

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Особенности проявления неустойчивости тока с низкочастотными  
осцилляциями в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

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

Шапошниковой Елизаветы Игоревны

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.И. Михайлов

инициалы, фамилия

Консультант:

старший преподаватель

должность, ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.В. Митин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твердого тела:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025

## ВВЕДЕНИЕ

### **Общая характеристика работы.**

**Актуальность темы.** Функциональная электроника является одним из направлений современной микроэлектроники. При построении функциональных приборов и устройств используются нелинейные активные среды, которые на протяжении последних десятилетий активно исследуются и находят применение во всех научных и технических сферах. Характерным примером нелинейной активной среды является арсенид галлия n-типа.

Ранее в работах [1-3] авторами было установлено, что в планарно-эпитаксиальных мезоструктурах на основе полуизолирующего GaAs (SI-GaAs) возможно возникновение низкочастотных устойчивых колебаний, обусловленных проявлением рекомбинационной неустойчивости тока. Было показано, что параметры генерируемых колебаний тока, могут в существенной степени зависеть от внешних факторов таких как приложенное к структуре постоянное напряжение, интенсивность внешнего оптического воздействия и др.

Недавние исследования авторов работ [1-3] показали, что более выраженный характер проявления рекомбинационной неустойчивости тока в исследуемых структурах наблюдается при условии, когда анодный контакт структуры представляет собой контакт металл-полупроводник M-SI-GaAs (контакт прижимного вольфрамового зонда к полуизолирующему арсениду галлия), а катодный контакт является мезоструктурой (M-n<sup>+</sup>-n-SI-GaAs). Однако детально не было проведено исследование вольт-амперных характеристик и зависимостей параметров генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения и длины активной области исследуемой структуры.

**Цель магистерской работы.** Целью данной работы является исследование особенностей проявления неустойчивости тока с низкочастотными осцилляциями в структурах M-n<sup>+</sup>-n-SI-GaAs-M на основе полуизолирующего арсенида галлия.

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

1. Анализ научно-технической литературы по тематике исследования: рассмотрение возможных физических механизмов, приводящих к развитию неустойчивостей тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия, и перспектив их применений в устройствах функциональной электроники;

2. Освоение методики проведения экспериментов с использованием установки, позволяющей исследовать вольт-амперные характеристики планарных структур на основе арсенида галлия и параметры генерируемых колебаний тока;

3. Экспериментальное исследование влияния длины активной области структуры на особенности проявления рекомбинационной неустойчивости тока в структурах  $M-n^+-n-SI-GaAs-M$  на основе полуизолирующего арсенида галлия;

4. Экспериментальное исследование особенностей проявления рекомбинационной неустойчивости тока в исследуемых структурах в условиях внешнего оптического воздействия на активную область структуры;

5. Анализ полученных экспериментальных данных;

6. Формулировка выводов на основе полученных результатов.

Структура магистерской работы. Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ, работа включает 2 основных раздела:

1. Физические механизмы возникновения неустойчивостей тока в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия.

2. Экспериментальное исследование особенностей проявления неустойчивости тока с низкочастотными колебаниями в структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия.

**Положение, выносимое на защиту.** Экспериментальное исследование вольт-амперных характеристик структур с различной длиной активной области показало, что на всех исследуемых образцах при увеличении длины активной области структуры происходит увеличение порогового напряжения генерации.

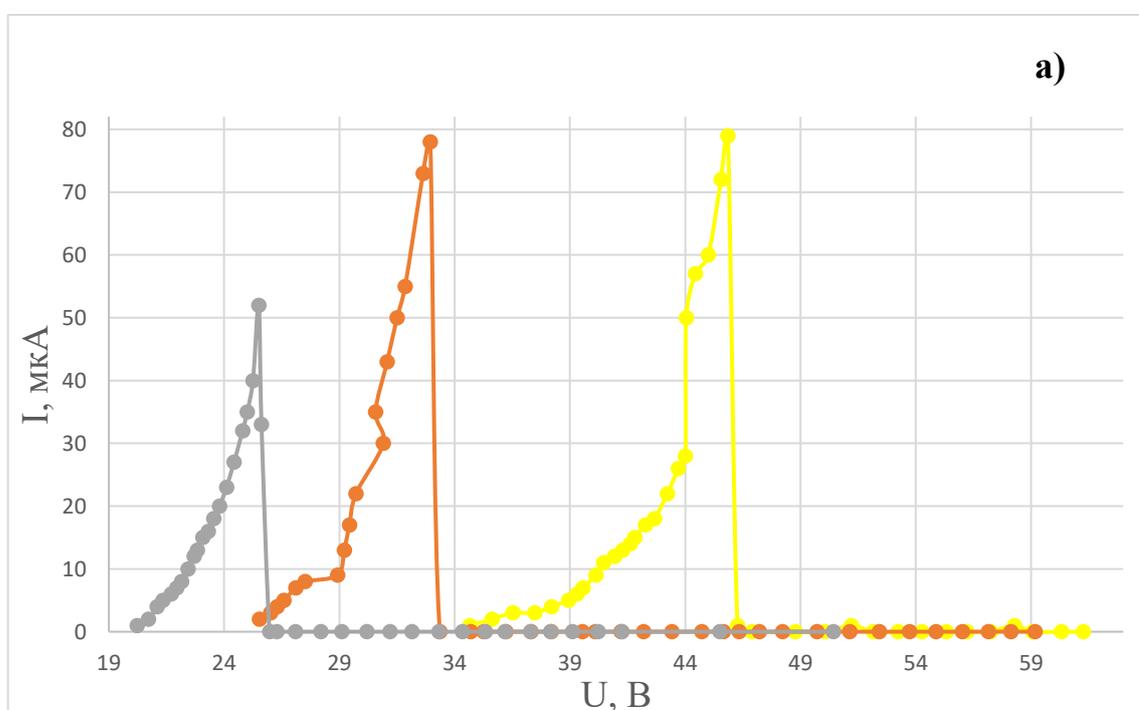
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

