности или с большой амплитудой.

Однако, существует ряд схмотехнических и алгоритмических решений, которые позволяют увеличить амплитуду, а, следовательно, и выходную мощность сигнала, на базе диодов с накоплением заряда, а также сократить длительность генерируемых импульсов по сравнению с классическими решениями. Это значительно расширяет область применения ДНЗ в качестве формирователей сверхширокополосных сигналов.

При работе с полупроводниковыми диодами в импульсном режиме была обнаружена интересная особенность, которая заключается в их заметной инерционности [112]. Это связано с происходящими в кристалле диода процессами накопления и удаления неосновных носителей заряда [98]. В свою очередь длительность этих процессов непосредственно связана с параметрами полупроводниковой структуры, и в первую очередь с временем жизни носителей накопленного в этой структуре заряда. Это позволяет оценивать качества полупроводникового диода (в частности ДНЗ) как быстродействующего электронного ключа, опираясь на известные параметры его структуры.

Однако, практические исследования показали, что не существует двух абсолютно одинаковых диодов, у которых параметры полупроводниковой структуры бы совпадали с большой точностью. Происходит это из-за того, что невозможно обеспечить абсолютную точность параметров полупроводника по всему объему пластины в процессе изготовления диодов. Как следствие мы получаем полупроводниковые диоды из одной партии, изготовленные по одной технологии, из одной пластины, но имеющие некий разброс параметров, который будет зависеть от технологических процессов. На практике это приведет к тому, что использование таких диодов из одной партии станет причиной разницы в скорости их работы как размыкателя тока.

Для реализации цели исследования разброса параметров диодов с накоплением заряда в данной главе диссертации проведено исследование процессов, протекающих в их полупроводниковой структуре, работающих в



импульсном режиме. Исследования проведены для большой выборки диодов из одной партии для двух моделей диодов отечественного и зарубежного производства. Также в данной главе проведен анализ основных параметров ДНЗ, получены экспериментальные результаты измерения этих параметров и их анализ для двух разных моделей. Также выявлен значительный технологический разброс описанных параметров, объяснено его влияние на процесс переключения последовательной сборки диодов и предложена методика их отбора для обеспечения синхронного переключения.

### **1.1. Переключение диодов с накоплением заряда с учётом процессов, протекающих в его полупроводниковой структуре**

Диоды с накоплением заряда активно используются в качестве прерывателей тока в сверхширокополосных импульсных сигналах квазигауссовской формы наносекундной и субнаносекундной длительности. Далее для простоты будем называть их сверхкороткими импульсными сигналами или просто СКИ. Такая популярность вызвана высоким быстродействием этих диодов. Работа этих полупроводниковых устройств в качестве высокоскоростных электронных ключей основана на эффекте резкого восстановления высокого обратного сопротивления р-п перехода. Оно может лежать как в пределах нескольких Ом, так и, например, достигать значений порядка нескольких МОм, в зависимости от того, в каком режиме работы находится ДНЗ. В полупроводниковой структуре кристалла ДНЗ при протекании прямого тока происходит накопление заряда в форме электронно-дырочной плазмы за счёт инжекции носителей заряда разного знака [96]. После протекания прямого тока в течение какого-то времени анод диода соединяют с источником отрицательной полярности, что приводит к его обратному смещению. Накопленный в кристалле заряд является причиной того, что через диод начинает протекать обратный ток, который рассасывает этот самый заряд. В тот момент, когда заряд будет полностью удалён из диода, то есть, когда концентрация

носителей станет равной нулю, произойдёт резкий обрыв обратного тока через диод вследствие быстрого восстановления высокого обратного сопротивления ДНЗ [119]. Процесс перехода из состояния с высокой проводимостью в непроводящее состояние принято называть переключением диода. 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.

Описанные выше процессы можно представить в виде упрощённой диаграммы, изображённой на рисунке 1.1 [37, 106, 107]. Рисунок (а) изображает временную зависимость напряжения, приложенного к аноду диода относительно катода. На рисунке (б) изображена идеальная переходная характеристика диода, представляющая собой зависимость тока, протекающего через диод, работающего в ключевом режиме, от времени [94, 95]. Упрощённая схема, которой соответствуют данные временные диаграммы изображена на рисунке 1.2. 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. При смещении р-п перехода диода *SRD* на рисунке 1.2 в прямом направлении, в случае если база диода является полупроводником типа *n*, из области *p* типа происходит инжекция носителей положительного заряда в базу диода. В базе они являются неосновными носителями заряда. Равномерность распределения этих дырок в базе нарушается, и это приводит к возникновению диффузионного тока в направлении от р-п перехода к омическому контакту. Иными словами, диод смещается в прямом направлении, находится в состоянии высокой проводимости, и через него от анода к катоду, а потом через сопротивление цепи накачки *R* начинает протекать ток  $I_{np}$ . В полупроводниковой структуре происходят процессы рекомбинации в следствие которых часть дырок, полученных в результате инжекции в базу, рекомбинирует с носителями отрицательного заряда [47]. Концентрация дырок в направлении от р-п перехода падает ввиду процессов диффузии. Величина протекающего тока накачки  $I_{np}$  определяется величиной сопротивления *R*.

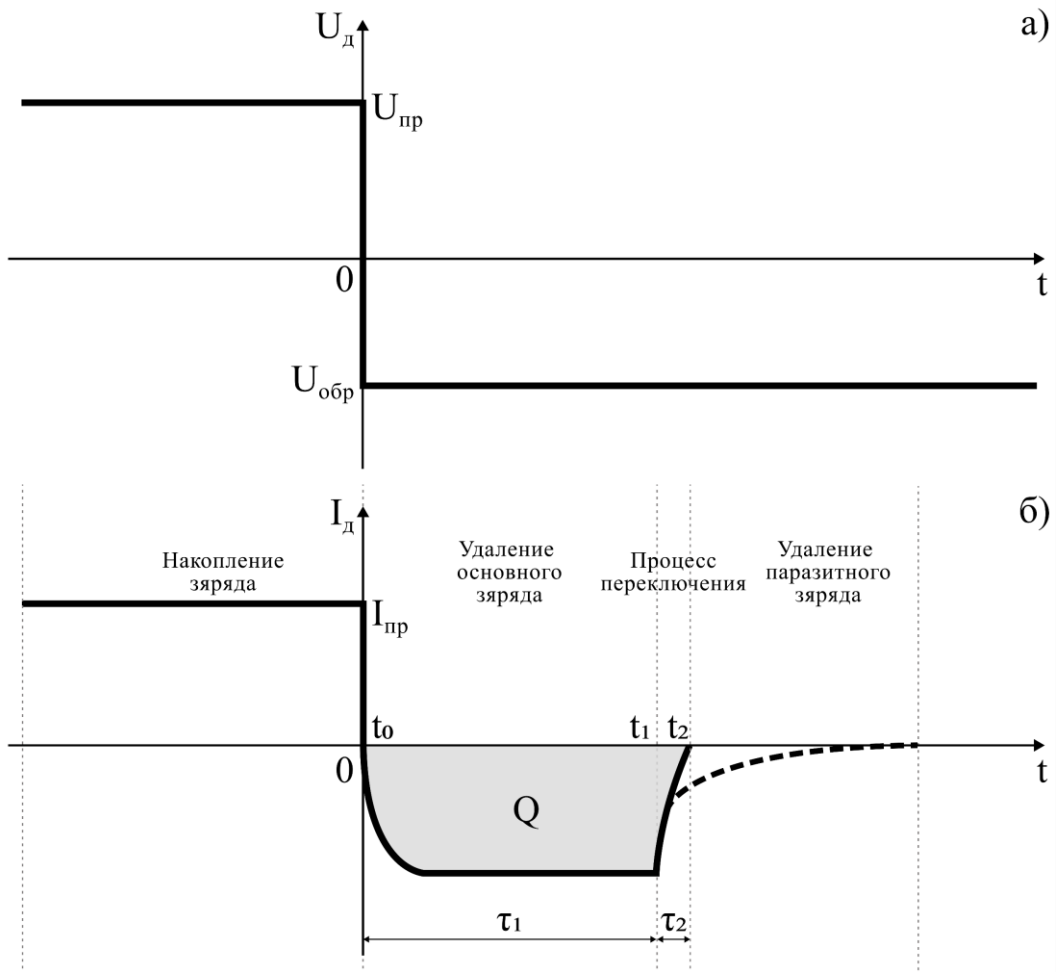


Рисунок 1.1 – (а)Временная зависимость напряжения, приложенного к ДНЗ, и (б) его переходная характеристика

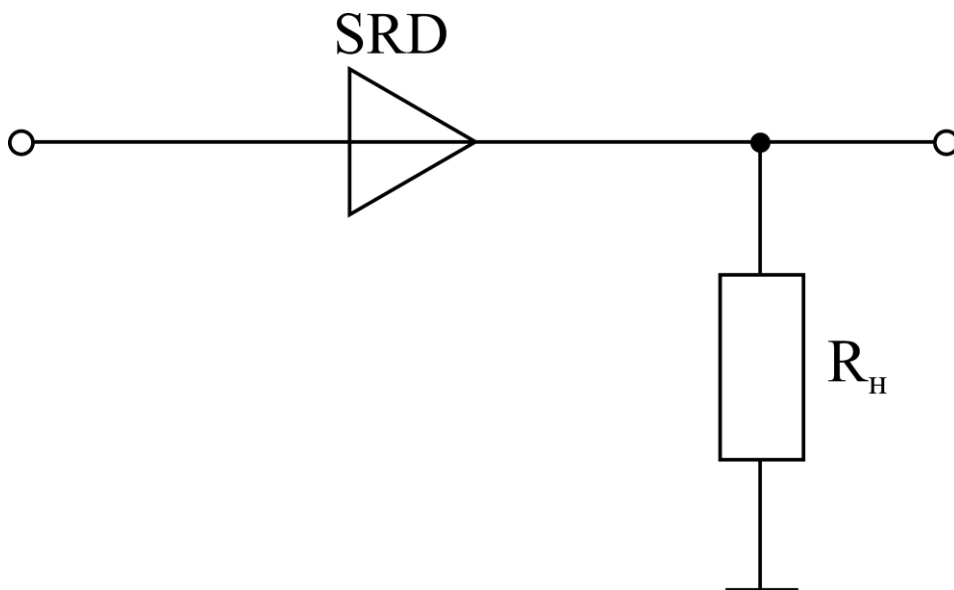


Рисунок 1.2 – Упрощенная схема подключения диода, работающего в ключевом режиме

На графике переходной характеристики это соответствует моменту времени  $t_0$ . За счет процесса протекания тока накачки происходит накопление избыточной концентрации дырок в базе диода. Эта концентрация не равномерна и уменьшается в сторону от p-n перехода. Таким образом, мы можем говорить о том, что в течение первой стадии происходит так называемое накопление заряда в полупроводниковой структуре диода. Второй этап работы ДНЗ начинается в тот момент, когда напряжение на аноде диода  $SRD$  меняет свою полярность. Это соответствует нулю по оси времени на графике (а). В этот момент ток через диод меняет свой знак. На графике переходной характеристики этот процесс происходит моментально, и этот момент совпадает с моментом времени  $t_0$ , так как в данном случае рассматривается идеальный случай для упрощения описания происходящих в диоде процессов. На самом деле же данные процессы инертны и занимают конечное время. Вначале после смены полярности напряжения на обратное ток через диод уменьшается до нуля в течение определенного времени. В этом случае дырки в базе не исчезают моментально. Накопленный заряд остается там в течение некоторого времени, необходимого для полной его рекомбинации. Далее ток меняет свой знак и уже значительно растет в области отрицательных значений до некоей фиксированной величины. Другими словами, через диод начинает течь обратный ток  $I_{обр}$ . Неосновные носители заряда под воздействием возникшего электрического поля начинают двигаться обратно в сторону области типа  $p$ . Происходит это потому, что заряд, накопленный в течение первой фазы, обеспечивает высокую обратную проводимость диода. Поэтому вторая стадия носит название стадии высокой обратной проводимости ДНЗ. В течение этой фазы условно принято считать обратное сопротивление диода равным нулю. Её длительность ( $\tau_1$  на рисунке 1.1 (б)) определяется моментами времени между сменой полярности напряжения на диоде с положительной на отрицательную и моментом полного удаления накопленного во время первой стадии заряда  $t_1$ . В разных источниках момент  $t_1$  определяется по-разному. Иногда считают, что это происходит тогда, когда обратный ток через диод уменьшается до значения в 80% (в других источниках 90%) от максимального значения обратного тока. В данной

работе будем придерживаться значения  $0.9I_{обр}$ . Амплитуда обратного тока  $I_{обр}$  в течение второй фазы при этом определяется амплитудой запирающего импульса и сопротивлением в цепи нагрузки.

Наконец, момент, когда концентрация неосновных носителей в непосредственной близости к р-п переходу будет стремиться к нулю, можно считать началом последней третьей фазы работы диода. Это происходит в момент  $t_1$ , то есть ровно в тот момент, когда диод резко начинает восстанавливать свое состояние высокого обратного сопротивления. Закон, по которому происходит данный процесс, близок к экспоненциальному. Обратный ток при этом стремительно убывает до тех пор, пока не станет сопоставимым с токами утечки. Происходит это потому, что вблизи р-п перехода концентрация неосновных носителей становится нулевой.

Важно отметить, что то, с какой скоростью диод восстанавливает свое состояние с высоким обратным сопротивлением, зависит от суммарного количества накопленных за первую фазу носителей в базе. Её характеризуют два параметра: величина тока накачки  $I_{np}$  и время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$  в базе. Также амплитуда обратного тока, который протекает через диод в течение второй фазы его работы является еще одним фактором, влияющим на скорость восстановления диода. Чем больше обратный ток, протекающий через полупроводниковую структуру диода, тем быстрее происходит удаление накопленных дырок в базе ДНЗ, и, как следствие, длительность фазы высокой обратной проводимости уменьшается. Принято считать, что момент восстановления нулевой проводимости диода с накоплением заряда наступает, когда обратный ток рассасывания, протекающий через диод, достигает 10% от минимального тока  $i_{обр}$  (см. рисунке 1.1 (б)). Этот момент можно принять за окончание третьей стадии работы ДНЗ. Временной отрезок  $\tau_1$ , находящийся между моментами  $t_1$  и  $t_2$ , соответствует процессу переключению диода в непроводящее состояние. Момент времени  $t_2$  обычно принято выбирать из соображений, чтобы величина обратного тока в этот момент времени находилась на уровне 0.1—0.3 от  $I_{мин}$ . В данной работе будет использовать значение равное 0.1 от  $I_{мин}$ , потому что

оно достаточно мало по сравнению с  $I_{мин}$ , но вместе с тем лежит на относительно спадающем участке обратного тока в момент переключения и позволяет исключить большую ошибку при отсчете времени переключения. Сам процесс переключения при этом происходит очень быстро, и может занимать промежутки от десятков пикосекунд до единиц наносекунд в зависимости от модели диода с накоплением заряда. Благодаря такому быстродействию эти диоды в иностранной литературе более известны как Step Recovery Diode (SRD) или иначе «диоды с резким восстановлением высокого обратного сопротивления (ДРВ)» [112, 113].

Описанная выше зависимость обратного тока от времени демонстрирует, что в довольно грубом приближении она представляет собой ту же зависимость, которую можно наблюдать при заряде конденсатора. Поэтому, в данных условиях можно полагать, что в момент переключения некоторая емкость шунтирует обратное сопротивление ДНЗ. Эта емкость получила название диффузионной емкости, так как ее наличие непосредственно связано с диффузионным передвижением зарядов в базе диода.

Длительность третьей фазы работы ДНЗ занимает значительную часть времени, занимаемого процессом восстановления высокого обратного сопротивления диода. В связи с этим чаще всего для повышения быстродействия устройств, основанных на полупроводниковых диодах, основные усилия при разработке этих самых диодов были направлены на уменьшение их инерционности, которая, в свою очередь, частично определяется рядом параметров диода. Знание этих параметров и алгоритмы их определения могут позволить производить расчеты схем, в которых используются ДНЗ, и оценивать длительность переходных процессов в их полупроводниковой структуре.

## 1.2. Параметры диодов с накоплением заряда

Если рассматривать случай идеального диода с накоплением заряда, то он должен обладать следующими характеристиками: нулевыми прямым

сопротивлением, индуктивностью выводов, барьерной емкостью и длительностью фазы спада обратного тока, а также бесконечными обратным сопротивлением и длительностью фазы высокой обратной проводимости. Бесконечная длительность фазы высокой обратной проводимости и нулевая длительность фазы спада обратного тока особенностями, которые свойственны только диодам с накоплением заряда. Однако, идеальных диодов на практике не существует, поэтому принято использовать систему параметров ДНЗ, которая позволяет оценить, насколько данный диод с накоплением заряда близок к идеальному накопительному элементу.

Так, параметры ДНЗ можно условно поделить на три группы. Первая группа включает в себя параметры, свойственные для предельных режимов работы ДНЗ, вторая – статические параметры и, наконец, третья группа содержит параметры, характерные для диодов, как импульсным приборам. В первую группу параметров, свойственных для предельных режимов работы ДНЗ входят: максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр\_макс}$ , максимально допустимый постоянный прямой ток  $I_{пр\_макс}$ , максимально допустимый обратный ток в импульсе  $I_{обр\_макс\_имп}$  и, наконец, максимально допустимая рассеиваемая мощность  $P_{макс}$ . Вторая группа, то есть группа статических параметров, включает в себя постоянный обратный ток  $I_{обр}$  и постоянное прямое напряжение  $U_{пр}$ .  $I_{обр}$  – величина тока при заданной амплитуде обратного напряжения, протекающего через диод в обратном направлении.

Параметры диодов с накоплением заряда, выделенные выше в тексте в первые две группы и методики их измерения довольно хорошо известны и стандартизированы. Подробнее о том, что они из себя представляют и как определяются на практике, описано в [112]. Что же касается импульсных параметров, то методики их измерения не так очевидны и на них стоит остановиться подробнее, тем более что данные параметры являются наиболее важными в контексте использования в генераторах сверхширокополосных импульсных сигналов субнаносекундной длительности.

В группу импульсных параметров входят общая емкость диода  $C_d$ , сопротивление потерь диода  $R_d$ , его индуктивность  $L_d$ , эффективное время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$  и, наконец, накопленный в полупроводниковой структуре ДНЗ заряд  $Q_n$ .

Общая емкость диода  $C_d$  складывается из корпусной, барьерной и диффузионной емкостей. Первая определяется исключительно параметрами корпуса и является величиной постоянной вне зависимости от режима работы ДНЗ, в то время как последние две зависят от приложенного к диоду напряжения смещения. Сопротивление потерь диода  $R_d$  вычисляется в соответствии с законом Ома как отношение напряжения накачки к току накачки, протекающего через него, и, по сути, представляет собой суммарное сопротивление выводов ДНЗ, его контактов и активного сопротивления кристалла. Индуктивность диода  $L_d$  играет важную роль, так как её значение на прямую влияет на скорость тока в цепи диода за счёт явления самоиндукции. Одними из самых важных параметров ДНЗ, работающего в импульсном режиме, являются эффективное время жизни  $\tau_p$  и накопленный заряд  $Q$ . Эффективное время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p$  показывает, насколько быстро уменьшается концентрация неравновесных носителей заряда из-за их рекомбинации. Если плотность накопленного заряда уменьшить в  $e$  раз, то промежуток времени, за который это произошло и представляет собой интервал, равный эффективному времени жизни.

Сам же накопленный заряд  $Q$  характеризует суммарный заряд носителей, которые находятся во время протекания тока накачки в пределах активной области ДНЗ, и, как следствие, он пропорционален амплитуде этого тока. В дальнейшем, говоря о заряде, мы будем подразумевать именно восстановленный заряд, потому что он является одним из самых главных параметров диода, и фактически определяет суммарный электрический заряд, который передается во внешнюю цепь после переключения. Величину накопленного заряда можно определить с помощью следующего выражения:

$$Q = I_{np} \tau_p, \quad (1.1)$$



где  $\tau_p$  является своего рода коэффициентом пропорциональности между током накачки и величиной накопленного им заряда. Отсюда следует, что отношение накопленного заряда  $Q$  к величине прямого тока равно  $\tau_p$ . Однако, это условие выполняется только для идеальных диодов. На практике же это отношение немногим меньше, чем  $\tau_p$  [112, 113].

Как уже упоминалось, если изменить полярность приложенного к диоду с накоплением заряда напряжения на обратное, то за счет экстракции зарядов во внешнюю цепь, а также из-за их рекомбинации, плотность накопленного заряда будет уменьшаться. Скорость этого процесса будет зависеть от разницы между током удаления  $I_{обр}$  и током накачки  $I_{np}$ . Если  $I_{обр}$  будет значительно превосходить  $I_{np}$  ( $I_{обр} \gg I_{np}$ ), иными словами, если напряжение накачки  $U_{np}$  будет достаточно велико, то рассасывание накопленного за первую стадию работы ДНЗ заряда будет происходить за очень малое время, соизмеримое с временем жизни носителей заряда для данного полупроводника. Это позволяет пренебречь в данном случае процессами рекомбинации, и в таком случае величина заряда, накопленного в диоде, может быть вычислена как интеграл обратного тока в пределах, ограниченных временем второй и третьей фазы, то есть временем удаления заряда из полупроводниковой структуры диода:

$$Q = \int_{t_0}^{t_2} I_{обр}(t) dt, \quad (1.2)$$

где  $t_0$  момент перехода тока, протекающего через диод, в область отрицательных значений,  $t_2$  – момент полного удаления заряда из активной области.

Таким образом, можно выделить две пары параметров, которые вполне однозначно определяет процесс переключения диода с накоплением параметров. Такими параметрами являются  $\tau_1$  и  $\tau_2$  (или  $\tau_p$  и  $\tau_2$ ). Именно эти величины обычно используются в качестве основных импульсных параметров.

Однако, до этого момента исследование не учитывало дополнительные процессы, которые могут происходить в полупроводниковой структуре диода с накоплением заряда в течение описанных выше трех фаз его работы. Как уже было

сказано выше, в качестве основных параметров диодов чаще всего на практике используют время жизни носителей и время переключения. Первый из этих параметров отвечает за процессы рекомбинации носителей. Но здесь важно отметить, что в кристалле диода происходят еще и другие процессы помимо рекомбинации. Полупроводниковая структура характеризуется также наличием токов утечки зарядов через потенциальные барьеры [99]. Эти барьеры ограничивают ту область (активную область), в которой происходит непосредственно накопление основного заряда. Токи утечки также как и другие описанные выше процессы определяют максимальную величину накопленного равновесного заряда, а также вносят весомый вклад в процессы восстановления высокого обратного сопротивления диода. Происходит это потому, что токи утечки приводят к накоплению заряда в том числе и за пределами активной области.

Процессы утечки зарядов будут рассматриваться на примере полупроводниковой структуры типа *p-i-n* [3, 73, 94, 95, 100, 101, 112, 113]. Это одна из известных в настоящее время диодных структур, которая обладает интересующим нас свойством резкого восстановления высокого обратного сопротивления [46, 52, 65, 66, 69, 80, 86]. Упрощенно такая структура выглядит подобно тому, что изображено на рисунке 1.3. В данном случае будем полагать, что диод состоит из трех зон. Первая зона состоит из проводника  $n^+$ -типа и граничит с катодом диода, образуя омический контакт [11, 99]. Вторая представляет собой область накопления заряда (активную область) или просто *I*-область. И, наконец, третья зона – это слой полупроводника  $p^+$  типа, граничащего с анодом, которые также образуют омический контакт [22, 24, 37]. Границы переходов между парами описанных областей формируют полупроводниковые переходы. Они способствуют накоплению заряда в активной области диода. В тот момент, когда описанные переходы смещаются в прямом направлении, в область собственного полупроводника *I*-области инжектируются носители зарядов из других областей с разным типом проводимости. Только по истечении некоторого времени вся область накопления заряда оказывается заполнена носителями заряда разного знака, которые вместе образуют электронно-дырочную плазму.

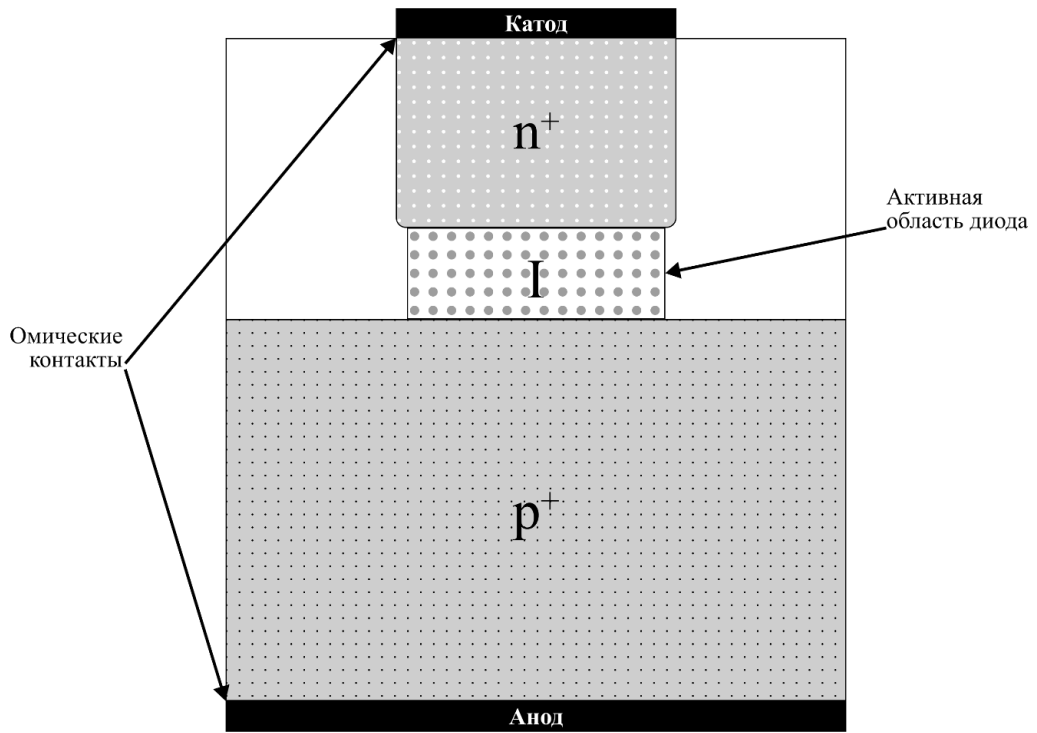


Рисунок 1.3 – Полупроводниковая p-i-n структура диода с накоплением заряда

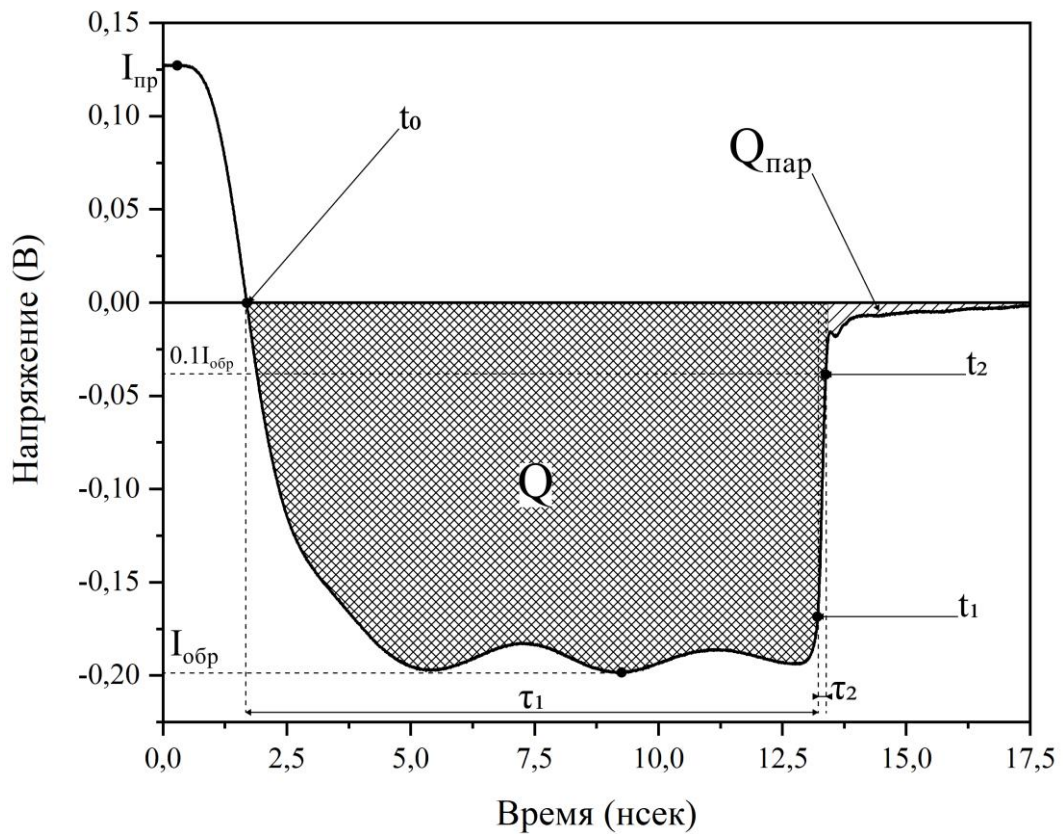


Рисунок 1.4 – Вид реальной переходной характеристики кремниевого диода

Предположим, что процесс накопления заряда осуществляется за время, меньшее или равное времени пролета носителей через расстояние, сопоставимое с протяженностью активной области диода. В этом случае весь накопленный заряд в течение первой фазы работы диода оказывается сосредоточенным в его  $I$ -области. Это объясняется инерционностью процессов переноса заряда. Однако в случае, если процесс накопления заряда происходит дольше, чем носители заряда преодолевают расстояние, равное протяженности  $I$ -области, то наблюдается другая картина. Чтобы удержать локально инжектированную электронно-дырочную плазму, активно вовлекаются потенциальные барьеры на границах областей полупроводника. Однако, эти барьеры не являются полностью непроницаемыми, и часть зарядов могут их преодолевать, что становится причиной утечки заряда из активной области в легированные области: электроны утекают в область  $p^+$  типа, а дырки – в область  $n^+$  типа. Это явление принято называть паразитным накоплением зарядом, а суммарный заряд, накопленный вне активной области, принято называть паразитным зарядом [3, 35, 38, 78, 112, 113, 120]. При этом чем больше ток накачки диода, тем больше возникает токов утечки, и, следовательно, тем больше величина паразитного заряда [3]. Его наличие и объем существенно влияет на быстрдействие диода с накоплением заряда как электронного ключа, значительно затягивая процесс его переключения (пунктирная линия на рисунке 1.1) [78].

До этого момента исследование параметров диодов с накоплением заряда и возможностей их измерения не учитывало искажений, которые вносят измерительная аппаратура и элементы схем, в которых установлены диоды. На самом же деле реальная переходная характеристика с учетом конечности фронта запирающего импульса, а также всех паразитных процессов и резонансных колебаний выглядит подобно той, которая изображена на рисунке 1.4. Обозначения на этом рисунке полностью совпадают с обозначениями для переходной характеристики на рисунке 1.1 (б). Плотной штриховкой с обозначением  $Q$  на данном рисунке обозначена область, соответствующая объему накопленного в активной области ДНЗ заряда, а следом выделена область, которая соответствует величине накопленного вне  $I$ -области паразитного заряда. Здесь

хорошо видны также паразитные колебания, возникающие в схеме, которые усложняют процессы измерения параметров и вносят в них ошибку измерения. О результатах экспериментальных исследований влияния накопленных зарядов на переключение диода, а также о методах измерения параметров при наличии паразитных эффектов и методах борьбы с ними будет рассказано в следующих разделах диссертации.

### **1.3. Методика измерения и экспериментальное исследование импульсных параметров диодов с накоплением заряда**

Чтобы более детально изучить процессы, проходящие в полупроводниковой структуре диодов с накоплением заряда, а также подтвердить выкладки, сделанные выше, было проведено экспериментальное исследование ДНЗ. Для более детального экспериментального исследования параметров диодов с накоплением заряда (как основных энергетических характеристик) в данной работе был использован программный автоматизированный измерительный комплекс (ПАИК) [1, 75, 74, 82, 82]. Он позволяет экспериментально измерить необходимые импульсные характеристики диодов с накоплением заряда, работающих в импульсном режиме, а также зависимости этих параметров друг от друга, в том числе определить величину накопленного паразитного заряда вне активной области ДНЗ. Данный комплекс является полностью автоматизированным и позволяет производить описанные выше измерения практически без участия человека с возможностью управления программируемыми источниками питания.

Для реализации программного комплекса были выполнены следующие задачи: 1) разработан измерительный модуль, с помощью которого можно проводить измерения импульсных параметров диодов с накоплением заряда; 2) спроектирован и разработан модуль, предназначенный для быстрой установки исследуемых диодов с накоплением заряда; 3) собрана измерительная установка; 4) для измерительной установки написан программный модуль, отвечающий за

связь измерительного оборудования и измерительного модуля; 5) написан программный модуль, отвечающий за обработку данных, поступающих с измерительного оборудования; 6) написан программный модуль, позволяющий в автоматическом режиме управлять программируемыми источниками питания.

Подробное описание процесса разработки ПАИК, его устройства и особенностей, а также описание графического пользовательского интерфейса приведено в главе 4.

