

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)

Кафедра физики твердого тела

**Вариант экспериментальной установки для исследования
неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями
в полуизолирующем арсениде галлия**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2252 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
института физики

Аверина Михаила Алексеевича

Научный руководитель:

профессор, д.ф.-м.н.

должность, ученая степень, ученое звание

Консультант:

старший преподаватель

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твердого тела:

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание


подпись, дата

А.И. Михайлов

инициалы, фамилия


подпись, дата

А.В. Митин

инициалы, фамилия


подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Функциональная электроника, основанная на управлении динамическими неоднородностями в полупроводниках, представляет значительный научный и практический интерес. Особое место в этой области занимает арсенид галлия (GaAs) n-типа, в котором под действием сильных электрических полей наблюдаются различные типы неустойчивостей тока, включая эффект Ганна и рекомбинационные неустойчивости тока.

В работах, проводимых на кафедре физики твёрдого тела СГУ исследовались структуры на основе полуизолирующего GaAs (SI-GaAs), исследования выявили сложности в получении воспроизводимых результатов вольтамперных характеристик из-за влияния тепловых эффектов и перезарядки глубоких примесных центров при длительном воздействии постоянного напряжения.

Таким образом, представляет интерес проведение исследований особенностей рекомбинационной неустойчивости тока в структурах на основе SI-GaAs при воздействии напряжения на исследуемую структуру в течение задаваемого ограниченного интервала времени.

Цель магистерской работы. Целью данной магистерской работы является разработка варианта экспериментальной установки, позволяющего исследовать особенности рекомбинационной неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия в условиях импульсного и ступенчатого воздействия напряжения на исследуемую структуру.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Проведение анализа существующих подходов к экспериментальному исследованию вольтамперных характеристик полупроводниковых структур и разработке формирователей

последовательностей импульсов специальной формы с заданными параметрами;

2. Конструирование и тестирование блока, позволяющего формировать импульсы специальной формы (пилообразной, треугольной, гармонической и меандра);

3. Конструирование и тестирование блока, обеспечивающего формирование ступенчатого напряжения с управляемыми параметрами;

4. Конструирование и тестирование блока, позволяющего формировать периодические последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы с управляемыми параметрами;

5. Анализ и обобщение экспериментальных результатов.

Структура магистерской работы. Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ, работа включает 3 основных раздела:

1 Анализ существующих подходов к измерению вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов.

2 Анализ существующих подходов к конструированию формирователей сигналов специальной формы.

3 Экспериментальная установка для исследования особенностей неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями в полуизолирующем арсениде галлия.

Положение, выносимое на защиту. Разработанный вариант экспериментальной установки позволяет исследовать особенности проявления рекомбинационной неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия в различных режимах и масштабах изменения во времени напряжения, прикладываемого к рассматриваемой структуре (в режиме формирования последовательностей импульсов специальной формы, в режиме формирования сигнала ступенчатой

формы, в режиме формирования периодических последовательностей импульсов напряжения прямоугольной формы с регулируемыми параметрами).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 проведён обзор методов измерения ВАХ, которые делятся на статические (непрерывные) и динамические (импульсные). Статические методы, такие как ступенчатое изменение воздействующего напряжения, в существенной степени чувствительны к внешним факторам. Импульсные методы, например, с прямоугольными импульсами, позволяют минимизировать влияние указанных факторов. Также рассмотрены альтернативные классификации, включающие изотермические и изодинамические методы. Особое внимание уделено адаптивным подходам, которые автоматически подбирают параметры импульсов для снижения тепловых искажений.

В разделе 2 рассмотрены основные варианты электронных устройств и подходов, применяемых для формирования сигналов специальной формы.

1. Аналоговые RC-интеграторы – простые, но с ограниченной линейностью.
2. Генераторы на транзисторах с обратной связью – обеспечивают лучшую линейность.
3. Цифро-аналоговые методы (DDS, AWG) – гибкие и точные, но требуют сложного оборудования.
4. Генераторы импульсов – на основе заряд-разрядных цепей, применяются в телекоммуникациях и измерительной технике.
5. Оптопары – обеспечивают гальваническую развязку, но имеют ограничения по скорости переключения.

Раздел 3 посвящён разработке установки, состоящей из трёх блоков.

3.1 Блок формирования последовательностей импульсов специальной формы (пилообразной, треугольной, гармонической и меандра) с регулируемыми параметрами

Исходя из требований к данному блоку, за основу был выбран генератор низкочастотного DDS и высокочастотного HS сигнала, позволяющий задавать требуемую форму сигнала: пилообразную, треугольную, гармоническую и форму меандра. Для реализации гальванической развязки и повышения уровня выходного напряжения был предложен вариант схемы с использованием оптронов 3ОД101Б.

