

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

Кафедра физики полупроводников

**Особенности нелинейной динамики пространственного заряда и тока в
структурах на основе высокоомного арсенида галлия в условиях
ганновской неустойчивости и локализованной засветки
активной области структуры**

АФТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

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

Шпак Никиты Валериевича

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Михайлов А.И.

фамилия, инициалы

ст. преподаватель

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Митин А.В.

фамилия, инициалы

Зав. кафедрой физики
полупроводников:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Михайлов А.И.

фамилия, инициалы

Саратов 2021

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика темы.

Одним из перспективных направлений современной электроники является функциональная электроника, которая основана на принципах возникновения в сплошных средах и взаимодействия с физическими полями динамических неоднородностей, а также разработкой устройств для обработки, генерирования и хранения информации на основе динамических неоднородностей. Динамическая неоднородность, возникающая в объеме твердого тела, выступает в роли носителя информации и представляет, главным образом, интерес для создания принципиально новых функциональных устройств. Материалами для построения функциональных устройств выступают нелинейные активные среды. Одним из известных физических эффектов, перспективных для функциональной электроники, является эффект Ганна, который, в частности, проявляется в такой нелинейной активной среде, как полуизолирующий GaAs.

Установление механизмов управления динамикой домена сильного электрического поля и исследование особенностей проявления ганновской неустойчивости в условиях локализованного оптического воздействия образца открывает возможности создания элементов и устройств с широкими возможностями, способных осуществлять приём, обработку, хранение и передачу информации в широком диапазоне частот.

Цель и задачи бакалаврской работы.

Целью данной работы является исследование особенностей нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия в условиях ганновской неустойчивости тока и локализованной засветки активной области структуры.

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

- Анализ научно-технической литературы по теме исследования;
- Освоение методики проведения численных экспериментов с использованием локально-полевой математической модели нелинейной

динамики пространственного заряда и тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия в условиях ганновской неустойчивости тока и локализованной засветки активной области структуры;

- Проведение серии численных экспериментов;
- Анализ полученных результатов и формулировка выводов.

Структура бакалаврской работы.

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ, работа включает 4 основных раздела:

1. Физическая картина эффекта Ганна.
2. Локально-полевая математическая модель $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$ структур.
3. Результаты численных экспериментов.
4. Исследование влияния времени жизни на особенности нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структуре при различных вариантах локализации области засветки

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

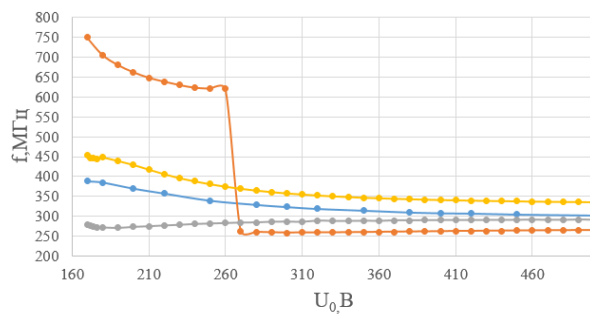
В разделе 1 проводится анализ научно-технической литературы, посвященной рассмотрению физической картины эффекта Ганна, исследованиям ганновской неустойчивости тока в полуизолирующем GaAs в условиях внешнего оптического воздействия, а также рассмотрены основные виды математических моделей, используемых при исследовании динамики электронных процессов в полупроводниковых структурах на основе арсенида галлия в сильных электрических полях.

В разделе 2 формулируется система уравнений локально-полевой математической модели для исследуемых структур.

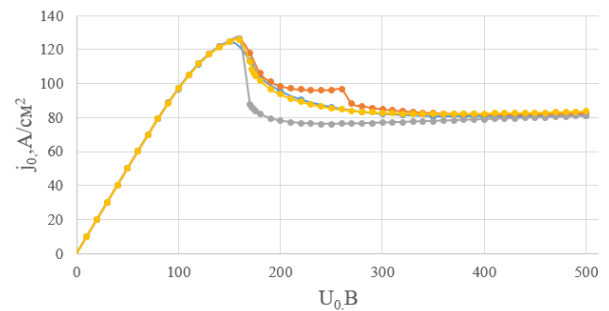
В разделах 3 и 4 представлены результаты проведенных численных экспериментов.