Основной частью измерительного комплекса является измерительный модуль. Он состоит из измерительного блока и установочного модуля. Первый представляет собой печатную плату, произведенную на основе схемы, изображенной на рисунке 1.3. Рисунок 1.5 иллюстрирует внешний вид готового измерительного блока. Установочный модуль же представляет собой заключенную в корпус колодку для установки в нее диода и имеет два вывода с разъемами SMA. Данный модуль является симметричным, поэтому полярность подключения его в схему не играет никакой роли. Важно правильно соблюсти полярность исследуемого диода при установке его в измерительный модуль. Также эта колодка даёт возможность быстро и легко устанавливать диоды с накоплением заряда, а также обеспечивает хорошее согласование. Используя разные установочные колодки, появляется возможность проводить измерение диодов с разным исполнением корпусов без необходимости внесения изменений в конструкцию основного блока измерительного модуля, к выходу которого и подключается колодка посредством разъёма SMA. Фотография установочной колодки изображена на рисунке 1.6.

После того, как все модули ПАИК ДНЗ соединены согласно блок-схеме, изображённой на рисунке 1.1, в установочный модуль устанавливается исследуемый диод. После старта измерений программа отправляет команду на источник питания и устанавливает первую пару напряжений  $V^+$  и  $V^-$  из заданного диапазона. Измерительная схема изменяет режим работы диода с накоплением заряда, который можно отследить по осциллограмме, которую отображает на своём

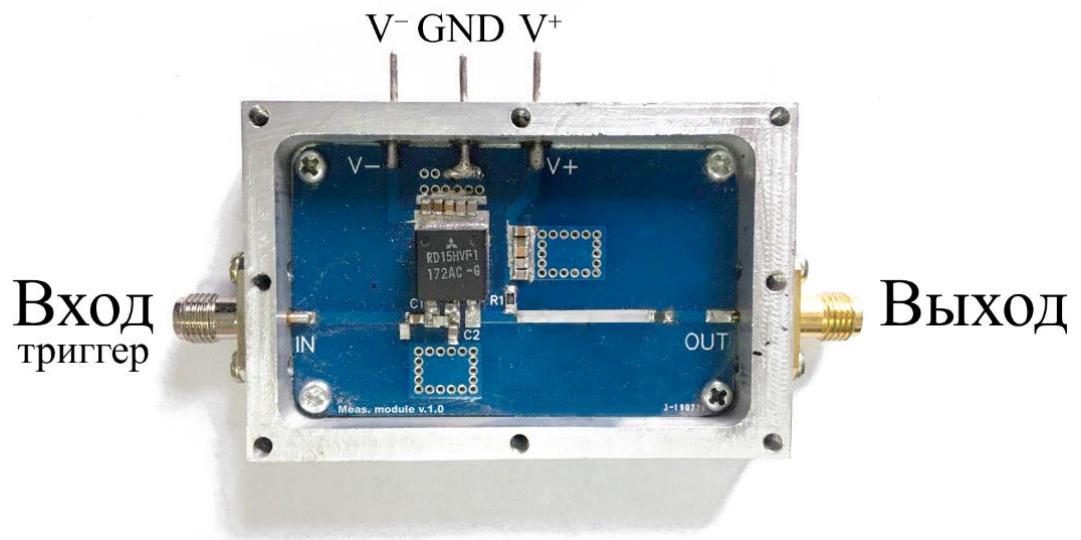


Рисунок 1.5 – Фото готового измерительного блока

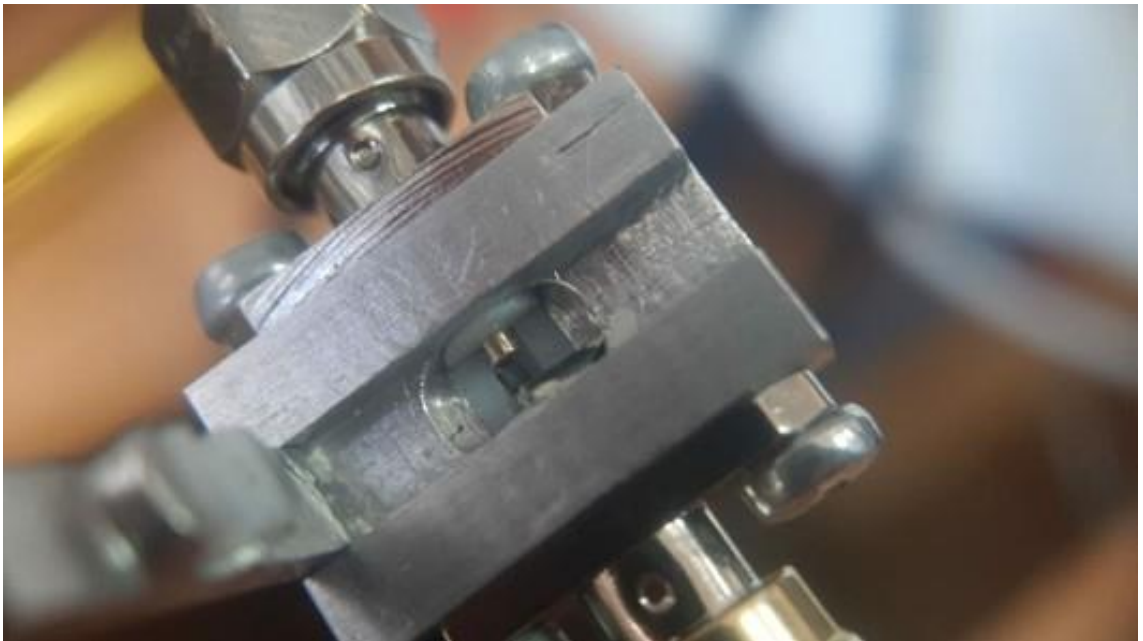


Рисунок 1.6 – Фото установочной колодки ДНЗ

экране осциллограф. Полученная усреднённая осциллограмма переходной характеристики в режиме реального времени по протоколу Ethernet отправляется на ПК. Данная зависимость сохраняется в текстовый файл в конце измерения.

Программная часть измерительного комплекса в том числе позволяет по имеющимся временным зависимостям тока определить требуемые импульсные параметры диодов с накоплением заряда, а также автоматизировать и ускорить процесс их измерения. В первую очередь алгоритм реализует измерение статических параметров диода с накоплением заряда, таких как величины прямого тока накачки и обратного тока. Затем комплекс определяет длительность фазы высокой обратной проводимости и на основе этих данных определяет величину восстановленного заряда. Величиной восстановленного заряда  $Q_r$  по определению является площадь под кривой тока во время проводящей стадии диода, то есть во временном диапазоне между  $t_1$  и  $t_2$ , и определяется она также по формуле (1.2). Иными словами, чтобы найти этот заряд на практике нужно произвести численное интегрирование по времени всех имеющихся дискретных отсчётов тока, протекающего через диод в течение фазы обратной проводимости. С физической точки зрения восстановленный заряд  $Q_r$  представляет собой разность между накопленным зарядом  $Q$  и величиной рекомбинировавшего заряда  $Q_r$ :

$$Q_r = Q - Q_r. \quad (1.3)$$

Как уже было сказано ранее для того, чтобы найти величину накопленного заряда, имея величину восстановленного, необходимо пренебречь зарядом рекомбинации. Это условие достигается в тот момент, когда экстракция носителей заряда в большой степени превосходит их рекомбинацию [7]. На практике такие условия можно получить, установив напряжение рассасывания отрицательной полярности на минимальное значение (порядка -10 В – -15 В). Это позволяет после установления переходных процессов в полупроводниковой структуре диода найти величину  $Q$ , используя численное интегрирование кривой тока через диод.

Далее измерительный комплекс оценивает длительность переключения ДНЗ  $\tau_{пер}$ , которая характеризуется наклоном восходящего участка переходной характеристики. Последним определяемым параметром является  $\tau_{эфф}$  –



эффективное время жизни неосновных носителей заряда. Оно вычисляется измерительным комплексом как отношение величины накопленного заряда  $Q$  к величине прямого тока накачки  $I_{np}$ .

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 производства Masom.

Для проведения первого ряда экспериментов были задействованы двадцать кремниевых диодов с накоплением заряда марки 2А609Б, взятые из одной партии. Эти диоды выпускаются в металлокерамическом корпусе с жесткими выводами типа КД-106 и в бескорпусном исполнении в виде кристалла с контактными площадками на кристаллодержателе. В ходе данного эксперимента были использованы диоды в корпусном исполнении. Общая емкость такого диода, согласно документации, составляет от 0,8 пФ до 1,3 пФ при напряжении смещения  $-6$  В, а конструктивная емкость диода на частоте 1 МГц равна 0,25 пФ.

ДНЗ из данной выборки были пронумерованы, и каждый из них поочередно включался в установочную колодку измерительного модуля (см. рисунок 4.3), изображённую на рисунке 1.6. В ходе эксперимента, управляя напряжениями питания измерительного модуля, менялись режимы работы диодов с накоплением заряда. В данном эксперименте с кремниевыми диодами 2А609Б напряжение питания варьировалось в пределах от 1 В до 14 В при напряжении рассасывания, зафиксированном на значении  $U_{обр} = -15$  В. С помощью автоматического измерительного комплекса для каждого из режимов строилась переходная характеристика и определялся набор параметров ДНЗ. Полученные на данном этапе зависимости изображены на рисунках 1.7 и 1.8. Дабы не загромождать рисунки кривыми для всех измерений и для большей наглядности в данном случае были отображены результаты только лишь для 9 диодов из всей выборки и только для одного режима работы ДНЗ (одной величины тока накачки).

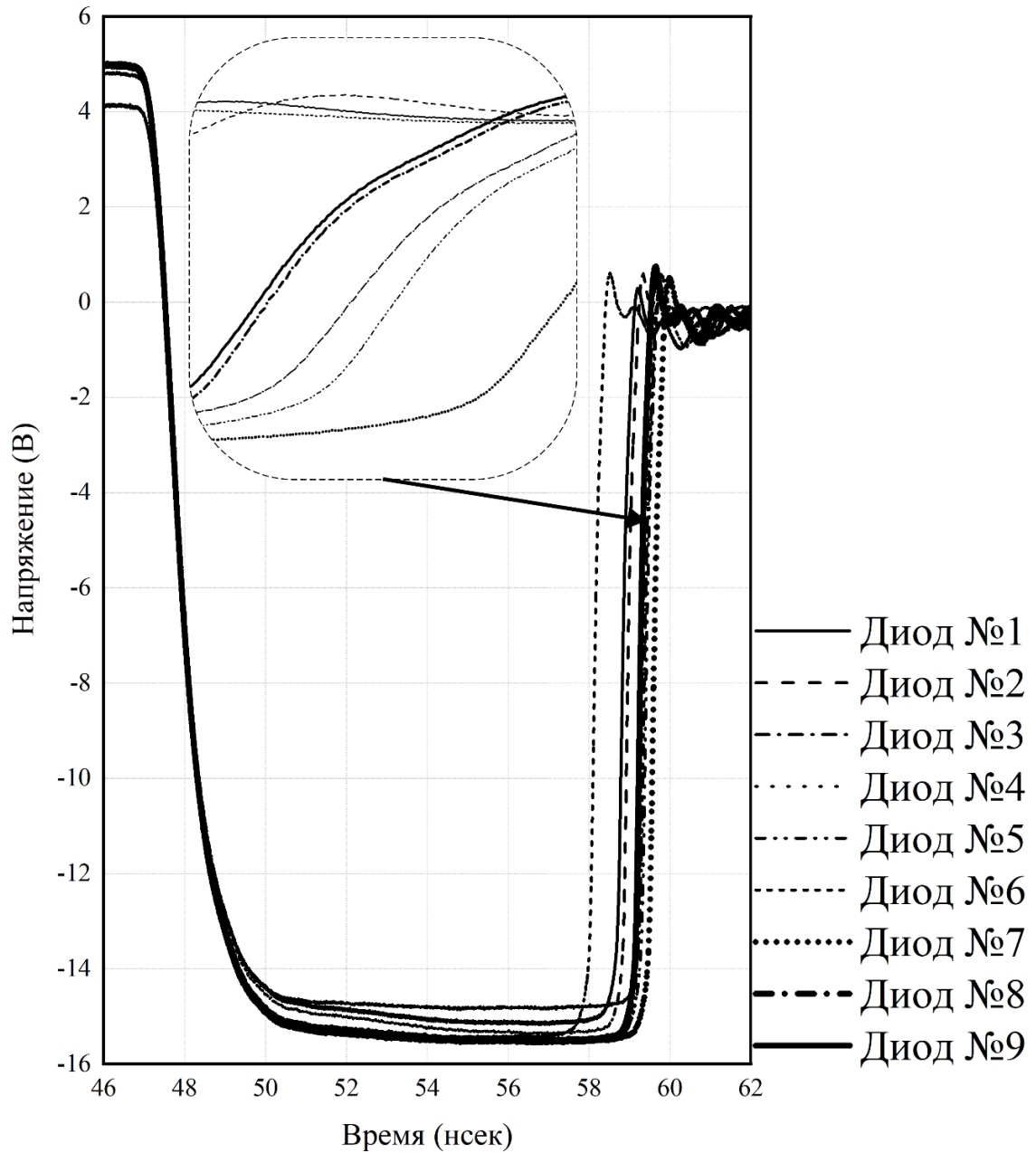


Рисунок 1.7 – Осциллограммы переходных характеристик кремниевых диодов 2А609Б из общей выборки при  $I_{пр} = 35$  мА

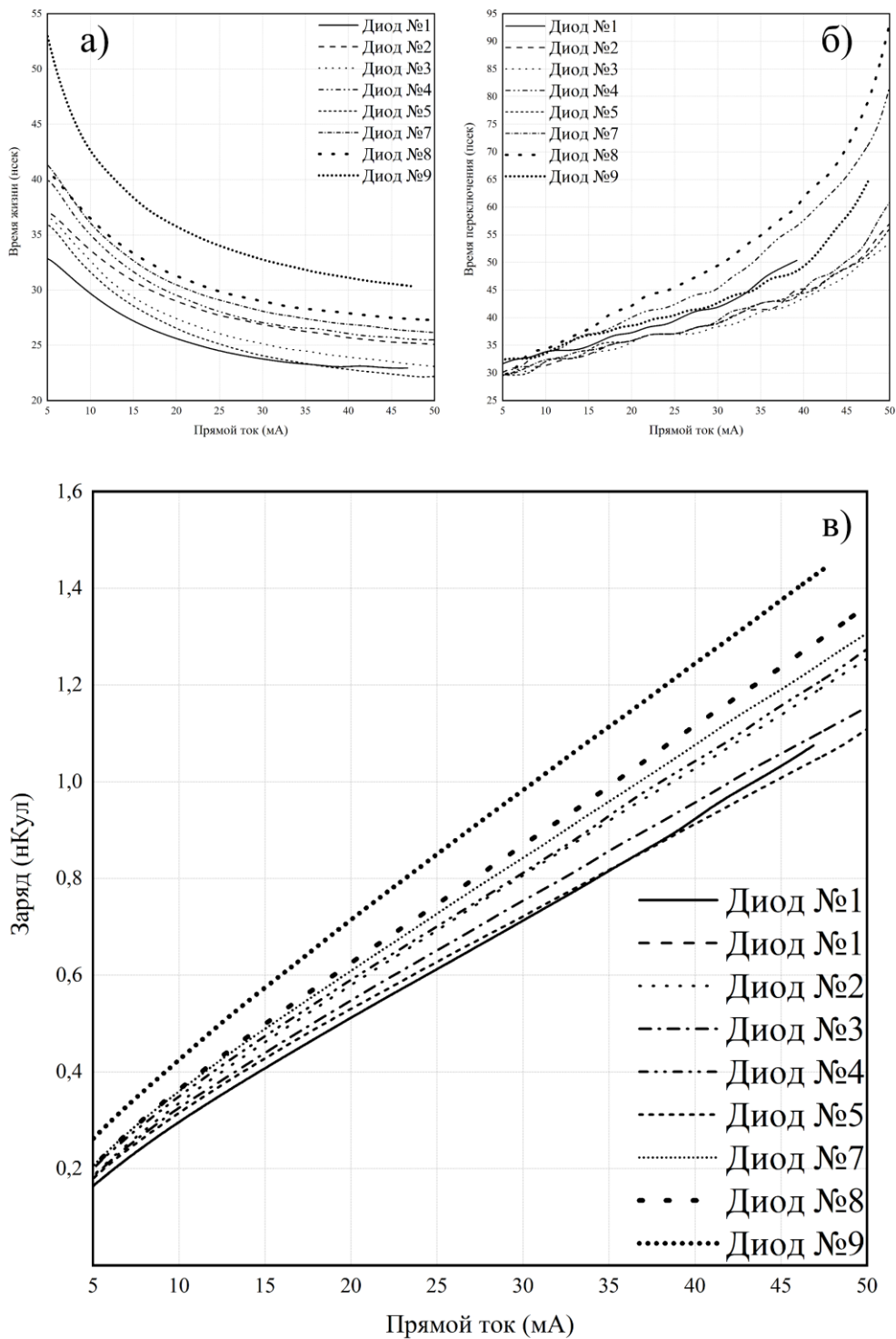


Рисунок 1.8 – Полученные экспериментальные зависимости параметров для отдельных диодов с накоплением заряда 2А609Б от величины прямого тока: а) времени переключения диода, б) эффективного времени жизни неосновных носителей, в) величины накопленного заряда

Видно, что величина  $Q$  для различных диодов при работе в одном и том же режиме не одинаковая. Также следует отметить, что это отличие увеличивается с ростом прямого тока. На рисунке 1.8 (в) отчётливо видна эта разница в величинах накопленных зарядов. При этом максимальная разница между ними при рабочих значениях прямого тока (порядка 35 мА) достигает существенных значений и составляет около 30 %. Исходя из рисунка а) можно сделать вывод, что предположение о том, что эффективное время жизни носителей сокращается с возрастанием прямого тока, протекающего через диод, соответствует реальности. Рисунок 1.8 (б) также заслуживает отдельного внимания. Из него видно, что при возрастании прямого тока накачки время переключения диода значительно увеличивается. Так, времена переключения диодов 2А609Б примерно одинаковы при прямом токе в диапазоне до 20 мА, но при дальнейшем его возрастании эта разница увеличивает и становится довольно существенной. Вероятно, это можно объяснить различием в разбросе технологических параметров при производстве диодов.

Для проведения второго ряда экспериментов описанные выше исследования были проведены также для другой выборки диодов. В данном случае в качестве исследуемых образцов для проведения экспериментального исследования разброса параметров диодов из одной партии были отобраны 80 ДНЗ модели MAVR-044769 в корпусном исполнении типа SC-79, предназначенном для поверхностного монтажа. Емкость диодов в этом исполнении на частоте 1 МГц и при напряжении смещения –6 В лежит в диапазоне от 0.8 В до 1.2 В.

Все диоды из этой выборки были пронумерованы также, как и в первом эксперименте, и устанавливались в установочную колодку измерительного модуля. В ходе эксперимента для каждого диода были получены осциллограммы переходной характеристики при разных режимах работы диода. Для наглядности на рисунке 1.9 приведены осциллограммы не для каждого из исследуемых диодов, а только для пяти из них (для диодов с номерами 2, 5, 14, 17, 19), которые позволяют наглядно увидеть разницу в переходных характеристиках для диодов из одной

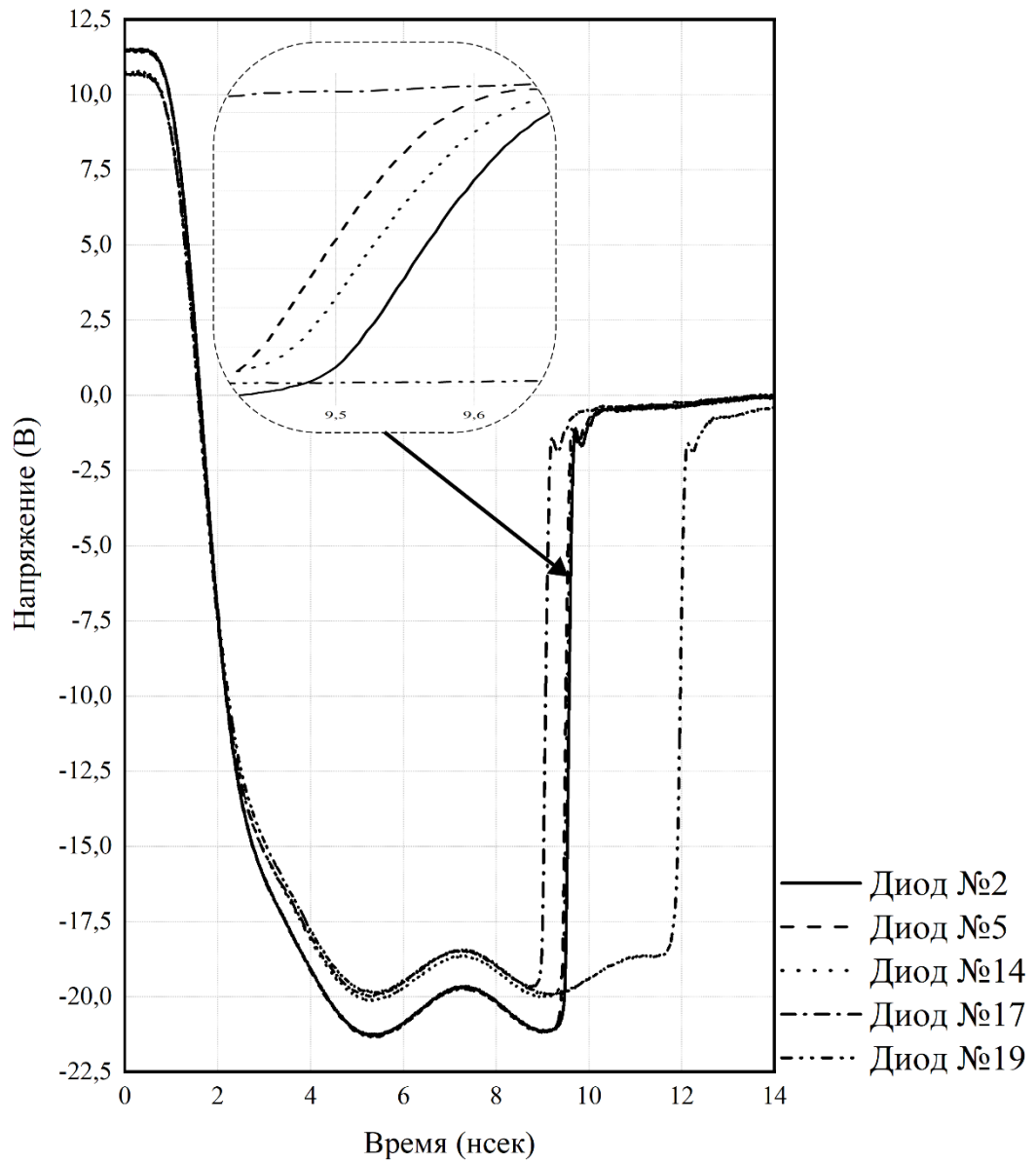


Рисунок 1.9 – Осциллограммы переходных характеристик пяти кремниевых диодов MAVR-044769 из общей выборки, работающих в одинаковых режимах

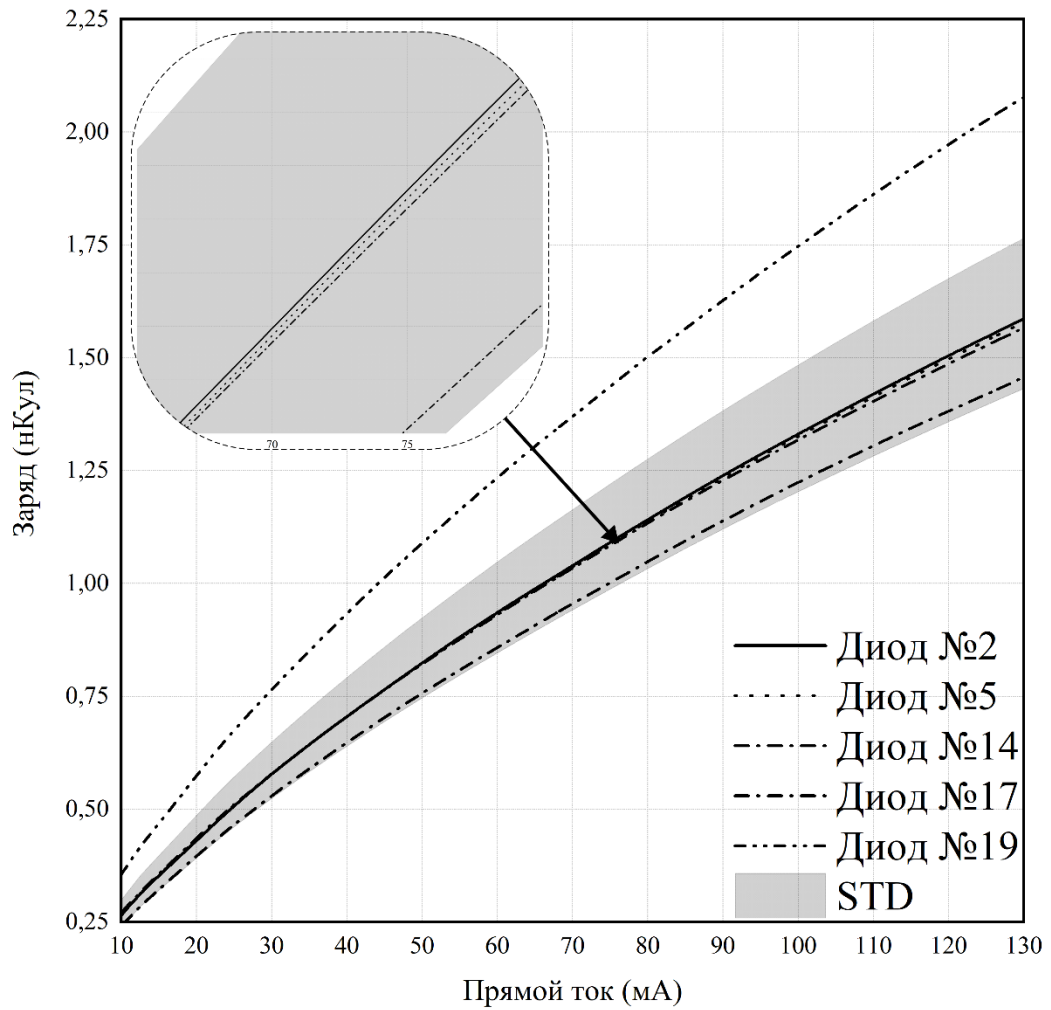


Рисунок 1.10 – Зависимости накопленного заряда от величины прямого тока накачки для пяти кремниевых диодов MAVR-044769 из общей выборки

партии. Также были вычислены наборы параметров и построены их зависимости от режима работы диода: зависимость эффективного времени жизни неосновных носителей заряда от величины тока накачки; зависимость времени переключения ДНЗ от величины тока накачки; зависимость величины тока накачки от величины прямого напряжения и зависимость величины накопленного заряда в полупроводниковой структуре ДНЗ от величины тока накачки. В ходе эксперимента прямое напряжение изменялось в пределах от 0,5 В до 20 В с шагом в 0,5 В при постоянном отрицательном напряжении рассасывания в 10 В.

Графики зарядовых зависимостей, построенных измерительным комплексом для диодов с номерами 2, 5, 14, 17, 19, представлены на рисунке 1.10. Величина обратного тока, протекающего через диод, для всех измерений была одинакова и составляла  $-40$  мА. Серая область на рисунке соответствует среднеквадратическому отклонению накопленного заряда. Здесь хорошо видно, что дисперсия накопленного заряда увеличивается с увеличением тока накачки. Однако, отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию лежит в данном случае в пределах 9,6% — 9,8% для широкого диапазона режимов работы. Поведение зависимостей эффективного времени жизни неосновных носителей заряда и времени переключения ДНЗ от величины тока накачки для диодов Масот совпадает с поведением аналогичных зависимостей для диодов 2А609Б и подтверждает наличие технологического разброса параметров, поэтому отдельное рассмотрение графиков этих зависимостей в данном случае не вызывает интереса.

Таким образом, на основе полученных выше экспериментальных зависимостей можно сделать вывод о том, что в результате эпитаксии технологический процесс производства полупроводников не позволяет достичь абсолютной точности параметров по всей площади кремниевой пластины, не смотря на высокие требования к качеству наращивания слоев полупроводника. Для практических целей это означает, что этот разброс параметров полупроводниковой структуры даже в пределах одной партии приведет к инжекции в активной базе диодов разного объема электронно-дырочной плазмы при одинаковых режимах

работы, а также к разности во временах жизни неосновных носителей. А это всё, в свою очередь, станет причиной того, что моменты переключения таких диодов не будут совпадать. Подобный разброс параметров вносит значительный отрицательный вклад в повторяемость сверхширокополосных импульсов, формируемых с их помощью, в реальных генераторах. Также из полученных результатов очевидно, что стабильность параметров диодов марки 2A609B значительно хуже, чем у диодов MAVR-044769.

#### **1.4. Экспериментальное исследование параметров последовательных сборок диодов с накоплением заряда**

Как уже говорилось ранее, полупроводниковый размыкатель тока, в частности диод с накоплением заряда, во многом определяет такие параметры генерируемого импульса, как амплитуду и длительность. Однако существуют ограничения связанные с физикой работы полупроводников, которые являются существенной преградой для получения мощных импульсов сверхмалой длительности. 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 сверхмалые интервалы времени. Уменьшения времени переключения диода в закрытое состояние можно добиться, укорачивая его обедненную область. Однако при этом снижается пробивное напряжение, так как оно пропорционально ширине обедненной области р-п перехода. Разрешить данное противоречие можно путем последовательного соединения диодов в сборку [89]. Максимально допустимое пробивное напряжение при этом возрастает кратно количеству ДНЗ.

Кроме многократного повышения максимально допустимого обратного напряжения, последовательное соединение ДНЗ позволяет уменьшить время переключения диодной сборки из проводящего состояния в закрытое. Влияние



барьерной емкости диода с накоплением заряда на его быстродействие очень велико. В наибольшей степени оно проявляется при переключении диода в закрытое состояние, когда происходит резкое изменение напряжения на диоде. Барьерная емкость диода перезаряжается от нуля, до напряжения равного амплитуде запирающего импульса. При последовательном включении, напряжение смещения диодной сборки делится между всеми ДНЗ, и барьерная емкость каждого из них перезаряжается тем же током до меньшего потенциала. Таким образом, переходной процесс, затягивающий восстановления запирающих свойств диода, завершается раньше.

Корпусная емкость также оказывает влияние на работу диода с накоплением заряда в режиме переключения. В схеме генератора СКИ её можно рассматривать как параллельно подключенный к диоду конденсатор постоянной емкости. Из-за перезарядки этого конденсатора размыкание тока диода затягивается. При последовательном включении  $N$  корпусированных диодов их результирующая емкость убывает как:

$$C = \frac{C_0}{N}, \quad (1.4)$$

где  $C_0$  – корпусная емкость одного диода. Таким образом, использование диодных сборок, в которых приборы соединены последовательно, позволяет уменьшить влияние паразитных элементов и повысить быстродействие.

Также следует отметить, что при последовательном соединении диодов, их суммарные омическое сопротивление и паразитная индуктивность возрастает кратно их количеству. Как показано в [36] изменение паразитной индуктивности оказывает существенное влияние на размыкание тока диодом. Увеличение омического сопротивления ветви диодов приводит к тому, что в активной области накапливается меньшее количество заряда (меньший объем плазмы). Эти особенности важно учитывать при проектировании генераторов СКИ. Уменьшение накопленного заряда приводит к сокращению продолжительности стадии работы генератора, в течение которой из ДНЗ удаляется накопленный заряд и накапливается энергия магнитного поля в индуктивном накопителе, что может

привести к снижению амплитуды генерируемого импульсного сигнала. Также подобный разброс параметров диодов с накоплением заряда в пределах одной партии может внести значительный отрицательный вклад в повторяемость сверхширокополосных импульсов, формируемых с их помощью, в реальных генераторах.

Основываясь на вышесказанном, в данной главе предлагается произвести исследование параметров последовательных соединенных диодов с накоплением заряда и сравнения с результатами, полученными ранее. Для этого сначала кратко рассмотрим особенности переключения диодов в последовательной сборке на примере схеме, изображенной на рисунке 1.11.

Диоды с накоплением заряда  $SRD_1$  и  $SRD_2$  установлены последовательно в установочной колодке, вход которой подключен к выходу измерительного блока. В результате протекания прямого тока накачки от источника напряжения  $V^+$  через диоды  $SRD_1$ ,  $SRD_2$  и токоограничивающий резистор  $R_1$  в течение некоторого времени в обоих диодах устанавливается равновесное состояние электронно-дырочной плазмы. В каждом диоде накапливается некоторый заряд, величина которого зависит от параметров полупроводника, величины тока накачки  $I_{np}$ , протекающего через диод в течение этой фазы, а также процессами рекомбинации, происходящими в ДНЗ. В тот момент, когда на затвор полевого транзистора  $MOSFET$  поступает прямоугольный импульс положительной полярности от запускающего генератора  $V_{зан}$ , транзистор открывается. В этот момент от источника напряжения отрицательной полярности  $V^-$  через транзистор  $MOSFET$ , диоды  $SRD_1$ ,  $SRD_2$  начинает протекать обратный ток, так как величина напряжения  $V^-$  по модулю превосходит величину напряжения  $V^+$ . Накопленная за предыдущий этап работы диодов суммарный заряд начинает удаляться только в тот момент, когда обратный ток  $I_{обр}$  сравняется с током накачки  $I_{np}$ . В этот момент начинается следующая фаза. При описании процесса переключения диодов в сборке необходимо обратить внимание на один интересный момент.

