

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Влияние времени жизни неравновесных носителей заряда на  
особенности рекомбинационной неустойчивости тока в  
структурах полуизолирующего арсенида галлия**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ  
студента 4 курса 4052 группы  
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
института физики

Курочкина Данилы Витальевича

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

старший преподаватель

кафедры физики твердого тела

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твёрдого  
тела:

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 2023

## **Общая характеристика темы**

Функциональная электроника – это область интегральной электроники, которая изучает образование и взаимодействие с физическими полями динамических неоднородностей в сплошных средах и разрабатывает устройства для обработки, генерации и хранения информации на основе этих неоднородностей.

Функциональная электроника основывается на принципах физической интеграции динамических неоднородностей. К числу перспективных для функциональной электроники физических эффектов можно отнести: эффект Ганна, обусловленный дрейфовой нелинейностью и рекомбинационную неустойчивость, обусловленную концентрационной нелинейностью, которые могут проявляться в такой активной среде, как полуизолирующий GaAs в сильных электрических полях. Два этих механизма могут приводить к образованию, в активной области полупроводниковых структур подвижных доменов сильного электрического поля.

В работах, проведенных на кафедре физики полупроводников СГУ по исследованию низкочастотных устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокомоменных планарных мезаструктурах на основе GaAs было установлено, что локализованное освещение лазерным излучением из диапазона длин волн, соответствующего собственному поглощению арсенида галлия, центральной части активной области структуры может приводить к существенному увеличению частоты генерируемых колебаний тока (кратность изменения частоты составляла от 5 до 8 раз).

Для интерпретации полученных экспериментальных данных была выдвинута физическая идея, заключающаяся в том, что наблюдаемое значительное изменение частоты генерируемых колебаний тока может быть связано с изменением времени жизни неравновесных носителей заряда, генерируемых светом в исследуемом материале при воздействии внешних физических факторов.

Исследование влияния времени жизни на спектр генерируемых колебаний тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия, проведенное с использованием локально-полевой математической модели, при проявлении рекомбинационной неустойчивости показало наличие двух устойчивых динамических состояний в различных интервалах значений времени жизни. В интервале значений времени жизни  $\tau = 1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8}$  с наблюдался режим с появлением устойчивых низкочастотных колебаний, а в интервале  $3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$  с наблюдался режим с более высокочастотными устойчивыми колебаниями меньшей амплитуды. Численные эксперименты показали, что в указанных структурах в интервале значений времени жизни  $1 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-8}$  с наблюдался более сложный характер динамики электронных процессов, однако, не было проведено детальное исследование особенностей проявления рекомбинационной неустойчивости тока в этом интервале значений времени жизни.

### **Цель и задачи бакалаврской работы**

Целью данной работы является исследование влияния значения времени жизни на нелинейную динамику пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структурах полуизолирующего GaAs в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости тока и локализованного оптического воздействия. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

- 1) Анализ научно-технической литературы;
- 2) Реализация математической модели нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структурах полуизолирующего GaAs в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости тока и локализованного освещения активной области структуры при различных значениях времени жизни;
- 3) Проведение серии численных экспериментов;
- 4) Анализ результатов математического моделирования.

## **Структура бакалаврской работы**

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ, работа включает 3 раздела:

1. Понятие рекомбинационной неустойчивости.
2. Математическое моделирование электронных процессов в полупроводниках.
3. Результаты численных экспериментов по исследованию влияния времени жизни на нелинейную динамику пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структуре.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В разделе 1** проведен анализ научно-технической литературы, посвящённой исследованиям рекомбинационной неустойчивости тока, а также влиянию освещения на нее.

**В разделе 2** рассмотрены основные виды математических моделей, используемых при исследовании динамики электронных процессов в полупроводниковых структурах в сильных электрических полях; сформулирована система уравнений локально-полевой математической модели для исследуемых структур.

**В разделе 3** приведены результаты численных экспериментов по исследованию влияния времени жизни на нелинейную динамику пространственного заряда и тока в структуре в условиях освещения центральной части активной области структуры.