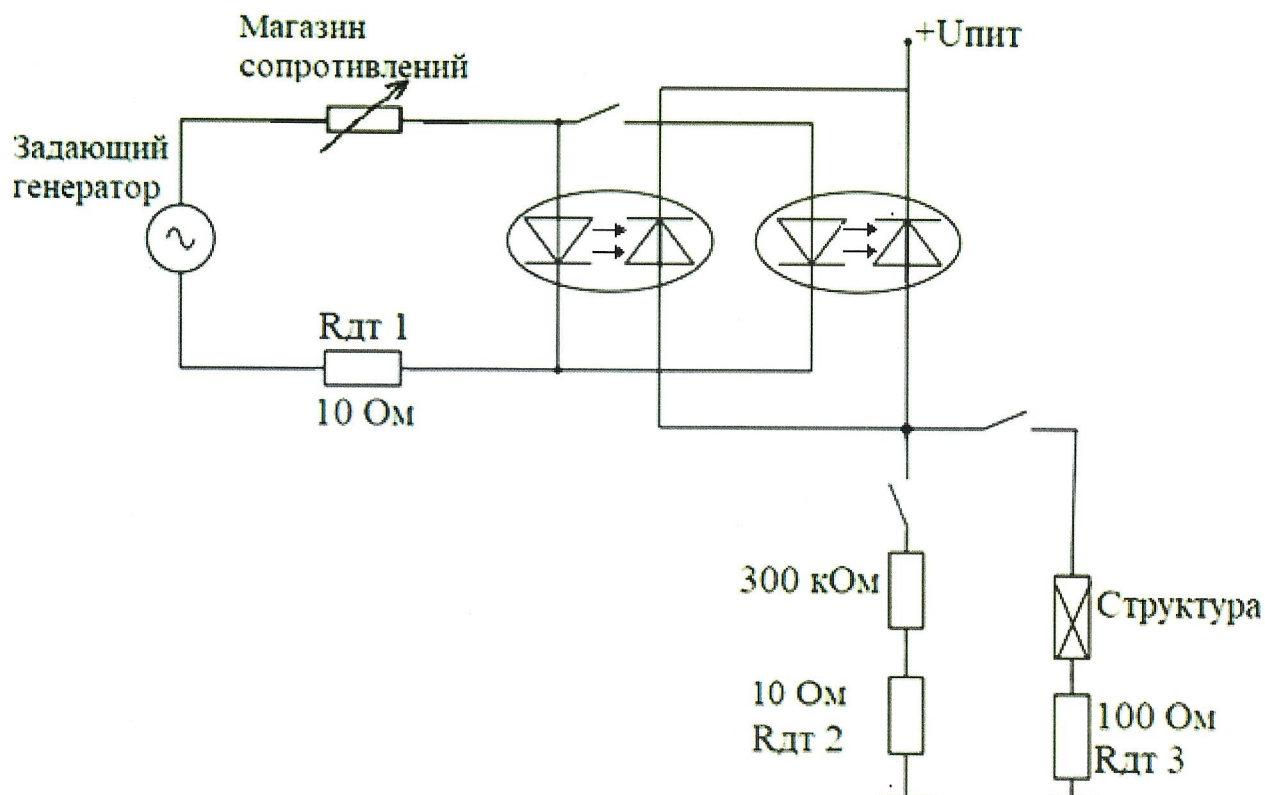


Рисунок 1 – Схема формирования сигналов специальной формы

Сконструированная схема в основном предназначена для реализации режима формирования пилообразных импульсов частотой от единиц Гц до десятков кГц. Данная форма сигнала была выбрана по причине возможности получения динамических вольтамперных характеристик исследуемых структур, а также исследования влияния амплитуды и длительности сигнала на параметры генерируемых структурой колебаний тока.

В серии проведённых экспериментов исследовалось влияние сопротивления переменного резистора во входной цепи рассматриваемого

блока формирования, изменяемого при помощи магазина сопротивлений, на параметры сигнала, получаемого в режиме работы на резистивную нагрузку.