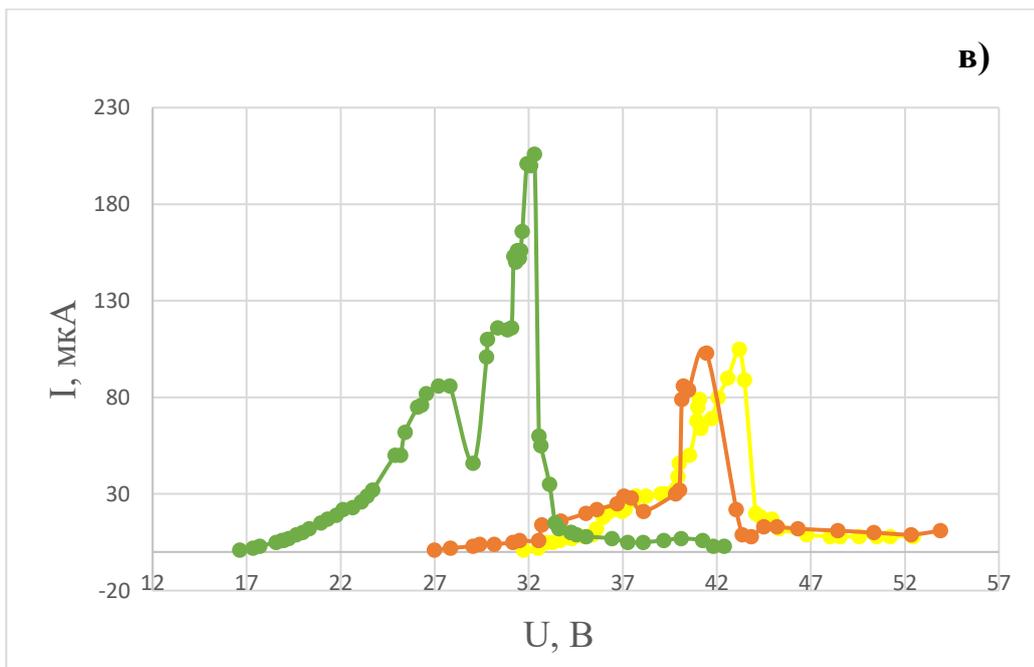
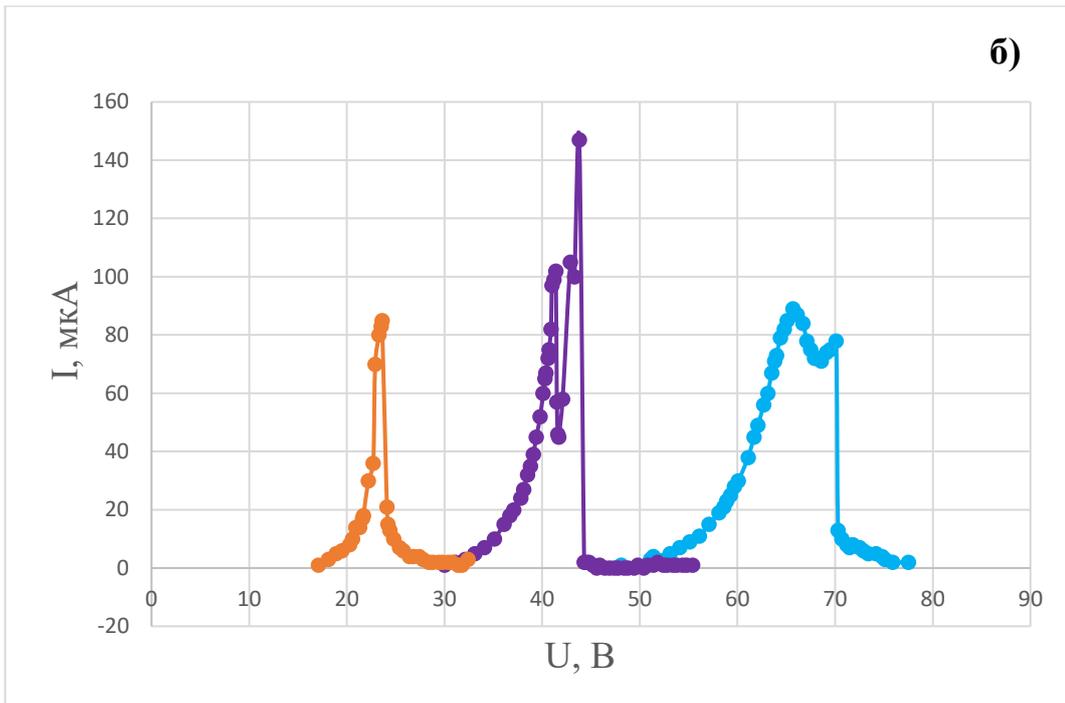
В разделе 1 проводится анализ научно-технической литературы, в которой рассматриваются различные механизмы неустойчивостей тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия. Анализ известных литературных данных, включая результаты предшествующих работ, проводимых на кафедре физики твердого тела СГУ, свидетельствует о том, что исследованиям ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниковых образцах (GaAs, CdTe, Ge, Si), посвящено большое количество работ.