В работе проведена серия численных экспериментов по исследованию нелинейной динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия в условиях проявления ганновской неустойчивости и локализованной засветки активной области

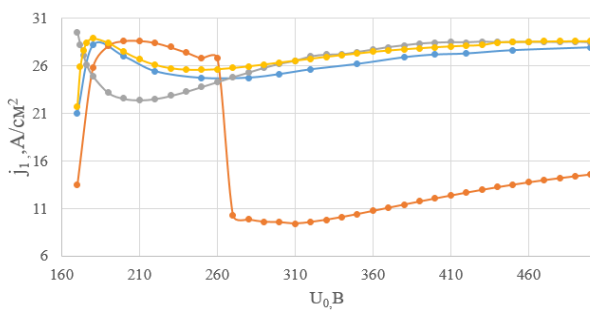
структуры с использованием локально-полевой математической модели, разработанной авторами [1-3].



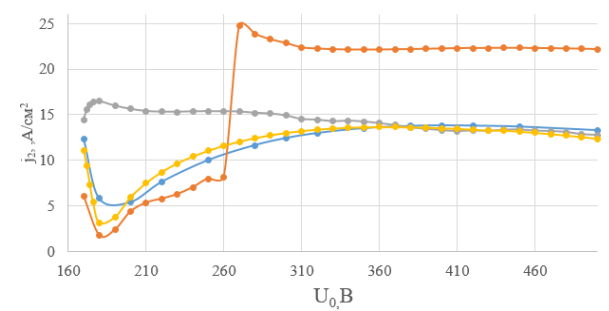
а)



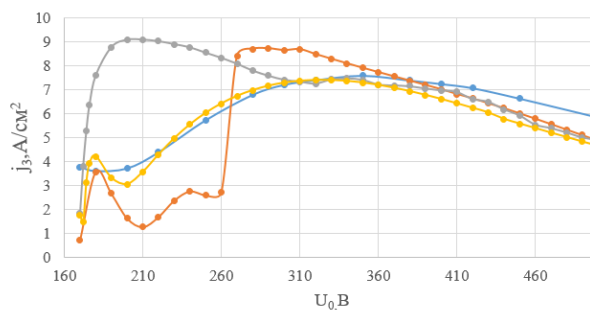
б)



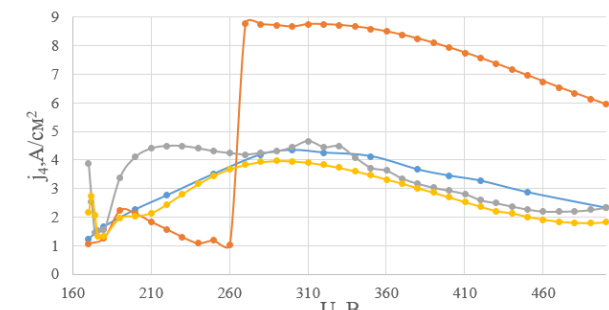
в)



г)



д)



е)

Рисунок 1 – Зависимости частоты (а), постоянной составляющей (б), амплитуд основной (в), второй (г), третьей (д) и четвертой (е) гармоник тока от величины приложенного постоянного напряжения ($\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с), синяя – «темновой» случай; желтая – засветка структуры вблизи катода; оранжевая – засветка центральной части активной области структуры; серая – засветка структуры вблизи анода.