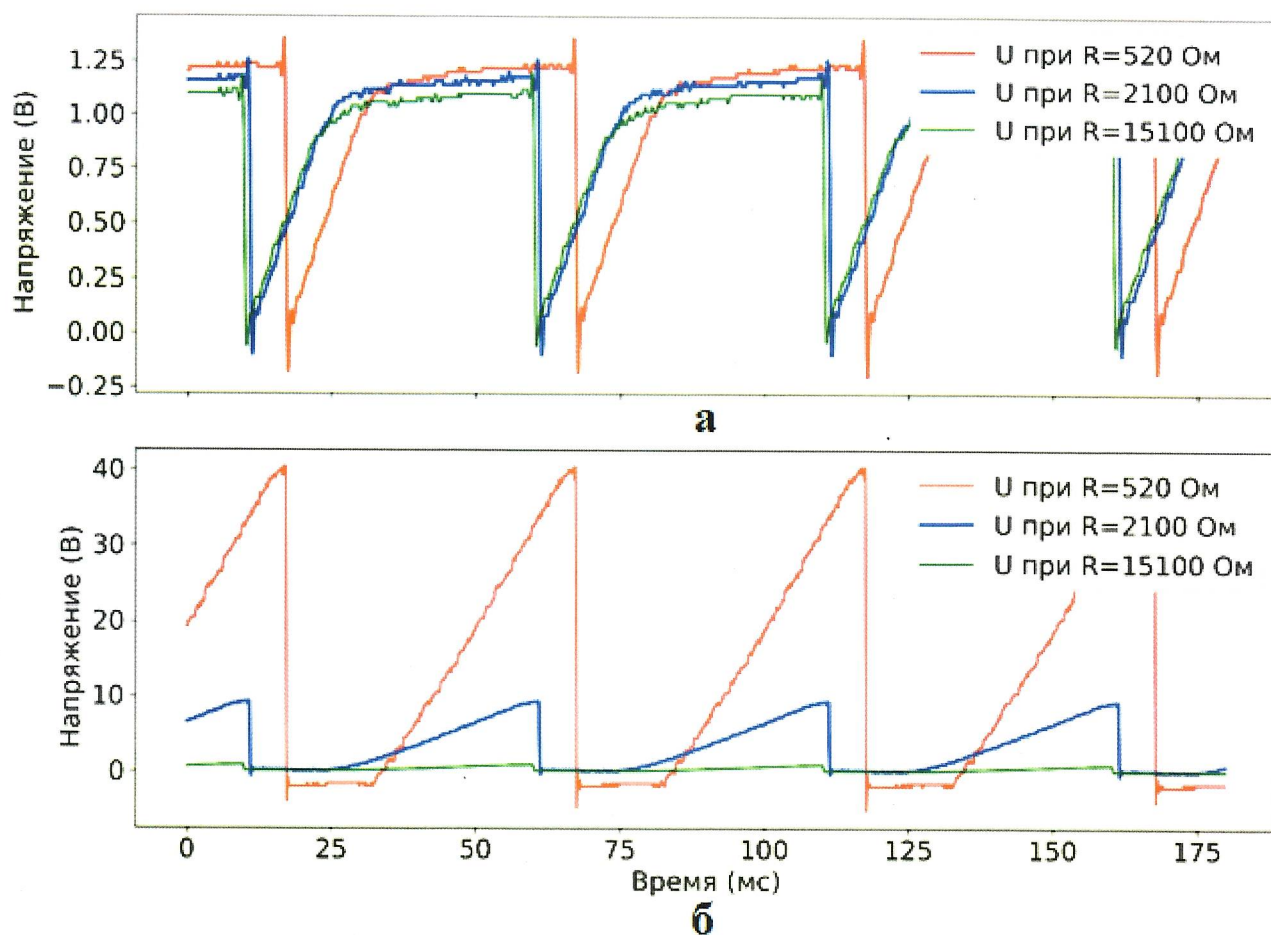


Рисунок 2 – Зависимости напряжения от времени – на светодиоде во входной цепи (а) и выходе блока формирования (б), при различном сопротивлении переменного резистора входной цепи : 520 Ом (красный), 2100 Ом (синий) и 15100 Ом (зелёный)

Из полученных данных можно сделать вывод о наличии ограничений в использовании рассматриваемого блока, связанных с наличием характерного “излома”, наблюдаемого на выходном сигнале, что свидетельствует о наличии участка, на котором напряжение увеличивается незначительно, а линейный рост происходит при достижении напряжения открывания светодиода в используемых оптронах.

Экспериментальные данные демонстрируют, что тестируемый блок обеспечивает работу в диапазоне амплитуд импульсов напряжения от 0 до 50 В, что согласуется с параметрами исследуемых структур, но между формируемыми импульсами пилообразного напряжения образуется характерная пауза.

Далее проводилось тестирование блока формирования сигналов специальной формы с приложением импульсов пилообразного напряжения на исследуемые структуры. В ходе этих тестов были получены зависимости амплитуды генерируемых колебаний тока в исследуемой структуре от напряжения на ней, а также вольт–амперные характеристики.