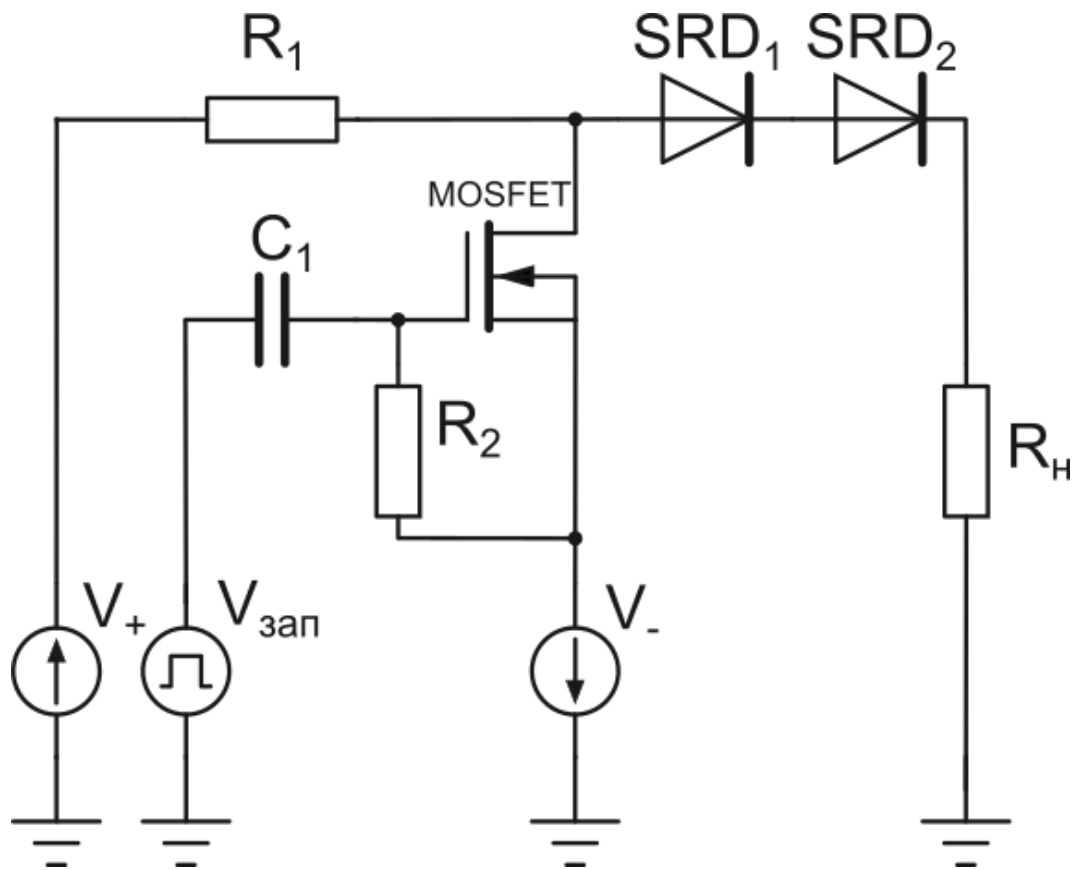


Рисунок 1.11 – Схема измерительного модуля параметров последовательной сборки из двух ДНЗ

В генерации сверхкоротких импульсов принципиальное значение имеет синхронность работы всех диодов в сборке. Чем больше будет разница в величинах времен переключения между ними, тем более рассогласованной будет их работа. На практике это будет выражаться в том, что ДНЗ, который установлен по схеме ближе к земле (в данном случае таковым является  $SRD_2$  на рисунке 1.11), при условии, что его время переключения больше, чем у второго последовательно ему соединенного диода, не будет успевать удалить весь накопленный в своей активной области заряд из-за обрыва обратного тока в цепи уже переключившимся первым диодом. Если же такие диоды с отличающимися временами переключения поменять местами в сборке, то будет наблюдаться аналогичная картина. Из этого можно сделать предположение, что, измеряя величину заряда, накопленного парой таких диодов, скорее всего, будет вычислена величина заряда, накопленного диодом с наименьшим временем переключения в сборке. А как говорилось ранее, чем меньше накапливаемый в полупроводниковой структуре заряд, тем менее продолжительной будет стадия работы генератора, в течение которой из ДНЗ удаляется накопленный заряд и накапливается энергия магнитного поля в индуктивном накопителе. Таким образом, использование двух (или более) диодов, объединенных в сборку и имеющих при этом разные времена переключения, то есть переключающихся не синхронно, может привести к уменьшению амплитуды выходного импульса и, соответственно, к ухудшению характеристик самого генератора.

Используя озвученное выше предположение, в диссертации предложена методика отбора диодов с накоплением заряда, которая позволяет обеспечить синхронность переключения ДНЗ в сборке. Основная идея данной методики заключается в том, чтобы подбирать диоды для установки их в последовательные сборки на основе выполнения трех условий. Первое условие предполагает равенство времен переключения диодов, второе – синхронный момент начала переключения и, наконец, третье условие подразумевает равенство накопленных зарядов в активной области каждого диода. Иными словами, можно сказать, что необходимым условием согласованной работы диодов с накоплением заряда при

их последовательном включении является максимальное совпадение их переходных характеристик.

Для проверки работоспособности озвученной методики на основе полученных ранее зависимостей величин накопленного заряда от тока накачки для одиночных диодов из всей выборки были отобраны несколько пар ДНЗ обеих марок. Здесь аналогично с исследованием одиночных диодов для удобства анализа результатов не будут демонстрироваться результаты измерений для полной выборки. Исследование будет проходить над теми диодами, чьи параметры были измерены ранее.

Сначала рассмотрим результаты, полученные для отечественных диодов 2А609Б, среди которых было отобрано две пары. Первую из них составили диоды под порядковыми номерами 2 и 4 – это диоды, у которых зарядовые зависимости, исходя из рисунка 1.8 (в) оказались максимально близки друг к другу на всем диапазоне тока накачки. Во вторую пару вошли диоды под номерами 1 и 9. Они, наоборот, имеют максимально отличающиеся характеристики. Диоды из каждой пары были последовательно установлены в установочную колодку измерительного модуля. Далее для данной сборки диодов были повторно получены переходные характеристики и по ним измерены описанные ранее зависимости параметров. Полученные результаты представлены на рисунке 1.12.

Так, из рисунка а) 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 (см. рисунок 1.12 (б)), судя по всему, является среднеарифметическим от времен жизни носителей отдельных диодов. Важно отметить, что суммарное время переключения диодов для пары 2 и 4, у которых кривые этих зависимостей находятся ближе друг к другу на рисунке 1.12 (б), оказывается меньше, чем у пары

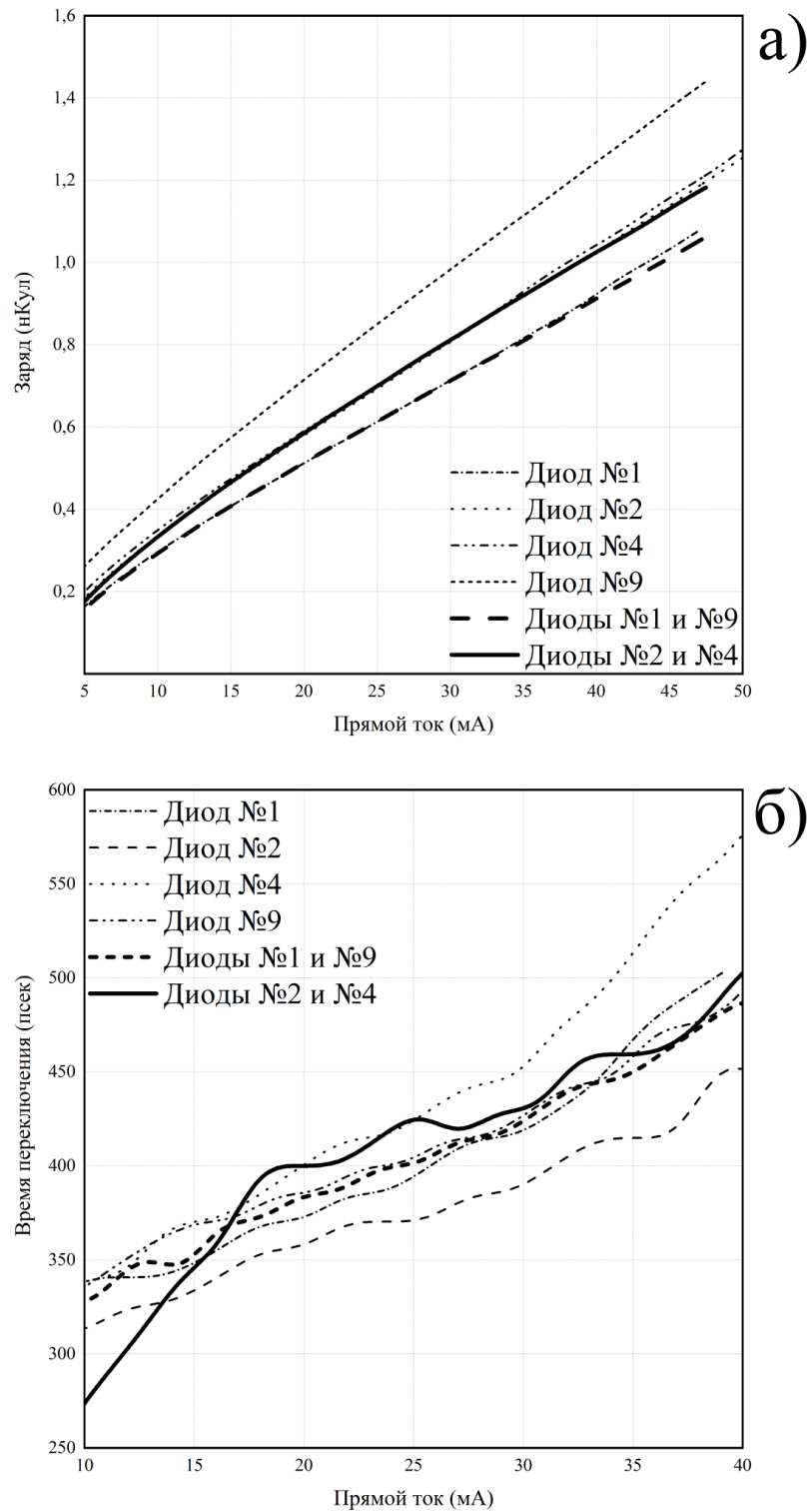


Рисунок 1.12 – Полученные экспериментальные зависимости параметров для последовательного соединения диодов с накоплением заряда 2А609Б от величины прямого тока: а) величины накопленного заряда, б) времени переключения диода

1 и 9, у которых эти кривые зависимостей значительно отличаются. Эти результаты полностью коррелируют с озвученными выше предположениями и полностью соответствуют описанным физическим процессам.

Глядя на рисунок 1.12, можно сделать главный вывод о том, что, действительно, полученные результаты для описанных пар диодов подтверждают заявление о совпадении переходных характеристик. Диоды, переключающиеся с близкими скоростями почти в один момент времени и обладающие близкими зарядовыми характеристиками имеют очень близкие друг к другу переходные характеристики.

Аналогичные манипуляции были проделаны для другой марки диодов. В установочную колодку измерительного модуля по очереди были установлены несколько других пар диодов MAVR-044769. Исходя из данных, изображенных на рисунке 1.10, диодами с максимально близкими зарядовыми характеристиками оказались ДНЗ с порядковыми номерами 2, 5 и 14, а диоды под номерами 14 и 17 заметно отличались от них. Комбинируя эти диоды в двойные последовательные сборки, их параметры были также измерены. Наблюдения за их зависимостями для MAVR-044769 полностью совпадают с теми, которые были получены для отечественных ДНЗ, поэтому изображать графики этих зависимостей не имеет практического смысла.

Поэтому в данном случае методика отбора диодов с накоплением заряда для успешного использования их сборок в генераторах сверхширокополосных импульсных сигналов сводится к их селекции на основе близости переходных характеристик.

## **Выводы**

В первой главе описаны процессы, происходящие в полупроводниковой структуре диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения. Также проведено исследование основных их параметров, как полупроводниковых размыкателей тока. В результате использования программного автоматического измерительного комплекса были получены переходные характеристики для двух

больших выборок ДНЗ из одной партии моделей 2А609Б и Masom MAVR-044769, на основе которых были получены зависимости параметров диодов. В результате анализа полученных результатов было установлено, что в силу несовершенства технологических процессов производства кремниевых пластин диоды даже в пределах одной партии имеют некий разброс параметров. Для диодов марки 2А609Б, работающих в одном режиме, он составил порядка 30%, а для ДНЗ MAVR-044769 – не превышает 10% на всем диапазоне режимов работы. Также, учитывая особенности работы диодов в последовательной сборке, в данной главе предложена методика их отбора, которая позволяет обеспечить синхронность переключения ДНЗ в сборке. Эта методика предполагает отбор диодов на основе близости их переходных характеристик.



## **ГЛАВА 2. Формирование СШП импульсов квазигауссовой формы схемами на основе диодов с накоплением заряда**

В современной электронике на данный момент существует большое разнообразие схем генераторов СКИ [1–8, 10, 12–14, 64, 71–73]. При этом все такие генераторы, основанные на полупроводниковых элементах, можно разделить на три основные группы [10, 17, 23, 31, 42, 45, 123]. Первая группа генераторов основана на полупроводниковых устройствах, работающих на эффекте лавинного пробоя (диоды с задержкой лавинного пробоя, лавинные транзисторы и др.). Однако, основанные на этих элементах генераторы, как правило, обладают существенными недостатками, сужающие область их применения. Вторая группа генераторов работает на индуктивных или емкостных накопителях энергии. Эти элементы в процессе работы генератора отдают накопленную энергию в нагрузку в виде импульсов напряжения. Эти импульсы формируются при помощи полупроводниковых размыкателей тока [62, 63, 94, 95, 110]. Третья группа генераторов использует в своей основе солитонные преобразователи. Их используют обычно для обострения импульсов, формируемых в генераторах первых двух типов [21, 44, 111]. Однако особый интерес представляют генераторы из второй группы.

Пожалуй, самыми распространенными на данный момент приборами, используемыми в разработке генераторов сверхкоротких импульсных сигналов, являются полупроводниковые диоды с накоплением заряда. Они обладают ключевой особенностью, которая заключается в их способности резко (в течение сотен пикосекунд) восстанавливать свои запирающие свойства, в результате чего ток в цепи диода также резко обрывается. Эту особенность активно и используют в формирователях сверхширокополосных импульсов. Подробно об устройстве ДНЗ и процессах, происходящих в их структуре в процессе переключения было рассказано в первой главе настоящей диссертации.

Характеристики получаемых на выходе таких генераторов СКИ определяются прежде всего режимом работы диодов с накоплением заряда, как электронного ключа, его также режимами работы, а также номиналами остальных электронных компонентов схемы. В этой главе и в дальнейшем будем полагать амплитуду и длительность формируемых импульсов как наиболее интересующие в исследовании характеристики.

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

## **2.1. Обобщенная схема формирователя сверхширокополосных импульсных сигналов**

В устройстве всех генераторов на диодах с накоплением заряда можно выделить некоторые закономерности [18, 15, 9, 115, 91, 99, 103, 104, 92, 16, 11, 122, 78]. Как уже было сказано выше, все они содержат в своем составе элементы, способные накапливать энергию, и размыкатели тока [80, 83, 90]. В данном случае роль таких размыкателей тока играют полупроводниковые диоды с накоплением заряда, а роль накопителя энергии магнитного поля – индуктивный контур. В качестве нагрузки в данном случае может выступать вход антенны, работающей в режиме излучения.

Рабочий цикл таких генераторов можно так же, как и работу самого диода разделить на три стадии [18, 99, 103]. В течение первой стадии работы, диод работает в режиме накопления, и в нем инжектируются носители заряда в активную область диода. Вторая стадия работы генератора ознаменуется сменой полярности напряжения, приложенного к ДНЗ. В результате, обладая проводимостью в обоих направлениях, диод начинает пропускать через себя обратный ток, который удаляет накопленный в его  $I$ -области и за ее пределами заряд [87]. В цепи диода

присутствует также и индуктивность, протекая через которую, обратный ток способствует накоплению в ней энергии магнитного поля. И, наконец, третья стадия работы ДНЗ ознаменуется его стремительным восстановлением высокого обратного сопротивления и резким обрывом обратного тока в цепи диода и индуктивности. В результате явления самоиндукции вся накопленная в индуктивности энергия высвобождается в виде сверхкороткого импульса на нагрузке.

Используя описанные выше общие принципы работы диодов с накоплением заряда, работающих в режиме переключения, и принципах формирования СКИ на магнитных накопителях энергии можно рассмотреть обобщенную схему генератора на стадии переключения (см. рисунок 2.1). Как видно из рисунка генератор представляет собой соединение цепи диода с цепью удаления заряда и цепью нагрузки в одной общей точке. Так как сопротивление диода в цепи как на стадии накачки заряда в активную область, так и на стадии его рассасывания остается почти неизменным, то в данной схеме он представлен в виде сопротивления с постоянным номиналом.

Соотношение токов в узле определяется с помощью первого правила Кирхгофа. Ток в нагрузке при этом равняется разнице токов в цепи диода и в цепи удаления заряда. Согласно первому правилу Кирхгофа для узла, в котором пересекаются цепи накопления, удаления, нагрузки и цепь диода, ток в цепи нагрузки определяется как разность тока в цепи накопления и цепях диода и удаления:

$$I_L - I_R - I_D = 0. \quad (2.1)$$

Из этого следует, что от соотношения этих токов будут зависеть амплитуда и длительность формируемых диодом с накоплением заряда сверхширокополосных импульсов.

В тот момент, когда диод переходит в непроводящее состояние, его сопротивление резко возрастает в связи с уменьшением концентрации носителей заряда в активной области, и ток, протекающий через диод, резко уменьшает свое

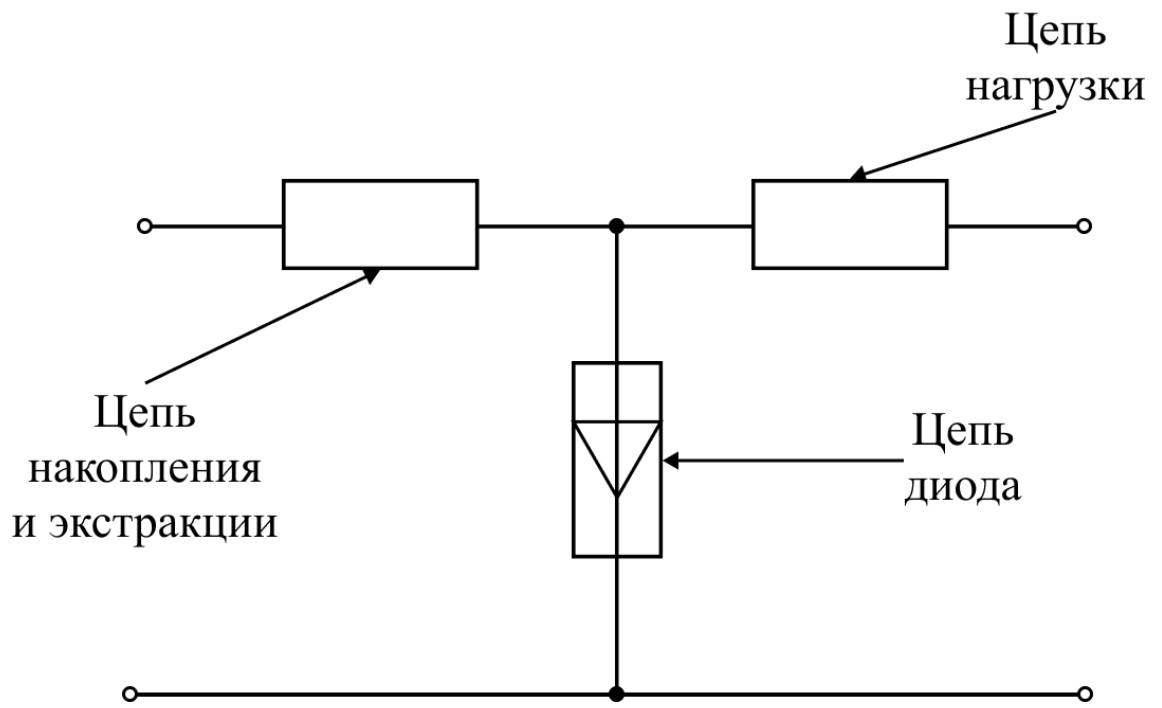


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема генератора сверхкоротких импульсов на основе ДНЗ

значение. При этом видно, что соотношение токов в данной точке будет определять параметры генерируемого импульса, а именно его длительность и амплитуду. Это происходит в связи с тем, что скорость изменения тока в цепи удаления заряда значительно ниже скорости убывания тока через полупроводниковую структуру диода. Когда ток в цепи диода стремится к нулю, то на нагрузке наблюдается максимум амплитуды генерируемого импульса. А передний фронт формируемого импульса соответствует спаду тока в цепи удаления заряда.

Используя обобщенную схему генератора сверхширокополосных импульсов, описанную выше, изобразим на рисунке 2.2 временные диаграммы токов, протекающих в ней в течение всего цикла работы. Здесь хорошо видно, что формируемый импульс имеет длительность, определяемую суммой длительностей заднего и переднего фронтов, то есть как:

$$t_{имп} = t_{пер} + t_{зад}, \quad (2.2)$$

где  $t_{пер}$  соответствует длительности нарастания переднего фронта, а  $t_{зад}$ , соответственно, длительности, за которую, спадает задний фронт. Используя данное наблюдение, можно регулировать длительность импульса, управляя длительностью его фронтов, в частности, сделав фронты импульса более резкими, уменьшить его суммарную длительность. При этом на практике этого эффекта можно достичь, используя особенности работы генератора. Так, задний спадающий фронт сверхширокополосного импульса квазигауссовой формы определяется прежде всего самой электронной схемой устройства и номиналами ее реактивных элементов, в частности величиной индуктивности. При этом же длительность переднего нарастающего фронта СШП импульса зависит исключительно от времени переключения самого ДНЗ [35, 40–42]. То, насколько быстро он разрывает ток в цепи, полностью определяет, насколько быстро произойдет нарастание импульса в этой цепи. То есть, используя ДНЗ с меньшим временем переключения, можно получить меньшую длительность переднего нарастающего фронта импульса, а, следовательно, сократить суммарную длительность импульса, формируемого генератором.

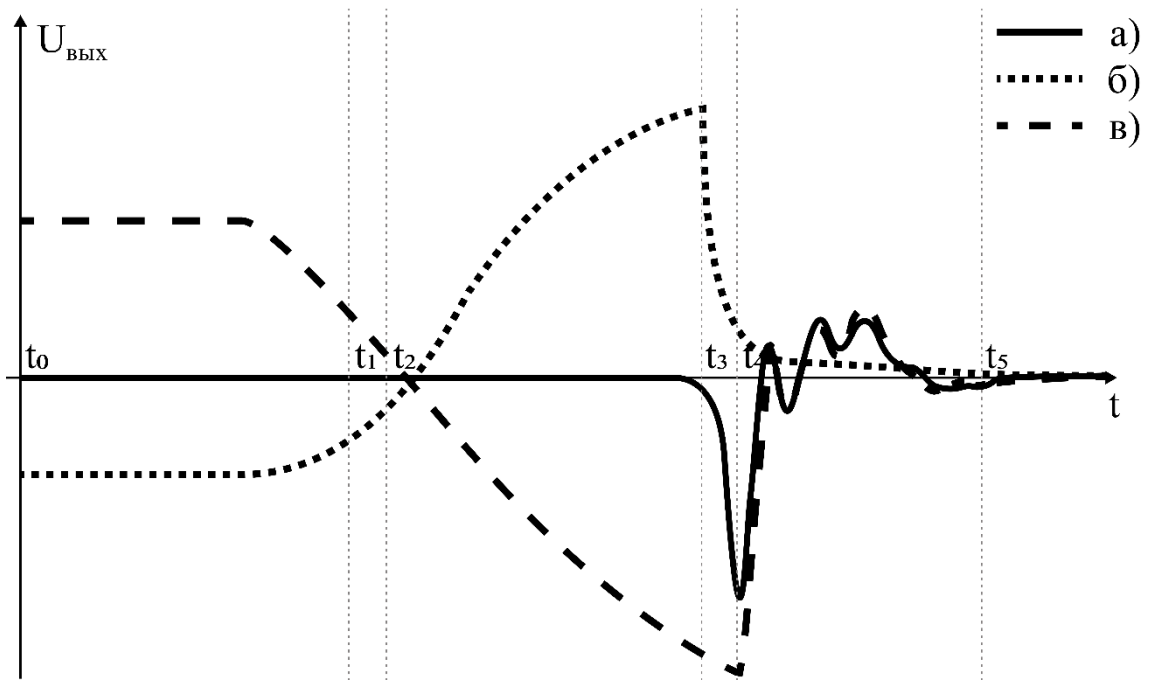


Рисунок 2.2 – Временные диаграммы токов через разные цепи в обобщенной схеме генератора СКИ: а) через нагрузку, б) через цепь диода, в) через индуктивность

Происходит это потому, что процессы изменения тока в цепи удаления заряда происходят гораздо более инертно, чем в цепи самого ДНЗ, за счет наличия в ней индуктивностей, в которых постоянно происходит процесс преобразования энергии из одного вида в другой.

При обрыве тока в цепи диода, суммарный импульсный ток  $I_R$  становится равным току в цепи удаления заряда  $I_L$ , то есть в индуктивности. Это следует из выражения (2.1). Наибольшее значения напряжение в цепи нагрузки будем называть амплитудой генерируемого сверхкороткого импульса. Повысив величину обратного напряжения и уменьшив сопротивление цепи диода, можно достичь увеличения выходной амплитуды. В то же время, 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, которые будут рассмотрены подробно в третьей главе данной диссертации, но и путем подбора диодов для обеспечения правильных условий их работы в генераторах СКИ. Влиянию параметров ДНЗ на характеристики формируемых импульсов посвящены следующие разделы настоящей главы.

## **2.2. Исследование влияния параметров диодов с накоплением заряда в схемах генераторов СКИ с длительным накоплением**

На основе всего вышеизложенного можно представить схему генерации сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы на основе ДНЗ с длительным накоплением. Такая схема пользуется популярностью, благодаря малому количеству элементов и предсказуемости. При этом, в такой схеме можно получить импульсы различной полярности перестановкой диода и индуктивности.

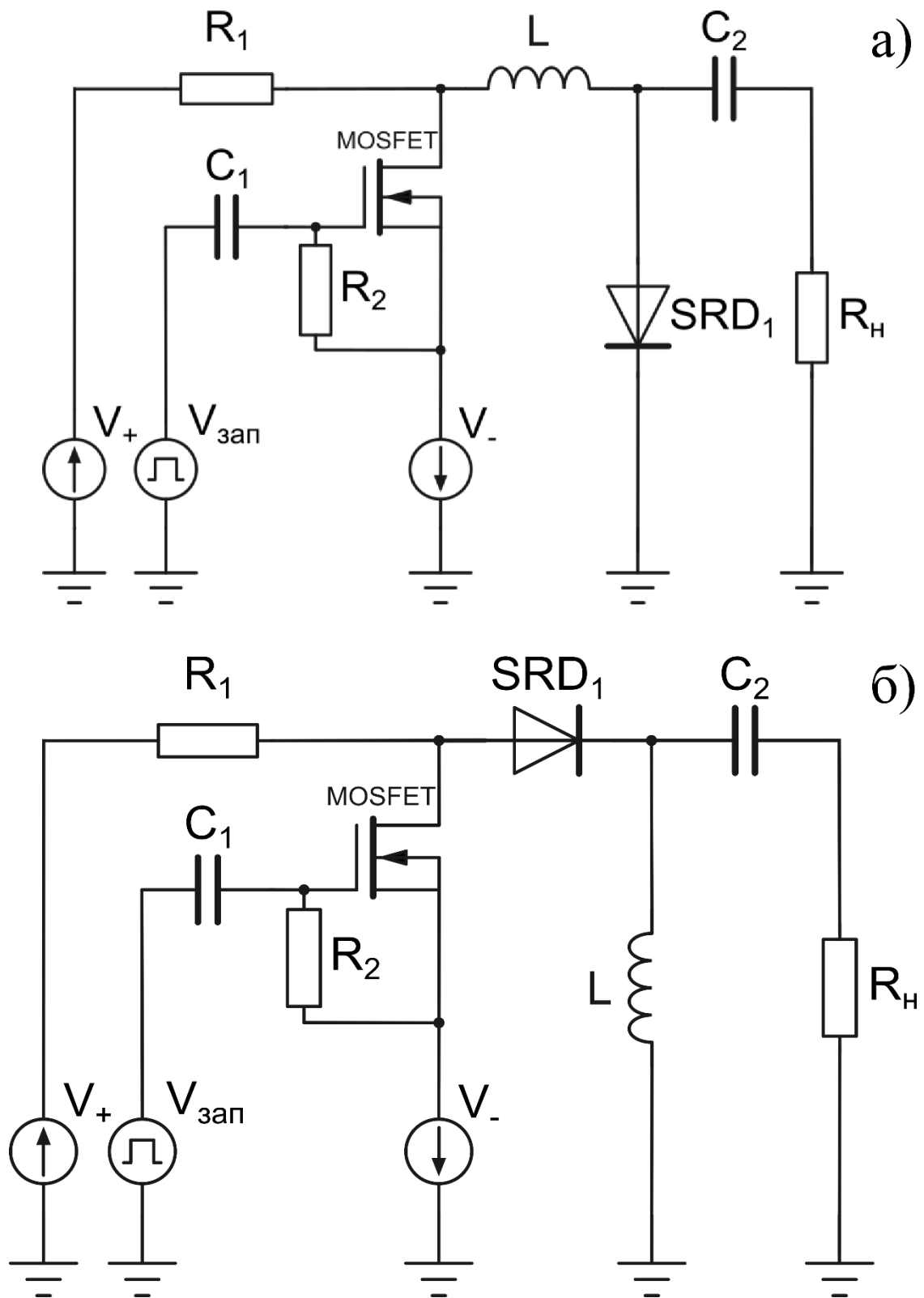


Рисунок 2.3 – Схема генератора а) положительных импульсов, б) отрицательных импульсов на основе ДНЗ и магнитного накопителя энергии



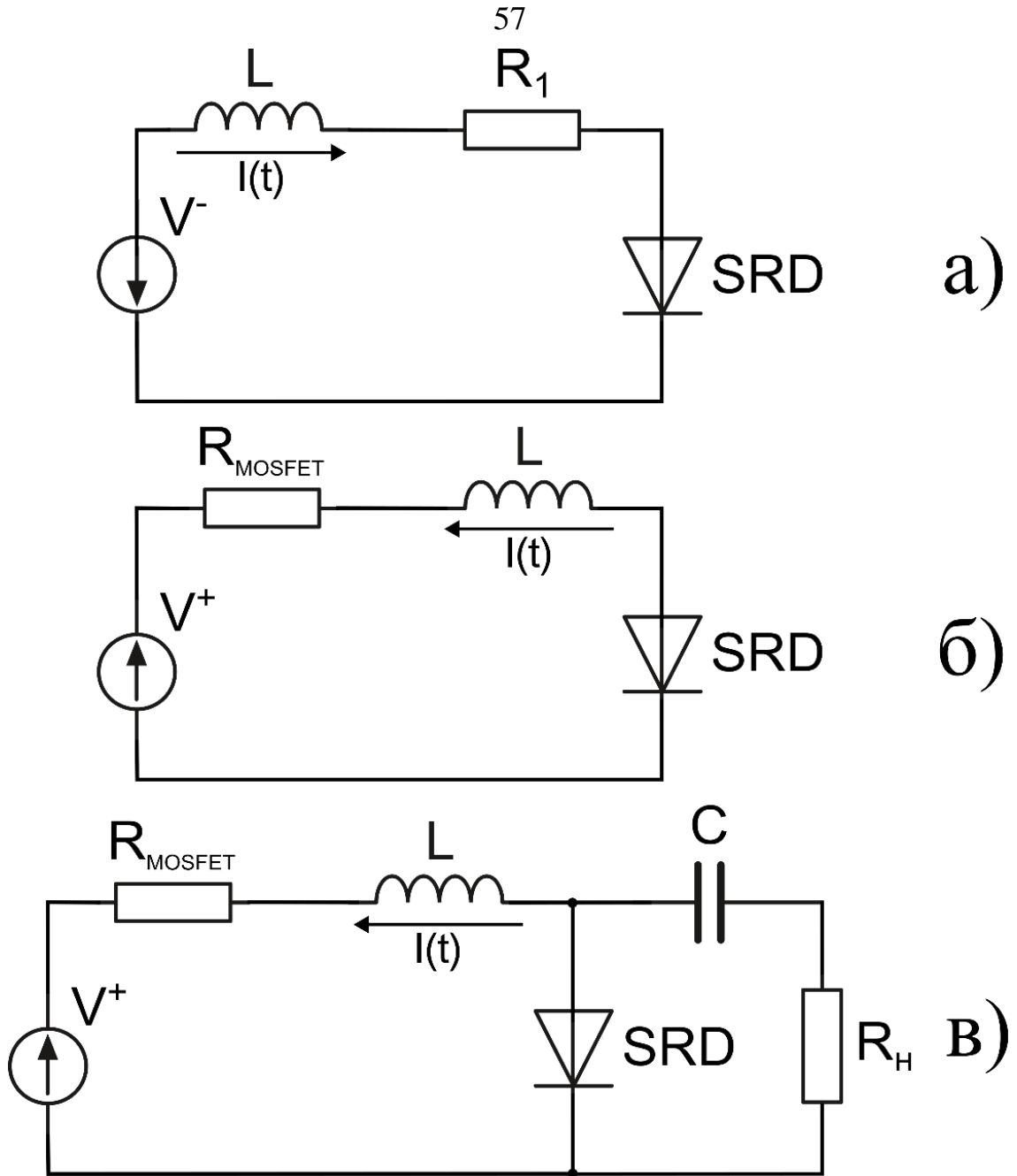


Рисунок 2.4 – Эквивалентные схемы для отдельных стадий работы ДНЗ:

а) стадия накопления заряда, б) стадия удаления заряда, в) переключения диода

Так на рисунке 2.3 (а) изображена схема генератора положительных импульсов, а на рисунке 2.3 (б) – отрицательных. В работе такие генераторы называются схемами с длительным накоплением или с фазой длительного накопления по той причине, что большую часть всей работы генератора занимает именно стадия накопления заряда в активной области диода *SRD*.