Было проведено математическое моделирование электронных процессов в исследуемых структурах в интервале значений времени жизни  $\tau = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с} - 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$  и были получены зависимости частоты первой гармоники  $f_1(U)$ , постоянной составляющей  $j_0(U)$ , а также зависимость амплитуды первой  $j_1(U)$ , второй  $j_2(U)$ , третьей  $j_3(U)$  гармонической составляющей от напряжения (в соответствии с рисунком 1):

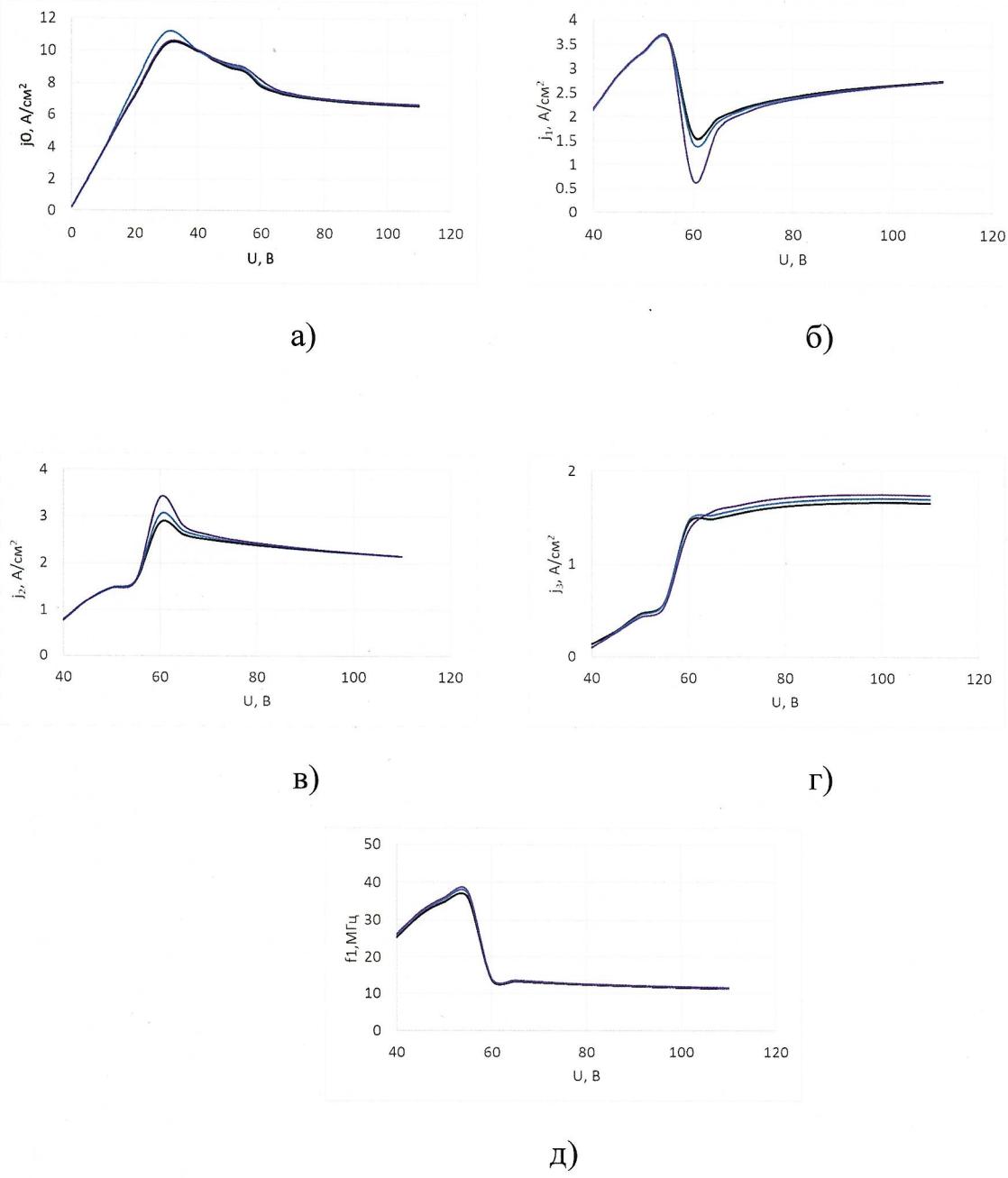


Рисунок 1 – Зависимости постоянной составляющей  $j_0$  (а), амплитуд основной  $j_1$  (б), второй  $j_2$  (в), третьей  $j_3$  (г) гармоник плотности полного тока и частоты первой гармоники  $f_1$  (д) от величины приложенного напряжения  $U$  в условиях локализованного освещения центральной части активной области структуры при различных значениях времени жизни:  $\tau=1 \cdot 10^{-8}$  с (черный),  $\tau=1.1 \cdot 10^{-8}$  с (синий),  $\tau=1.2 \cdot 10^{-8}$  с (фиолетовый)

Анализ зависимостей  $j_0(U)$  в диапазоне напряжений 40 - 110 В при данных значениях времени жизни показывает, что с увеличением напряжения происходит уменьшение плотности тока (отрицательное дифференциальное

сопротивление). Это обуславливается проявлением рекомбинационной неустойчивости тока в исследуемой структуре.