В разделе 2 представлены результаты серии экспериментального исследования низкочастотных колебаний тока в структурах полуизолирующего арсенида галлия при приложении к структуре постоянного напряжения. В ходе работы было проведено исследование для четырех различных образцов (образец 1 (а), образец 2 (б), образец 3 (в), образец 4 (г)).

На рисунке 1 представлены полученные ВАХ для структур с различной длиной активной области.

$L_a= 15$  мкм ■,  $L_a= 30$  мкм ■,  $L_a= 45$  мкм ■,  $L_a= 60$  мкм ■,  
 $L_a= 75$  мкм ■,  $L_a= 90$  мкм ■,  $L_a= 150$  мкм ■





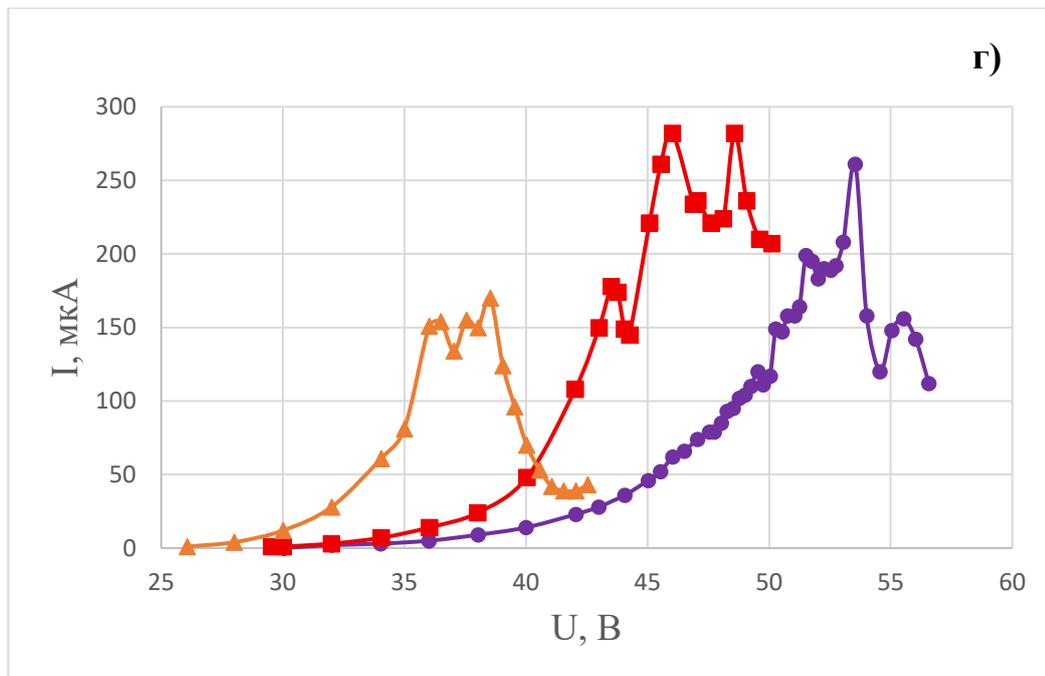
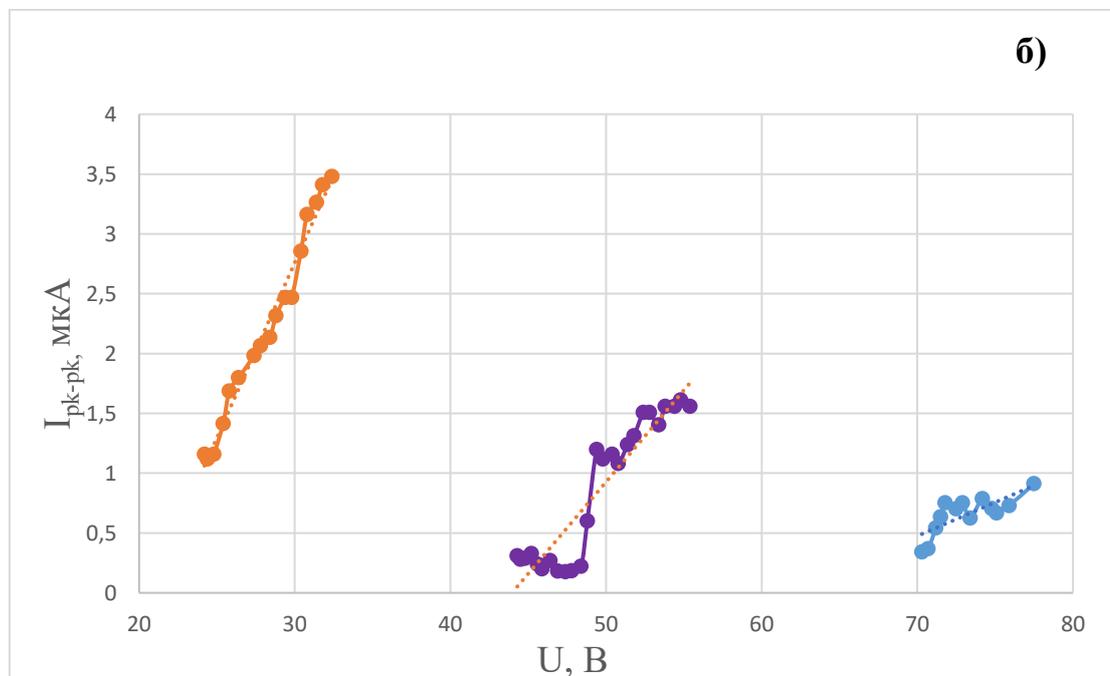
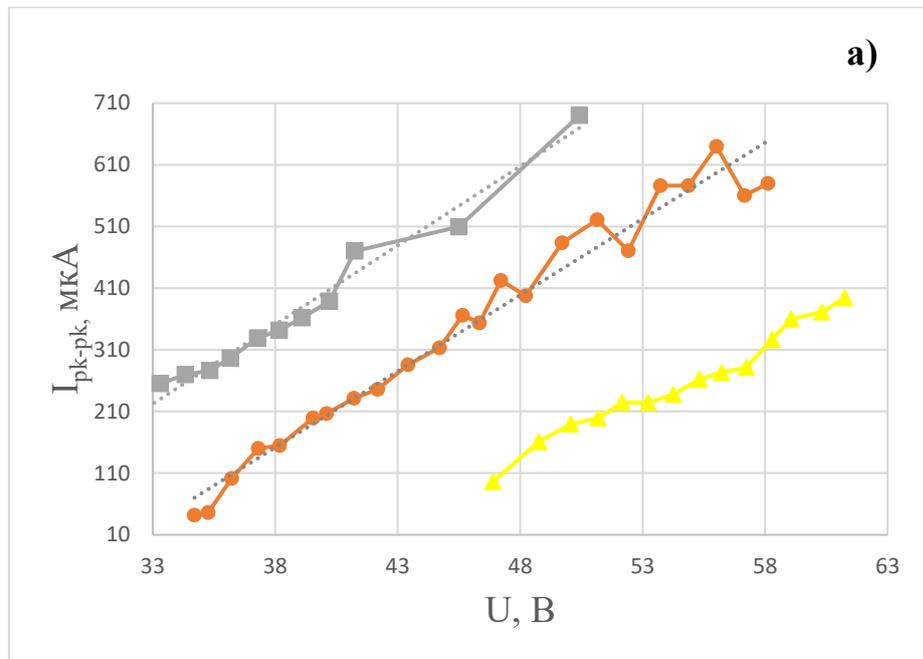


