

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 эффекта Ганна в структурах
полуизолирующего арсенида галлия**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

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

Щипцова Романа Александровича

Научные руководители:
д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание

ст. преподаватель
должность, ученая степень, ученое звание
Зав. кафедрой физики твёрдого
тела
д.ф.-м.н., профессор
должность, ученая степень, ученое звание


подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

А.И. Михайлов
инициалы, фамилия

А.В. Митин
инициалы, фамилия

Ал.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

Функциональная микроэлектроника является одним из перспективных направлений твердотельной электроники, устройства которой реализуются на основе нелинейных активных сред. К таким средам, в частности, относится арсенид галлия, в котором в сильных электрических полях может наблюдаться эффект Ганна. В настоящее время проводятся исследования, связанные с разработкой оптически управляемых СВЧ устройств на основе арсенида галлия. При воздействии света на полупроводник в нем возникают дополнительные неравновесные носители заряда, которые могут приводить к возрастанию роли процессов рекомбинации и генерации. Одной из важных характеристических величин процесса рекомбинации является время жизни неравновесных носителей заряда, которое может определяться такими физическими величинами как интенсивность оптического воздействия, концентрация генерируемых носителей заряда и примесных центров.

Целью данной работы является анализ влияния времени жизни неравновесных носителей заряда на нелинейную динамику пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах полуизолирующего арсенида галлия в условиях ганновской неустойчивости тока и локализованного оптического воздействия. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проведение анализа научно-технической литературы по тематике исследований.
2. Формулировка системы уравнений локально-полевой математической модели.
3. Реализация локально-полевой математической модели.
4. Проведение серии численных экспериментов.
5. Анализ спектра генерируемых колебаний тока, динамики пространственного заряда и электрического поля в активной области структуры в условиях локализованного оптического воздействия при различных значениях времени жизни неравновесных носителей заряда.

Структура бакалаврской работы

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ, выпускная квалификационная работа содержит следующие разделы:

1. Физическая картина эффекта Ганна.
2. Особенности математического моделирования нелинейной динамики электронных процессов в многодолинных полупроводниках.
3. Локально-полевая математическая модель для структур полуизолирующего GaAs.
4. Результаты численных экспериментов.

Основное содержание работы

Раздел 1 представляет собой обзор научно-технической литературы по теме исследования. Приводится общее описание эффекта Ганна и особенности его проявления в условиях внешнего оптического воздействия в структурах полуизолирующего арсенида галлия.

Раздел 2 включает в себя обзор математических моделей и инструментов, необходимых для проведения численных экспериментов. Рассматриваются математические модели, которые позволяют исследовать динамику электронных процессов в многодолинных полупроводниках: локально-полевая модель, различные гидродинамические модели и модель, которая основана на решении кинетического уравнения Больцмана методом Монте-Карло. На основе достоинств и недостатков рассмотренных математических моделей приводится обоснование выбора локально-полевой математической модели. Также данный раздел содержит рассмотрение методики численного решения задач для уравнений в частных производных на ЭВМ и перечисление достоинств использования современных средств программирования для численного моделирования.

В разделе 3 формулируется система уравнений локально-полевой математической модели для структур полуизолирующего арсенида галлия как в отсутствие освещения, так и с учетом локального оптического воздействия. Также данный раздел включает описание приложения, разработанного на языке Python, позволяющего проводить численные эксперименты по исследованию динамики электронных процессов в рассматриваемых структурах.

В разделе 4 представлены результаты численных экспериментов. Проведенные численные эксперименты показали, что изменение величины времени жизни может приводить к значительным изменениям в динамике пространственного заряда и поля в структуре, и соответствующим изменениям в спектре генерируемых колебаний тока.

Для всех значений времени жизни характерно наличие двух различающихся режимов. Рассмотрен каждый из режимов для фиксированного значения времени жизни $\tau = 10$ нс. Зависимости постоянной составляющей (а), частоты (б), амплитуд основной (в), второй (г) гармоник тока от величины приложенного постоянного напряжения при $\tau = 10$ нс представлены на рисунке 1.