Как видно из рисунка 1(д), зависимости  $f_1(U)$ , рассчитанные при всех указанных значениях времени жизни, имеют схожий характер. При увеличении напряжения от порогового (40 В) до 55 В происходит увеличение частоты колебаний тока для всех значений времени жизни. При увеличении напряжения от 55 до 60 В наблюдается резкое уменьшение частоты основной гармоники генерируемых колебаний тока. При  $U = 60$  В на зависимости  $f_1(U)$  наблюдается локальный минимум. Дальнейшее повышение напряжения не приводит к значительным изменениям частоты.

Анализ зависимостей  $j_1(U)$ ,  $j_2(U)$ ,  $j_3(U)$  показал, что увеличение напряжения от порогового до 55 В приводит к увеличению амплитуд гармонических составляющих плотности полного тока для всего интервала значений времени жизни. При увеличении напряжения от 56 до 60 В значения амплитуды первой гармоники резко уменьшаются, амплитуды второй и третьей гармоник резко увеличиваются. Установлено, что увеличение значения времени жизни в рассматриваемом интервале при  $U = 60$  В приводит к уменьшению амплитуды первой гармоники (на 58%) и увеличению амплитуды второй гармоники (на 18%) колебаний тока.

Дальнейшее увеличение напряжения приводит к увеличению амплитуды первой гармоники и уменьшению амплитуды второй гармоники плотности полного тока. При этом амплитуда третьей гармоники изменяется незначительно.

Анализ нелинейной динамики напряженности электрического поля в структуре в условиях локализованного освещения центральной части активной области показал, что в диапазоне напряжений 40 – 55 В, при всех рассматриваемых значениях времени жизни, динамика напряженности электрического поля характеризуется образованием в прикатодной области структуры, левее освещаемого участка, динамической неоднородности, представляющей собой рекомбинационный домен. Формирующийся домен

развивается, доходя до середины освещаемой области, где происходит его рассасывание. Данный процесс периодически повторяется, что обуславливает характер формирования колебаний тока (в соответствии с рисунком 2).

При дальнейшем увеличении напряжения и достижении 60 В происходит изменение характера динамики электронных процессов. Рекомбинационный домен, формируясь вблизи катода, развивается в левой, относительно области освещения, части активной области структуры и, достигая области освещения, проходит через нее, после чего домен доходит до анода, что обусловливает наличие дополнительного пика на форме генерируемых колебаний тока по сравнению с предыдущим случаем (в соответствии с рисунком 3).

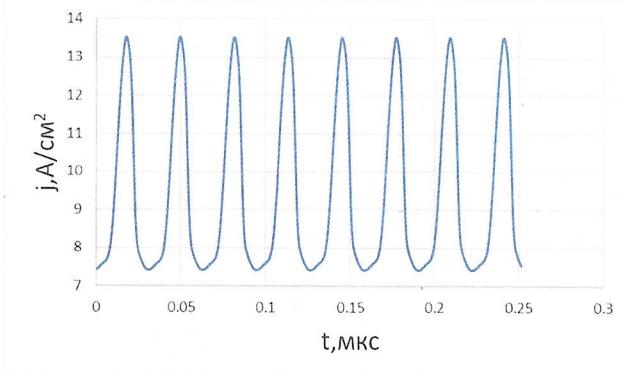


Рисунок 2 – Характерная форма генерируемых колебаний тока в условиях локального освещения в середине активной области ( $\tau=1 \cdot 10^{-8}\text{s}$ ,  $U=45\text{ V}$ ).

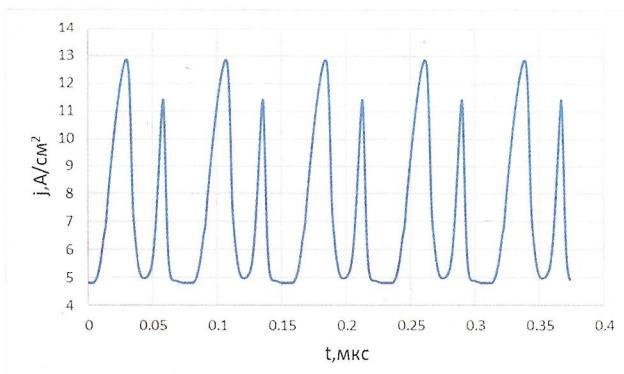


Рисунок 3 – Характерная форма генерируемых колебаний тока в условиях локального освещения в середине активной области ( $\tau=1 \cdot 10^{-8}\text{s}$ ,  $U=70\text{ V}$ ).