Рисунок 1 - Вольт-амперные характеристики для структур с различной длиной активной области для четырех образцов: образец 1 (а); образец 2 (б); образец 3 (в); образец 4 (г)

Из полученных данных на рисунке 1 можно сделать следующие выводы относительно вольт-амперных характеристик с различной длиной активной области для четырех образцов. На рисунке 1 (а) можем наблюдать как на начальном участке происходит монотонное возрастание тока при увеличении приложенного напряжения. В результате с увеличением длиной активной области происходит смещение области генерации колебаний (участка отрицательного дифференциального сопротивления - ОДС) в сторону более высоких напряжений.

Так же можно отметить, что для образцов 2-4 наблюдается противоположная тенденция: при возрастании длины активной области можем наблюдать наличие отклонений максимальных значений токов на вольт-амперных характеристиках. Максимальное значение тока, наблюдаемое на ВАХ, и его зависимость от длины активной области исследуемой структуры определяются индивидуальными особенностями каждого образца.

На рисунке 2 представлены зависимости амплитуды генерируемых колебаний тока от величины приложенного постоянного напряжения для структур с различной длиной активной области, полученные для четырех образцов (образец 1 (а), образец 2 (б), образец 3 (в), образец 4 (г)).



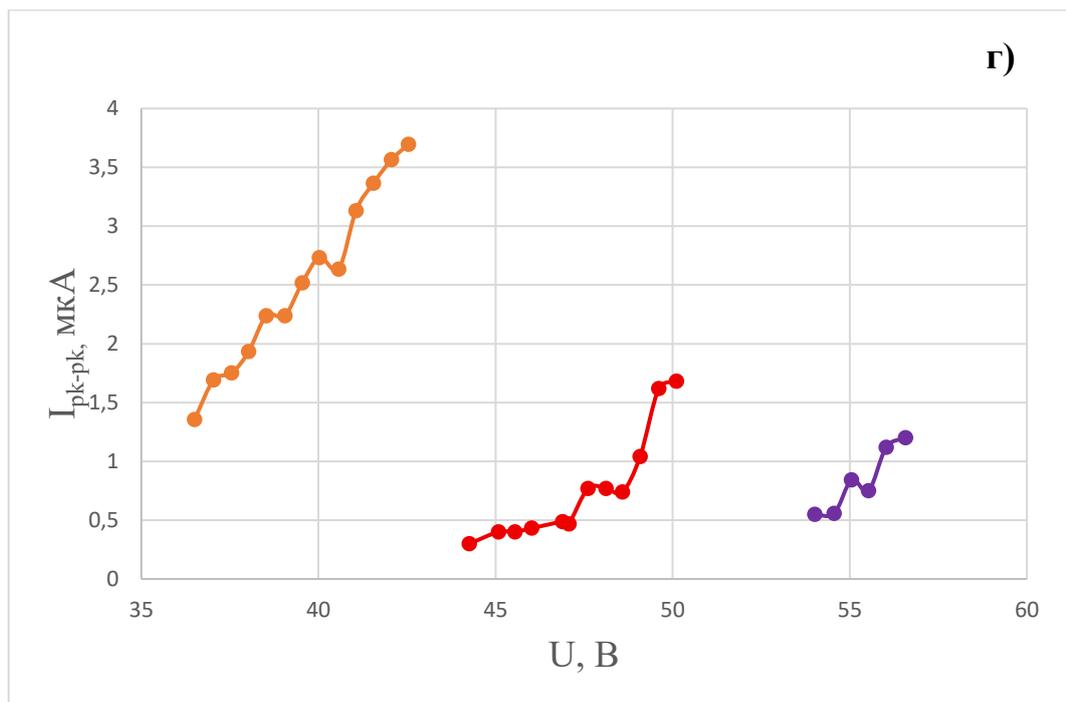
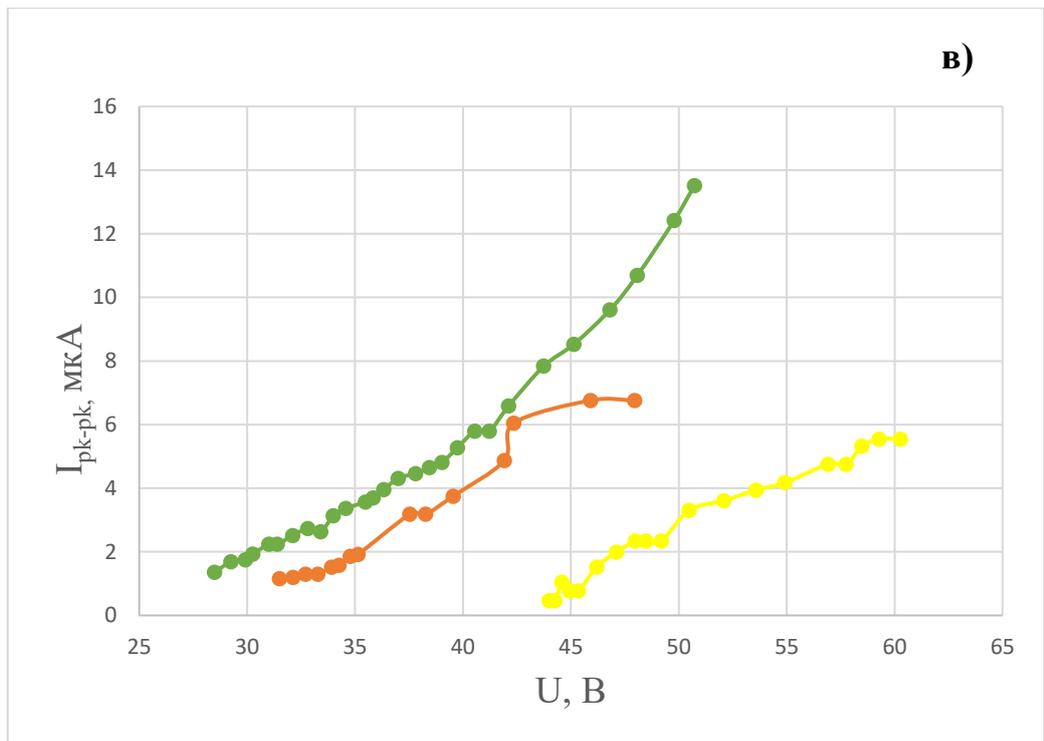