Как видно из (рисунка 1), на вольтамперных характеристиках, рассчитанных во всех случаях, наблюдается участок отрицательного

дифференциального сопротивления. Анализ зависимостей частоты, постоянной составляющей и амплитуд первых четырех гармоник тока j_1, j_2, j_3, j_4 от величины приложенного напряжения, показывает, что спектральный состав тока существенно определяется величиной приложенного постоянного напряжения и локализацией области засветки. Локализованная засветка вблизи катода приводит к увеличению частоты генерируемых колебаний во всем диапазоне прикладываемых напряжений примерно на 10-18 %. При засветке структуры в середине активной области при достижении напряжения 265 В наблюдается резкое уменьшение частоты (примерно в 2,6 раза) и амплитуды основной гармоники и увеличение (в 2,7 раза) амплитуд второй, третьей и четвертой гармоник тока. При этом при напряжениях более 265 В частота оказывается меньше, чем в «темновом» случае. Влияние локализованной засветки вблизи анода на спектр генерируемых колебаний тока оказывается наиболее существенным в диапазоне напряжений 170 -300 В и состоит в уменьшении амплитуды и частоты основной гармоники, а также постоянной составляющей, и увеличении амплитуд второй, третьей и четвертой гармоник тока по сравнению с «темновым» случаем в указанном диапазоне напряжений. Форма генерируемых колебаний тока в «темновом» случае представлена на рисунке 2.

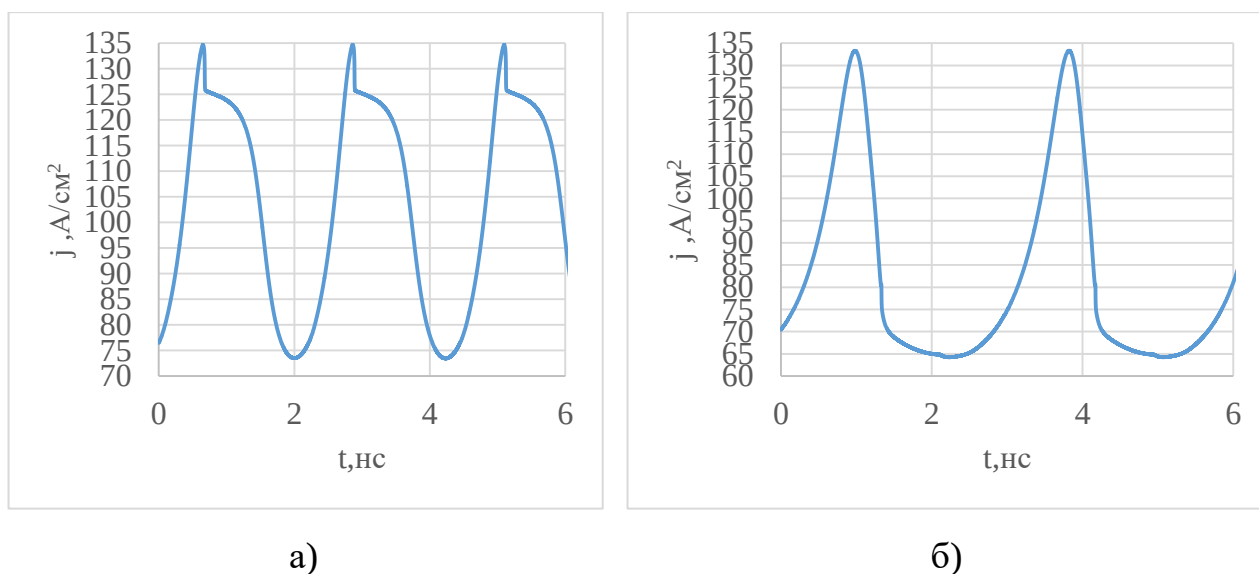


Рисунок 2 – Форма генерируемых колебаний тока в «темновом» случае при: а) $U_0=180$ В; б) $U_0=380$ В.

Распределения в структуре для «темнового» случая в различные моменты времени представлены на рисунках 3-6.

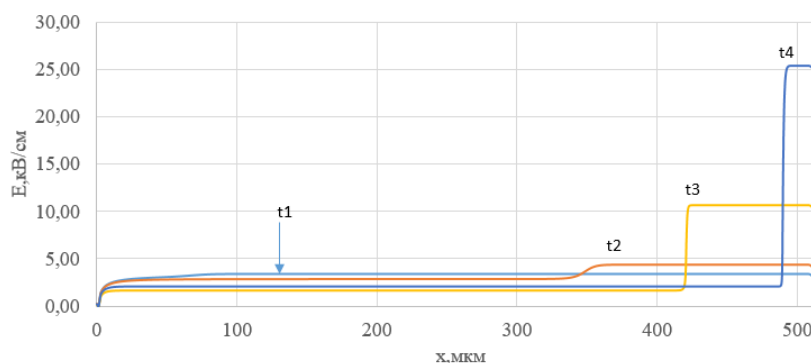


Рисунок 3 – Распределения электрического поля в структуре для «темнового» случая в различные моменты времени при $U_0=180$ В.