Было проведено математическое моделирование электронных

процессов в исследуемых структурах в интервале значений времени жизни  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  с –  $1,7 \cdot 10^{-8}$  с и были получены зависимости частоты первой гармоники  $f_1(U)$ , постоянной составляющей  $j_0(U)$ , а также зависимость амплитуды первой  $j_1(U)$ , второй  $j_2(U)$ , третьей  $j_3(U)$  гармонической составляющей от напряжения (в соответствии с рисунком 4):

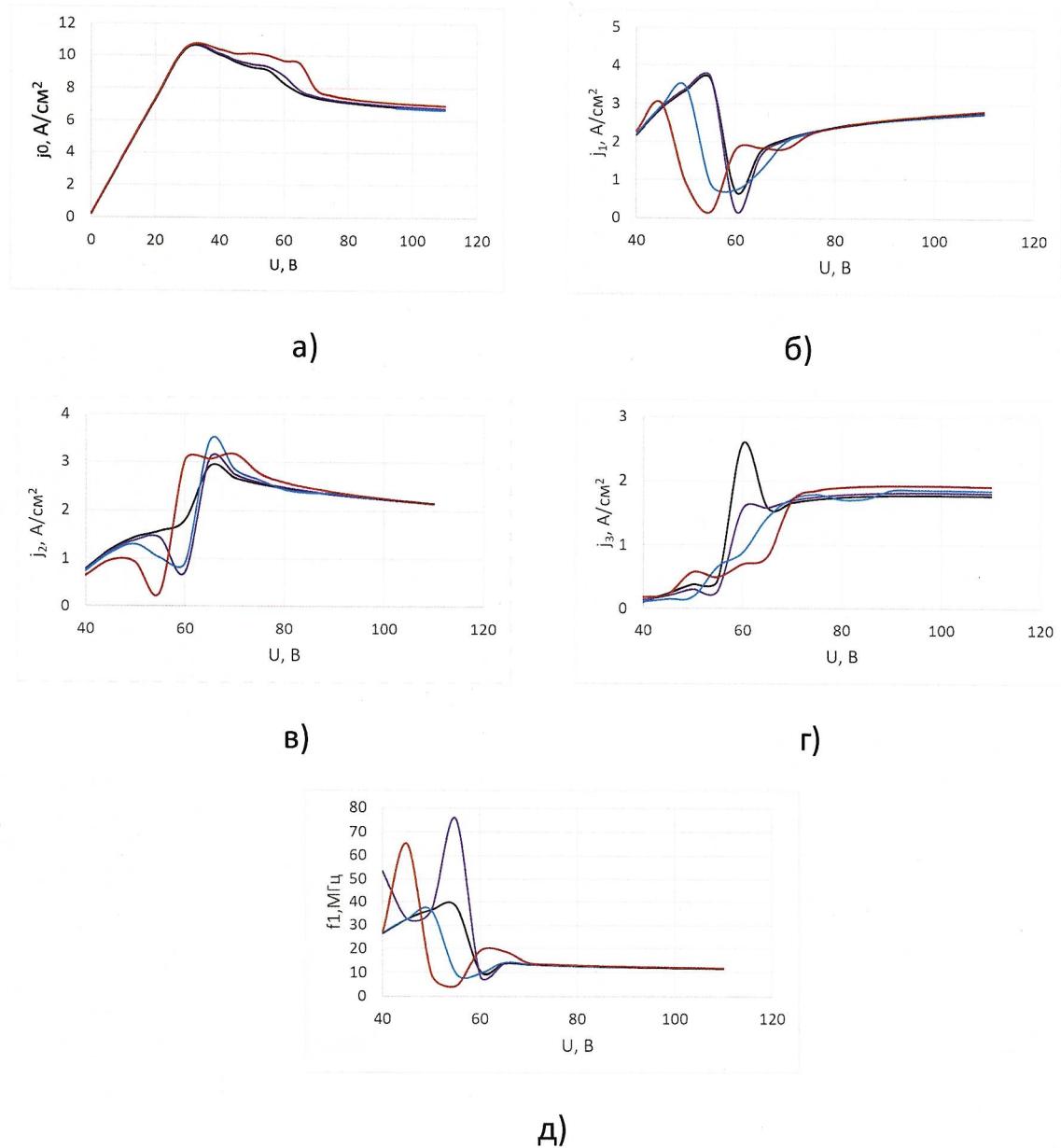


Рисунок 4 – Зависимости постоянной составляющей  $j_0$  (а), амплитуд основной  $j_1$  (б), второй  $j_2$  (в), третьей  $j_3$  (г) гармоник плотности полного тока и частоты первой гармоники  $f_1$  (д) от величины приложенного напряжения  $U$  в условиях локализованного освещения центральной части активной области