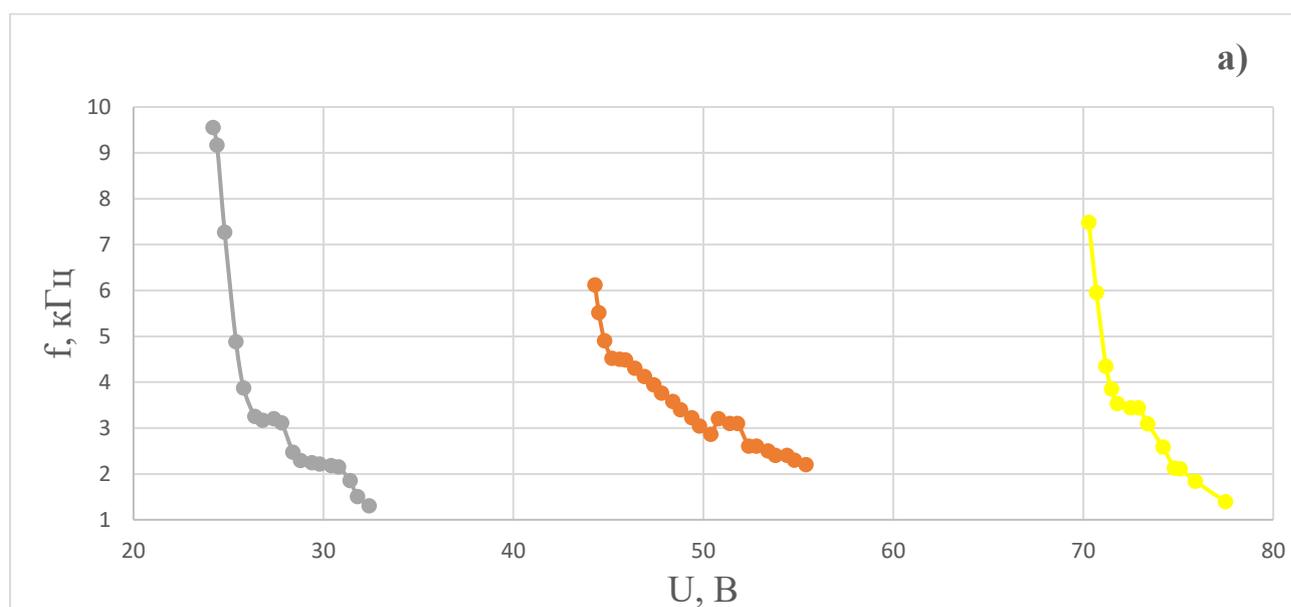
Рисунок 2 - Зависимости амплитуды генерируемых колебаний от величины приложенного постоянного напряжения для структур с различной длиной активной области для четырех образцов: образец 1 (а); образец 2 (б); образец 3 (в); образец 4 (г)