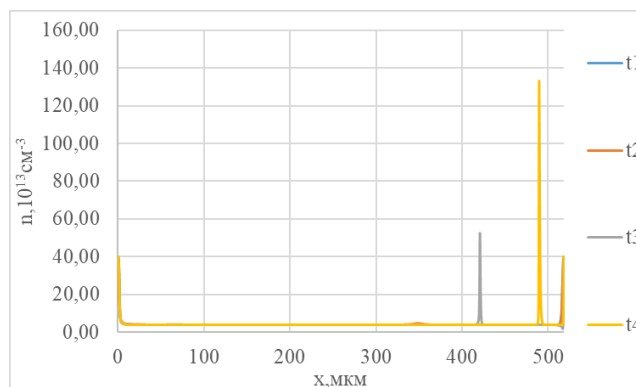


Рисунок 4 – Распределения концентрации электронов в структуре для «темнового» случая в различные моменты времени при $U_0=180$ В.

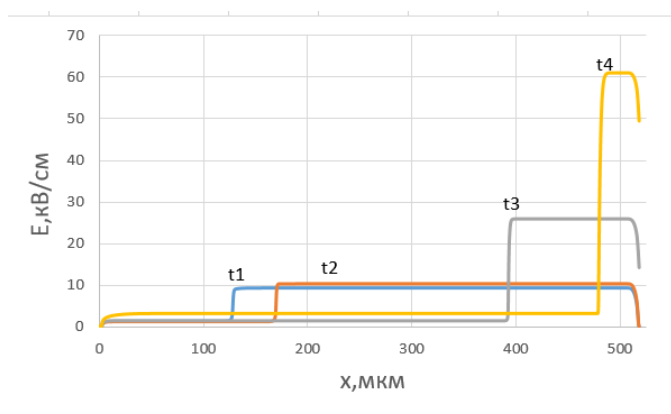


Рисунок 5 – Распределения электрического поля в структуре для «темнового» случая в различные моменты времени при $U_0=380$ В.

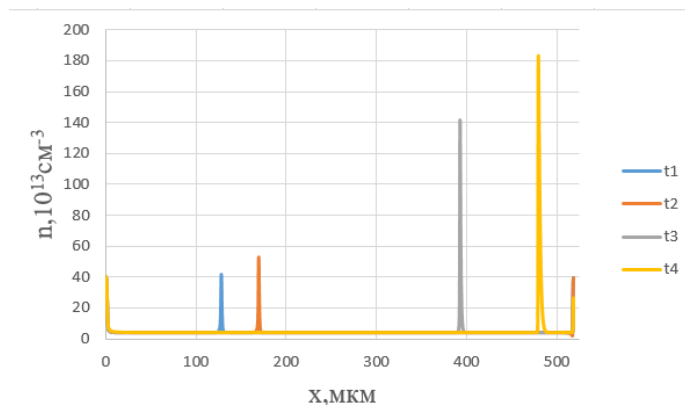


Рисунок 6 – Распределения концентрации электронов в структуре для «темнового» случая в различные моменты времени при $U_0=380$ В.