Рассмотрим принцип работы схемы генератора СКИ положительной полярности с длительным накоплением. Для более чёткого понимания процессов, происходящих в таком формирователе, разделим весь цикл его работы на стадии и рассмотрим каждую из них подробнее. Для удобства рассмотрения работы генератора рисунок 2.4 содержит эквивалентную схему каждой её фазы.

Первая фаза представляет собой накопление заряда (см. рисунок 2.4 (а)). Так, при подключении источников напряжения к данной схеме от источника  $V^+$  через диод *SRD* и индуктивность  $L$  начинает протекать ток. Величина этого тока ограничивается резистором  $R_I$ . Этот ток способствует накоплению электронно-дырочной плазмы в  $I$ -области ДНЗ. Величина этого тока  $I_{SRD}(t)$  определяется решением дифференциального уравнения:

$$L \frac{dI_{SRD}}{dt} = V^+ - I_{SRD} (R_I + R_{SRD}), \quad (2.3)$$

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

$$I_{SRD}(t) = \frac{V^+ (1 - \exp(-\frac{R_I + R_{SRD}}{L} t))}{R_I + R_{SRD}}. \quad (2.4)$$

Отсюда видно, что это решение растёт экспоненциально и стремится по асимптоте к значению  $V^+/R_{sum}$ , где  $R_{sum}$  представляет собой суммарное сопротивление резистора  $R_I$  и сопротивления диода  $R_{SRD}$ . Однако, помимо этого в то же время индуктивность  $L$  накапливает в себе энергию магнитного поля за счёт протекания того же тока.

Протекание описанного выше тока приводит к инжекции носителей как отрицательного, так и положительного зарядов в активной области диода. Этот процесс изменения заряда можно описать следующим равенством:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{SRD}(t) - \frac{Q(t)}{\tau}, \quad (2.5)$$

где  $\tau$  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 в формуле выше отвечает за рекомбинацию заряда. После начала процесса накачки, процессы инжекции в диоде возрастают, а затем спустя некоторый временной интервал оказываются уравновешенными процессами рекомбинации. Можно сказать, что диод в этот момент выходит на стационарный режим. Следовательно, в этом режиме можно полагать, что  $\frac{dQ}{dt} = 0$ , так как накопления заряда не происходит, а, значит, что величина накопленного заряда в этом режиме определяется произведением величины прямого тока и времени жизни неосновных носителей заряда:

$$Q_p = I_{np} \tau. \quad (2.6)$$

Именно эта формула используется для экспериментальных расчётов величин накопленных зарядов в главах 1 и 4.

Второй фазой работы генератора является фаза экстракции заряда из активной области. Ей соответствует эквивалентная схема, изображённая на рисунке 2.4 (б). В этом случае уравнение, описывающее процессы, происходящие с зарядом, будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t) - \frac{Q(t)}{\tau}. \quad (2.7)$$

Отсюда видно, что первое слагаемое соответствует обратному току через диод, который удаляет из активной области накопленный за предыдущую фазу заряд. Чтобы рассчитать временной интервал, за который этот заряд будет удалён, необходимо решить равенство:

$$\int_{t_0}^{t_1} I(t) dt = Q_p, \quad (2.8)$$

где  $t_0$  и  $t_1$  — моменты начала и конца рассасывания заряда в  $I$ -области.

Учитывая выражения (2.6) и (2.8), получается, что

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{V^- (1 - \exp(-\frac{R_\Sigma}{L} t))}{R_\Sigma} dt = Q_p, \quad (2.9)$$

где  $R_\Sigma$  представляет собой сумму собственного сопротивления транзистора  $R_{MOSFET}$ , находящегося в открытом состоянии, и сопротивление диода  $R_{SRD}$ .

Если принять в качестве начала отсчета момент времени  $t_0$ , то тогда, используя выражения (2.6) и (2.9), можно установить равенство, которое будет определять момент времени, когда носители заряда будут полностью удалены из  $I$ -области:

$$V^- (t_1 + \frac{L}{R_{\Sigma p}} (\exp(-\frac{R_\Sigma}{L} t_1) - 1)) = R_\Sigma I_{np} \tau. \quad (2.10)$$

Решение для этого уравнение можно найти только используя численные методы, так как оно является трансцендентным.

Величина обратного тока рассасывания, под которой подразумевается именно максимальная величина по модулю, определяется аналогично прямому току и равняется отношению напряжения, вызвавшего протекание этого тока к суммарному сопротивлению цепи. В данном случае:

$$I_{обп} = \frac{V^-}{R_\Sigma}, \quad (2.11)$$

где  $R_\Sigma$  также как и ранее представляет собой сумму собственного сопротивления транзистора и диода.

Далее следует третья фаза работы генератора. Она ознаменуется резким переключением диода с накоплением заряда в непроводящее состояние. Эквивалентная схема данной фазы представлена на рисунке 2.4 (в). Время переключения  $t_{nep}$  определяется как временной интервал между моментами начала

и конца переключения, которые, в свою очередь, калькулируются относительно величины обратного тока. Так, время начала переключения принято выбирать равным  $0,9I_{обp}$  по амплитуде, а окончание переключения –  $0,1I_{обp}$  по амплитуде [112, 113]. Одновременно с этим время переключения ДНЗ  $t_{nep}$  определяется параметрами самого диода, такими как коэффициент диффузии носителей заряда  $D_p$ , коэффициентом диффузии  $D$ , временем диффузии  $t_{диф}$ , площадью полупроводникового перехода  $A$ , толщиной кристалла полупроводника  $W$ , а также концентрацией примесей  $N_0$  и эффективным временем жизни носителей заряда  $\tau_p$  [112]. Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$t_{nep} = \frac{1}{D_p} \left( \frac{I_{np} \frac{\tau_p}{A}}{2eN_0 \left( \frac{W}{4Dt_{диф}} \right)^2} \right)^{2/3}, \quad (2.12)$$

где  $e$  – элементарный заряд.

$$\frac{d^2 U_R}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{LC} = -R \frac{d^2 I_D}{dt^2}. \quad (2.13)$$

Выражение (2.13) соответствует импульсу напряжения, формируемого генератором на нагрузке  $R$  согласно схеме, изображенной на рисунке 2.4 (в), и получено оно путем применения первого и второго законов Кирхгофа для схемы на рисунке 2.4 (б). Если определить ток через диод на стадии переключения как [112, 113]:

$$I_{SRD}(t) = I_{обp} \exp\left(-\frac{t}{t_e}\right), \quad (2.14)$$

где  $t_e$  представляет собой временной интервал, за которое ток, протекающий через диод с накоплением заряда, падает в  $e$  раз, то с учетом выражения (2.14) решением выражения (2.13) будет:

$$U_R = (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \exp\left(-\frac{R}{2L} t\right) - A \exp\left(-\frac{t}{t_e}\right), \quad (2.15)$$

где

$$A = \frac{I_{обр} RLC}{t_e^2 - RCt_e + LC}, \quad \omega = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}, \quad B = \frac{-A}{\omega} \sqrt{\frac{1}{t_e} - \frac{R}{2L}}. \quad (2.16)$$

Выражение (2.15) с учетом введенных обозначений позволяет определить форму и параметры импульсов, генерируемых формирователем СШП импульсов при заданном режиме работы.

Описанные выше выражения никак не оперируют описанными ранее интересующими нас параметрами полупроводниковой структуры ДНЗ. Поэтому в данном случае, пренебрегая внутренним сопротивлением диода и внутренним сопротивлением транзистора в схеме (считая его постоянным на всех этапах работы схемы), возможно провести косвенную оценку некоторых параметров, полученных с помощью пересчета из величин, использованных в (2.15) и (2.16). Величину накопленного в ДНЗ заряда  $Q$  с определенной точностью можно определить через известную в данном случае величину обратного тока  $I_{обр}$  как  $Q = I_{обр}t$ , где  $t$  – время протекания обратного тока. Вводя замену  $I_{обр} = Q/t$  в выражение (2.15) с учетом (2.16), можно провести анализ схемы генератора СКИ и в аналитическом виде подтвердить или опровергнуть утверждение о влиянии разницы в величинах накопленных в полупроводниковой структуре ДНЗ зарядов на формируемые с их помощью импульсы. С этой целью в данной диссертации были произведены расчеты временных зависимостей амплитуды и формы формируемых импульсов для генераторов СКИ на основе диодов 2А609Б и Масом MAVR-044769. Для расчетов использовались величины зарядов, полученные для данных моделей диодов в первой главе настоящей диссертации, а также номиналы элементов, взятые из схемы генератора СКИ на основе ДНЗ и магнитного накопителя энергии [83]. Результаты проведенного моделирования двух генераторов на основе диодов 2А609Б и Масом MAVR-044769

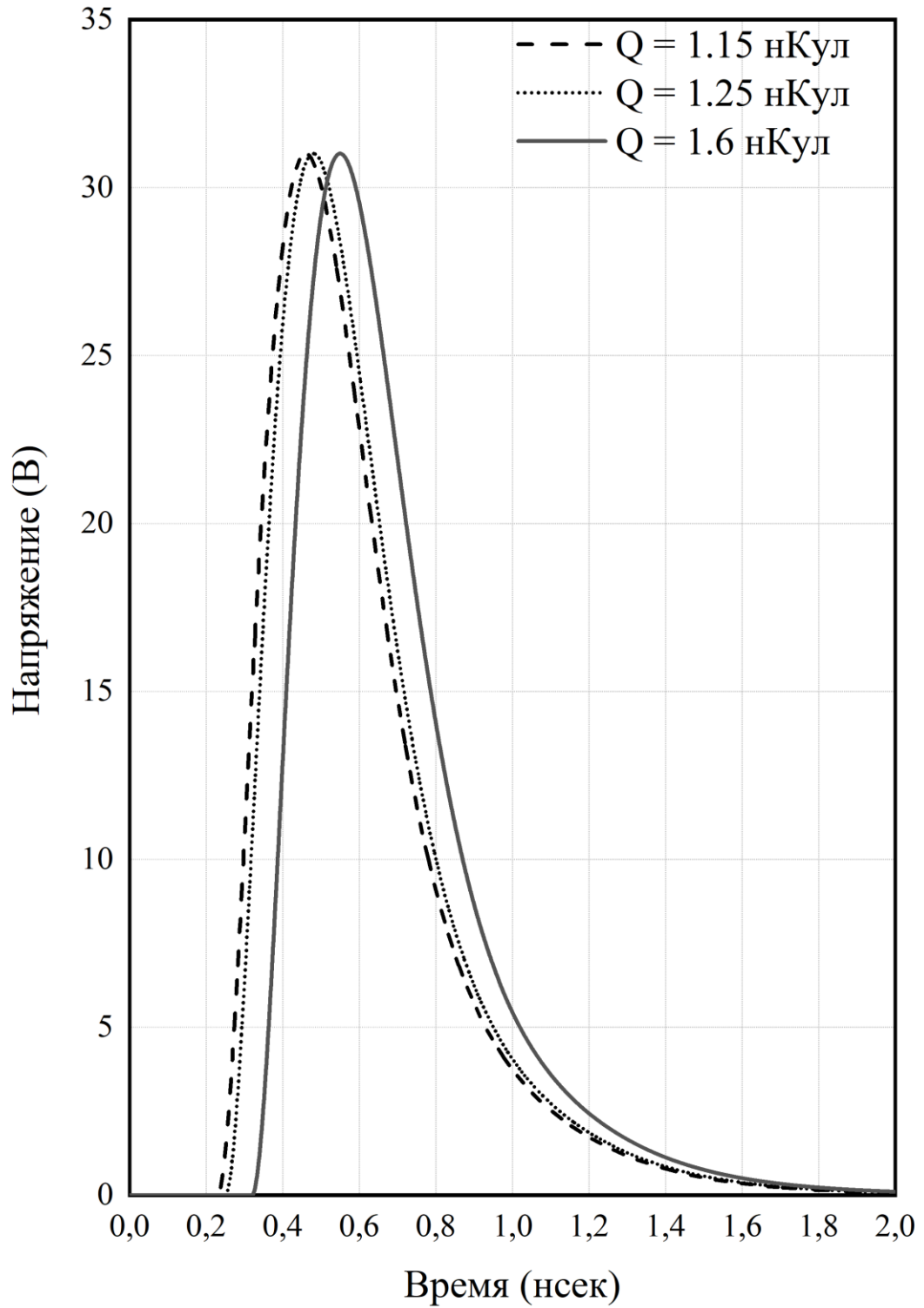


Рисунок 2.5 – Форма импульсов, полученных в ходе моделирования схемы генератора СКИ на основе диодов 2А609Б

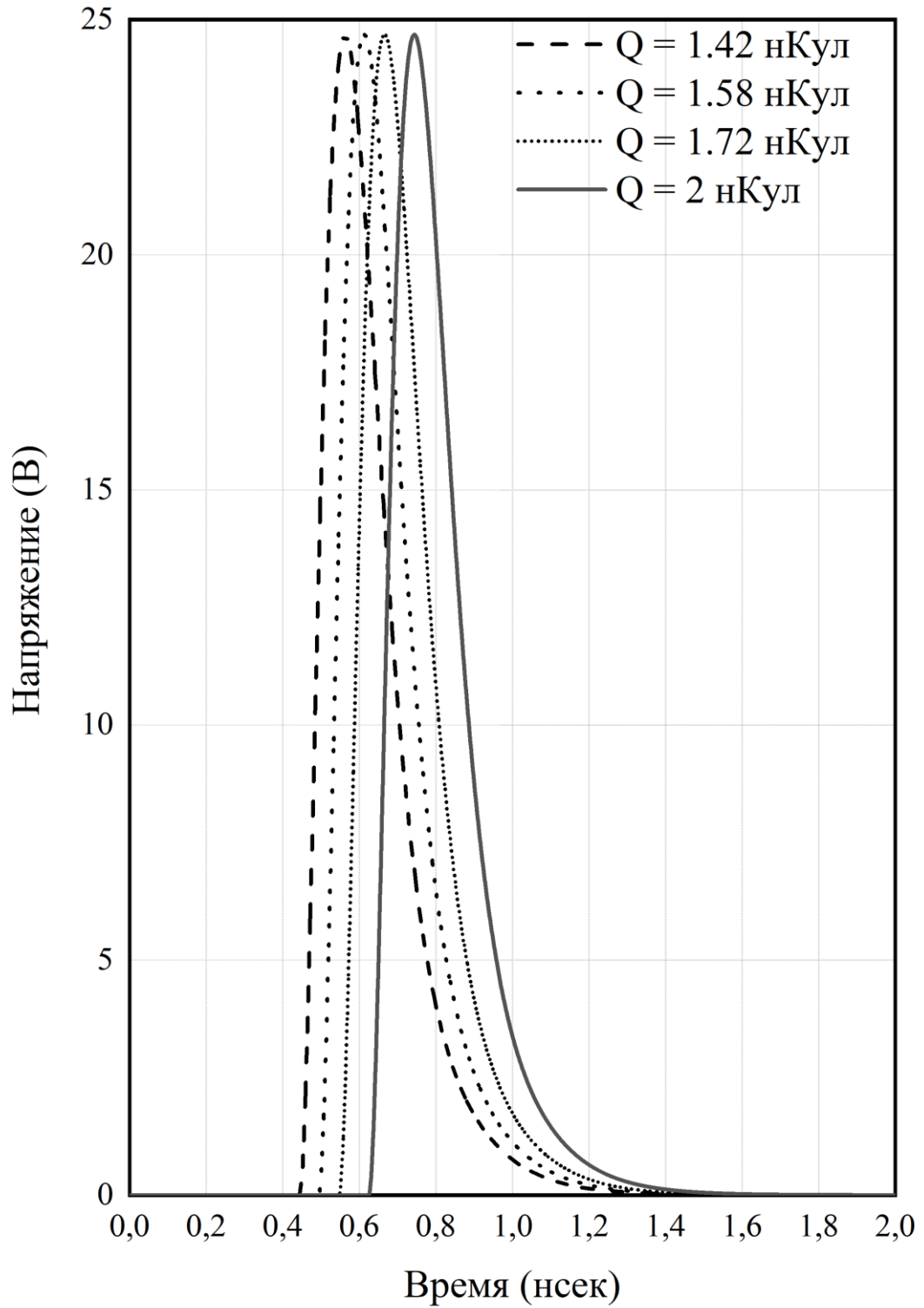


Рисунок 2.6 – Форма импульсов, полученных в ходе моделирования схемы генератора СКИ на основе диодов Масом MAVR-044769



представлены в виде графиков на рисунках 2.5 и 2.6, соответственно. Каждая кривая на данном графике соответствует разной величине накопленного в диоде заряда. Из представленных рисунков видно, что в представленной модели наблюдается некоторая разница в длительности импульсов в зависимости от величины накопленного заряда. Также видно, что импульсы начинают формироваться в разные моменты времени. Чем больше накопленный в ДНЗ заряд, тем позже начинается формирование импульса в схеме генерации. Изменение величины заряда на величину более 10% приводит к заметному сдвигу момента начала формирования импульса. При этом в данной аналитической модели амплитуда формируемых импульсов практически не зависит от величины накопленного в ДНЗ заряда.

Полученные результаты моделирования подтверждают тот факт, что характеристики формируемых импульсов зависят от параметров ДНЗ, в частности от величины накопленного в них заряда. Как уже было сказано ранее, чтобы эффективно формировать импульсы последовательными диодными сборками, необходимо обеспечить условие одновременно формирования импульсов диодами в таких сборках. Достичь этого можно путем отбора диодов с максимальными друг к другу параметрами.

Зависимости тока через диод от времени и амплитуды выходного импульса от времени для каждой фазы генератора, работающего по схеме, изображённой на рисунке 2.3 (а), отображены на рисунке 2.7 (б) и (в) соответственно.

Принцип работы генератора сверхкоротких импульсов отрицательной полярности, схема которого изображена на рисунке 2.3 (б), аналогичен вышеописанному принципу для генератора положительных импульсов.

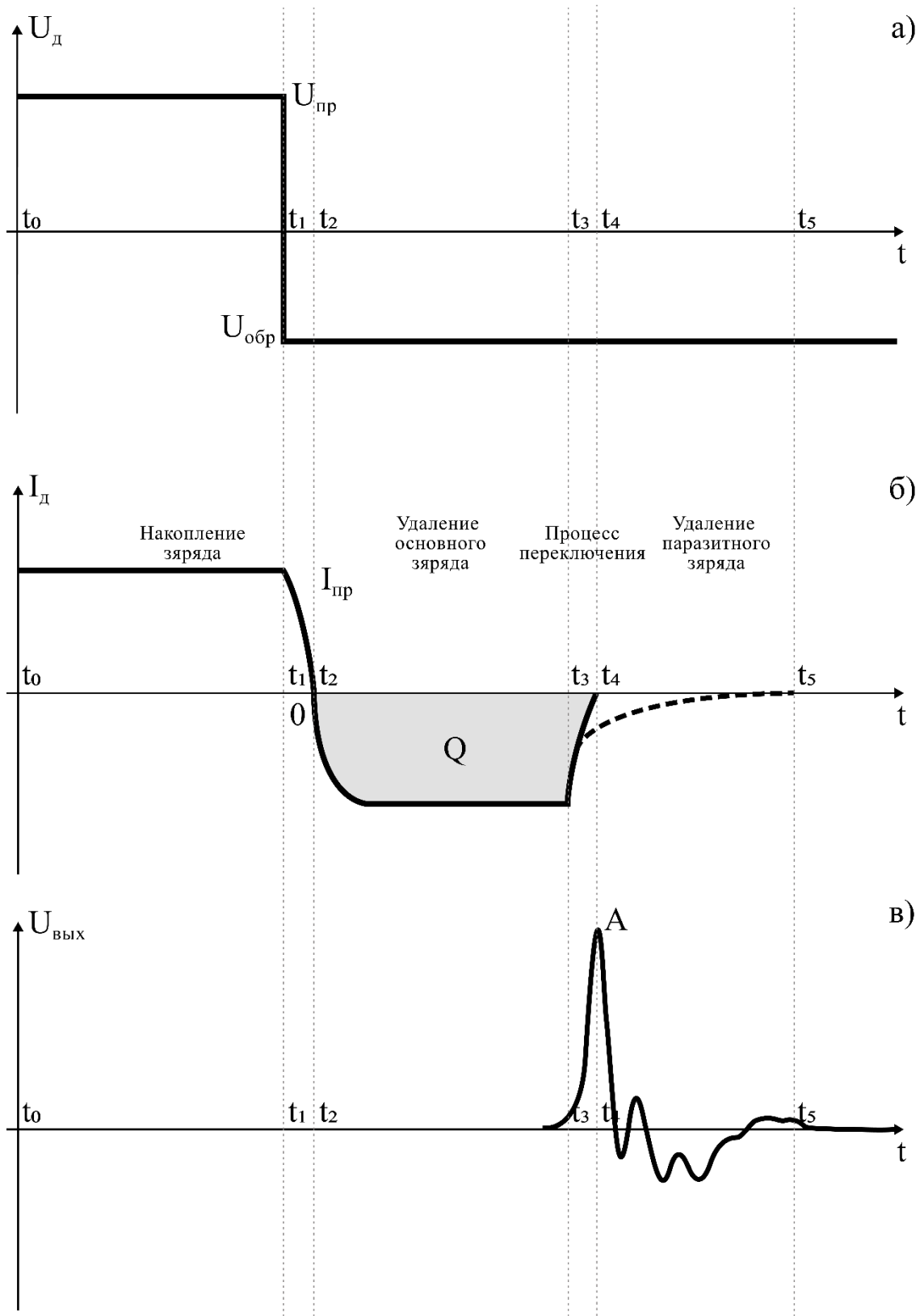


Рисунок 2.7 – Временные диаграммы (а) напряжения, приложенного к ДНЗ, (б) его переходной характеристики, (в) импульса, сформированного на нагрузке

### 2.3. Экспериментальное исследование влияния разброса параметров ДНЗ на формируемые СШП импульсы

Для экспериментального исследования влияния разброса параметров ДНЗ на характеристики получаемых импульсов в измерительном комплексе, использованном в первой главе настоящей диссертации для измерения параметров диодов с накоплением заряда, измерительный блок был заменен на генератор СШП импульсов квазигауссовой формы на основе ДНЗ, описанный в [74].

Данный генератор был спроектирован на основе принципиальной схемы, изображённой на рисунке 2.3 (а). Принцип его работы аналогичен тому, что был описан выше, с единственным отличием в том, что в данном случае он формирует на выходе импульсы отрицательной полярности. Данный модуль был спроектирован таким образом, чтобы была возможность подключать к его выходу установочную колодку для диодов с накоплением заряда, описанную в первой главе настоящей диссертации. Соединенные вместе блок генератора и установочная колодка образуют вместе модуль генератора. Рисунок 2.8 демонстрирует внешний вид готового блока генератора.

Используя получившийся измерительный стенд параметров сверхширокополосных импульсов, было проведено экспериментальное исследование зависимости амплитуды и длительности импульсов от разброса параметров ДНЗ.

В первой части этого исследования в генератор поочередно устанавливались 20 диодов марки 2А609Б из партии, использованной в первой главе. В ходе исследования посредством изменения напряжения обоих каналов программируемого источника питания менялись режимы их работы.

Для каждого диода были получены зависимости осциллограмм импульсов на выходе генератора от режима работы. Так, напряжение накачки  $V^+$  варьировалось в пределах от 0,5 В до 30 В, а напряжение рассасывания – в пределах от -0,5 В до -15 В. На рис. 2.9 отображены полученные результаты.

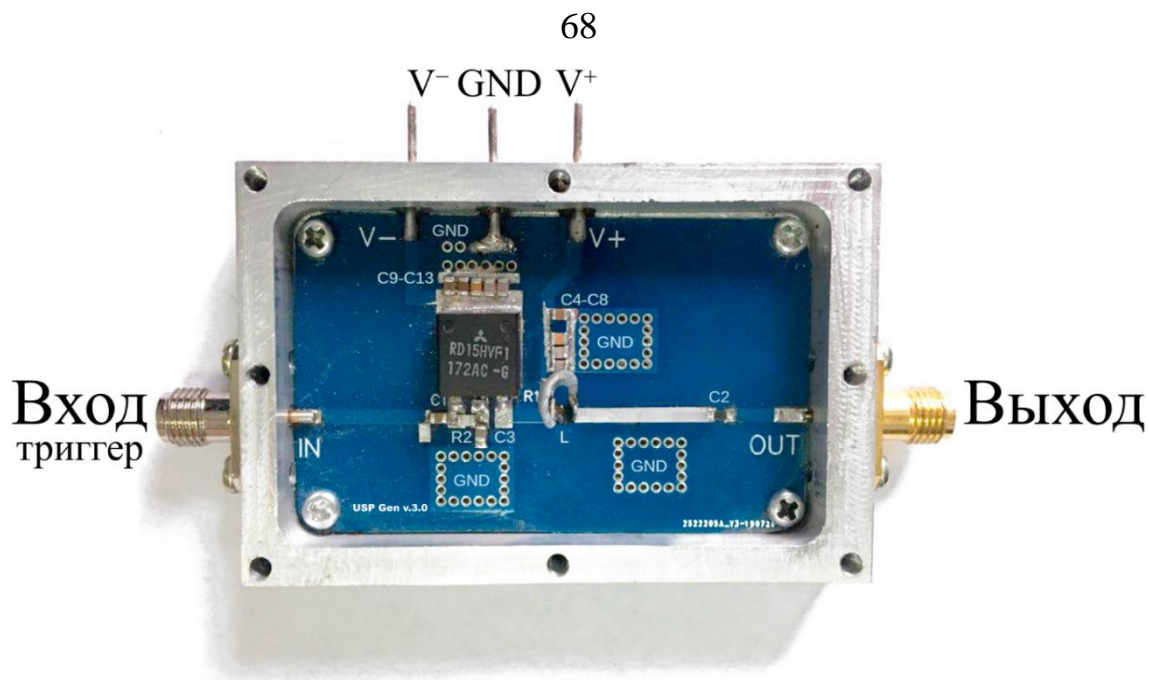


Рисунок 2.8 – Фото готового блока генератора на основе ДНЗ

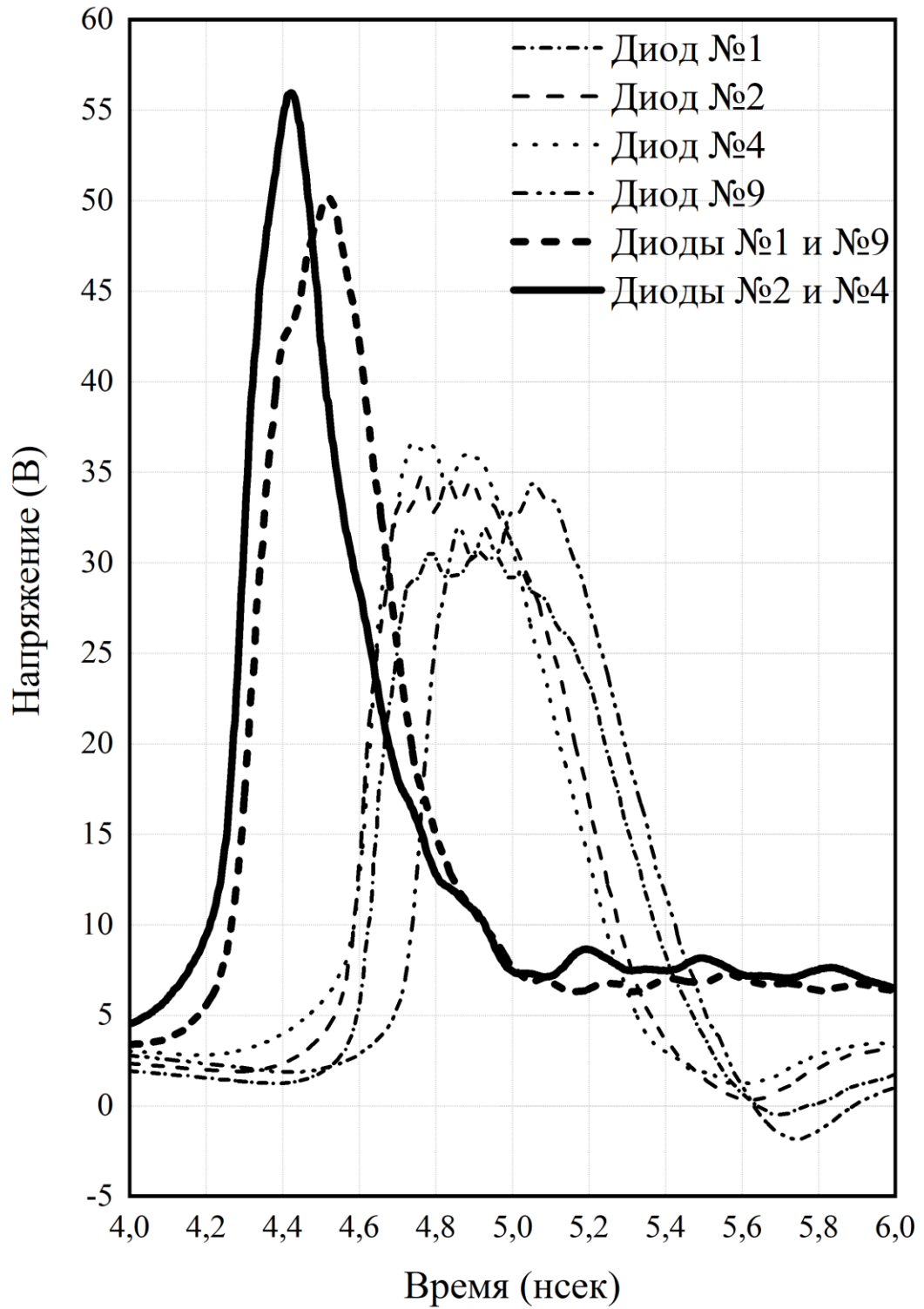


Рисунок 2.9 – Осциллограммы, полученные для выборки диодов 2А609Б

Отсюда видно, что амплитуды и длительности импульсов отличаются, что свидетельствует о том, что действительно параметры ДНЗ в значительной степени влияют на характеристики формируемых импульсов. Так, максимальная амплитуда импульса в случае одиночных диодов наблюдается, исходя из рисунка, для диода с порядковым номером 4.

Затем аналогичные измерения импульсов были проведены для диодов модели MAVR-044769. Из выборки, описанной ранее в первой главе, было отобрано несколько диодов. У трех из них зависимости заряда от тока накачки и времени переключения при условии совпадения режимов работы не отличались более, чем на 3%, в то время как у двух других аналогичные зависимости различались уже более, чем на 5%. На рисунке 2.10 изображены осциллограммы импульсов, полученных с помощью генераторов с описанными выше диодами. Здесь и далее длительность импульсов будут определяться по уровню 50% от их размаха, а амплитуды будут сравниваться относительно пиковых значений импульса, сформированного на нагрузке.