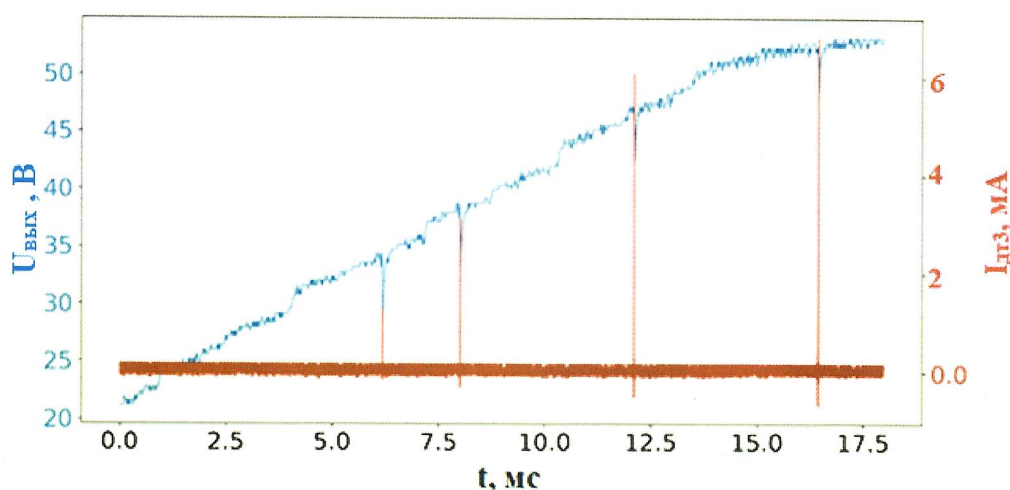


Рисунок 3 – Зависимости напряжения на выходе блока формирования $U_{\text{вых}}$ (синий) и колебаний тока в исследуемой структуре, регистрируемые на нагрузке $R_{\text{пт3}}$ (красный), от времени

На основе полученных зависимостей, представленных на рисунке 3, можно сделать вывод, что блок формирования сигналов специальной формы позволяет регистрировать и исследовать более устойчивые во времени колебания тока, генерируемые исследуемой структурой, однако есть ограничения в работе блока, связанные с наличием сублинейного участка сигнала в области больших напряжений.

На основе данных, представленных на рисунке 3, была рассчитана и построена динамическая вольтамперная характеристика исследуемой структуры, полученная в режиме линейного изменения во времени напряжения, прикладываемого к ней (рисунок 4).

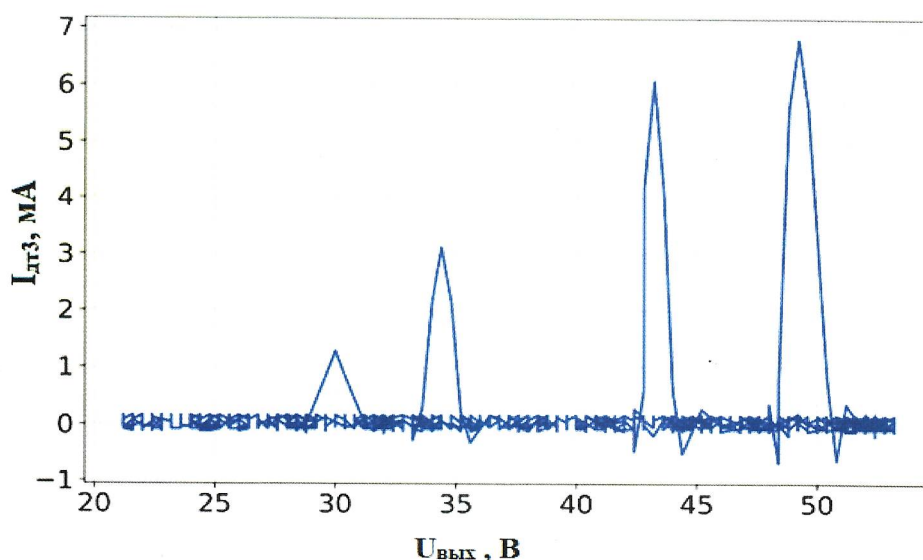


Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика, полученная для исследуемой структуры при линейном изменении приложенного напряжения во времени

Из полученных данных можно сделать вывод, что в данном режиме схема может быть использована для исследования динамических вольтамперных характеристик структур на основе полуизолирующего арсенида галлия, а также для исследования влияния напряжения и других внешних факторов на параметры генерируемых колебаний тока.

3.2 Блок формирования сигнала ступенчатой формы

Аналогично блоку формирования импульсов специальной формы, в данном случае для формирования сигнала ступенчатой формы была выбрана аналогичная схема с использованием оптронов 3ОД101Б представленная на рисунке 6. Для обеспечения требуемого режима работы ко входу схемы подключался модуль DPS5005.