Анализ зависимостей $f(U_0)$, рассчитанных (рисунок 1(а)) для «темнового» случая показал, что с повышением приложенного постоянного напряжения происходит монотонное уменьшение частоты генерируемых колебаний тока. При этом увеличение напряжения приводит к существенным изменениям в спектре генерируемых колебаний тока от трапецеидальной формы с плоской вершиной и характерным пиком к колебаниям более выраженной треугольной формы (рисунок 2), что обуславливает указанный немонотонный характер зависимостей $j_1(U_0)$, $j_2(U_0)$, $j_3(U_0)$, $j_4(U_0)$. Анализ динамики пространственного заряда и электрического поля в структуре показал, что структуре происходит периодический процесс формирования в непосредственной близости от катода динамической неоднородности типа обогащенного слоя, который движется по активной области структуры в сторону анода и уходит в анод (рисунки 3-6). Проведенный анализ показал, что наличие выраженного пика на колебаниях трапецеидальной формы обусловлено процессом ухода динамической неоднородности в анод, а наличие широкой плоской вершины – процессом относительно длительного формирования следующего обогащенного слоя. Изменение формы генерируемых колебаний тока от трапецеидальной к треугольной связано с тем, что во втором случае в активной области структуры в непосредственной близости от катода одновременно с процессом ухода в анод обогащенного слоя происходит формирование нового обогащенного слоя.

Форма генерируемых колебаний тока и характер ее изменения при увеличении приложенного напряжения в условиях локализованной засветки структуры в прикатодной области в целом подобны наблюдаемым в «темновом» случае. Это и обуславливает аналогичный характер зависимостей $j_1(U_0)$, $j_2(U_0)$, $j_3(U_0)$, $j_4(U_0)$ и динамику электронных процессов, происходящих в структуре в условиях прикатодной засветки.

Зависимость $f(U_0)$, рассчитанная в условиях локализованной засветки образца в центре активной области (рисунок 1(а)), характеризуется наличием двух диапазонов приложенного постоянного напряжения, соответствующих участкам монотонного изменения частоты, разделенных участком резкого изменения частоты генерируемых колебаний тока. В диапазоне напряжений 170-265В форма колебаний тока (рисунке 2(а)) характеризуется «трапецеидальным» видом и наличием небольшого пика на вершине колебания и сходна с «темновым» случаем, однако частота колебаний почти в 2 раза превышает «темновое» значение. При напряжениях порядка $U_0=265\text{В}$ происходит переход структуры в другой динамический режим. Форма генерируемых колебаний тока при напряжении $U_0=265\text{В}$ и более характеризуется наличием двух максимумов, близких по амплитуде (рисунок 7), и частотой примерно на 20 % меньшей (рисунок 1(а)), чем в «темновом» случае.

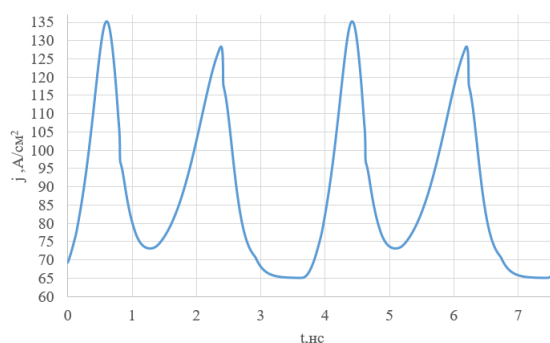


Рисунок 7 – Форма генерируемых колебаний тока при: $U_0=270\text{ В}$.

Распределения в структуре для «темнового» случая в различные моменты времени представлены на рисунках 8-10.

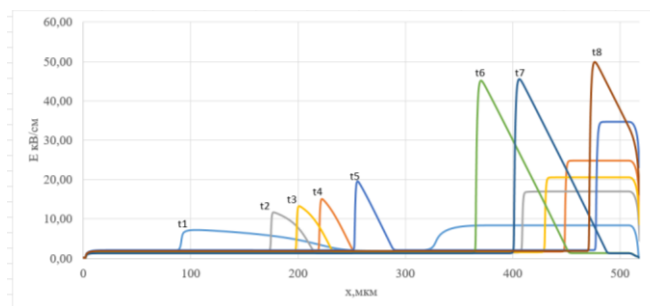


Рисунок 8 – Распределения электрического поля в структуре в различные моменты времени при $U_0=270$ В.