Так, из рисунка видно, что также существует разброс амплитуд и длительностей импульсов, как и в предыдущем случае для диодов 2А609Б. Однако, он уже не такой значительный, что согласуется с результатами, полученными при измерениях параметров ДНЗ в первой главе. Величина разброса характеристик импульсов с поправкой на паразитные явления в схеме в данном случае коррелирует с разбросом параметров ДНЗ, с помощью которых были получены эти импульсы. Так, схема, в которую устанавливались диоды с порядковыми номерами 2, 5, 14 (то есть диоды с близкими переходными характеристиками), также сформировала довольно близкие по длительности, форме и амплитуде импульсы. Одновременно с этим схема на основе ДНЗ №14 и №17 с различающимися параметрами более чем на 5% сгенерировала импульсы, которые имеют заметные отличия от первой группы. К примеру, импульс, полученный с помощью генератора с установленным в него диодом №5, опережает импульс, сформированный аналогичной схемой на основе диода с

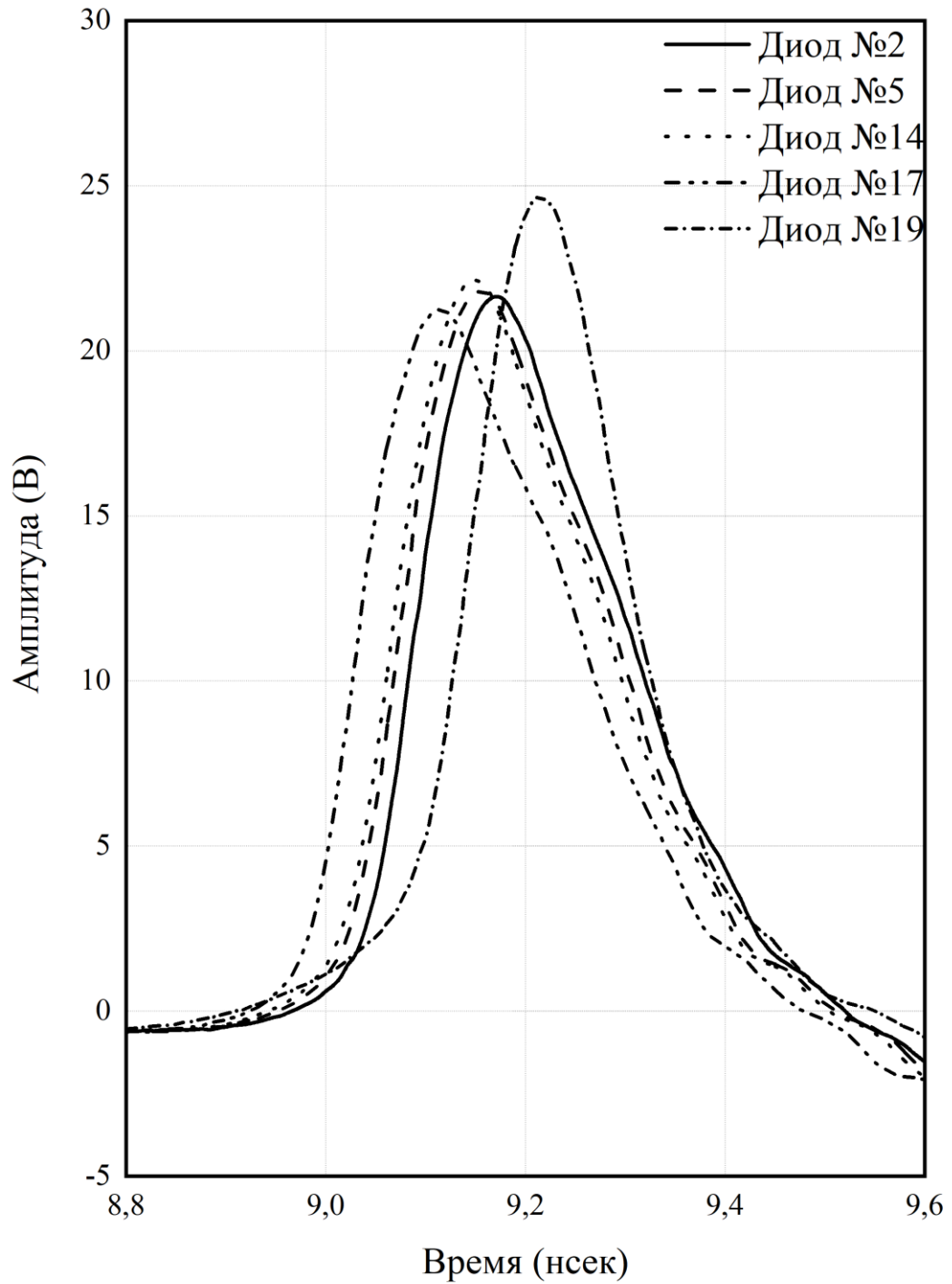


Рисунок 2.10 – Осциллограммы, полученные для выборки диодов  
Mасom MAVR-044769

порядковым номером 14, на 40 пикосекунд. А импульс, полученный на основе диода 19 формируется на 50 пикосекунд позже, нежели №5.

Однако, как уже говорилось в первой главе, чтобы достичь больших амплитуд выходного сигнала, необходимо диоды с накоплением заряда могли работать при больших напряжения смещения и пропускать большие токи в обоих направлениях, и при этом иметь минимально возможное время переключения, для формирования сверхкоротких импульсов. Чтобы выполнить второе условие, можно укорачивать обедненную область диода, однако, это приведет к снижению уровня пробивного напряжения, что уже не удовлетворяет первому условию. Поэтому, чтобы разрешить возникшее противоречие можно пойти по пути последовательного соединения диодов в сборку.

При этом важно отметить, что в вопросах формирования импульсов огромную роль играет емкость прибора. Корпусная емкость диода вносит свой вклад и оказывает заметное влияние на работу диода с накоплением заряда в режиме переключения, которую можно рассматривать как параллельно подключенный к диоду конденсатор постоянной емкости в схемах генерации. Из-за перезарядки этого конденсатора размыкание тока диода затягивается. Однако, в случае сборки  $N$  корпусированных диодов суммарная емкость убывает пропорционально количеству диодов в этой сборке.

При использовании нескольких последовательно соединенных диодов вместо одного амплитуда и длительность импульса прямого тока, скорость нарастания импульса обратного тока одинаковы для всех ДНЗ в сборке. Однако из-за разброса в значениях времени жизни носителей заряда, отличается количество накопленного заряда, что может привести к рассогласованию восстановления диодов во времени и размыкание тока диодной сборкой замедлится [85]. Одновременно с этим имеющаяся разница в величинах накопленных зарядов приводит к тому, что они начинают переключаться в непроводящее состояние не в один и тот же момент времени, а с некоторой задержкой. Из-за этого, в свою очередь, обратный ток не достигает своего максимального значения, а это напрямую отрицательным образом сказывается на амплитуде формируемого



импульсного сигнала. В современных условиях производства полупроводниковых приборов всегда имеет место некоторые отличия в значениях параметров электронных устройств даже в пределах одной пластины. В связи с тем, что требования, предъявляемые к синхронности работы всех элементов сборки, ужесточаются по мере уменьшения длительности и крутизны фронтов генерируемого импульса, различия в значениях параметров ДНЗ, которые были не существенны для генерации наносекундных импульсов, начинают играть важную роль при формировании СКИ длительностью не более 100 пс.

Чтобы удовлетворить данное условия одновременного переключения, можно воспользоваться несколькими путями. Путь, который предлагается в данной диссертации заключается в том, что перед использованием последовательного соединения диодов с накоплением заряда в генераторах, необходимо проводить их отбор с помощью ПАИК ДНЗ, пользуясь описанной в первой главе методикой. Иными словами, отбирать диоды, у которых переходные характеристики не отличаются на заранее определенную величину. Последовательная сборка таких диодов является гарантией того, что они будут переключаться одновременно, обеспечивая наилучшую синхронизацию и наилучшие параметры СКИ на выходе для данной схемы и данной модели ДНЗ.

Для того, чтобы исследовать, как влияет описанный выше разброс параметров на амплитуду и длительность сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы, в измерительный комплекс был установлен модуль генератора, схема которого изображена на рисунке 2.11. Установочная колодка этого модуля позволяет устанавливать несколько последовательно соединенных диодов с накоплением заряда.

Так как технологический разброс параметров играет особо важную роль именно при использовании ДНЗ с временами переключения 200 пикосекунд и менее, то наибольшую значимость будут представлять результаты экспериментального исследования только для диодов Mocom MAVR-044769.

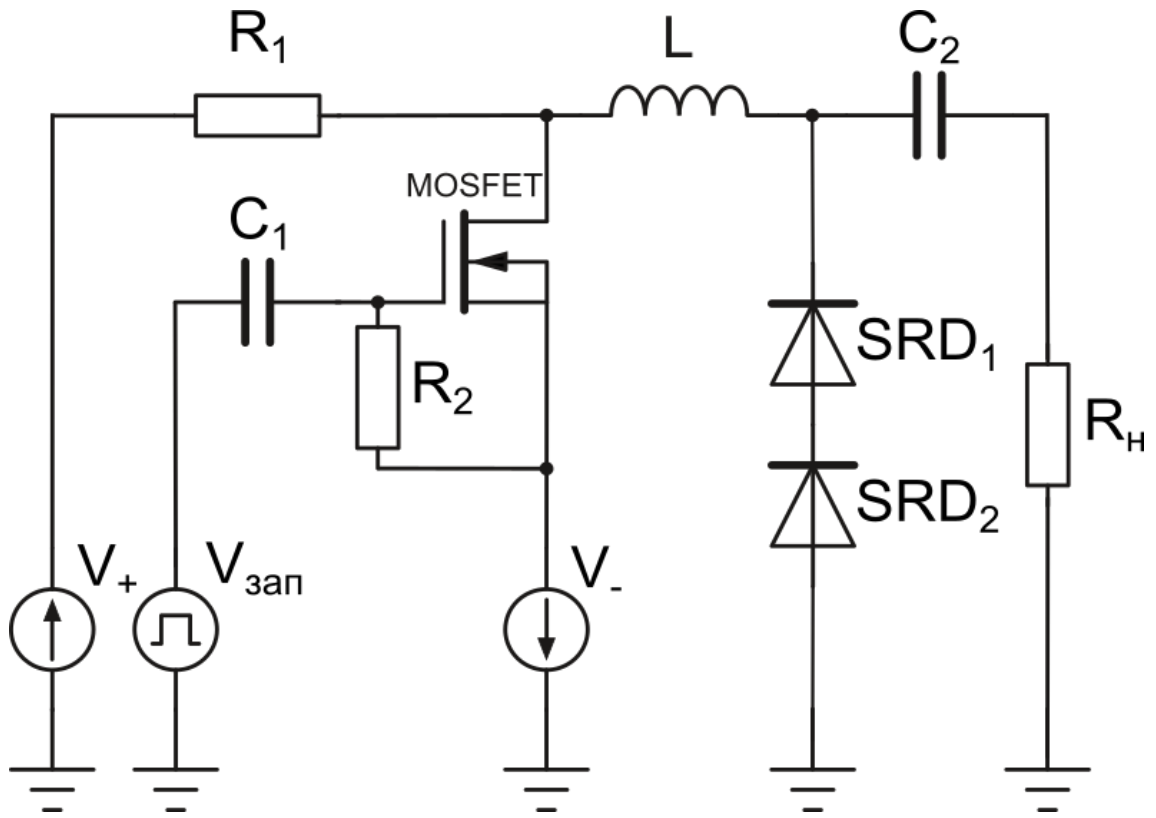


Рисунок 2.11 – Принципиальная схема генератора СКИ с последовательным включением ДНЗ

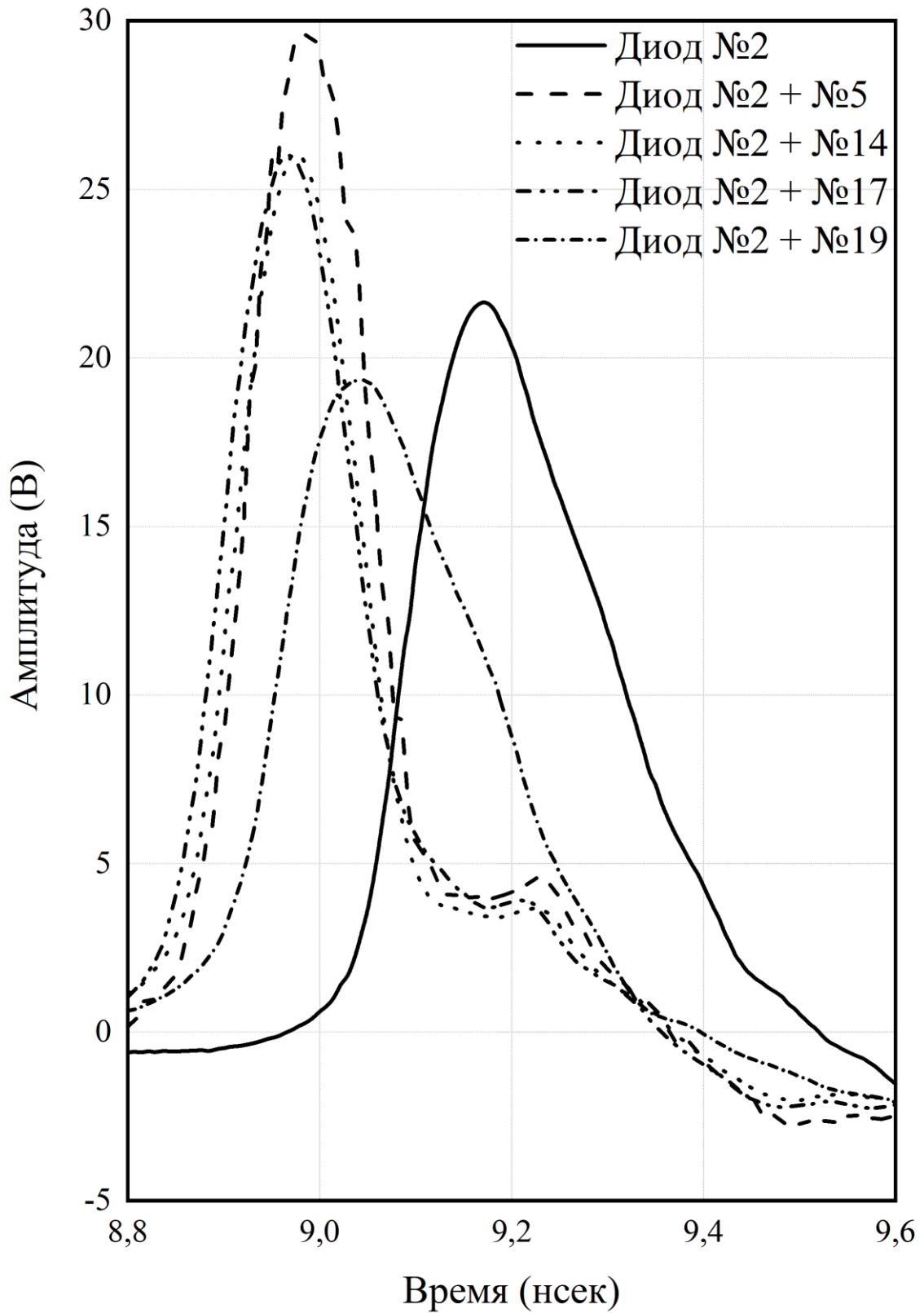


Рисунок 2.12 – Осциллограммы СКИ, полученные для пар ДНЗ Масом MAVR-044769

Паспортное время переключения этих диодов составляет порядка 150 секунд согласно документации [33].

Глядя на рисунок 2.9, можно заметить, что последовательное соединение диодов 2А609Б по схеме на рисунке 2.11 дает значительное увеличение амплитуды и сокращение длительности формируемых импульсов. Здесь диоды №2 и №4 имеют максимально близкие переходные характеристики из всей выборки, а диоды с номерами №1 и №9, наоборот, имеют максимальные отличия в пределах выборки. При этом стоит отметить, что импульсы, формируемые генератором на основе сборки диодов 2–4 дает самые лучшие результаты для этой схемы на основе 2А609Б.

На рисунке 2.12 изображены осциллограммы импульсов, полученные для схемы на рисунке 2.11 в случае последовательного соединения диодов Масот №2 с диодами под порядковыми номерами 5, 14, 17 и 19. Отсюда хорошо видно, что максимальная амплитуда импульса достигается в случае использования диодов №2 и №5 в паре. Импульс, полученный для пары диодов, формируется на нагрузке раньше, чем в случае с одним ДНЗ. Происходит в том числе и потому, что в диодах накапливается заряд меньше, чем в одиночном диоде, из-за уменьшения величины тока, протекающего через диоды, так как суммарное сопротивление пары диодов становится больше, чем у одного. При этом же можно отметить, что суммарная длительность сформированного на нагрузке импульсного сигнала уменьшилась до 100 пикосекунд. В случае парной установки диодов с номерами 2 и 14 также наблюдается прирост амплитуды и сокращение длительности формируемого импульса по сравнению с одиночными. При этом, используя сочетание диода №2 с диодами №17 и №19, не удалось получить кардинального улучшения параметров СКИ.

## **Выводы**

В данной главе были проведено экспериментальное исследование влияния параметров ДНЗ и их разброса на длительность и амплитуду формируемых с их помощью импульсов. Полученные результаты доказали, что существует

корреляция между параметрами ДНЗ и характеристиками и формой СКИ. Также было установлено, что последовательное соединение пары диодов с накоплением заряда, имеющих максимально похожие переходные характеристики, позволяет получить на нагрузке импульсы с максимальным размахом. Так, удалось получить импульсы с амплитудой, превосходящей амплитуду импульсов, полученных схемами с одиночными диодами, на величину порядка 30%.

### **ГЛАВА 3. Схемотехнические методы сокращения длительности сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы**

В генераторах СКИ с магнитным накопителем энергии, описанных во второй главе есть важная особенность. Длительность переднего фронта генерируемого импульса зависит от времени переключения диода, которое, в свою очередь, зависит от свойств полупроводниковой структуры диода, а также от режимов работы самого генератора. Крутизной заднего фронта импульса также можно управлять. Для ее увеличения необходимо уменьшить индуктивную составляющую в цепи удаления заряда. При этом возникает две проблемы. Первая заключается в том, что уменьшение индуктивности влечет за собой увеличение емкости линейной цепи и уменьшение ее характеристического сопротивления. А низкое характеристическое сопротивление, в свою очередь, ставит более жесткие требования, предъявляемые к ключу: он должен обладать высокой скоростью включения и выключения и низким выходным сопротивлением в открытом положении.

Вторая проблема заключается в том, что уменьшение индуктивности ведет к ухудшению энергетических характеристик импульса, так как при этом сократится количество накапливаемой энергии в накопителе 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 ухудшения их энергетических характеристик в данной работе предложено три схемотехнических решения: 1) генератор сверхкоротких импульсов с обострителем фронта импульса на основе ДНЗ, 2) генератор сверхкоротких импульсов с последовательным возбуждением и, наконец, 3) использование нелинейных линий передачи.

### 3.1. Генератор СКИ с обострителем фронта импульса

Принципиальная схема генератора сверхкоротких импульсов с обострителем фронта импульсов приведена на рисунке 3.1. Так называемым 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 [71, 86, 114, 116]. Рассмотрим общий принцип работы данной схемы, разделив ее условно на каскады.

Предположим, что изначально в первом каскаде транзистор  $VT$  закрыт. Тогда из источника  $V_1$  протекает прямой ток через ДНЗ  $D_1$ , а ток от источника  $V_3$  — через ДНЗ  $D_2$ . При этом в обоих диодах с накоплением заряда происходит накопление электронно-дырочной плазмы в их полупроводниковой структуре. При этом в цепях питания данных диодов стоят ограничительные резисторы  $R_1$  и  $R_3$ . В тот момент, когда на транзистор  $VT$  с запускающего генератора приходит положительный импульс, транзистор открывается, и от источника  $V_2$  через индуктивность  $L_1$  и диод  $D_1$  начинает протекать обратный ток. Этот ток начинает удалять накопленный в диоде заряд.

Когда концентрация заряда, накопленного в полупроводниковой структуре, достигнет нуля, то произойдет резкое восстановление высокого обратного сопротивления диода. Результатом этого является формирование сверхкороткого импульса отрицательной полярности на нагрузке.

Теперь рассмотрим принцип работы второго каскада. Сверхкороткий импульс, сформированный первым каскадом, поступает на вход второго каскада и стремительно удаляет накопленный к этому времени заряд в диоде  $D_2$ . В момент восстановления обратного сопротивления второго диода происходит

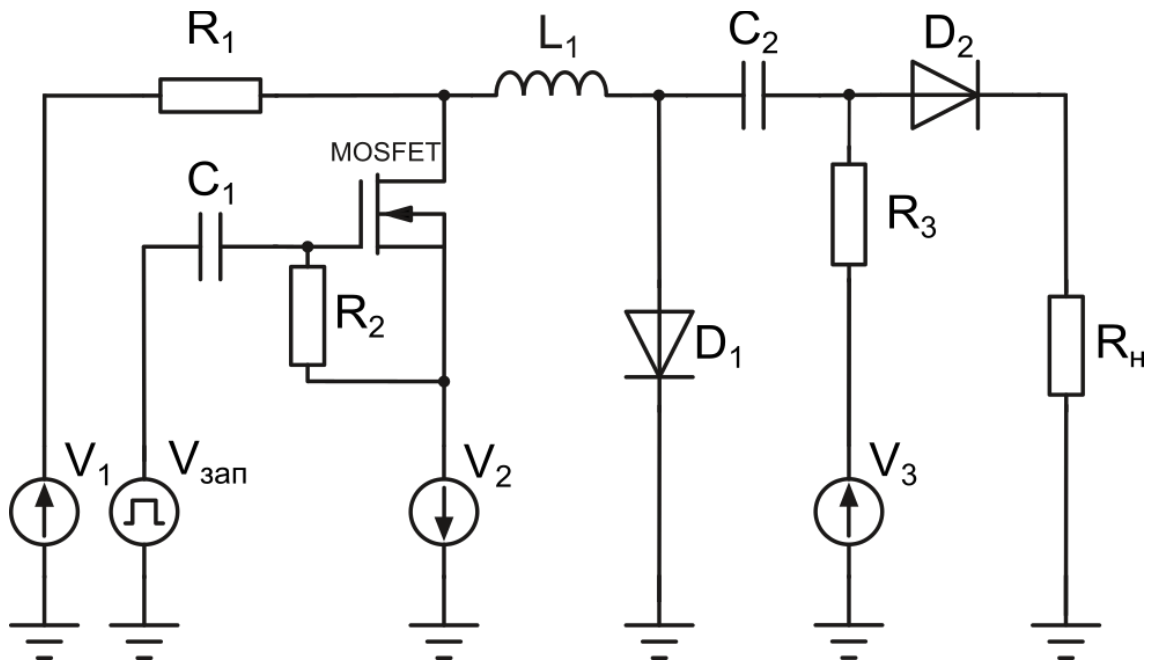


Рисунок 3.1 – Схема генератора СКИ на основе ДНЗ с обострителем фронта импульса



формирование резкого заднего фронта СКИ на выходе данного генератора. Отличительной особенностью данного генератора при этом является возможность уменьшения длительности этого импульса путем подбора соответствующего режима и диода-обострителя.

Данное экспериментальное исследование посвящено решению задачи по формированию длительностью менее 150 пс с помощью генератора с обострителем фронта импульса на базе ДНЗ.

В качестве диода  $D_1$  использовался отечественный диод с накоплением заряда 2А609Б. Управление транзисторным ключом производилось с помощью запускающих импульсов от генератора импульсов Agilent 81104А. В качестве диода-обострителя использовался ДНЗ с меньшим временем переключения, чем у диода  $D_1$ . Длительность импульсов определялась по уровню половины амплитуды. Для собранного макета данного генератора были исследованы режимы работы, которые устанавливались путем задания соответствующих напряжений источников питания  $V_1$  и  $V_3$ . В качестве нагрузки использовался широкополосный стробоскопический осциллограф.

Принимая напряжение на источнике питания  $V_3$  постоянным и равным 4.7 В, отобразим на рисунке 3.2 зависимость длительности выходного импульса от напряжения источника питания  $V_1$ . Видно, что зависимость не монотонна и имеет минимум около значения напряжения  $V_1 = V_{\text{opt}} = 2.1$  В. Такой вид зависимости длительности выходного импульса от напряжения питания  $V_1$  можно объяснить тем, что при малых значениях  $V_1$  импульсный ток в цепи нагрузки (то есть во втором каскаде) слишком мал для того, чтобы удалить весь заряд из диода-обострителя. В результате этого он не работает. При дальнейшем увеличении напряжения питания до значения  $V_{\text{opt}} = V_1 \approx 2.1$  В отчетливо наблюдается уменьшение длительности формируемых СКИ, которое вызвано ростом амплитуды импульса обратного тока диода  $D_2$ . И, напротив, при значениях напряжения источника питания  $V_1 > V_{\text{opt}}$  длительность генерируемого сигнала начинает возрастать.

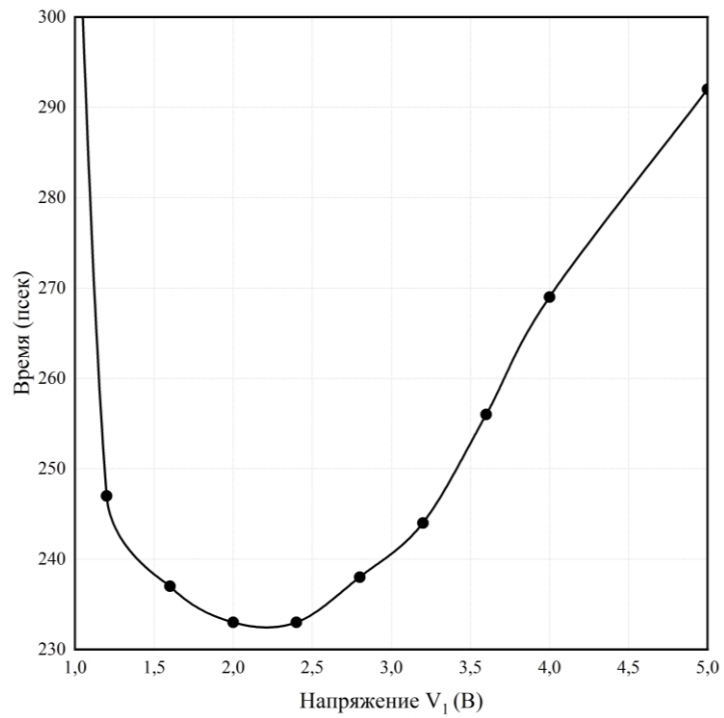


Рисунок 3.2 – Зависимость длительности СКИ на выходе генератора с обострителем от напряжения  $V_1$ , при  $V_3 = 4.7\text{В}$

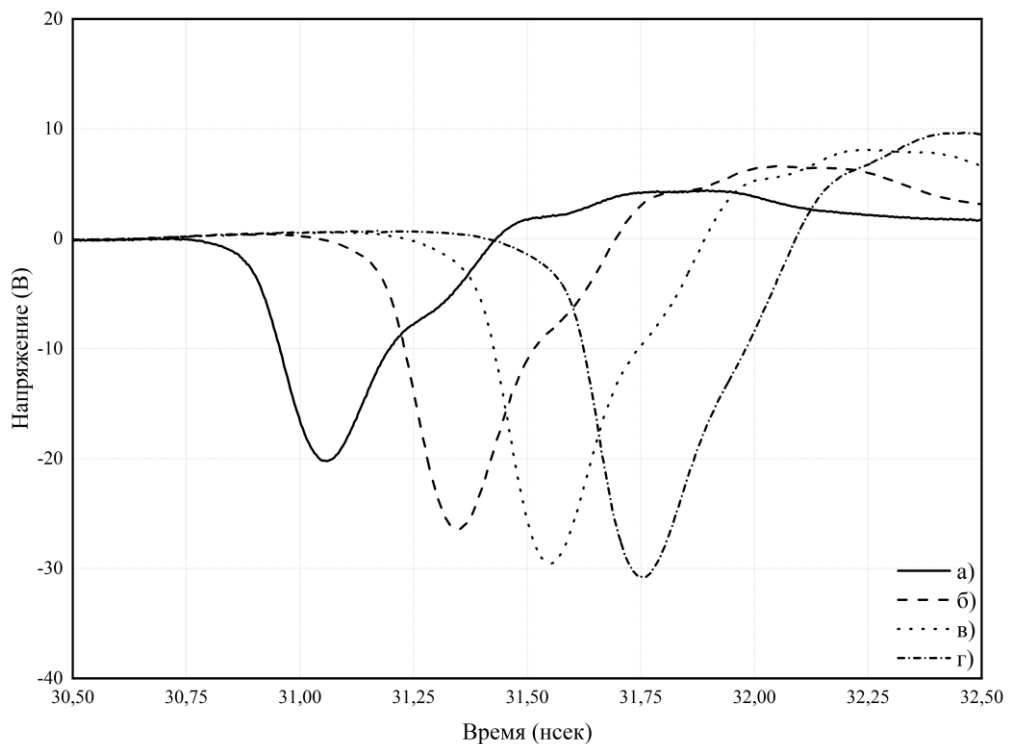


Рисунок 3.3 – Зависимость амплитуды выходного импульса от времени при фиксированном  $V_3 = 4.7\text{ В}$  и

а)  $V_1 = 0.8\text{ В}$ , б)  $V_1 = 1.2\text{ В}$ , в)  $V_1 = 2.1\text{ В}$ , г)  $V_1 = 4.0\text{ В}$

Это происходит из-за увеличения времени переключения диода  $D_1$ , зависящего от значения прямого тока, протекающего через диод.

На рисунке 3.3 представлены выходные осциллограммы для фиксированного значения напряжения  $V_3 = -4.7\text{В}$  и различных значений напряжения  $V_1$ .

Теперь, используя постоянное значение напряжения  $V_1 = V_{ont}$ , исследуем зависимость длительности выходных импульсов от напряжения  $V_3$ . В результате исследования данного режима работы генератора было замечено, что данная зависимость также не монотонна и имеет минимум при  $V_3 \approx 2.1\text{В}$ . При напряжениях  $V_3$ , больших 3.5 В, обостритель фронта вновь не работает. Это связано с тем, что при больших напряжениях через диод  $D_2$  протекают слишком большие токи накачки, и, следовательно, накапливается заряд, который затем не успевает удалиться полностью импульсом, сгенерированным в первом каскаде.

При уменьшении напряжения  $V_3$  величина накопленного заряда уменьшается, и цепь нагрузки разрывается прежде, чем импульс достигает своего максимального значения. Поэтому задний фронт формируется гораздо раньше, а амплитуда импульса уменьшается. График данной зависимости представлен на рисунке 3.4. Выходные осциллограммы при фиксированном  $V_1$  представлены на рисунке 3.5. Из них видно, что при увеличении напряжения питания  $V_3$  длительность импульса увеличивается. Одновременно с этим увеличивается амплитуда выходного импульса.

Из полученных результатов видно, что при определенных оптимальных условиях удастся добиться минимальной длительности выходного импульса.

На рисунке 3.6 изображены осциллограммы СКИ наименьшей длительности, полученные с помощью схемы генератора с обострителем фронта импульса (а) и с помощью «классической» схемы генератора (б). Внешний вид экспериментальной модели данного генератора представлен на рисунке 3.7.