структуры при различных значениях времени жизни:  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  с (черный),  $\tau=1,4 \cdot 10^{-8}$  с (фиолетовый)  $\tau=1,5 \cdot 10^{-8}$  с (синий)  $\tau=1,7 \cdot 10^{-8}$  с (красный).

Анализ зависимостей  $f_1(U)$  показывает, что для значения времени жизни  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  с в интервале напряжений 40-55 В характерно повышение частоты основной гармоники колебаний тока при увеличении напряжения. В интервале напряжений 56-60 В происходит резкое уменьшение частоты основной гармоники, и при дальнейшем увеличении значения напряжения частота практически не изменяется.

При значении времени жизни  $\tau=1,4 \cdot 10^{-8}$  с при увеличении напряжения от 40 до 45 В происходит уменьшение частоты колебаний тока. При напряжении от 46 до 55 В происходит увеличение частоты основной гармоники. При увеличении напряжения от 56 до 60 В происходит резкое уменьшение частоты генерируемых колебаний тока. При  $U = 60$  В на зависимости  $f_1(U)$  наблюдается локальный минимум. В области напряжений 65 – 110 В характер зависимости  $f_1(U)$  имеет вид, аналогичный полученному при  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  с.

Как видно из полученных данных, характер изменения частоты при увеличении напряжения для значения времени жизни  $\tau=1,5 \cdot 10^{-8}$  с имеет вид, аналогичный наблюдаемому для  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  с. Сравнительный анализ зависимостей  $f_1(U)$ , рассчитанных при  $\tau=1,5 \cdot 10^{-8}$  с и  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  с, показал, что увеличение значения  $\tau$  от  $1,3 \cdot 10^{-8}$  с до  $1,5 \cdot 10^{-8}$  с приводит к смещению напряжения перехода, при котором происходит резкое изменение частоты и амплитуды гармонических составляющих, в область меньших значений напряжения.

При значении времени жизни  $\tau=1,7 \cdot 10^{-8}$  с в интервале напряжений U=40 - 45 В происходит более резкое увеличение частоты, чем при меньших значениях времени жизни. Увеличение значения  $\tau$  от  $1,5 \cdot 10^{-8}$  с до  $1,7 \cdot 10^{-8}$  с сопровождается дальнейшим уменьшением напряжения перехода.

Анализ зависимостей  $j_1(U)$ , рассчитанных для значений времени жизни  $\tau=1,3 \cdot 10^{-8}$  и  $1,4 \cdot 10^{-8}$  с, показал, что в диапазоне напряжений 40-55 В происходит увеличение амплитуды первой гармонической составляющей при увеличении

напряжения. При дальнейшем повышении напряжения происходит резкое уменьшение значения амплитуды первой гармонической составляющей и достижение им минимального значения при напряжении 60 В. Как и на зависимостях  $f_1(U)$ , на зависимостях  $j_1(U)$  наблюдается уменьшение напряжения перехода при увеличении значения  $\tau$  от  $1,5 \cdot 10^{-8}$  с до  $1,7 \cdot 10^{-8}$  с.