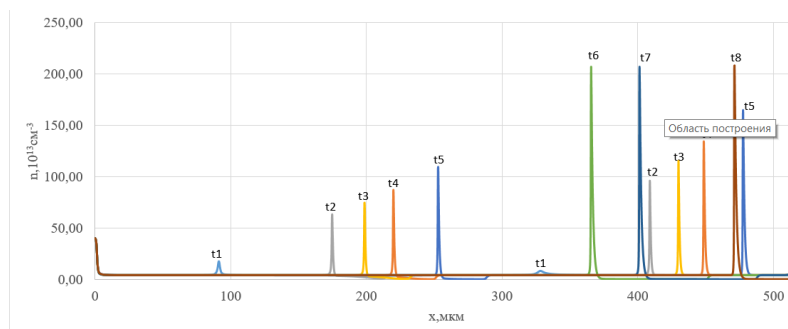


Рисунок 9 – Распределения концентрации свободных электронов в структуре в различные моменты времени при $U_0=270$ В.

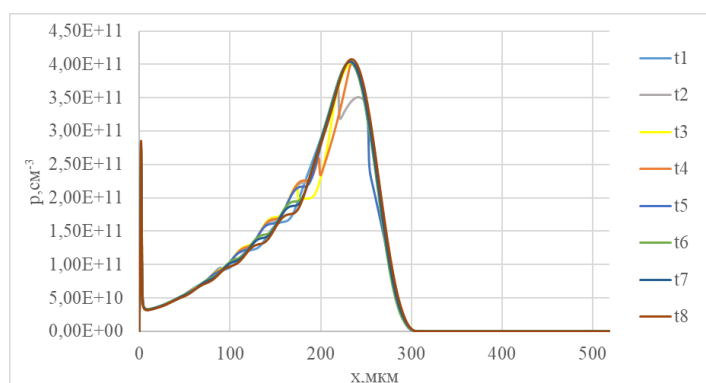


Рисунок 10 – Распределения концентрации дырок в структуре в различные моменты времени при $U_0=270$ В.

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структуре в условиях локализованной засветки в центре активной области показал, что при напряжениях менее $U_0=265$ В колебания тока, в основном, обусловлены процессами формирования двух динамических неоднородностей: обогащенного слоя в прикатодной области, преобразующегося в процессе движения в домен сильного поля, и рассасывающегося левее области засветки и

обогащенного слоя в правой части активной области структуры, амплитуда электрического поля в котором возрастает по мере его смещения в сторону анода.

Исследование динамики пространственного заряда и тока показало, что при напряжениях, превышающих $U_0=265$ В, в структуре наблюдается другой характер динамики электронных процессов в активной области (рисунок 8-10). Колебания в этом диапазоне напряжений обусловлены возникновением, распространением и уходом в анод двух динамических неоднородностей в активной области структуры. Одна динамическая неоднородность формируется в левой относительно области засветки части активной области структуры и представляет собой обогащенный слой, который по мере движения в сторону анода трансформируется в дипольный домен, но далее проходит через область оптического воздействия, правую часть активной области и уходит в анод, что приводит к формированию соответствующего пика колебаний тока, другая неоднородность возникает на правой границе области засветки и представляет собой обогащенный слой, который движется по правой части активной области структуры и уходит в анод, обуславливая другой пик колебаний тока (рисунок 7). Следует отметить, что формирование этих динамических неоднородностей происходит синфазно.

Дрейфовое смещение неравновесных дырок из области локализованного оптического воздействия в сторону катода приводит к увеличению концентрации электронов и дырок в этой части структуры. Численные эксперименты показали, что в процессе движения дипольного домена через рассматриваемую область (при напряжениях более $U_0=265$ В) наблюдается заметное изменение распределения неравновесных дырок, генерируемых светом, а именно происходит формирование характерного «гребня» на распределении дырок что, по всей видимости обусловлено действием пространственного заряда в домене на подвижные дырки. Кроме того, в ходе численных экспериментов установлено, что при напряжении более $U_0=265$ В

происходит формирование характерных волн на распределениях концентрации свободных электронов и дырок, обуславливающих формирование соответствующих волн пространственного заряда, распространяющихся по направлению к катоду, в рассматриваемой области (рисунок 10). Учитывая, что переход структуры в режим с двумя динамическими неоднородностями и появление характерных волн пространственного заряда происходят при одном напряжении ($U_0=265$ В), можно предположить, что вероятным физическим механизмом, приводящим к формированию указанных волн пространственного заряда может являться различие скоростей релаксации распределений неравновесных дырок и электронов к стационарному состоянию после прохождения дипольного домена через область с их повышенной концентрацией, обусловленное значительным различием коэффициентов диффузии и подвижностей неравновесных дырок и электронов.