На основе этого модуля, был собран блок формирования сигнала ступенчатой формы с регулируемыми параметрами (высотой и длительностью ступени). Временные параметры формируемого напряжения позволяют блоку

формирования занимать промежуточное положение по длительности воздействия напряжения на исследуемую структуру.

Данный модуль был выбран в качестве задающего формирователя так как обеспечивает необходимый режим ступенчатого изменения тока и режим ступенчатого изменения напряжения с настраиваемой длительностью ступени в диапазоне от единиц до десятков секунд и высотой ступени в диапазоне от 0 до 5 В.

На следующем этапе работы проведено тестирование блока формирования сигнала ступенчатой формы и его параметров. В серии проведённых экспериментов использовались два режима формирования выходного сигнала на модуле DPS5005: режим ступенчатого изменения напряжения и режим ступенчатого изменения тока.

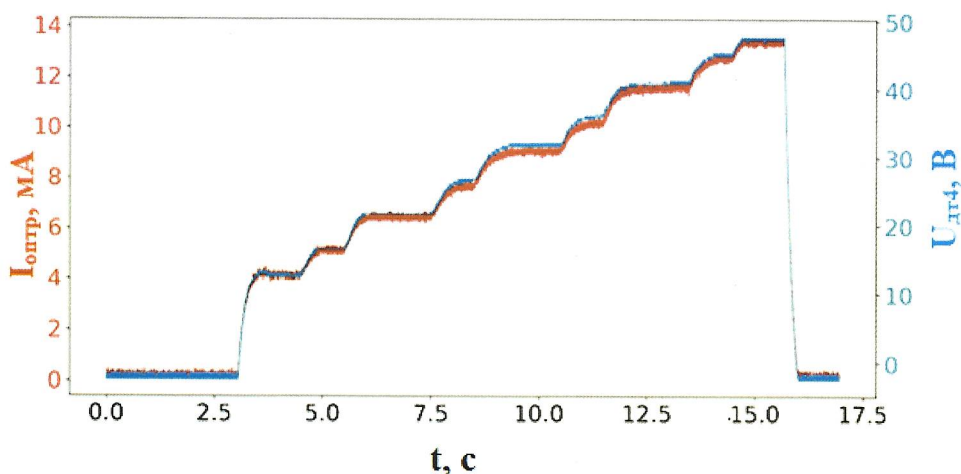


Рисунок 5 – Зависимости тока на входе оптронов $I_{\text{оптр}}$ (синий) и напряжения на нагрузке в выходной цепи блока формирования $U_{\text{дт4}}$ (красный) от времени, в режиме ступенчатого изменения тока на выходе модуля DPS5005

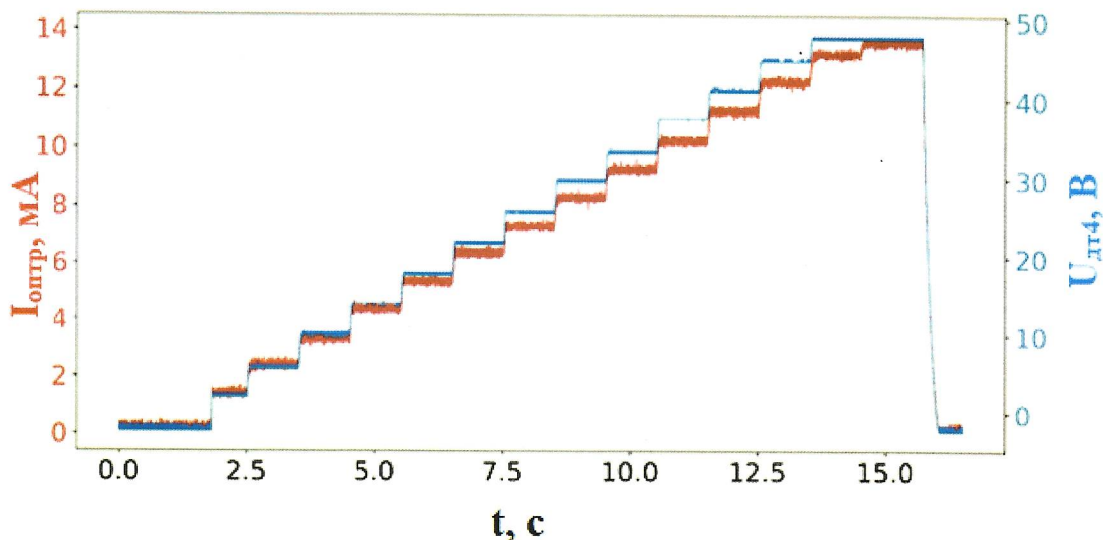


Рисунок 6 – Зависимости тока на входе оптронов $I_{\text{оптр}}$ (синий) и напряжения на нагрузке в выходной цепи блока формирования $U_{\text{дт4}}$ (красный) от времени, в режиме ступенчатого изменения напряжения на выходе модуля DPS5005