Таким образом, в ходе эксперимента удалось уменьшить длительность импульса почти в 2 раза, по сравнению с классической схемой. Важно отметить здесь, что амплитуда обоих импульсов практически одинаковая. Также видно, что

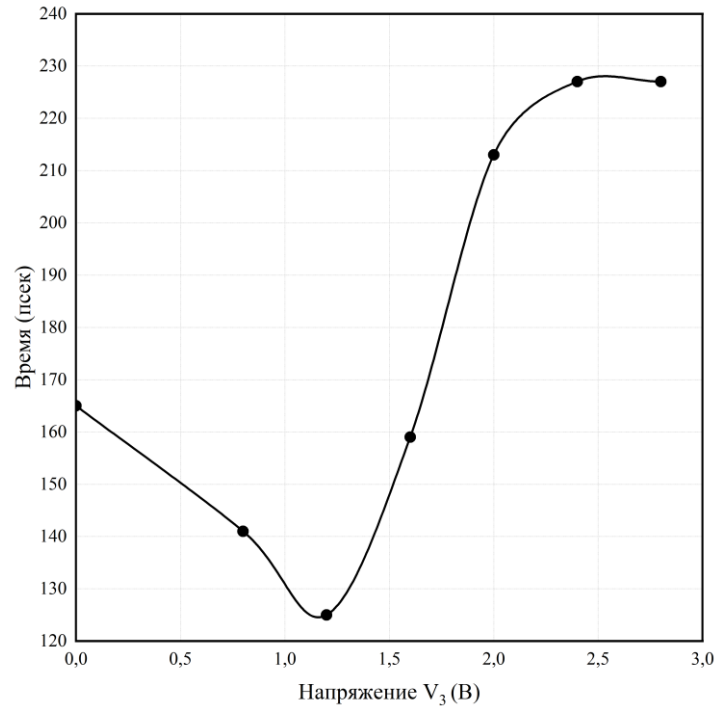


Рисунок 3.4 – Зависимость длительность СКИ на выходе генератора с обострителем от напряжения  $V_3$  при  $V_1 = 2.1$  В

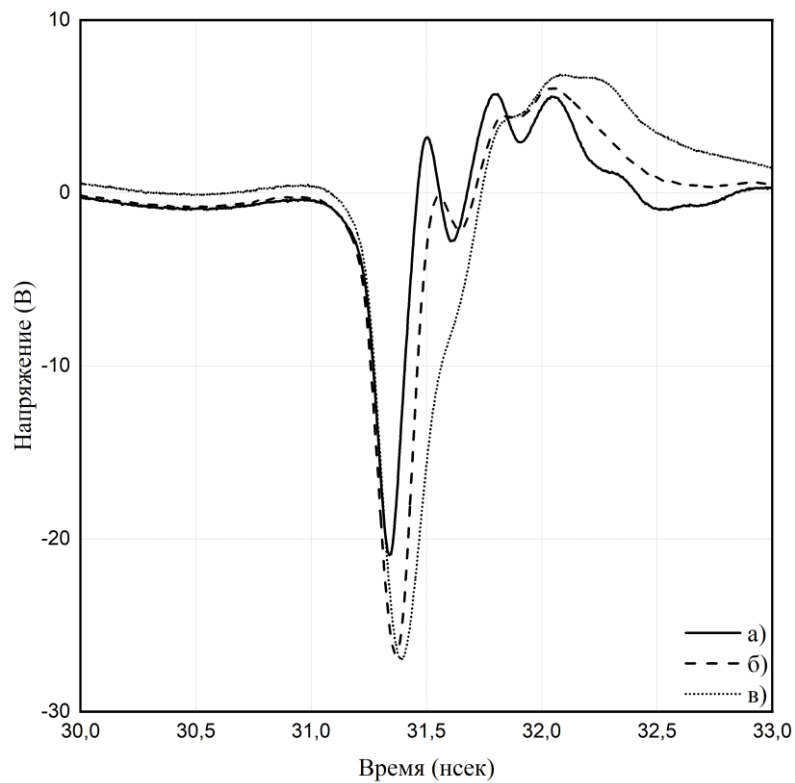


Рисунок 3.5 – Зависимость амплитуды выходного импульса от времени при фиксированном  $V_1 = 2.1$  В и а)  $V_3 = 2.0$  В, б)  $V_3 = 2.5$  В, в)  $V_3 = 3.5$  В

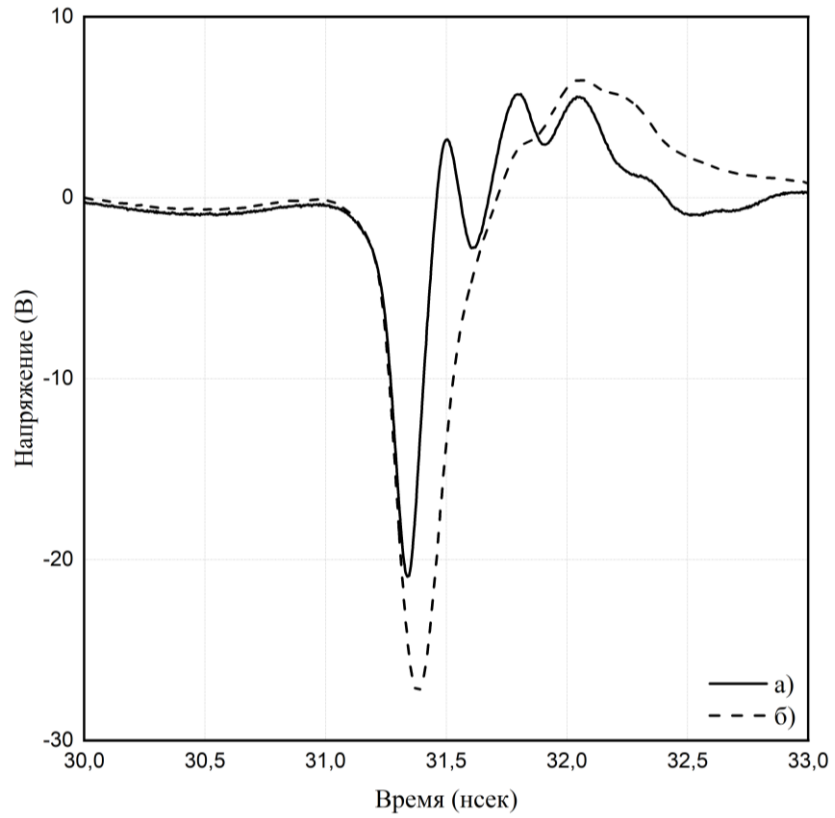
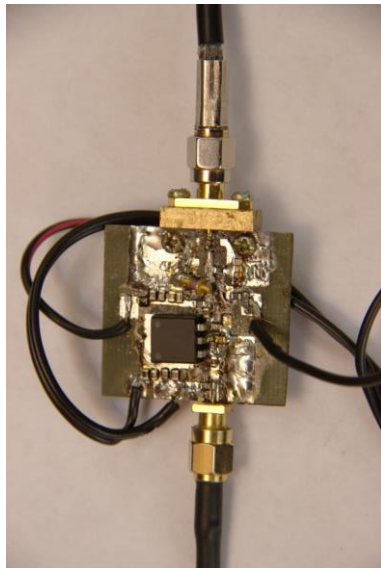
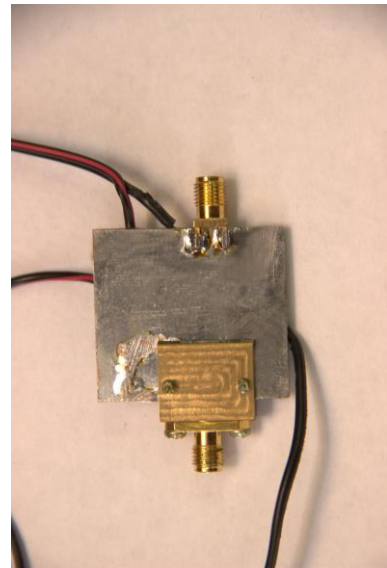


Рисунок 3.6 – Осциллограммы импульса на выходе генератора  
а) длительностью 120 пс, б) длительностью 230 пс



а)



б)

Рисунок 3.7 – Внешний вид экспериментальной модели генератора  
СКИ на ДНЗ с обострителем фронта импульсов:  
а) лицевая сторона, б) обратная сторона

в данной схеме имеется возможность управлять длительностью генерируемого импульса в широких пределах с помощью изменения режимов ее работы.

### 3.2. Генератор СКИ с импульсным накоплением заряда в ДНЗ

Формирование СКИ можно реализовать, используя схему с индуктивным накопителем энергии (см. рисунок 2.3(б)). Принцип работы ее заключается в следующем. В начальный момент времени  $t_0$ , когда транзистор  $VT_1$  закрыт, через диод с накоплением заряда  $SRD_1$  и индуктивность  $L_1$  протекает прямой ток накачки от положительного источника питания  $V_1$ . При этом диод оказывается смещенным в прямом направлении. Образовавшиеся на границе раздела легированных областей и  $I$ -области полупроводниковые переходы смещаются в прямом направлении. При этом осуществляется инжекция дырок и электронов из  $p+$  и  $n+$  областей в активную область диода, то есть происходит процесс накопления заряда в диоде. Также следует отметить, что в следствие амбиполярной диффузии часть электронов и дырок оказывается в собственном полупроводнике за границей активной области [73, 78]. В результате этого накапливается так называемый «паразитный заряд» [45, 112, 113]. В момент  $t_1$ , когда на затвор транзистора  $VT_1$  приходит импульс с запускающего генератора  $V_{зап}$ , транзистор открывается, и анод диода  $SRD_1$  оказывается подключен к источнику напряжения отрицательной полярности  $V_2$ . Так как в полупроводниковой структуре накоплен заряд, диод находится в проводящем состоянии, и в данный момент через него и индуктивность  $L_1$  начинает протекать обратный ток. Величина данного тока определяется параметрами схемы и напряжением источника питания  $V_2$ . Протекающий через диод обратный ток начинает накапливать магнитную энергию в катушке  $L_1$  и одновременно рассасывать накопленный в диоде заряд. За счёт этого момент времени  $t_2$ , когда концентрация носителей на границе одной из областей диода станет равной нулю, можно считать началом переключения диода. В течение времени, которое определяется как время переключения диода –  $\tau_{пер}$ , оставшиеся

носители зарядов покидают активную область диода. Одновременно с этим происходит удаление накопившегося паразитного заряда, сконцентрированного за пределами активной области диода. В результате этого обратное сопротивление диода резко возрастает, он переходит в непроводящее состояние при обратном смещении, ток в цепи диода резко обрывается, и вся накопленная в индуктивности энергия выделяется в нагрузке  $R_n$  в виде сверхкороткого импульса отрицательной полярности.

На основе схемы, изображенной на рисунке 2.3(б), была построена модель генератора. Для моделирования ДНЗ в режиме переключения была использована SPICE-модель на основе результатов работы [78]. Данная SPICE-модель помимо выводов, моделирующих анод и катод ДНЗ, имеет соединения, с помощью которых можно оценить накапливаемые паразитный заряд и заряд активной области.

Параметры формируемых импульсов зависят от величины прямого тока, то есть от смещения диода. Как показано в работе [83] длительность генерируемого импульса складывается из длительностей его переднего и заднего фронтов. Длительность заднего фронта в основном определяется величиной накопленного в диоде паразитного заряда и значением индуктивности, используемой в схеме. При увеличении ее номинала или протекающего обратного тока происходит рост амплитуды СКИ. Однако при этом происходит заметное возрастание его длительности. Передний же фронт определяется параметрами самого ДНЗ, в частности временем его переключения. Как уже было экспериментально установлено, 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 зарядов, переносимых этой плазмой и паразитного заряда. 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 [78]. При этом увеличивается и ширина генерируемого импульса.

В диссертации 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 этом случае стадия накопления заряда в активной области диода определяется постоянной времени LC-цепи, а длительность формируемого импульса определяется значением индуктивности. Для того, чтобы сформировать импульс требуемой длительности, необходимо задать значение индуктивности. Далее, для минимизации накапливаемого паразитного заряда осуществляется подбор значения емкости и длительности запускающего импульса.

В данной работе предлагается использовать в качестве таких импульсов накачки сверхкороткие импульсы. Предполагается, что это позволит уменьшить величину накапливаемого паразитного заряда в структуре диода и, следовательно, сократить время переключения, уменьшив тем самым длительность генерируемого импульса.

Основой предлагаемой схемы с последовательным возбуждением (рисунок 3.8) является блок накачки. Он представляет собой генератор СКИ, построенный по классической схеме, на выходе которого формируются импульсы длительности 250 пс и амплитудой 70 В, что затруднительно реализовать на классической элементной базе. Оставшаяся часть данной схемы представляет собой соединение колебательного  $L_1C_1$ - контура, диода с накоплением заряда  $SRD$  и нагрузки  $R_n$ .

Схемы, изображенные на рисунках 2.3(б) и 3.8, настроены таким образом,



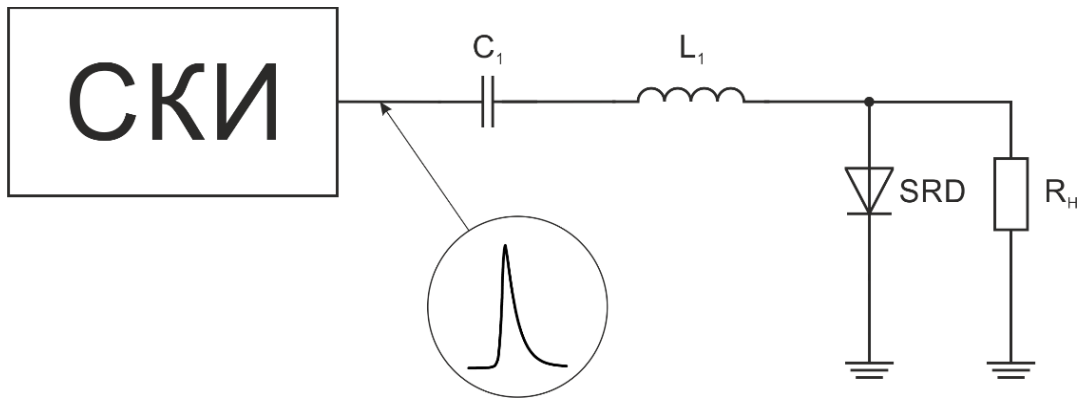


Рисунок 3.8 – Схема генератора СКИ с последовательным возбуждением

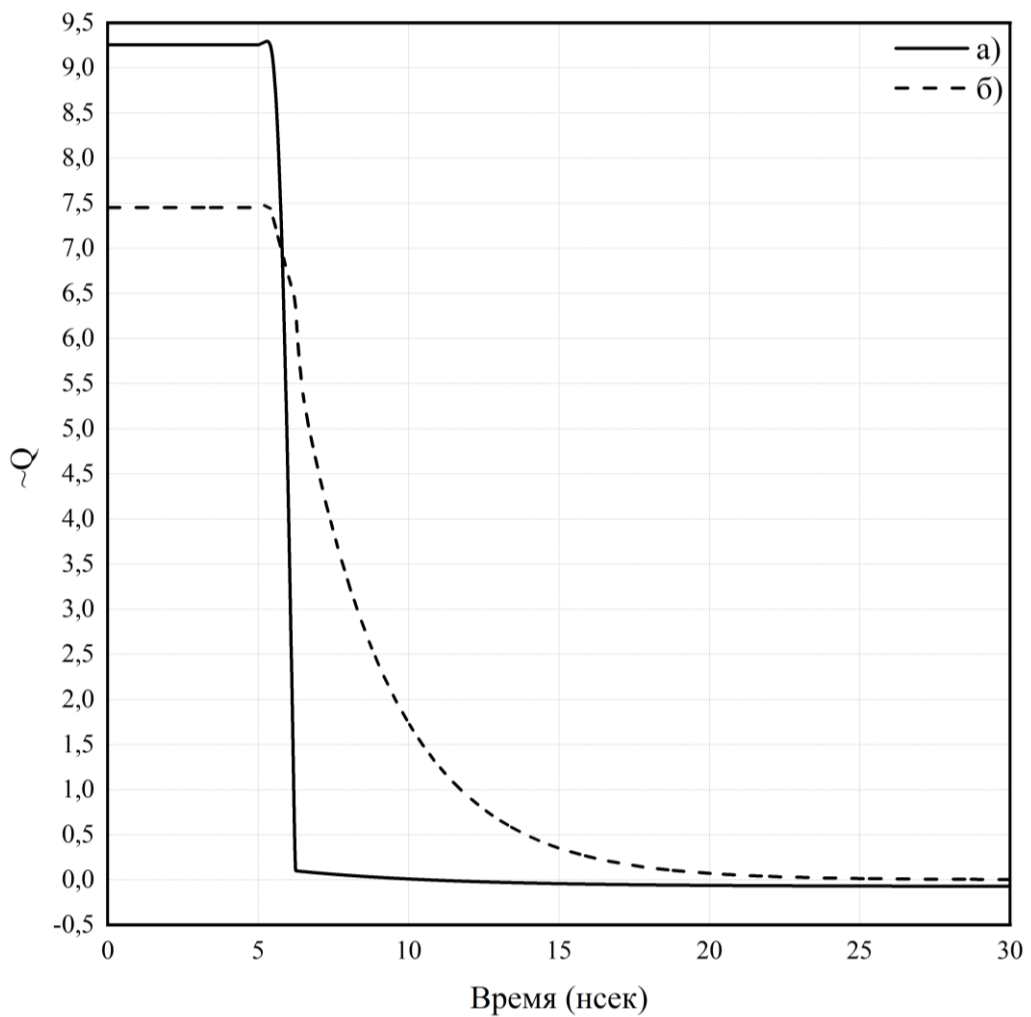


Рисунок 3.9 – Временные зависимости величин, пропорциональных накопленным зарядам а) в активной области, б) вне активной области (паразитный заряд), для классической схемы генерации

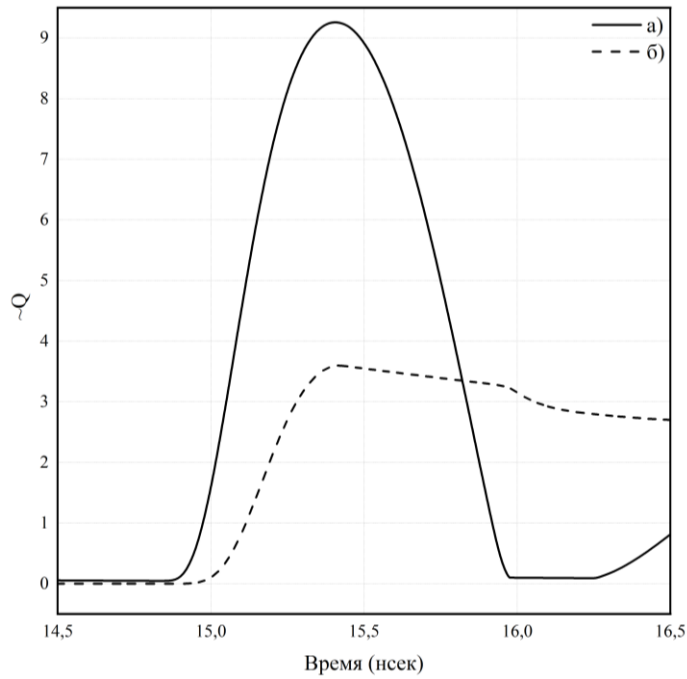


Рисунок 3.10 – Временные зависимости величин, пропорциональных накопленным зарядам а) в активной области, б) вне активной области (паразитный заряд) для схемы с последовательным возбуждением

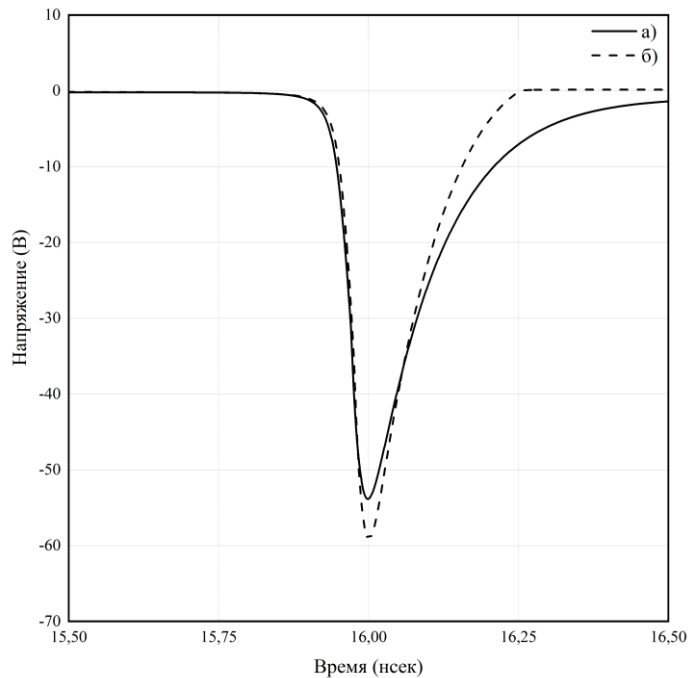


Рисунок 3.11 – Осциллограммы импульсов, сгенерированных а) классической схемой генерации СКИ, б) предложенной схемой

чтобы диоды, участвующие в генерации импульсов, работали в одинаковых режимах. Выполнить это условие можно, обеспечив равенство зарядов, накопленных в активной области ДНЗ. На рисунке 3.9 изображены временные зависимости, пропорциональные накопленным зарядам в активной области ДНЗ и вне ее (паразитный заряд) для схемы классического генератора. На рисунке 3.10 изображены аналогичные зависимости для схемы с последовательным возбуждением. Зависимости, характеризующие паразитный заряд, изображены в масштабе для удобства их анализа.

Из представленных рисунков видно, что обе схемы работают в одинаковых режимах, а именно максимальный накопленный заряд в активной области ДНЗ в обеих схемах совпадают. Однако также видно, что величина паразитного заряда, накопленного в диоде в схеме с последовательным возбуждением, практически в два раза меньше, чем в классической схеме. На рисунке 3.11 представлены осциллограммы генерируемых импульсов, полученных с помощью классической схемы и схемы с последовательным возбуждением.

Видно, что предложенная схема с последовательным возбуждением дает выигрыш по амплитуде импульса около 5 В по сравнению с классической схемой. Объяснить это можно следующим образом. Часть энергии, которая до этого (в классической схеме) тратилась на довольно длительный процесс удаления паразитного заряда из полупроводниковой структуры диода, теперь, за счет уменьшения величины этого заряда, позволила увеличить амплитуду генерируемого импульса. На рисунке 3.11 отчетливо видно, что длительности данных импульсов также отличаются. Задний фронт импульса, полученного с помощью классического решения, является затянутым по сравнению с сформированным СКИ предлагаемой в данной работе схемой с последовательным возбуждением. Таким образом, уменьшение паразитного заряда, накопленного вне  $I$ – области ДНЗ, приводит к уменьшению длительности заднего фронта. В результате этих процессов суммарная ширина импульса увеличивается.

### 3.3. Обострение сверхкоротких импульсов с помощью нелинейной линии передачи

При проектировании современных сверхширокополосных (СШП) систем связи необходимо удовлетворять требованиям, предъявляемым к генерируемым с их помощью сигналам. Сверхкороткие импульсы, используемые в качестве таких сигналов, должны иметь достаточно большую амплитуду (десятки вольт) и небольшую длительность (порядка нескольких сотен пикосекунд) для обеспечения требуемой ширины спектра сигнала. Обычно для сокращения длительности формируемых СКИ в генераторах применяют обострители, построенные на полупроводниковых размыкателях тока (например, на диодах с накоплением заряда). Однако элементы, способные обеспечить значительное сокращение ширины импульса благодаря малому времени переключения, имеют высокую стоимость. Альтернативным решением является использование в генераторе в качестве обострителя нелинейных линий передачи (НЛП). Импульс, распространяясь вдоль такой линии, сужается за счет ее отрицательной дисперсии [12, 13, 53]. В данном разделе диссертации обсуждаются принципы работы НЛП, позволяющие использовать их в качестве обострителя СКИ, а также представлены результаты экспериментальных исследований по уменьшению длительности СКИ.

Нелинейная сосредоточенная линия передачи представляет 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 (см. рисунок 3.12 (а)).

Скорость распространения фазы импульса напряжения по НЛП выражается как (3.1):

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC(V)}}, \quad (3.1)$$

где  $L$  представляет собой индуктивность линии передачи, а  $C(V)$  – емкость линии, зависящая от напряжения. Если нелинейная емкость увеличивается с ростом приложенного к ней напряжения, то скорость распространения импульса вдоль линии растет. Это означает, что пик импульса напряжения будет распространяться быстрее, чем восходящий фронт, и попытается обогнать низковольтную часть, как показано на рисунке 3.13, образуя крутую переднюю ударную волну, крутизна которой в конечном счете ограничена дисперсией линии.

Уменьшение времени нарастания широкого импульса с помощью NLTL рассчитывается как:

$$\Delta t = n(\sqrt{LC_0} - \sqrt{LC(V_{max})}), \quad (3.2)$$

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  $\Delta t$ . Из рисунка 3.13 видно, что эта величина определяется как  $t_{r1} - t_{r2}$ , что также равно  $\delta 1 - \delta 2$ . Таким образом,  $t_{r2}$ , являющееся временем нарастания сжатого импульса, равно  $t_{r1} - \Delta t$ . Однако, если  $t_{r1} < \Delta t$ , импульс преобразуется в последовательность солитонов [12].

В данной работе в качестве нелинейной емкости использовались полупроводниковые диоды, смещенные в обратном направлении. Нелинейная зависимость емкости от приложенного напряжения основана на том факте, что ширина области пространственного заряда перехода зависит от приложенного смещения. Нелинейная вольт-фарадная характеристика р-п перехода диода может быть аппроксимирована следующей функцией [32]:

$$C(V) = \frac{C_0}{(1 + V/V_j)^M}, \quad (3.3)$$

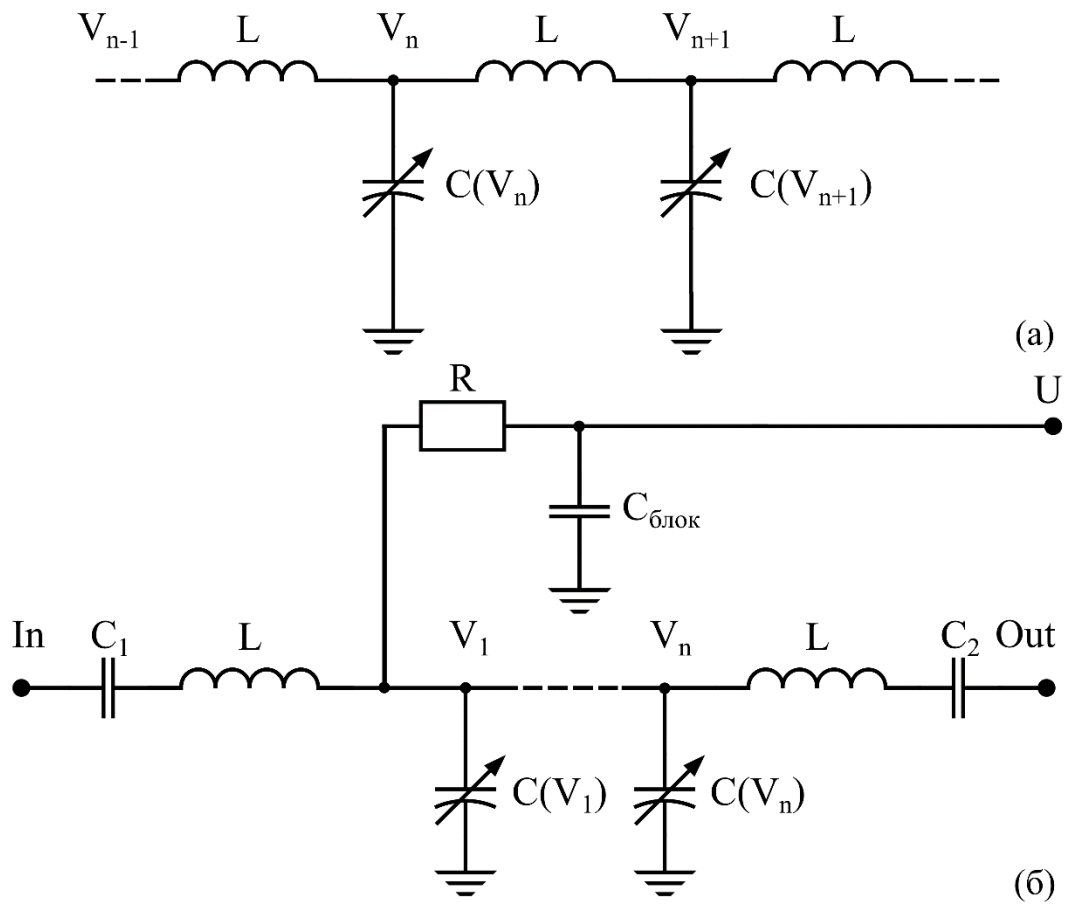


Рисунок 3.12 - Нелинейная линия передачи, состоящая из  $n$  секций (а), и с цепью управления длительностью выходных импульсов (б)

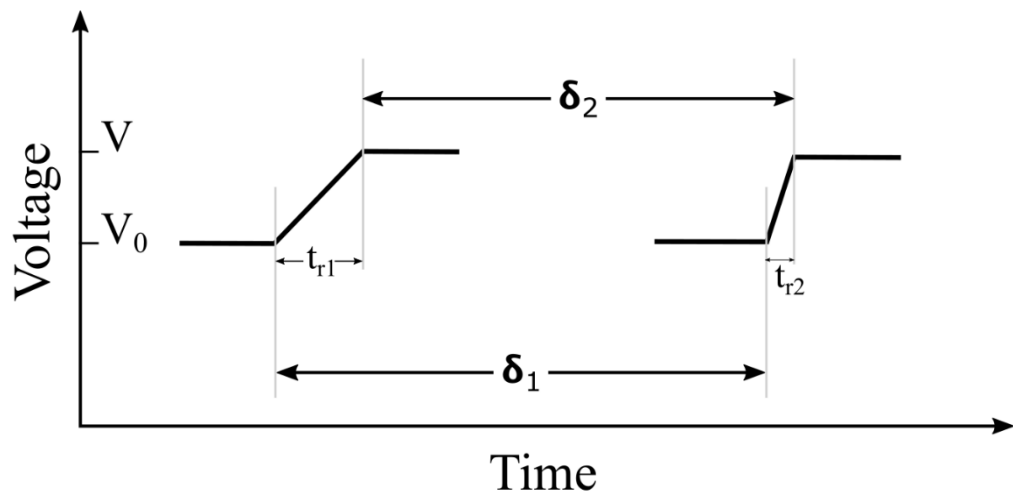


Рисунок 3.13 – Сжатие импульса в нелинейной линии передачи

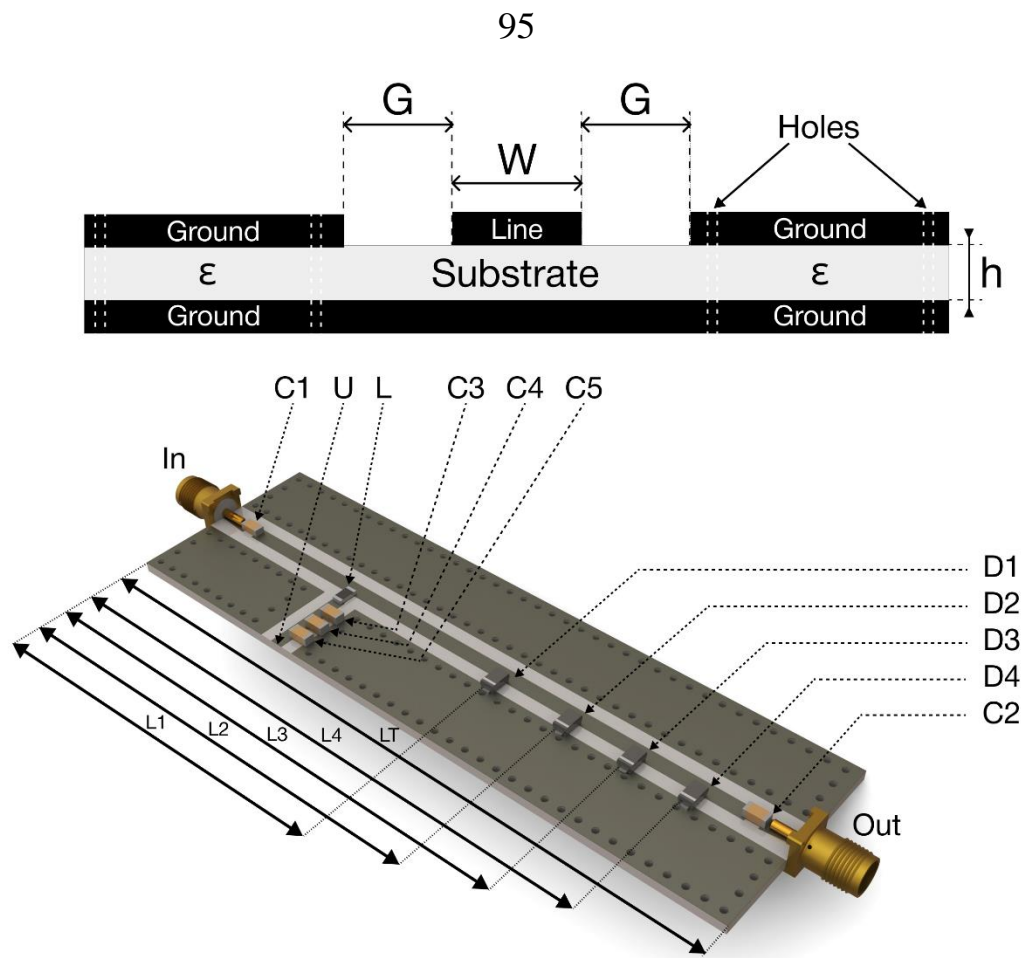


Рисунок 3.14 – Нелинейная линия передачи, выполненная в виде заземленного копланарного волновода, на основе диодов BB833 и BB131

где  $M$  – порядок нелинейности,  $V_j$  и  $V$  представляют собой контактная разность потенциалов и прикладываемое к диоду напряжение, соответственно. Прикладывая обратное смещение к диоду, ширина области истощения полупроводника увеличивается, и, следовательно, общая емкость диода становится меньше.

Для того, чтобы предотвратить разложение импульса на солитонные волны, нелинейная линия передачи формируется из нескольких последовательно соединенных секций. Индуктивности в секциях могут иметь одинаковый номинал [12], однако, используя индуктивности и емкости в каждой последующей секции меньше по номиналу, чем в предыдущей, можно добиться лучшей производительности НЛП [13]. Линейные индуктивности могут быть реализованы в виде заземленных копланарных волноводов. Величины этих индуктивностей достаточно низкие и определяются длиной линии передачи. На данный момент не существует единого правила для расчета индуктивностей, входящих в состав NLTL, для сжатия импульсов. В [13] расстояния между варикапами изменялись в соответствии с законом геометрической прогрессии, тогда как в [32, 53] индуктивности и емкости уменьшаются пропорционально номеру секции, в которой они установлены.

Рисунок 3.12 (б) демонстрирует схему нелинейной линии передачи, которая позволяет управлять варикапами посредством изменения напряжения смещения  $U$ . В данном случае выражение (3.2) может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta t = n(\sqrt{LC(U)} - \sqrt{LC(V_{\max} + U)}). \quad (3.4)$$

Если напряжение смещения  $U$  увеличивается,  $\Delta t$  уменьшается. 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 вариантов были установлены в соответствии с документацией к реальным диодам модели



ВВ131 [39]. Параметры этой НЛП были получены с помощью многопараметрической оптимизации и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры нелинейной линии передачи

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Диоды D1 – D4	ВВ131	C3 (пФ)	100
L1 (мм)	48	C4 (нФ)	10
L2 (мм)	65	C5 (нФ)	1
L3 (мм)	76	R (кОм)	10
L4 (мм)	83	W (мм)	1.69
LT (мм)	100	G (мм)	0.7
h (мм)	0.76	$\epsilon_r$	3.66
C1 (пФ)	100	DF тан, $\delta$	0.0037
C2 (пФ)	50	U (В)	0–30

С использованием полученной модели (см. рисунок 3.14) на печатной плате была реализована нелинейная линия передачи с использованием диодов ВВ131 [39] в качестве варикапов. Так, длина линии  $LT$  и ширина  $W$  равны 100 мм и 1.69 мм соответственно, что обеспечивает ее хорошее согласование с 50 Ом нагрузкой.