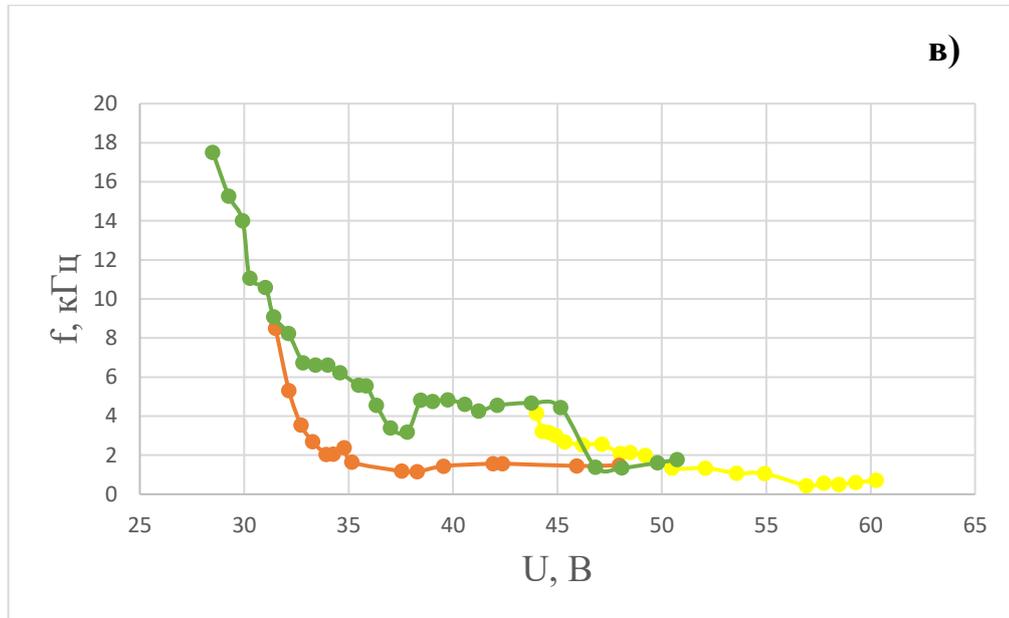
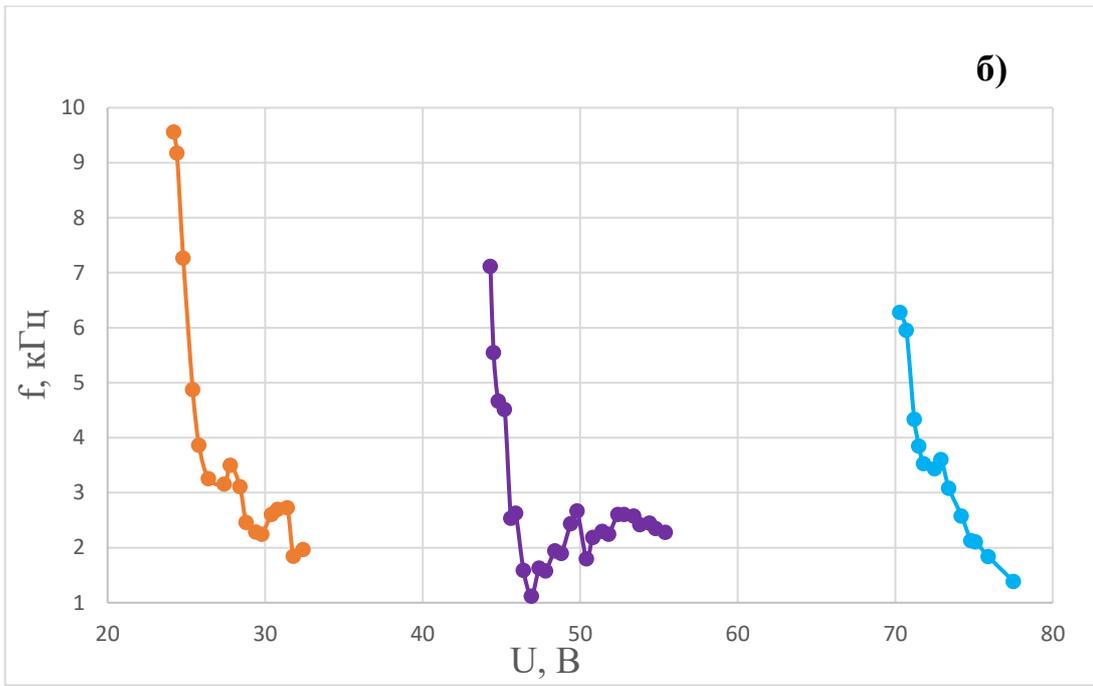
Установлено, что при увеличении длины активной области исследуемых структур наблюдается тенденция уменьшения амплитуды колебаний тока,

возникающих при проявлении неустойчивости. На рисунке 2 (б) зависимость амплитуды генерируемых колебаний тока от приложенного напряжения носит нелинейный характер. Так же было зафиксировано увеличение амплитуды генерируемых колебаний тока при увеличении приложенного напряжения. Это означает, что для структур с большей длиной активной области достижение сопоставимых значений амплитуды колебаний требует подачи более высоких напряжений.

Такое поведение согласуется с физическим механизмом рекомбинационной неустойчивости, при котором формирование и устойчивое существование колебательных процессов связано с условиями захвата носителей на глубокие примесные уровни, чувствительные к напряжённости электрического поля. Увеличение длины активной области приводит к тому, что при том же приложенном напряжении напряжённость электрического поля в активной области уменьшается, следовательно, для достижения аналогичных условий возбуждения колебательного режима требуется большее напряжение.

На рисунке 3 представлены зависимости частоты генерируемых колебаний тока от величины приложенного постоянного напряжения для структур с различной длиной активной области, полученные для четырех образцов (образец 1 (а), образец 2 (б), образец 3 (в), образец 4 (г)).