Из полученных в ходе тестов схемы формирователя сигнала ступенчатой формы результатов можно сделать вывод о том, что использование режима ступенчатого изменения тока для управления схемой формирования рассматриваемого блока не подходит для дальнейших исследований, так как не обеспечивает воспроизводимости сигнала с необходимыми характеристиками временных интервалов и амплитуды. Поэтому в дальнейших исследованиях использовался только режим ступенчатого изменения формируемого напряжения, характеризующийся минимальными искажениями выходного сигнала.

Далее проводилось тестирование схемы с подключенной структурой при подаче на вход ступенчато изменяемого напряжения от модуля DPS5005. Параметры тестирования включали: постоянное напряжение питания выходной цепи (составляло 50 В), сопротивление нагрузки (составляло 100 кОм), сопротивление переменного резистора входной цепи (составляло 400 Ом), максимальный ток на выходе модуля DPS5005 (составлял 20 мА). Напряжение на структуре увеличивалось от 1,8 В до 8 В с шагом 0,1 В и длительностью каждого шага в 1 секунду.

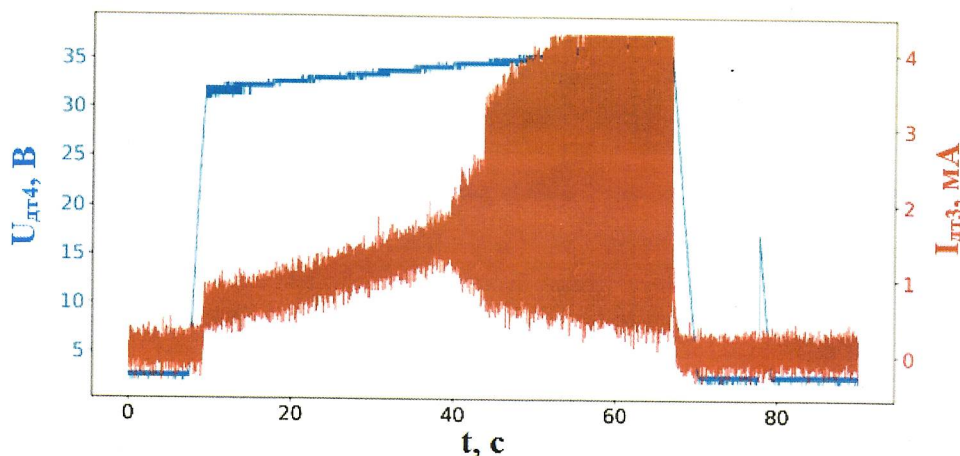


Рисунок 7 – Зависимости напряжения на структуре $U_{дт4}$ (синий) и тока структуры $I_{дт3}$ от времени (красный), в режиме ступенчатого изменения напряжения прикладываемого к структуре

На полученных вольт–амперных характеристиках наблюдается участок ОДП, соответствующий проявлению в структуре неустойчивости тока и генерации колебаний тока.

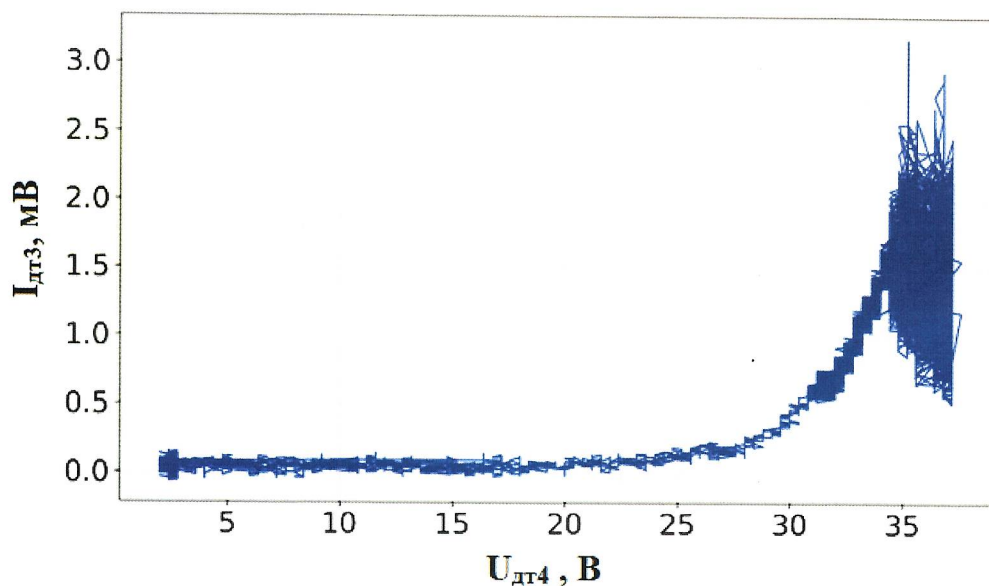


Рисунок 8 – Вольт–амперная характеристика исследуемой структуры, полученная в режиме ступенчатого увеличения прикладываемого к структуре напряжения