Анализ нелинейной динамики напряженности электрического поля, концентрации неравновесных электронов и дырок, а также тока в исследуемой структуре в условиях локализованного освещения центральной части активной области при значениях времени жизни  $\tau$  от  $1,3 \cdot 10^{-8}$  с до  $1,7 \cdot 10^{-8}$  с показал, что, в отличие от характера динамики электронных процессов, наблюдавшегося при значениях времени жизни  $\tau$  от  $1 \cdot 10^{-8}$  с до  $1,2 \cdot 10^{-8}$  с, в данном случае имеется диапазон напряжений, в котором наблюдается «переходный» динамический режим. В «переходном» режиме в течение одного периода колебаний тока может наблюдаться несколько (два или более) характерных циклов, соответствующих процессам последовательного формирования, движения и исчезновения в различных частях активной области структуры рекомбинационных доменов. При значениях времени жизни  $\tau$  от  $1,3 \cdot 10^{-8}$  с до  $1,5 \cdot 10^{-8}$  с в «переходном» режиме в первом цикле колебаний происходит формирование первого домена в прикатодной области структуры, прохождение его до освещаемой области и рассасывание в ней, после чего в прикатодной области структуры формируется второй домен, проходящий через освещаемую область, и достигающий анода, что обуславливает форму колебаний тока (в соответствии с рисунком 5), отличную от представленных ранее (в соответствии с рисунками 2, 3). При превышении временем жизни значения  $\tau = 1,4 \cdot 10^{-8}$  с в «переходном» режиме количество доменов, рассасывающихся в освещаемой области в течение одного периода колебаний, может увеличиваться, что приводит к увеличению количества циклов в периоде и появлению дополнительных пиков на форме генерируемых колебаний тока. Для значений времени жизни  $\tau = 1,3 \cdot 10^{-8}$  и  $1,4 \cdot 10^{-8}$  с «переходный» режим наблюдается при напряжениях  $U = 60\text{--}61$  В. Для времени

жизни  $\tau = 1,5 \cdot 10^{-8}$  с данный режим наблюдается при  $U = 55 - 60$  В, а для  $\tau = 1,7 \cdot 10^{-8}$  с – при  $U = 50 - 55$  В.

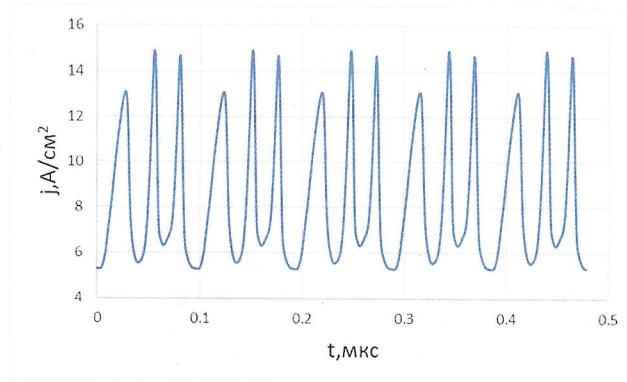


Рисунок 5 – Характерная форма генерируемых колебаний тока в условиях локального освещения в середине активной области ( $\tau = 1,3 \cdot 10^{-8}$  с,  $U = 60$  В)

Возникновение «переходного» режима, вероятно, объясняется тем, что процессы, связанные с прохождением предыдущего рекомбинационного домена через активную область структуры, влияют на формирование и прохождение следующего рекомбинационного домена. При уходе предыдущего домена происходит увеличение концентрации дырок в левой, относительно области освещения, части активной области структуры, которые не успевают перераспределиться в активной области к исходному состоянию до формирования очередного домена.

Дальнейший анализ распределений концентрации неравновесных электронов и дырок показал, что существование интервала значений времени жизни, для которых при увеличении времени жизни наблюдается уменьшение нижнего граничного значения интервала напряжений «переходного» режима, по всей видимости, обуславливается увеличением влияния диффузационного и дрейфового смещения неравновесных носителей заряда на нелинейную динамику пространственного заряда.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенный анализ результатов численных экспериментов позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Для всех рассматриваемых значений времени жизни можно выделить два основных режима генерации колебаний тока. В диапазоне малых напряжений наблюдается режим, при котором формирующийся домен доходит до освещаемой области и рассасывается. В диапазоне больших напряжений наблюдается режим, при котором формируемый домен проходит освещаемую область и уходит в анод.
2. Изменение значения времени жизни оказывает наиболее существенное влияние на характер динамики электронных процессов в определенном диапазоне напряжений, соответствующем переходу из режима, при котором домен, формируясь у катода, рассасывается в освещаемой области, в другой режим, при котором формирующийся домен проходит освещаемую область и уходит в анод.
3. Обнаружен «переходный» режим, наблюдаемый в определенном диапазоне значений времени жизни, при котором в одном периоде наблюдается несколько циклов колебаний, связанных, по всей видимости, с тем, что распределение электронов и дырок не успевает перейти в исходное состояние до формирования очередного домена в периоде.
4. Определено граничное значение времени жизни, превышение которого приводит к смещению напряжения изменения режима динамики электронных процессов в область меньших значений напряжения. Это, вероятно, связано с увеличением влияния дрейфового и диффузационного смещения на нелинейную динамику пространственного заряда.