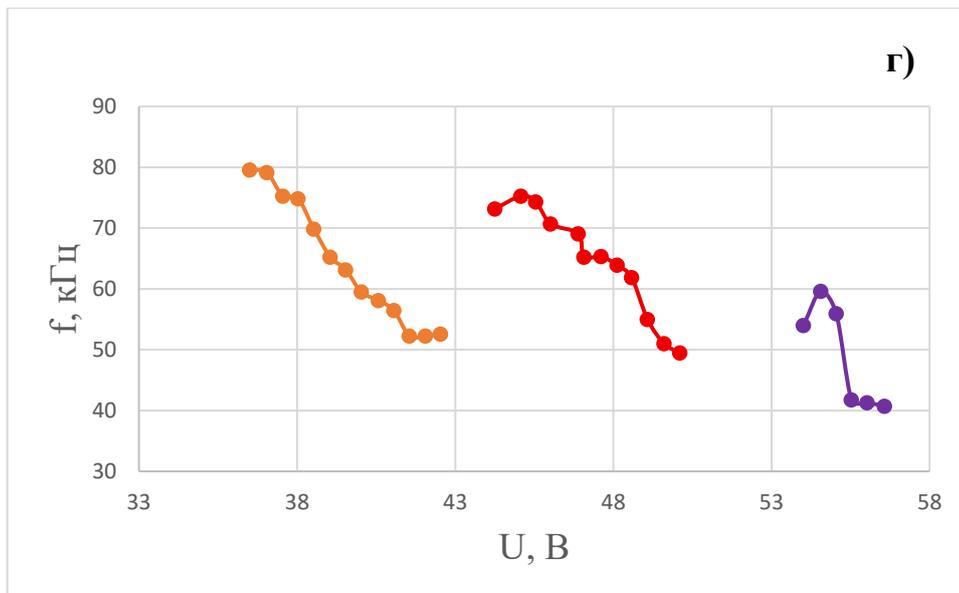


Рисунок 3 - Зависимости частоты генерируемых колебаний от величины приложенного постоянного напряжения для структур с различной длиной активной области для четырех образцов: образец 1 (а); образец 2 (б); образец 3 (в); образец 4 (г)

Зависимость частоты колебаний тока от величины приложенного постоянного напряжения для структур с различной длиной активной области во всех случаях отчетливо наблюдается тенденция к снижению частоты колебаний по мере увеличения напряжения, что отражает увеличение времени пролёта носителей через активную область.

Проведенное экспериментальное исследование по изучению влияния длины активной области на вольт-амперные характеристики показывают нестабильность результатов, как видно на рисунке 1 б, в, г. При увеличении длины активной области исследуемой структуры можно заметить увеличение порогового напряжения генерации (смещение участка ОДП на ВАХ в область больших напряжений при увеличении  $L_a$ ). Так же было зафиксировано увеличение амплитуды генерируемых колебаний тока при увеличении приложенного напряжения. Формирование устойчивых колебаний тока высокой амплитуды происходила при расположении анодного зонда на контакте Me-n<sup>+</sup>-n-n<sub>6</sub> - подложка структуры, а катодного – на высокоомной подложке.

Учитывая наличие значительных отклонений в значениях ВАХ, и нелинейность на некоторых графика зависимости амплитуды генерируемых колебаний было принято использовать режим изменения напряжения ступенчатой формы на исследуемые структуры. Такой подход позволяет точнее контролировать условия эксперимента и выявить зависимость от внешних факторов, обеспечивая стабильность и точность измерений.

На рисунке 4 представлены зависимости напряжения и тока через структуру от времени (подаваемое на структуру напряжение изменяется ступенчатым образом во времени). Высота каждой ступени напряжения составляла 1 В, а её продолжительность – 1 с. Такая временная дискретизация обеспечивала установление квазистационарного режима тока на каждой ступени.

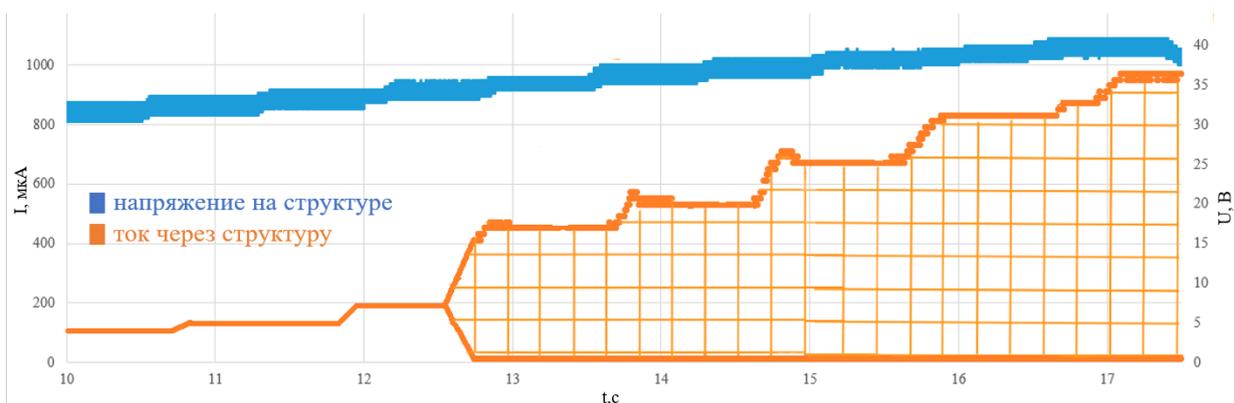


Рисунок 4 – Зависимость напряжения на структуре и тока через структуру от времени в режиме прикладываемого напряжения ступенчатой формы