Из полученных данных можно сделать вывод, что в данном режиме схема может быть использована для исследования вольт–амперных характеристик структур на основе полуизолирующего арсенида галлия в режиме воздействия

заданного питающего напряжения на исследуемую структуру в интервале времени от единиц до десятков секунд, и исследовать влияние напряжения и других внешних факторов на параметры генерируемых колебаний тока.

Схема блока формирователя ступенчатого увеличения прикладываемого напряжения при определённых условиях может переходить в режим источника тока. Это происходит, когда сопротивление исследуемой структуры резко уменьшается, что характерно для области токов, возникающих при достижении напряжений близких к пороговому напряжению возникновения генерации (участку ОДП на ВАХ). На зависимости напряжения от времени могут наблюдаться колебания напряжения, обусловленные ограничением тока схемой блока формирователя ступенчатого сигнала.

3.3 Описание и тестирование блока формирования периодических последовательностей импульсов напряжения прямоугольной формы с регулируемыми параметрами

На основе проведенного анализа научно-технической литературы и рассмотрения существующих подходов к построению схем формирователей и усилителей импульсных последовательностей, а также с учетом предъявляемых требований к параметрам разрабатываемой схемы импульсного формирователя/усилителя (напряжение в диапазоне 0–100 В, длительность импульсов в диапазоне 1–100 мкс) в данной работе был выбран вариант схемы на основе драйвера IR2110 и полумоста с двумя высоковольтными полевыми транзисторами 2SK1213.

Было проведено тестирование схемы рассматриваемого усилителя импульсных сигналов без подключения (рисунок 10) и с подключением (рисунок 11) планарно-эпитаксиальной структуры GaAs на выходе схемы.

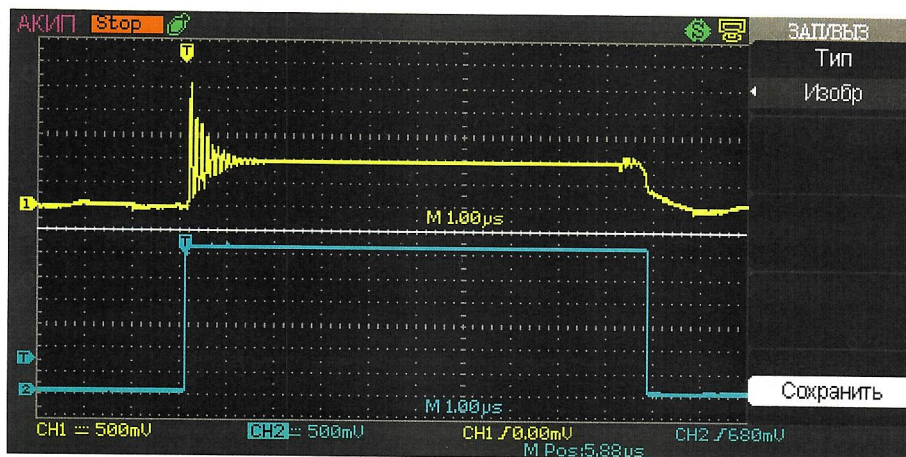


Рисунок 10 – Импульсные сигналы на входе (нижний) и выходе (верхний) схемы при использовании резистивной нагрузки 300 кОм (без подключения емкостного фильтра)

Как видно из рисунка 10, рассматриваемая схема позволяет формировать импульсы с заданной амплитудой и длительностью, но при этом наблюдаются заметные искажения формы получаемого импульсного сигнала: наличие характерного выброса и переходного процесса (затухающих осцилляций) на фронте импульса, а также увеличение времени спада сигнала. Применение емкостного фильтра на выходе схемы позволяет уменьшить длительность и амплитуду осцилляций переходного процесса, а также время спада выходного импульса (рисунок 11).