Как было показано экспериментально в [32, 53], оптимальное расположение варикапов  $L_i$  на НЛП в контексте сжатия распространяющего импульса соответствует соотношению:  $L_i = LT/(N+1)$ , где  $N$  – номер варикапа,  $i$  начинается с 2-х, а  $LT$  представляет собой общую длину линии передачи. При этом,  $L1 \approx LT/2$ . Данные соотношения полностью подтвердились результатами моделирования (см. Таблицу 1), проведенного в данной работе. Поэтому далее, на основе полученных значений на печатную плату последовательно устанавливались диоды ВВ131.

Входной импульс, подаваемый на НЛП, формировался с помощью генератора, описанного в [1]. Однако, в данной работе вместо ДНЗ с малым временем переключения (MAVR-044769) были использованы менее дорогие диоды KD609B. Амплитуда входного сигнала составляла 57 В и длительность была порядка 340 пс. Выход НЛП (Out) был подключен ко входу стробоскопического

осциллографа DCA-X 86100D с полосой пропускания 20 GHz и входным сопротивлением равным 50 Ом. Рабочая точка на вольт-фарадной характеристике варикапов устанавливалась при помощи напряжения, подаваемого через резистор R, номиналом в 10 кОм. C3 – C5 на рисунке 3.14 представляют собой блокировочные конденсаторы, емкости которых были выбраны равными 100 пФ, 10 нФ и 1 мкФ, соответственно. Величина напряжения смещения  $U$ , подаваемая с лабораторного источника напряжения, варьировалась в пределах от 0 до 30 В.

На рисунке 3.15 представлены экспериментальные зависимости длительности импульса от количества секций, смонтированных на печатную плату, для обеих НЛП. Длительность импульса определялась по уровню половины амплитуды. Из рисунка видно, что по мере увеличения количества секций ширина импульса уменьшается, а задержка его генерации увеличивается. Незначительное уменьшение амплитуды происходит из-за ослабления сигнала в подложке. Таким образом, используя менее дорогие ДНЗ совместно с НЛП, удалось добиться такой же длительности импульса, как и для ДНЗ с меньшим временем переключения [1].

Рисунок 3.16 демонстрирует зависимость длительности импульса от напряжения смещения  $U$ . Видно, что минимальная длительность импульса соответствует напряжению смещения 2,4 В. При этом наблюдается сжатие ширины импульса на 100 пс. Максимальная длительность импульса соответствует максимальному напряжению смещения  $U$ . Таким образом, схема, описанная на рисунке 3.16, позволяет достаточно просто управлять длительностью генерируемого импульса.

Рисунок 3.17 иллюстрирует осциллограммы импульсов, получаемые на выходе НЛП при различных значениях напряжения смещения  $U$ . Сплошная линия показывает форму входного СКИ, подаваемого на НЛП. Из рисунка видно, что задержка генерации импульса и его амплитуда существенно не изменяются при изменении напряжения смещения. Таким образом, предложенный в данной статье метод может быть использован для управления длительностью импульса с малым джиттером и изменением амплитуды. Изменение амплитуды импульса не

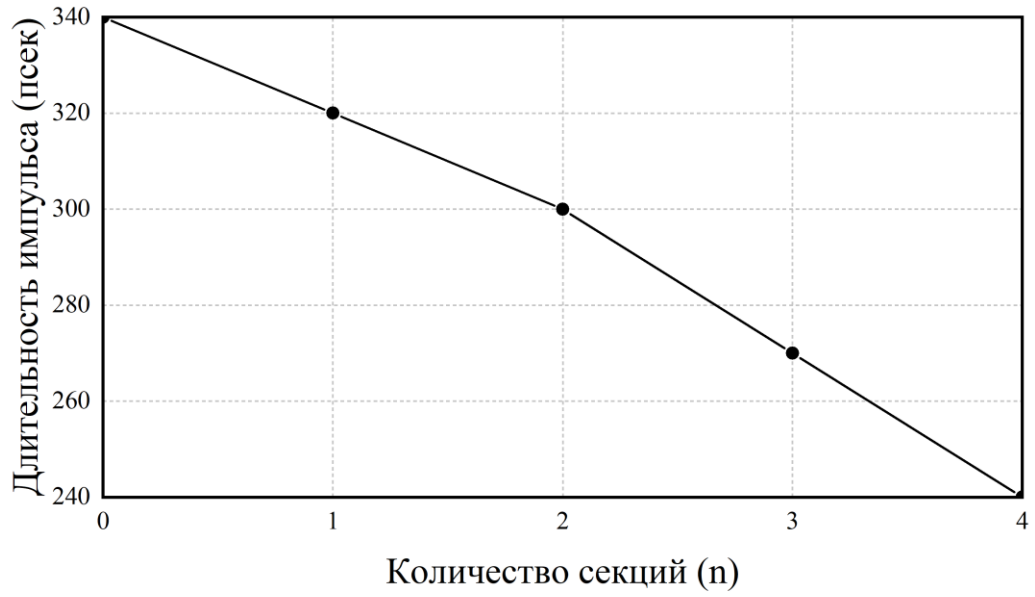


Рисунок 3.15 – Зависимость длительности формируемых импульсов от количества секций в НЛП

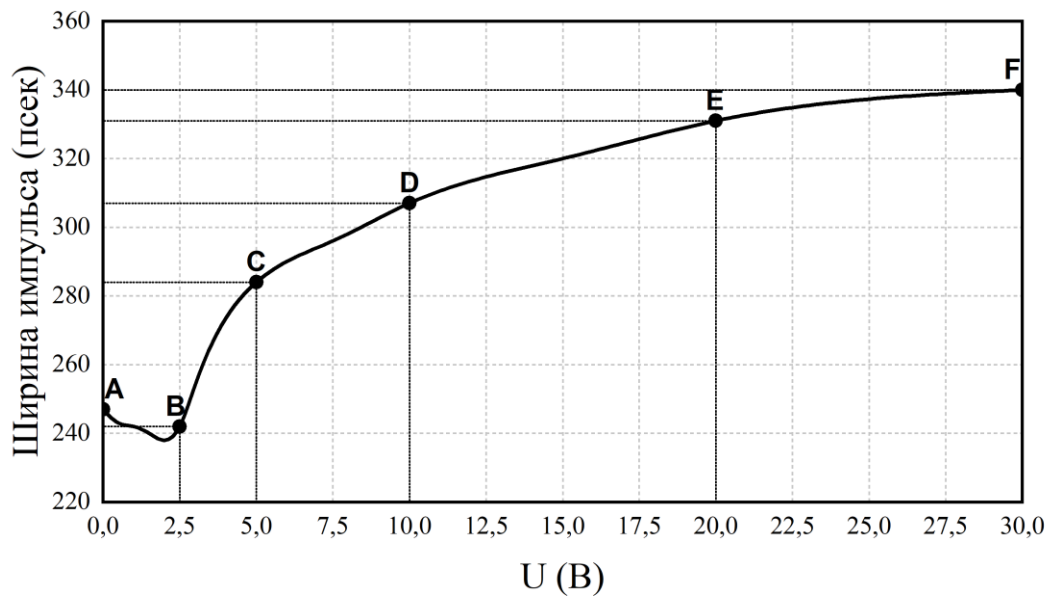


Рисунок 3.16 – Зависимость длительности импульса от напряжения смещения U

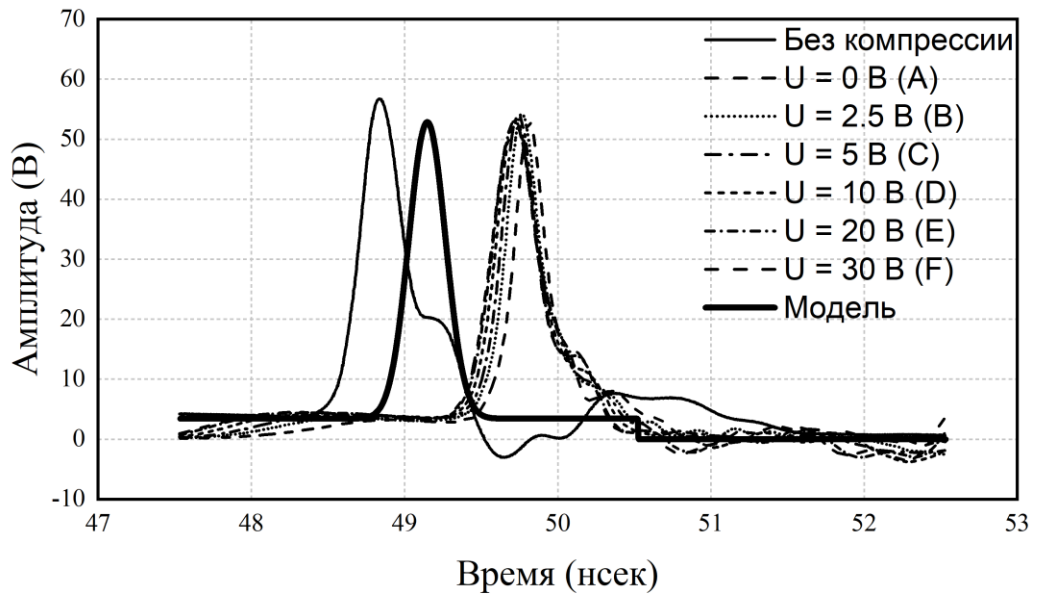


Рисунок 3.17 – Осциллограммы импульсов, получаемые на выходе НЛП при различных значениях напряжения смещения  $U$

превышает 3 В (около 5%). Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Поэтому на рисунке 3.17 для наглядности представлена только одна кривая (жирная линия), которая соответствует форме смоделированного импульса (с наименьшей шириной).

## **Выводы**

В данной главе было произведено исследование экспериментальной модели генератора сверхкоротких импульсов на основе диодов с накоплением заряда с обострителем фронта импульса и режимов его работы. Использование данной схемы позволило получить на выходе импульс, длительностью почти в два раза меньше, чем импульс, полученный с помощью классической схемы. Также в работе предложена схема генерации сверхкоротких импульсных сигналов с последовательным возбуждением, позволяющая уменьшить величину накопленного в ДНЗ паразитного заряда. Проведено моделирование представленной схемы. Показано, что использование в качестве импульса накачки СКИ позволяет получить выигрыш в амплитуде и длительности генерируемого импульса по сравнению с классической схемой генерации. В данной главе также предложено решение, основанное на эффектах, возникающих в нелинейных линиях передачи, которое позволяет уменьшить длительность импульса с 350 пс до 210 пс, сохраняя при этом его амплитуду практически неизменной, а также дает возможность плавно управлять длительностью импульсов с помощью изменения напряжения смещения. Если на вход NLTL подавать более короткий импульс, то в таком случае эффективность его сжатия была ниже. Из полученных результатов был сделан вывод, что существует минимальная длительность импульса, меньше которой спроектированные линии не позволяют сжать входной сигнал.

#### **ГЛАВА 4. Разработка автоматизированного программно-аппаратного измерительного комплекса параметров ДНЗ**

С целью исследования разброса технологических параметров диодов с накоплением заряда и их влияния на длительность и амплитуду (как основных энергетических характеристик) формируемых с их помощью сверхкоротких импульсов в диссертации было предложено разработать программный автоматизированный измерительный комплекс (ПАИК ДНЗ) [1, 75, 74, 82, 82], который бы позволил экспериментально измерить необходимые импульсные характеристики диодов с накоплением заряда, определить зависимость формы, длительности и амплитуды формируемых с их помощью сверхкоротких импульсов от измеренных параметров. Данный программный комплекс также должен быть полностью автоматизированным и проводить указанные измерения без участия человека с возможностью управления программируемыми источниками питания.

Чтобы реализовать поставленные в данной диссертации цели необходимо было выполнить ряд задач. Для реализации исследования разброса параметров диодов с накоплением заряда сперва стояла задача спроектировать и разработать измерительный модуль, который бы позволил производить измерения переходных характеристик и требуемых импульсных параметров диодов с накоплением заряда в разных типах корпусов, а также поддерживал бы установку нескольких последовательно соединенных ДНЗ. Это можно было осуществить только путем разделения измерительного модуля на два блока – непосредственно на измерительный блок и некое устройство, позволяющее устанавливать один или несколько ДНЗ последовательно с использованием различных корпусов, не вносящее при этом рассогласований и помех в общую работу устройства. Блок-схема, принципиальная схема и принцип работы разработанного измерительного модуля подробно изложены в главе 1. Далее было необходимо произвести сборку описанного модуля, измерительного оборудования, источников питания, персонального компьютера в единую измерительную установку. Впоследствии

были реализованы программные модули, отвечающие за связь измерительного оборудования и измерительного модуля, а также за обработку данных, поступающих с измерительного оборудования. И, наконец, была написана программная часть, которая позволяет в автоматическом режиме управлять программируемыми источниками питания.

Для реализации цели исследования влияния разброса параметров ДНЗ на формируемые с их помощью импульсы стояла задача разработать генератор сверхширокополосных импульсов квазигауссовой формы на основе ДНЗ и индуктивного накопителя энергии. При этом этот генератор должен иметь возможность подключаться к описанной выше установочной колодке для ДНЗ для возможности исследования диодов в разных корпусах, а также их последовательного соединения.

В данной главе подробно описаны процесс разработки, устройство, принцип действия и графический интерфейс пользователя ПАИК ДНЗ для измерения параметров ДНЗ и влияния их на формируемых с их помощью сверхширокополосных импульсов.

#### **4.1. Общая схема измерительного комплекса**

Для измерения описанных в главе 1 основных импульсных параметров в данной работе был разработан программный автоматизированный измерительный комплекс (ПАИК ДНЗ) для определения параметров диодов с накоплением заряда [1, 75, 74, 82, 82]. Блок-схема данного комплекса представлена на рисунке 4.1. В состав данного комплекса входят непосредственно измерительный модуль, установочная колодка, стробоскопический осциллограф с полосой пропускания 20ГГц Agilent DCA-X 86100D, генератор импульсов Agilent 81104A, программируемый источник напряжения Rigol DP832A и персональный компьютер с установленным пакетом прикладных программ MATLAB.

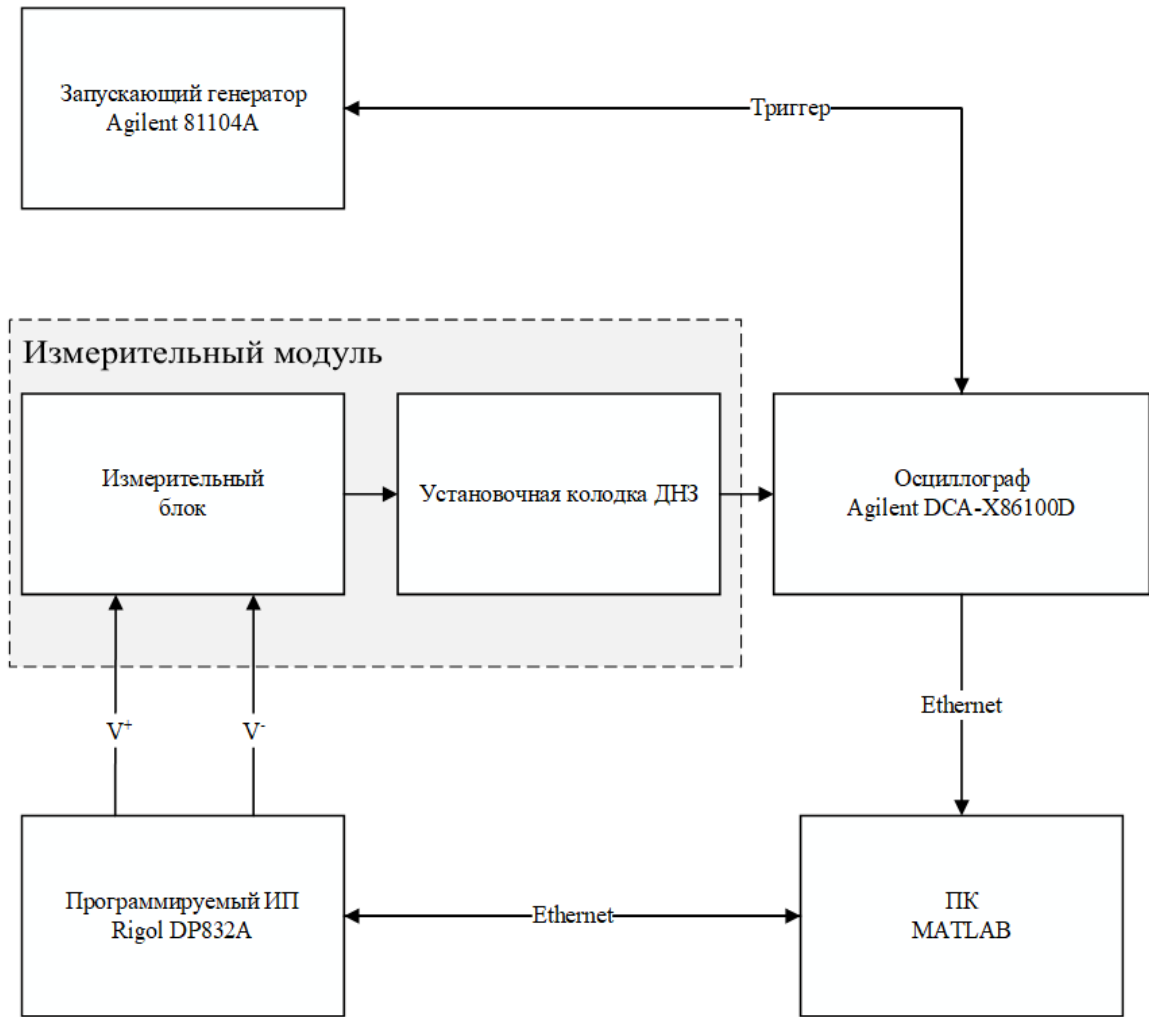


Рисунок 4.1 – Блок-схема ПАИК ДНЗ



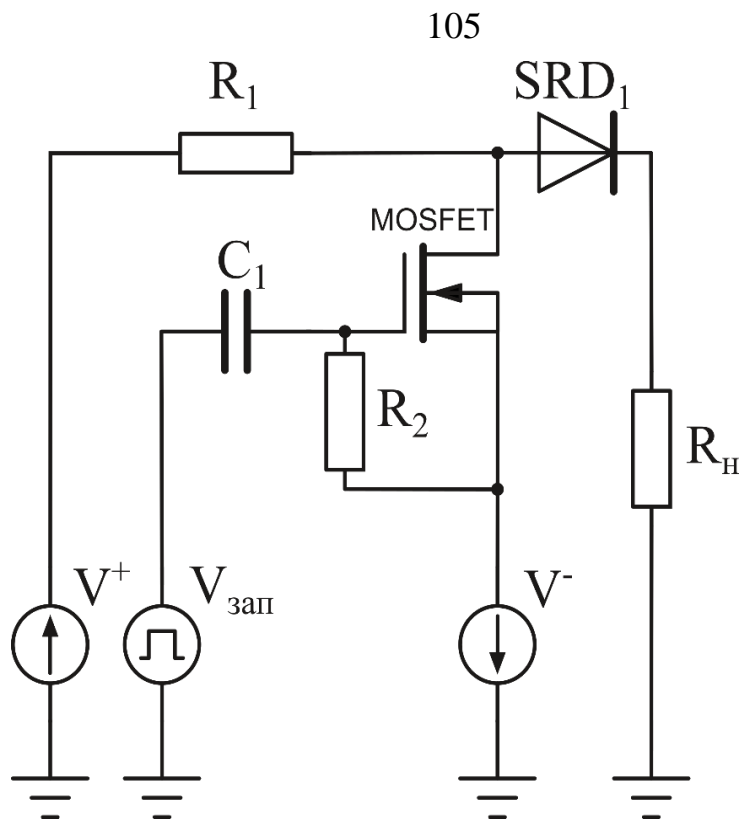


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема измерительного модуля

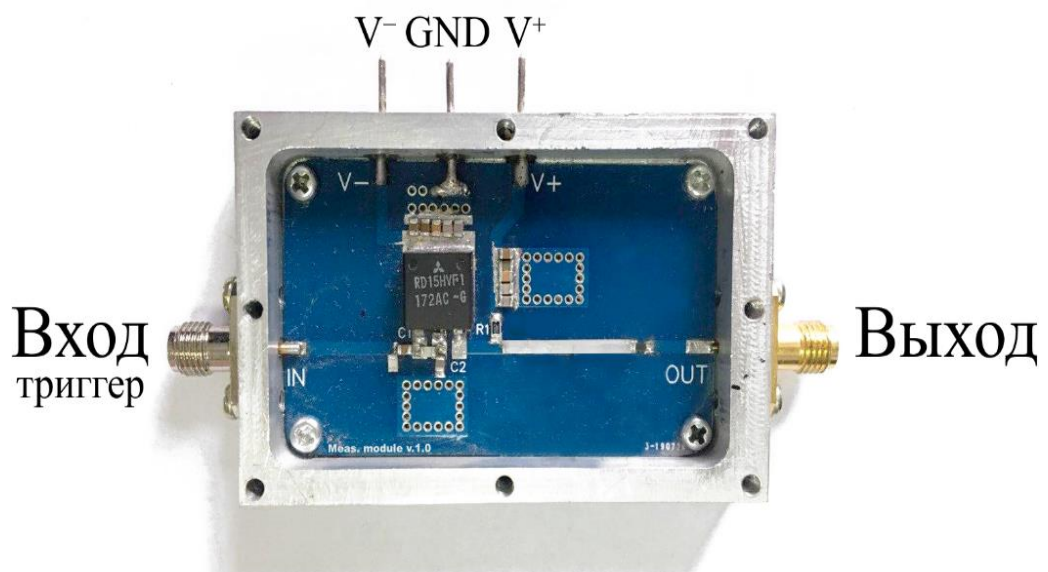


Рисунок 4.3 – Фото готового измерительного модуля

## 4.2. Модули измерительного комплекса

Ключевым звеном описанного комплекса является измерительный модуль. На рисунке 4.2 изображена его принципиальная схема, а рисунок 4.3 иллюстрирует его внешний вид. Изначально полевой транзистор *MOSFET* находится в закрытом состоянии. Диод с накоплением заряда *SRD<sub>1</sub>* своим анодом соединён с положительным выводом источника напряжения  $V^+$ . В результате протекания прямого тока накачки от источника напряжения  $V^+$  через диод *SRD<sub>1</sub>* и токоограничивающий резистор  $R_I$  в течение некоторого времени в полупроводниковой структуре ДНЗ устанавливается равновесное состояние электронно-дырочной плазмы. В диоде накапливается некоторый заряд, величина которого зависит от величины тока накачки  $I_{np}$ , протекающего через диод в течение этой фазы, а также процессами рекомбинации, происходящими в ДНЗ. В тот момент, когда на затвор полевого транзистора *MOSFET* поступает прямоугольный импульс положительной полярности от запускающего генератора  $V_{зан}$  (Agilent DCA-X 86100D), транзистор открывается. В этот момент от источника напряжения отрицательной полярности  $V^-$  через транзистор *MOSFET* диод *SRD<sub>1</sub>* начинает протекать обратный ток, так как величина напряжения  $V^-$  по модулю превосходит величину напряжения  $V^+$ . Свой вклад в величину тока рассасывания  $I_{обр}$  вносят как процесс рассасывания электронно-дырочной плазмы в активной области диода, её рекомбинация, так и удаление накопленного в сильнолегированных областях ДНЗ заряда паразитного характера. Так как все процессы занимают конечное время, то удаление заряда не начинается сразу после переключения транзистора в проводящее состояние. Накопленная за предыдущий этап работы ДНЗ электронно-дырочная плазма начинает удаляться только в тот момент, когда обратный ток  $I_{обр}$  сравняется с током накачки  $I_{np}$ . В этот момент начинается вторая фаза работы ДНЗ. По её окончании, когда суммарный заряд удалится из полупроводниковой структуры, происходит резкое восстановление высокого обратного сопротивления диода и обратный ток в цепи также резко обрывается.

Чтобы изменить величину тока накачки и, как следствие, величину накопленного в диоде заряда за время первой стадии его работы, необходимо изменить величину напряжения на источнике  $V^+$ . А изменение значения напряжения на источнике  $V^-$  приводит к изменению скорости рассасывания накопленного заряда во время второй стадии.

В качестве указанных источников  $V^+$  и  $V^-$  в работе были использованы два канала трёхканального линейного программируемого прецизионного источника питания Rigol DP832A (см. рисунок 4.1). Эти каналы позволяют получить на выходе напряжения в диапазоне от 0 до 30 В при силе тока от 0 до 3 А с погрешностью порядка 0,05 % по напряжению и 0,2 % по току. Каждый из каналов даёт возможность удалённого управления выходными величинами посредством нескольких протоколов. В данной работе регулировка выходных напряжений обоих каналов для управления режимами работы измерительного модуля осуществлялась с помощью протокола Ethernet. Измерительный комплекс позволяет управлять режимами работы каждого канала независимо с помощью стандартных команд для программируемых приборов SCPI, что позволяет использовать в данном комплексе любые программируемые источники питания, которые поддерживают эту систему команд. Автоматизация регулировки напряжений источника питания позволила заметно ускорить процесс измерения каждого диода, а также снизить влияние человеческого фактора на конечную точность измерений.

В качестве источника запускающего сигнала был использован генератор Agilent 81104A (см. рисунок 4.1). Прямоугольные импульсы с выхода данного устройства подавались посредством 50-омного коаксиального кабеля на вход измерительного модуля. 50-омный вход стробоскопического осциллографа Agilent DCA-X86100D был использован в качестве нагрузки ( $R_n$  в схеме на рисунке 4.2). Осциллограф фиксирует изменение напряжения на нагрузке, записывает эти данные и отправляет их по протоколу Ethernet на персональный компьютер с установленным пакетом прикладных программ MATLAB. В дальнейшем

программный комплекс по измеренному напряжению пересчитывает значения в ток, протекающий через диод. Программная часть ПАИК ДНЗ позволяет по имеющимся временным зависимостям напряжения определить требуемые импульсные параметры диодов с накоплением заряда, а также автоматизировать и ускорить процесс измерения.

### **4.3. Алгоритм работы измерительного комплекса**

После того, как все модули ПАИК ДНЗ соединены согласно блок-схеме, изображённой на рисунке 4.1, процесс измерения начинается с того, что исследуемый диод устанавливается в установочную колодку, которая даёт возможность быстро и легко устанавливать диоды с накоплением заряда и обеспечивает хорошее согласование. Используя разные установочные колодки, появляется возможность проводить измерение диодов с разным исполнением корпусов без необходимости внесения изменений в конструкцию основного блока измерительного модуля, к выходу которого и подключается колодка посредством разъёма SMA. Фотография установочной колодки изображена на рисунке 1.6.

Далее после запуска программной части на ПК происходит автоматическая установка начального режима работы измерительного модуля. Напряжение на обоих каналах источника питания посредством команд SCPI устанавливается в значение 0.5 В по модулю. ПАИК ДНЗ включает в себя примитивный графический интерфейс, с помощью которого пользователь имеет возможность выставить режим работы всего комплекса (режим измерения переходной характеристики или импульсный режим), задать пределы режима работы измерительного модуля, а также видеть результаты измерений на основной панели.

После выбора режима измерения переходной характеристики и

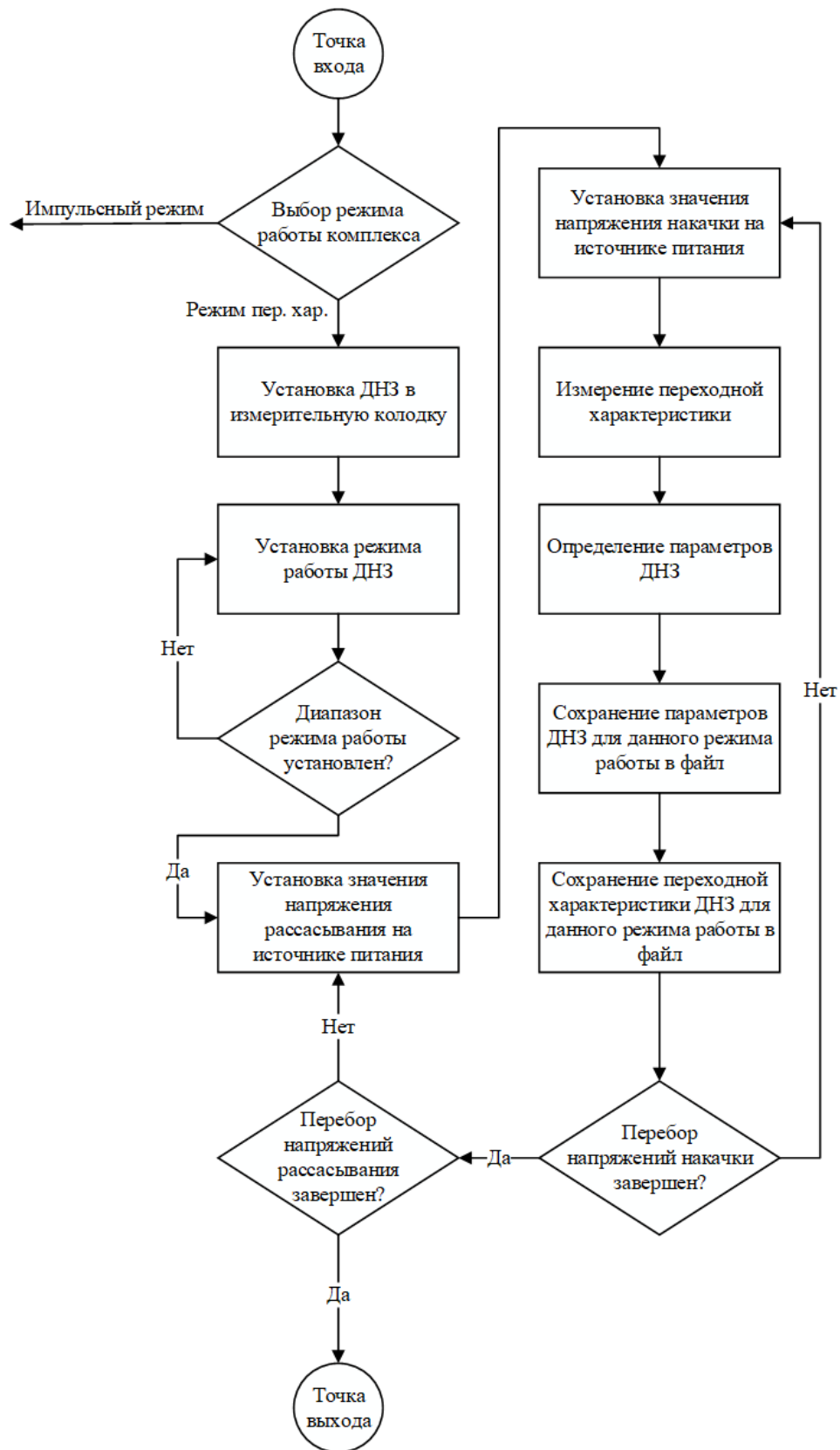


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритма работы ПАИК ДНЗ в режиме измерения переходной характеристики

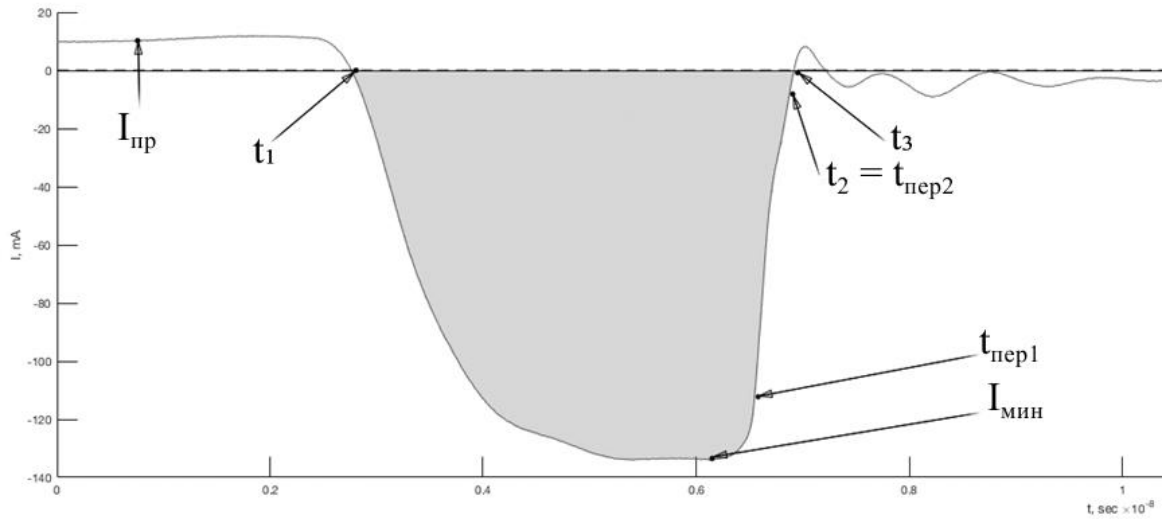


Рисунок 4.5 – Вид переходной характеристики ДЗ, наблюдаемой в окне измерительного комплекса, работающего в режиме измерения

установления диапазона напряжений в графическом интерфейсе можно начинать непосредственно измерение параметров ДНЗ нажатием кнопки «СТАРТ». На рисунке 4.4 представлена блок-схема, отражающая алгоритм работы измерительного комплекса.