Динамика электронных процессов в активной области структуры при засветке структуры вблизи анода характеризуется формированием в прикатодной области, движением через активную область, прохождением через область засветки и уходом в анод дипольного домена. При увеличении приложенного напряжения происходит значительное увеличение ширины домена сильного поля (расширение обедненного слоя домена), по всей видимости, обусловленное повышением однородности распределения неравновесных электронов и дырок в активной области структуры вследствие возрастания дрейфового смещения неравновесных дырок, генерируемых светом, из области засветки в неосвещенную часть структуры, расположенную ближе к катоду. Это обстоятельство, вероятно, приводит и к более выраженному характеру (увеличению амплитуды) формируемых в указанной части структуры волн пространственного заряда, аналогичных волнам, наблюдаемым при локализованной засветке в середине активной области.

В разделе 4 работы представлены результаты исследования влияния времени жизни на динамику пространственного заряда и тока при различных вариантах локализации области засветки.

В используемой в данной работе локально-полевой модели предполагается, что рекомбинация неравновесных носителей, генерируемых светом, описывается линейным законом (в уравнения непрерывности для электронов и дырок вводятся соответствующие слагаемые, определяющие темп рекомбинации, времена жизни для электронов и дырок принимаются постоянными и равными между собой).

Математическое моделирование динамики пространственного заряда и тока, проведенное в данной работе при различных значениях времени жизни неравновесных носителей ($\tau = 1 \cdot 10^{-9}$ с, $\tau = 5 \cdot 10^{-9}$ с, $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с), показало, что и в рамках предположения о постоянстве времени жизни, изменение его величины может приводить к существенным изменениям в динамике заряда и поля в структуре, и соответствующим изменениям в спектре генерируемых колебаний тока.

Сравнение зависимостей $f(U_0), j_0(U_0), j_1(U_0), j_2(U_0), j_3(U_0), j_4(U_0)$, рассчитанных при различных значениях времени жизни в условиях прикатодной засветки показало, что при времени жизни неравновесных носителей $\tau = 1 \cdot 10^{-9}$ с локализованная прикатодная засветка приводит к более заметному повышению частоты генерируемых колебаний (примерно на 25 %) в диапазоне малых напряжений U_0 и к более существенному изменению спектра тока. Анализ показал, что характер динамики пространственного заряда электрического поля и тока в структуре, а также закономерности в спектре при меньших временах жизни в целом аналогичны рассмотренным ранее (при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с).

При локализованной засветке центральной части активной области структуры при меньшем времени жизни $\tau = 5 \cdot 10^{-9}$ с, как и при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с, на всех рассматриваемых зависимостях имеется участок резкого изменения анализируемых величин, однако он расположен в области меньших значений приложенного напряжения ($U_0 = 225$ В). Проведенные численные эксперименты показали, что характер динамики пространственного заряда, электрического

поля и тока в исследуемой структуре при меньшем времени жизни в общем описывается теми же процессами, что и при большем его значении. Однако при меньшем времени жизни наблюдаются и меньшие значения концентрации генерируемых светом неравновесных электронов и дырок в области засветки и прилегающих к ней областях. Кроме того, рассмотренная особенность, приводит к тому, что при $\tau = 5 \cdot 10^{-9}$ с уже при достижении напряжения 225 В домен, формирующийся в левой относительно области засветки части структуры, оказывается способным преодолевать область засветки и достигать анода, что и приводит к наблюдаемому смещению участка резких изменений на зависимостях $f(U_0), j_0(U_0), j_1(U_0), j_2(U_0), j_3(U_0), j_4(U_0)$ в область меньших напряжений при этом времени жизни.