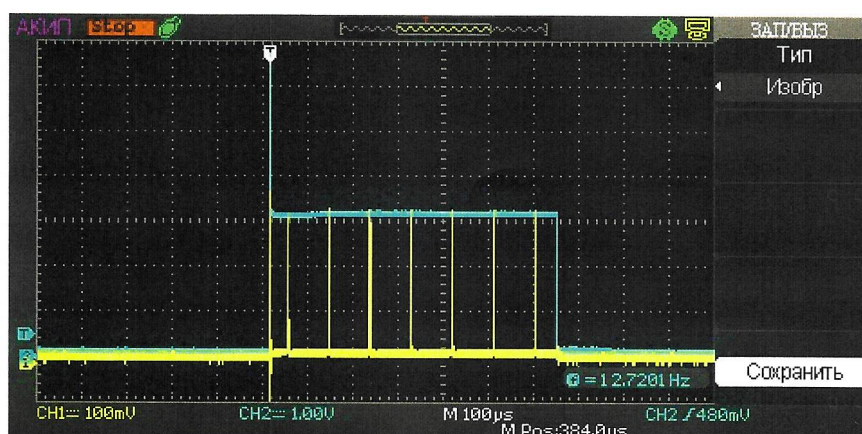


Рисунок 11 – Импульсный сигнал (с длительностью 0,7 мс, периодом 70 мс) на входе схемы усилителя (синий) и сигнал с сопротивления нагрузки (желтый) планарно-эпитаксиальной структуры GaAs, подключаемой к выходу схемы усилителя (с применением емкостного фильтра)

Данные рисунка 11 показывают, что схема обеспечивает необходимое импульсное воздействие на структуру, приводя к рекомбинационной неустойчивости тока и генерации колебаний при достижении порогового напряжения. Эксперименты подтвердили, что выбор длительности и периода импульсов повышает стабильность частоты и амплитуды колебаний по сравнению с режимом постоянного напряжения. Несмотря на соответствие основным требованиям исследований, схема имеет недостатки: выбросы, переходные процессы, увеличенные времена спада и фазовые искажения. Их устранение возможно за счет применения современных компонентов и фильтрующих элементов в выходном каскаде схемы блока формирователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской работы можно сделать следующие выводы.

1. Обзор научно-технической литературы на этапе проектирования варианта экспериментальной установки для исследования неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия позволил выбрать в качестве основного метода, применяемого в блоках формирования сигналов разрабатываемой установки, метод непрерывного измерения ВАХ, а также реализовать гальваническую развязку и обеспечить линейность характеристик проектируемых блоков формирования посредством использования диодных оптронов.

2. Тестирование блока формирования периодических последовательностей импульсов специальной формы (пилообразной, треугольной, гармонической и меандра) показало, что разработанный блок способен формировать импульсы напряжения специальной формы с управляемыми параметрами (амплитуда формируемых импульсов напряжения может быть задана в интервале от 0 до 50 В, а частота – в интервале от 1 Гц до 65 кГц), обеспечивающие возможность проведения исследования динамических ВАХ рассматриваемых структур. Установлено, что увеличение сопротивления переменного резистора во входной цепи схемы гальванической развязки блока формирования импульсов специальной формы уменьшает искажения как входного, так и выходного сигналов.

3. Полученные в ходе тестирования блока формирования сигнала ступенчатой формы результаты показали, что режим ступенчатого изменения тока с ограничением напряжения на выходе управляющего модуля DPS5005 не обеспечивает равномерной длительности и высоты ступеней формируемого напряжения, а также искажает переходные процессы между ступенями на выходе блока. Режим ступенчатого изменения напряжения с ограничением тока на выходе управляющего модуля DPS5005 позволяет формировать на выходе

рассматриваемого блока напряжение ступенчатой формы с управляемыми параметрами (максимальное значение напряжения может быть задано в интервале от 0 до 50 В, минимальное значение высоты формируемой ступени напряжения – порядка 0,6 В, длительность ступени напряжения – в интервале от 1 до 60 секунд). Реализуемый режим формирования ступенчатого напряжения может быть использован для получения более воспроизводимых ВАХ и зависимостей параметров генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения по сравнению с аналогичными зависимостями, получаемыми в режиме приложения к структуре постоянного напряжения.

4. Анализ результатов тестирования блока формирования периодических последовательностей импульсов прямоугольной формы показал, что блок позволяет формировать периодические последовательности импульсов прямоугольной формы с задаваемыми параметрами (амплитуда импульсов может быть задана в интервале от 0 до 300 В, длительность – в интервале от 10 до 700 мкс, а частота – в интервале от 100 Гц до 30 кГц). Режим формирования коротких импульсов может быть использован для исследования возникновения одиночных колебаний тока в рассматриваемых полупроводниковых структурах и влияния на них внешних физических факторов.

5. Таким образом, разработанный вариант экспериментальной установки позволяет исследовать особенности проявления рекомбинационной неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия в различных режимах и масштабах изменения во времени напряжения, прикладываемого к рассматриваемой структуре.