После старта измерений программа отправляет команду на источник питания и устанавливает первую пару напряжений  $V^+$  и  $V^-$  из заданного диапазона. Измерительная схема изменяет режим работы диода с накоплением заряда, который можно отследить по осциллограмме, которую отображает на своём экране осциллограф. Осциллограф позволяет производить усреднение осциллограммы по времени для уменьшения влияния шумов. Пользователь имеет возможность установить в интерфейсе временной интервал, по которому будет производиться усреднение. Полученная усреднённая осциллограмма переходной характеристики в режиме реального времени по протоколу Ethernet отправляется на ПК, где её можно также наблюдать в окне графического интерфейса. Данная зависимость сохраняется в текстовый файл в конце измерения.

На основе полученных временных зависимостей протекающего через диод тока (см. рисунок 4.5) в режиме реального времени также происходит измерение импульсных параметров самого ДНЗ.

В первую очередь идёт расчёт статических параметров диода таких как величина прямого тока накачки  $I_{пр}$ , протекающего через диод и модуль минимальной величины обратного тока  $I_{мин}$ . Величина прямого тока накачки определяется как среднее значение тока в течение некоторого длительного времени.  $I_{мин}$  представляет собой минимальное значение тока по графику переходной характеристики. После калькуляции этих статических величин измерительный комплекс определяет длительность фазы высокой проводимости диода с накоплением заряда. Эта фаза ограничена моментами времени  $t_1$  и  $t_2$  и определяется как разность  $t_2 - t_1$ , где  $t_1$  – это момент перехода тока, протекающего через диод, через ноль в область отрицательных значений (соответствует моменту начала удаления накопленного в ДНЗ заряда); а  $t_2$  – момент обрыва тока через диод. Обычно полагают, что обрыв тока завершается тогда, когда его значение

уменьшится до уровня ниже 10% по модулю от значения обратного тока рассасывания (это соответствует моменту полного извлечения заряда из  $I$ -области и прилегающих областей диода).

Как уже было сказано в первой главе величиной заряда  $Q$  по определению является площадь под кривой тока во время проводящей стадии диода, то есть во временном диапазоне между  $t_1$  и  $t_2$  (см. формулу (1.2)). Измерительный комплекс для нахождения величины накопленного заряда производит численное интегрирование по времени всех имеющихся дискретных отсчетов переходной характеристики в течение фазы обратной проводимости. Напряжения рассасывания отрицательной полярности при этом для каждого измерения устанавливалось на минимальное значение (порядка -10 В – -15 В). Это позволяет создать условия, при которых можно пренебречь экстракция носителей значительно превосходит рекомбинацию, а следовательно, при измерениях можно пренебречь зарядом рекомбинации. В результате после установления переходных процессов в полупроводниковой структуре диода найти величину  $Q$ , используя численное интегрирование кривой тока через диод.

Далее измерительный комплекс оценивает длительность переключения ДНЗ  $t_{пер}$ , которая характеризуется наклоном восходящего участка переходной характеристики и определяется как разница между моментами начала переключения  $t_{пер1}$  и конца переключения  $t_{пер2}$  ДНЗ:

$$t_{пер} = t_{пер2} - t_{пер1}. \quad (4.1)$$

Первый момент определяется по уровню 90% от  $I_{мин}$  по модулю. Окончание переключения  $t_{пер2}$  совпадает с моментом времени  $t_2$ , когда диод переходит в непроводящее состояние.

Последний калькулируемый параметр, это  $\tau_{эфф}$  – эффективное время жизни неосновных носителей заряда. Оно вычисляется как отношение величины накопленного заряда  $Q$  к величине прямого тока накачки  $I_{пр}$ .

Все полученные значения параметров, а также сами осциллограммы переходных характеристик измерительный комплекс сохраняет в текстовый файл.



Следующая итерация измерения зависимостей переходной характеристики ознаменуется установкой следующего значения напряжения  $V^+$  из заданного диапазона при неизменном значении  $V^-$ . Измерение переходной характеристики повторяется вновь. Когда все значения напряжений  $V^+$  перебраны, полученный текстовый файл с зависимостями величины напряжения на ДНЗ от величины прямого напряжения при фиксированном обратном сохраняется на ПК в выбранный каталог. Далее источник питания устанавливает  $V^+$  равным исходной величине из выбранного диапазона и устанавливает следующее значение напряжения  $V^-$ . Подобные измерения повторяются вновь для всех значений напряжений, установленных пользователем.

Как только будут перебраны все значений напряжений  $V^+$  и  $V^-$  и сохранены все данные проведенных измерений, комплекс обнуляет напряжения на каналах источника питания и приостанавливает свою работу.

Из вышесказанного можно заключить, что описанный алгоритм работы измерительного комплекса даёт возможность проводить точные измерения переходной характеристики для диодов с накоплением заряда в автоматическом режиме без участия экспериментатора.

Для того, чтобы пользователь данного измерительного комплекса, не знакомый как непосредственно с его внутренним устройством, так и в целом с пакетом прикладных программ MATLAB, мог управлять его режимами, диапазонами работы модулей, менять настройки осциллографа и источника питания, в комплексе предусмотрен простейший графический пользовательский интерфейс. Он представляет из себя окно с двумя панелями. Эти панели реализуют интерфейсы для настройки измерений в двух режимах – в режиме измерения переходной характеристики и в импульсном режиме.

В режиме измерения переходной характеристики на панели пользователь может в режиме реального времени наблюдать осциллограмму самой переходной характеристики, графики зависимостей измеряемых параметров, а также элементы управления режимом работы самого комплекса и осциллографа.

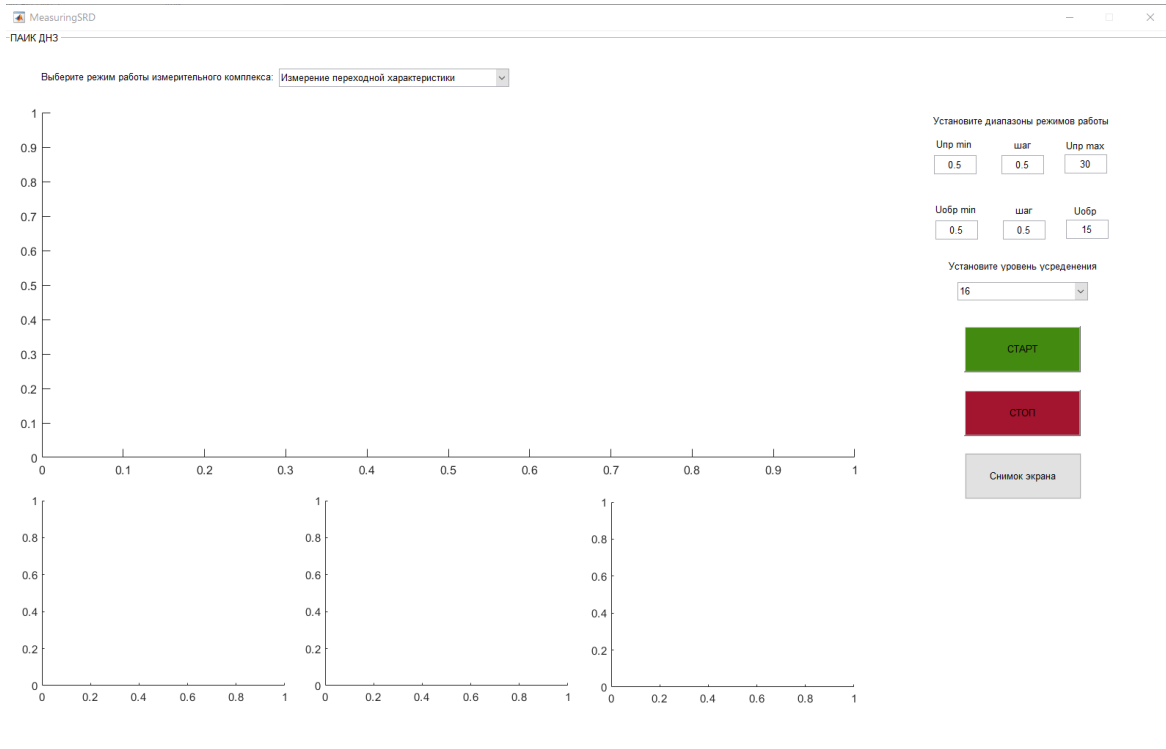


Рисунок 4.6 – Скриншот пользовательского интерфейса ПАИК ДНЗ в режиме измерения переходной характеристики

Так, например, пользователь может установить шаг и диапазоны работы программируемого источника напряжения для каждого из каналов, настроить уровень усреднения по времени осциллографом измеряемых величин. Также на данной панели имеются кнопки, которые позволяют начать процесс измерения диодов, остановить его, и сделать скриншот текущей панели. На рисунке 4.6 представлен скриншот данного интерфейса.

### **Выводы**

В четвертой главе диссертации разработан автоматический измерительный комплекс, 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 системы компьютерной алгебры 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 в первой главе.

## Заключение

В результате проведенных в диссертационной работе исследований и разработок были получены следующие результаты:

1. Было 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.

**Список литературы**

1. 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.
2. 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.
3. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, V. A. Stepkin and G. K. Uskov "Novel Tunable Ultrashort Pulse Generator With High Amplitude and Low Ringing Level", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 11, pp. 1013–1015, November 2017.
4. Atlas user's manual device simulation software // Silvaco International, September 2004, p. 728.
5. B. Litton Low impedance nanosecond and sub-nanosecond risetime pulse generators for electro-optical switch applications / A. B. Litton, P. Bond, A. Kardosusoyev, Barney O'Meara-Moose // *IEEE*, V. 5, 2001, p733-738
6. Barrett T.W. History of Ultra-WideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators. / Terrence W. Barrett // *Progress in Electromagnetics Symposium (PIERS 2000)*, 2000.
7. Bemsy G. Recombination in Semiconductors / G. Bemsy // *Proceedings of the IRE*, 1958. – P. 990-1004.
8. Chudobyak M.J. Subnanosecond 300V diffused step recovery diode / M.J. Chudobyak, D.J. Walkey // *Electronics-letters*, V. 32, № 16, 1996
9. Cooper R.W. Design and performance of Fast High-Voltage Epi-Diodes / R.W. Cooper, K.A. Jagers // *PESC83*, pp. 150-153, 1983
10. David Brown and Don Martin Subnanosecond high-voltage pulse generator / *Rev. Sci. Instr.*, 1987, 58, (8), P. 1523-1529.

11. Davies L.W. The use of p-i-n structures in investigations of transient recombination from high injection levels in semiconductors / L.W. Davies // Proc IEEE, V. 51, pp. 1637-1642, November 1963
12. E. Afshari and A. Hajimiri, "Nonlinear transmission lines for pulse shaping in silicon," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 40, no. 3, pp. 744-752, March 2005, doi: 10.1109/JSSC.2005.843639.
13. E. G. L. Rangel, J. J. Barroso, J. O. Rossi, F. S. Yamasaki, L. P. Silva Neto and E. Schamiloglu, "Influence of Input Pulse Shape on RF Generation in Nonlinear Transmission Lines," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 44, no. 10, pp. 2258-2267, Oct. 2016, doi: 10.1109/TPS.2016.2593606.
14. Efanov V.M. Power semiconductor 80kV nanosecond pulser / V.M. Efanov, A.F. Kardo-Sysoev, M.A. Larionov, I.G. Tchashnikov // Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International. Volume: 2. pp. 985-987
15. Ghandi S.K. Semiconductor Power Devices / Ghandi S.K. // John Wiley and Sons, New York. 1977.
16. Glover I.A. Microwave device circuits and subsystems for communications engineering // I. A. Glover, S. R. Pennock, P.R. Shepherd // John Wiles and sons inc, 2005.p 531.
17. Grekhov I.V. Pulse Power Generation in Nano- and Subnanosecond Range by Means of Ionizing Fronts in Semiconductors: The State of the Art and Future Prospects / Grekhov I.V. // IEEE transactions on plasma science, vol. 38, no. 5, may 2010, P.1118-1123
18. Grove A.S The Origin of Channel Currents Associated with P+ Region in Silicon / Grove A.S, D.J.Fitzgerald // IEEE Trans. Elec. Dev., V. 12, № 12 pp 619. 1965
19. Ha J. A new ultra-wideband, ultra-short monocycle pulse generator with reduced ringing / J. Ha, C. Nguyen // IEEE Microwave and wireless components letters, V. 12, № 6, March 2002
20. Han J. Ultra-wideband electronically tunable pulse generators / J. Han, C. Nguyen // IEEE Microwave and wireless components letters, V. 14, № 14, March 2004, pp. 112-114

21. Hansjochen Benda and Eberhard Spenke Reverse Recovery Processes in Silicon Power Rectifiers / Proc. IEEE, 1967, 55, (8), P. 1331-1354
22. Hoffmann A. Switching processes in alloyed pin rectifiers / A. Hoffman, E. Spenke // Solid-state electronics, V.8, pp. 693-697, August 1965
23. Howard L. Nanosecond-pulse generator for laser diodes / L. Howard, K. Daneshvar // Rev. Sci. Instr., 1989, 60, (10), P. 3343-33451
24. Hower P.L. The SPIN rectifier, a new fast-recovery device / P.L. Hower, C.E. Weaver // PESC88, pp. 709-717, 1988
25. Ilyin V.A. High-voltage ultra-fast pulse diode stack based on 4H-SiC / V.A. Ilyin, A.V. Afanasyev, B.V. Ivanov, A.F. Kardo-Sysoev, V.V. Luchinin, S.A. Reshanov, A. Schöner, K.A. Sergushichev, A.A. Smirnov // Materials Science Forum. 2016. № 858. C. 786-789.
26. Kardo-Sysoev A.F. Generation and Radiation of UWB-signals / A.F. Kardo-Sysoev // 33rd European Microwave Conference - Munich 2003 P. 845-848
27. Katarzyna Opalska A charge model of step recovery diode for cad/ Opalska Katarzyna, Baranowski Jerzy // IEEE 0-7803-3814-6/9 TH3F-4, 1997 – P.1503-1506
28. Kingston R.H. Switch time in junction diodes and junction transistors / R.H. Kingston // Proc. IRE, V.42, pp. 829-834, May 1954.
29. Kurata Mumoru Design Considerations of Step Recovery Diodes with the Aid of Numerical Large-Signal Analysis / Mumoru Kurata // IEEE Transactions on electron devices, vol. ED-19, NO.11, 1972 – P.1207-1215
30. Lauritzen P. A simple diode model with reverse recovery / P. Lauritzen, C.L. Ma // IEEE Transactions on power electronics, V. 6, № 2. April 1991, pp. 188-191.
31. Lesha M. J. Generation of balanced subnanosecond pulses using step-recovery diodes / M. J. Lesha, F. J. Paoloni // Electron. Lett., 1995, 31, (7), P.510-511
32. M. Tan; C.-Y. Su; W.J. Anklam: '7× electrical pulse compression an inhomogeneous nonlinear transmission line', Electron. Lett., 1988, 24, (4), pp. 213–215.
33. MAVR-044769-12790T Datasheet / Macom.com – URL: [https://www.macom.com/products/product-detail/MAVR-044769-12790T\(01.06.2022\)](https://www.macom.com/products/product-detail/MAVR-044769-12790T(01.06.2022)).



34. Maxwell E. Enhanced ultra-wideband tunable pulse generation based on variable edge-rate compression / E. Maxwell, T. Weller, J. Harrow // European radar conference, Manchester, UK, 13-15 September, pp. 198-202, 2006.
35. Mehrotra M. Comparison of high voltage power rectifier structures / M. Mehrotra, B.J. Baliga // International Symposium Power Semiconductor Devices, pp. 199-204. 1993.
36. Moll J. L. Physical Modeling of the Step Recovery Diode for Pulse and Harmonic Generation Circuits / J. L. Moll, S. A. Hamilton // Proceedings of the IEE. – vol. 37. – P.1250-1259.
37. Moll J.L. P-n junction charge storage diodes / J. L. Moll, S. Krakauer, R. Shen // Proc. IRE, 1962, 50, (1), P. 43-53
38. Mori M. A novel soft and fast recovery diode with thin p-layer formed by Al-Si electrode / M. Mori, Yasuda Y., Sakurai N., Sugawara Y // International Symposium Power Semiconductor Devices., pp.. 113-117. 1991.
39. NXP Semiconductors, June 2021, [online] Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BB131.pdf>
40. Opalska K. Shaping of step-edged pulses with controlled width / K. Opalska, S. Misiaszek // Proc. of SPIE, V. 6347, pp. 1-5, 2006
41. Opalska K. SRD-based multistage circuit for shaping picosecond pulses / K. Opalska, S. Misiaszek // Proc. of SPIE, V. 6347, 63472H, pp. 1-5, 2006
42. Prokhorenko V. Drift Step Recovery Utilization for Electromagnetic Pulse Radiation / V. Prokhorenko, V. Ivashchuk, S. Korsun // Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, Netherlands – P.195-198
43. R. Fegghi, D. Oloumi and K. Rambabu, "Design and Development of an Inexpensive Sub-Nanosecond Gaussian Pulse Transmitter," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 9, pp. 3773-3782, Sept. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2918298.
44. Robert D. H. The Step Recovery Diode for Microwave Harmonic Generation and Nanosecond Pulse Generation / D. H. Robert, M. K. Stewart // Electronic Components, Nov. 1965. P. 1046-1051.

45. S.V. Zazoulin, A.F. High repetition frequency picosecond pulse generator / Zazoulin S.V., Kardo-Sysoev A.F., Moryakova S.A. // IEEE 2002, P.403-405
46. Sameer P.P. Dynamics of Reverse Recovery of High-Power P-i-N Diodes / Sameer P. Pendharkar, Malay Trivedi, and Krishna Shenai // IEEE Transactions on electronic devices, vol. 43, no.1, 1996
47. Shockley W. Statistics of the recombination of holes and electronics / W. Shockley, W.T. Read // Phys. Rev., V. 87, pp. 835-842, September 1952.
48. Spenke E. The voltage step at switching of alloyed pin rectifiers / K. Schuster, E. Spenke // Solid-state Electronics, 1965. - V. 8, - P. 881-882.
49. Taylor J.D. Introduction to Ultra-wideband Radar Systems / James D. Taylor. // CRC press Boca Raton; Ann Arbor, London; Tokyo; New-York, 1995.
50. Tian Xia A high-performance low-ringing ultrawideband monocycle pulse generator / Anbu Selvam Venkatachalam, Dryver Huston, Tian Xia // IEEE Transactions on instrumentation and measurement, IEEE, V. 7, pp 1-9, 2015
51. Uschkerat U. Comparing UWB GPR measurements and simulation of simple shaped buried targets / U. Uschkerat // Detection of Abandoned Land Mines, 1998. Second International Conference on the (IEE Conf. Publ. No. 458) 12-14 Oct. 1998 pp.41 – 44.
52. Varshnry R.C. Turn-off transient behavior of p-i-n diodes / R.C. Varshnry, D.J. Roulston // Solid state electronics, V. 14, pp. 735-745, 1971
53. Y. Ahajjam, O. Aghzout, J. M. Catalá-Civera, F. Peñaranda-Foix and A. Driouach, "A compact UWB sub-nanosecond pulse generator for microwave radar sensor with ringing miniaturization," 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2016, pp. 497-501, doi: 10.1109/ICMCS.2016.7905602.
54. Yongsheng G. A technology to generate fast-edge pulses using step recovery diode / G. Yongsheng, L. Baiyu, B. Yonglin, X. Yingdong, O. Xian, Z. Wei, L. Yan // Chinese journal of electronics, V. 19, № 2, Apr. 2010, pp. 378-380.

55. Yoshihito A. Novel low-loss and high-speed diode utilizing “ideal” ohmic contact / A. Yoshihito, S. Takayuki, M. Yoshihito // IEEE Trans, Elec., Dev., V. 29, pp. 236-242, 1982.
56. Yoshihito S. High-speed low-loss p-n diode having a channel structure / S. Yoshihito, N. Masayoshi, S. Murakami, T. Yoshio // IEEE Trans, Elec., Dev., V. 31, pp. 1314-1319, 1984.
57. Young-Jin P. Development of an ultra wideband ground penetrating radar (UWB GPR) for nondestructive testing of underground objects / P. Young-Jin, C. Sung-Bae, K. Kwan-Ho, Y. Dong-Gi // IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004, Volume 2, 20-25 June 2004 pp.:1279 - 1282 Vol.2.
58. Zaiming F. Research on a fast edge generation technology of the pulse / F. Zaiming, S. Yibing // Proc. of IEEE 2008 International conference on communications, Circuits and systems, Xiamen university, China, pp. 1066-1069, 2008
59. Zhang Jian A New Model of Step Recovery Diode for CAD / Jian Zhang, Antti Raisanen // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995. – TH3F-H4 – P.1459-1462.
60. Аристов Ю. В. Полупроводниковые формирователи наносекундных импульсов высоко напряжения / Ю.В. Аристов [и др.] // Приборы и техника эксперимента, 2007. – №3. – с. 72-74.
61. Астанин Л. Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев – М.: Радио и связь, 1989. – 192 с.
62. Белкин В. С. Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе / В. С. Белкин, Г. И. Шульженко. – Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1990. – 36 с.
63. Белкин В. С. Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов на серийных диодах / Белкин В. С., Марин О. Ю., Шульженко Г. И. // Приборы и техника эксперимента, 1992. – № 6. – с. 120-124.
64. Бобрешов А. М. Генератор сверхкоротких импульсов с электронным управлением длительностью / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Успехи современной радиоэлектроники №11, 2015г. – С.24-28.

65. Бобрешов А. М. Генератор сверхширокополосных импульсных сигналов субнаносекундной длительности с высокой частотой повторения / А.М. Бобрешов, Ю.И. Китаев, В.А. Степкин, И.С. Коровченко, Г.К. Усков // 66 Научная сессия, посвященная Дню радио, 11-12 мая 2011 г., Москва: труды. — М., 2011 .— С. 340-342

66. Бобрешов А. М. Моделирование процессов переключения диодов с накоплением заряда / А.М. Бобрешов [и др.] // 65 Научная сессия, посвященная Дню радио, 19-20 мая 2010 г., Москва: труды. — М., 2010 .— С. 271-273 .— 0,3 п.л.

67. Бобрешов А. М. Определение параметров модели диода с накоплением заряда по экспериментальным данным / А.М. Бобрешов, Ю.И. Китаев, И.С. Коровченко, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Воронеж, 12-14 апр. 2011 г. — Воронеж, 2011 .— Т. 1. - С. 802-810 .— 0,6 п.л.

68. Бобрешов А. М. Автоматизированный измерительный комплекс для отбора НЕМТ-транзисторов, стойких к воздействию импульсных помех / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Инженерные и научные приложения на базе технологий NI: NIDays - 2015: сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции. — Москва, 2015. — С. 353-356 .— 0,3 п.л.

69. Бобрешов А. М. Влияние параметров полупроводниковой структуры диода с накоплением заряда на характеристики его переключения. / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.С. Лопатин, В.А. Степкин, Г.К. Усков / Сборник докладов 23-я Международной научно-технической конференции Радиолокация, навигация, связь, г. Воронеж, 18-20 апр. 2017 г. — Воронеж, 2017 .— Т. 2. - С. 526-532 .— 0,4 п.л..

70. Бобрешов А. М. Влияние помех в виде последовательностей сверхкоротких импульсов на коэффициент усиления НЕМТ / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XVII Междунар. научно-техническая конференция, г. Воронеж, 12-14 апр. 2011 г. — Воронеж, 2011. — Т. 1. - С. 797-801 .— 0,3 п.л.

71. Бобрешов А. М. Генератор сверхкоротких импульсов с длительным накоплением и обострителем на основе диода с накоплением заряда / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиотехника. — Москва, 2018. — № 3. - С. 75-79. — ISSN 0033-8486. — 0,3 п.л.

72. Бобрешов А. М. Генератор сверхкоротких импульсов с электронным управлением длительностью / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь : XXI Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 14-16 апр. 2015 г. — Воронеж, 2015. — Т. 2 - С. 908-912. — 0,4 п.л.

73. Бобрешов А. М. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / Бобрешов А. М., Степкин В.А., Китаев Ю.И., Усков Г.К. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2011. - Т14. №3. - С. 103.

74. Бобрешов А. М. Исследование влияния разброса параметров диодов с накоплением заряда на генерируемые СКИ / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XXVI Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 29 сен.-01 окт. 2020 г. — Воронеж, 2020. — Т. 6 - С. 30-39.

75. Бобрешов А. М. Исследование разброса параметров диодов с накоплением заряда / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2020): 30-я Международная Крымская конференция, 6-12 сент. 2020 г., Севастополь, Крым, Россия : материалы. — Севастополь, 2020. — С. 257-258. — 0,2 п.л.

76. Бобрешов А. М. Корреляционный приемник СШП импульсных сигналов субнаносекундной длительности / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, М.И. Малезин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XX Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 15-17 апр. 2014 г. — Воронеж, 2014. — Т. 1. - С. 258-263. — 0,4 п.л.

77. Бобрешов А. М. Модель TRAPATT-диода в режиме генерации сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, Р.Ю. Дмитриев, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XX Международная

научно-техническая конференция, г. Воронеж, 15-17 апр. 2014 г. — Воронеж, 2014. — Т. 3. - С. 2065-2070 .— 0,4 п.л.

78. Бобрешов А. М. Модель диода с накоплением заряда для анализа схем генерации сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, В.А. Степкин, Ю.И. Китаев, Г.К. Усков // Вестник Воронежского госуниверситета. Серия: Физика. Математика, 2012 с. 12

79. Бобрешов А. М. Обострение сверхкоротких импульсов с помощью нелинейной линии передачи / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2020): 31-я Международная Крымская конференция, 6–12 сент. 2021 г., Севастополь, Крым, Россия : материалы .— Севастополь, 2021 .— С. 309-310 .— 0,2 п.л.

80. Бобрешов А. М. Особенности диодов с накоплением заряда при генерации сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, Ю.И. Китаев, Г.К. Усков, Е.А. Руднев // 8-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: тр. симп., 16-19 июня 2009 г. — СПб., 2009 .— С. 298-300 .— 0,3 п.л.

81. 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).

82. 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).

83. Бобрешов А. М. Расчет генератора субнаносекундных импульсов на основе диодов с накоплением заряда / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиотехника, №2 , 2016 – С. 101-107. - ISSN 0033-8486.

84. Бобрешов А. М. Сверхширокополосный смеситель для аналогового умножения сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, М.И. Малежин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XIX Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 16-18 апр. 2013 г. — Воронеж, 2013. — Т. 1. - С. 110-115 .— 0,4 п.л.

85. Бобрешов А. М. Характеристики переключения двух диодов с накоплением заряда при их последовательном соединении / Бобрешов А. М., Жабин А.С., Рязанцев А.Д., Степкин В.А., Усков Г.К. // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации .— Тольятти 2017 .— № 7 .— С. 80-87.

86. Бобрешов А. М. Экспериментальное исследование генератора сверхкоротких импульсов с обострителем фронта на основе диодов с накоплением заряда / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XXII Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 19-21 апр. 2016 г. — Воронеж, 2016. — Т. 1. - С. 361-365 .— 0,3 п.л.

87. Бобрешов А. М. Экспериментальное исследование работы диода с накоплением заряда в режиме переключения / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2016): 26-я Международная Крымская конференция, 4-10 сент. 2016 г., Севастополь, Крым, Россия: материалы. — Севастополь, 2016.

88. Бобрешов А. М. Экспериментальное исследование разности потенциалов между катодом и анодом диода с накоплением заряда при его переключении / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, И.С. Коровченко, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. — Воронеж, 2016. — № 3. - С. 11- 19. — ISSN 1609-0705.— 0,3 п.л.

89. Бобрешов А. М. Экспериментальное следование генератора сверхкоротких импульсов с последовательным включением нескольких диодов с накоплением заряда в схеме генератора / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий: РЭУС - 2016, Москва, Россия: доклады Международной конференции. — Москва, 2016. — Т. 1. - С. 154-157. — 0,3 п.л.

90. Бобрешов А. М. Электронное управление длительностью сверхкоротких импульсов, формируемых генератором на базе SRD / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2015): 25-я Международная Крымская конференция, 6-12 сент. 2015 г., Севастополь, Крым, Россия: материалы. — Севастополь, 2015. — Т. 1. - С. 85-87. — 0,2 п.л.

91. Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках / Б.И. Болтакс // Физматгиз, 1961

92. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников // М.:1967г. 672с

93. Грехов И. В. / Грехов И. В. [и др.] // Письма в Журнал технической физики, 1983. – т. 9. – Вып. 7. С. 435-439. Кардо-Сысоев А. Ф. / А. Ф. Кардо-Сысоев, М. В. Попова // Физика и техника полупроводников, 1991. – т. 25. – С. 3-11.

94. Грехов И. В. Мощный полупроводниковый переключатель высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом нарастания / Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Люблинский А.Г. // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 87-90.

95. Грехов И. В. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов / И. В. Грехов, Г. А. Месяц // Успехи физических наук, 2005. – т. 175. – №7. – С. 735-744.

96. Дарзбек С. А. Динамика электронно-дырочной плазмы в полупроводниковых прерывателях сверхплотного тока / С.А. Дарзбек, Г.А. Месяц, С.Н. Рукин // Журнал технической физики, Т. 67, № 10, 1997, С. 64-70.



97. Дмитриев В.Д. Технологии передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов / В.Д.Дмитриев // Компоненты и технологии №9, 2003, С. 72-76.

98. Еремин С. А. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение / С. А. Еремин, О. К. Мокеев, Ю. Р. Носов. – М.: Издательство Советское радио, 1966. – 152 с.

99. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи; Пер. с англ.; под ред. А. Ф. Трутко. – М. : Энергия, 1973. – 655с.

100. Иммореев И. Я. Сверхширокополосная локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации / И. Я. Иммореев // Электромагнитные волны и электронные системы, 1997. – т.2. – № 1. – С. 81-88.

101. Иммореев И. Я. Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности / И. Я. Иммореев // Вестник МГТУ, 1998. – № 4. – С. 128-133.

102. 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.

103. К.В. Шалимова Физика полупроводников. М.: Энергоатомидат, 1985. – 392 с

104. Карауш, А. С. Генераторы импульсов наносекундной длительности на лавинных диодах / А. С. Карауш, С. П. Лукьянов, Р. В. Потемин, О. П. Толбанов. // Электронная промышленность, - №1-2, 1998.

105. Кольцов Ю. В. Методы и средства анализа и формирования сверхширокополосных сигналов / Ю. В. Кольцов. – М.: Радиотехника, 2004. – 128с.

106. Кюрегян А. С. / Кюрегян А. С., Юрков С. Н. // Физика и техника полупроводников, 1989. – т. 23.

107. Кюрегян А. С. Теория дрейфовых диодов с резким восстановлением / А. С. Кюрегян. // Журнал технической физики, 2004. – том 74. – С. 57-64.
108. Лазоренко О. В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – т. 13. – № 2. – С. 166–194.
109. Лазоренко О. В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – т. 13. – № 4. – С. 270–322.
110. Мартыненко В. А. Мощные полупроводниковые ключи для импульсных применений / В.А Мартыненко и др. // Компоненты и технологии • № 10, 2008 – С. 80-82
111. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц .— М. : Наука, 2004 .— 704 с. — ISBN 5-02-033049-3.
112. Носов Ю. Р. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение / С. А. Еремин, О. К. Мокеев, Ю. Р. Носов. – М.: Издательство Советское радио, 1966. – 152 с.
113. Носов Ю. Р. Полупроводниковые импульсные диоды / Ю. Р. Носов. – М.: Издательство Советское радио, 1965. – 224 с.
114. 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").
115. Пильдон В.И. Полупроводниковые умножительные диоды. / Пильдон В.И, М.: Радио и связь, 1981. – 88с.

116. 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.

117. 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.

118. Радзиевский В. Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В. Г. Радзиевский, П. А. Трифионов. – М.: Радиотехника, 2009. – 288 с.

119. Рукин С. Н. Влияние объемного заряда на работу мощного полупроводникового размыкателя тока / С.Н. Рукин, С.Н. Циранов // Письма в ЖТФ, 2004, Т. 30, № 1, С. 43-50.

120. Усков Г. К. Физика диодов с накоплением заряда при генерации сверхкоротких импульсов / Усков Г.К. // Теория и техника радиосвязи. 2012. - №4. - С. 100–105.

121. Финкельштейн М. И. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн; под ред. М. И. Финкельштейна. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.

122. Хрулев А. К. Диоды и их зарубежные аналоги / А.К. Хрулев, В.П. Черепанов // Изд. Радиософт, Москва. 1999. 638с.

123. Яландин М. И. Генерирование высоковольтных субнаносекундных импульсов с пиковой мощностью до 300 MW и частотой повторения 2 kHz / М. И. Яландин, С. К. Любутин, С. Н. Рукин, Б. Г. Словиковский, М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов // Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 1, с. 81-88.