Изменение времени жизни неравновесных носителей заряда в условиях локализованной засветки структуры вблизи анода приводит к более сложному характеру наблюдаемых изменений в спектре генерируемых колебаний тока по сравнению с другими вариантами локализации области засветки. Можно отметить, что при времени жизни $\tau = 1 \cdot 10^{-9}$ с локализованная засветка вблизи анода приводит к значительным и немонотонным изменениям в спектре тока во всем диапазоне напряжений, и особенно ярко ее действие проявляется в поведении амплитуд высших гармонических составляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенного исследования особенностей нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления ганновской неустойчивости и локализованной засветки позволяет сформулировать следующие выводы:

1 Численные эксперименты показали, что динамика пространственного заряда и тока в исследуемой структуре имеет сложный нелинейный характер и локализованная засветка части активной области структуры может приводить к существенным изменениям спектра генерируемых колебаний тока:

- Наблюдаемое при **локализованной засветке прикатодной области** структуры незначительное изменение формы генерируемых колебаний тока и увеличение их частоты по сравнению с «темновым» случаем во всем диапазоне напряжений обусловлено незначительным изменением характера динамики электронных процессов в активной области структуры и уменьшением ее эффективной длины под действием засветки, соответственно.

- Происходящее в результате **локализованной засветки центральной части активной области** структуры резкое изменение динамики неоднородностей электрического поля при достижении определенного напряжения, заключающееся в их преобразовании от одного типа (обогащенный слой) к другому (дипольный домен) и характера прохождения ими области засветки, приводит к появлению участков резкого изменения величин на зависимостях частоты и амплитуд всех спектральных составляющих тока от напряжения в узком диапазоне напряжений.

- Характер протекания электронных процессов при **локализованной засветке прианодной области** структуры определяется динамикой домена сильного электрического поля, ширина которого значительно увеличивается при повышении приложенного напряжения вследствие повышения однородности

распределения неравновесных электронов и дырок в активной области структуры, обусловленного возрастанием дрейфового смещения неравновесных дырок, генерируемых светом, из области засветки в неосвещаемую часть структуры, что приводит к уменьшению частоты, амплитуды и постоянной составляющей и увеличению амплитуд высших гармоник колебаний тока в определенном (достаточно широком) диапазоне напряжений и приближению указанных параметров к «темновым» значениям при больших напряжениях.

2 Математическое моделирование позволило установить, что и в рамках предположения о постоянстве времени жизни, изменение его величины может приводить к существенным изменениям в динамике заряда и поля в структуре:

- Наиболее сильное влияние на спектр генерируемых колебаний тока **изменение времени жизни** оказывает в условиях **локализованной засветки структуры в середине активной области и вблизи анода**, что обусловлено, во-первых, значительным изменением характеристических длин, определяющих дрейфовое и диффузионное смещение неравновесных носителей заряда из области засветки (изменением эффективной ширины области засветки), приводящим к перераспределению электрического поля между этой областью и остальными частями структуры, и, во-вторых, увеличением влияния рекомбинационных процессов на динамику пространственного заряда при сопоставимости времен жизни и характеристических времен, определяющих формирование и пролет через активную область (или отдельные части) структуры динамических неоднородностей.

3 Обнаруженные **особенности в динамике электронных процессов и существенные изменения спектра**, происходящие в структуре вследствие локализованного оптического воздействия, представляются интересными (перспективными для) с точки зрения **функциональной электроники**, поскольку позволяют эффективно и избирательно (в определенных диапазонах напряжений, на определенные спектральные составляющие) управлять спектром

генерируемых колебаний тока (способ эффективного управления амплитудой, формой, частотой).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.И. Михайлов, А.В. Митин Система уравнений локально-полевой модели динамики зарядов и тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs // Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2006. - Вып. 13. С. 74-78.
2. Михайлов А.И., Митин А.В. Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs в условиях локальной засветки. Часть 1// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 2. С. 49-56.
3. Михайлов А.И., Митин А.В. Анализ нелинейной динамики тока в длинных высокоомных образцах n-GaAs в условиях локальной засветки. Часть 2. Результаты моделирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 1. С. 73-81.