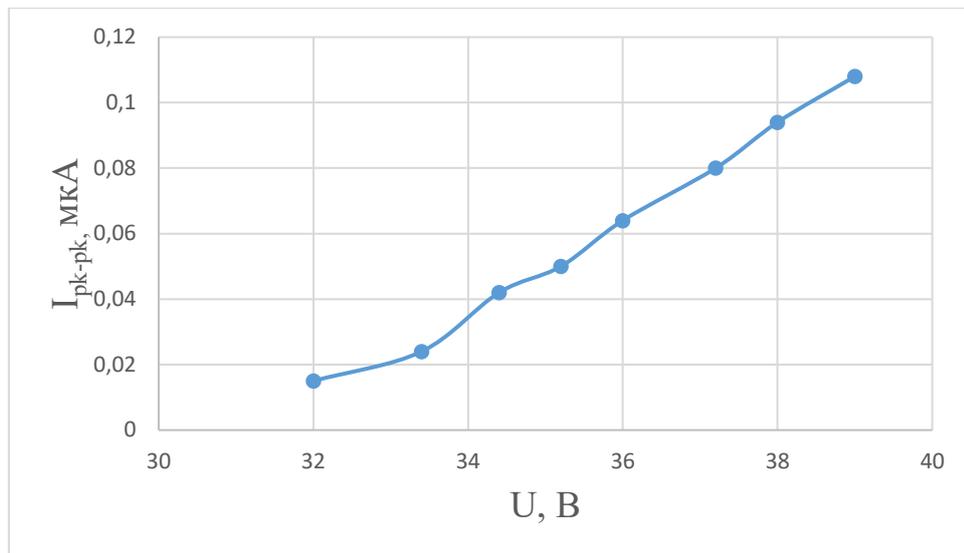


Рисунок 5 - Зависимость амплитуды генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения ступенчатой формы

Значения тока определялись по падению напряжения на последовательно включённом со структурой нагрузочном резисторе, что позволяло оценить амплитуду генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения ступенчатой формы. Для каждой ступени подаваемого напряжения по осциллограммам измерялись амплитуды возникающих колебаний тока. На рисунке 5 представлена зависимость амплитуды генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения. Из графика видно, что с увеличением напряжения наблюдается практически линейный рост амплитуды колебаний. Зависимости амплитуды тока от напряжения при подаче постоянного и ступенчатого сигнала имеют схожий характер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения выпускной квалификационной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. В данной работе проведен анализ научно-технической литературы, в которой рассматриваются различные механизмы неустойчивостей тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия. Анализ известных литературных данных, включая результаты предшествующих работ, проводимых на кафедре физики твердого тела СГУ, свидетельствует о том, что исследованиям ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниковых образцах (GaAs, CdTe, Ge, Si), посвящено большое количество работ. Исследования такого рода не теряют актуальности и в настоящее время, поскольку установление механизмов управления динамикой доменов сильного поля, исследования особенностей проявления этих неустойчивостей в условиях воздействия однородного или локализованного оптического излучения открывают перспективы создания различных электронных, оптоэлектронных и электрооптических элементов и устройств с широкими функциональными возможностями, способных осуществлять прием, обработку, хранение, передачу и отображение сложных информационных сигналов в широком диапазоне частот (от десятков кГц до десятков ГГц).

2. Экспериментальное исследование вольт-амперных характеристик структур с различной длиной активной области показало, что на всех исследуемых образцах при увеличении длины активной области структуры происходит увеличение порогового напряжения генерации. Результаты исследования ВАХ структур с различной длиной активной области, полученные в режиме приложения к структуре заданного постоянного напряжения, показали что однозначной зависимости максимального значения тока на вольт-амперной характеристике от длины активной области структуры не наблюдается. Результаты аналогичного исследования, проведенного в режиме приложения к структуре напряжения ступенчатой формы, позволяют сделать вывод о том, что максимальное значение тока на вольт-амперной характеристике при увеличении

длины активной области структуры монотонно уменьшается, по всей видимости, вследствие увеличения омического сопротивления активной области структуры;

3. Проведенная серия экспериментальных исследований амплитуды и частоты генерируемых колебаний тока в структурах  $M-n^+-n-Si-GaAs-M$  с различной длиной активной области показала, что для всех исследуемых образцов обнаружены следующие особенности:

- при увеличении длины активной области структуры наблюдается тенденция уменьшения амплитуды генерируемых колебаний тока; на зависимостях амплитуды генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения имеется выраженная тенденция увеличения амплитуды генерируемых колебаний тока при увеличении приложенного напряжения;

- при увеличении длины активной области структуры наблюдается тенденция уменьшения частоты генерируемых колебаний тока; на зависимостях частоты генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения имеется выраженная тенденция уменьшения частоты генерируемых колебаний тока при увеличении приложенного напряжения;

4. Зависимости амплитуды генерируемых колебаний тока от величины приложенного напряжения, полученные для исследуемых структур в режиме приложения к структуре напряжения ступенчатой формы согласуются с аналогичными зависимостями, полученными в режиме приложения к структуре заданного постоянного напряжения;

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов А.И., Митин А.В. Экспериментальное исследование спектра колебаний тока в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах арсенида галлия в условиях засветки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 87-91.
2. Михайлов А.И., Митин А.В., Кожевников И.О. Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n-GaAs // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2014. - Т. 17, № 4. - С. 64-69. - ISSN 1810-3189.
3. Михайлов А.И., Митин А.В., Терентьева А.И. Особенности проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках в условиях оптического воздействия // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сборник статей / Под общей редакцией проф. А.И. Михайлова. – Саратов: Издательский центр «Наука», 2013. – С. 130-153. - ISBN 978-5-9999-1719-5.