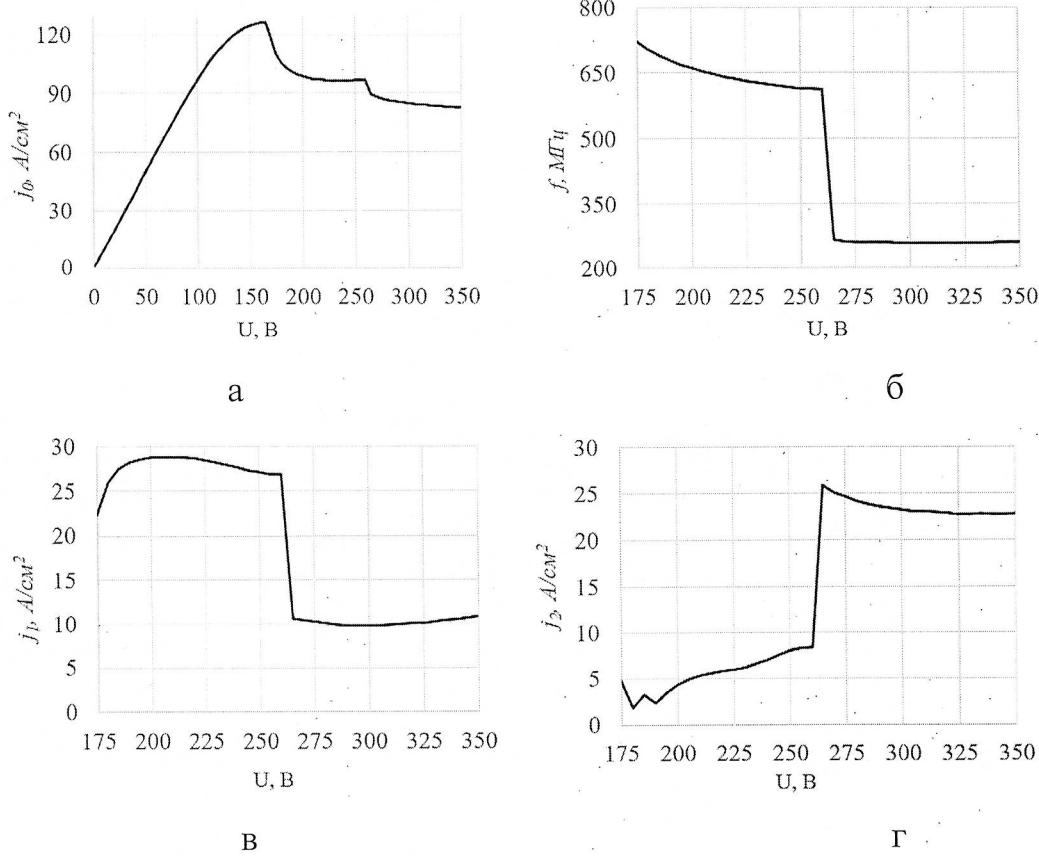


Рисунок 1 – Зависимости постоянной составляющей (а), частоты (б), амплитуд основной (в) и второй (г) гармоник тока от величины приложенного постоянного напряжения при $\tau = 10$ нс

Как видно из рисунка 1 (а), на вольтамперной характеристике, наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления, обусловленный проявлением ганновской неустойчивости тока в исследуемой структуре. Зависимости $f(U)$, $j_1(U)$, $j_2(U)$ показанные на рисунке 1 (б, в, г), характеризуются наличием значения приложенного постоянного напряжения, при котором происходит существенное изменение частоты, амплитуд основной и второй гармоник тока.

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда и тока показал, что при напряжениях менее $U = 265$ В колебания тока обусловлены процессами формирования, развития и исчезновения двух динамических неоднородностей: домена сильного поля и обогащенного слоя. Домен сильного поля, образуется в прикатодной части активной области и в процессе движения рассасывается левее области засветки (в области с повышенной концентрацией неравновесных носителей). Обогащенный слой формируется в правой (относительно области засветки) части активной области структуры, амплитуда электрического поля в котором возрастает по мере его смещения в сторону анода. В последствии обогащенный слой уходит в анод. Далее процесс периодически повторяется.

При напряжениях, превышающих $U = 265$ В, в структуре наблюдается другой характер динамики электронных процессов, которые в этом диапазоне напряжений обусловлены возникновением, распространением и уходом в анод двух динамических неоднородностей в активной области структуры. В левой части (относительно области засветки) активной области структуры формируется дипольный домен, который проходит через область засветки, правую часть активной области и уходит в анод. Другая неоднородность возникает в активной области структуры на правой границе области засветки и представляет собой обогащенный слой, который движется по правой части активной области структуры и уходит в анод. Далее процесс периодически повторяется.

Для всех времен жизни было определено значение напряжения перехода U_n , при котором в структуре наблюдается изменение характера динамики электронных процессов.

На рисунке 2 представлена зависимость U_n от времени жизни. Видно, что зависимость $U_n(\tau)$ имеет немонотонный характер и при $\tau = 3-4$ нс наблюдается минимальное значение U_n .

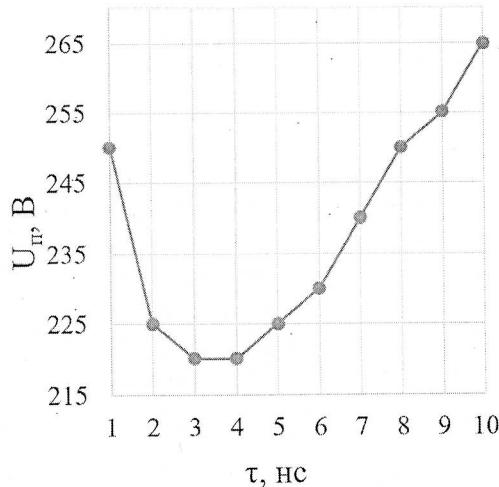


Рисунок 2 – Зависимость напряжения перехода
от времени жизни

Был проведен анализ нелинейной динамики пространственного заряда и тока при различных значениях времени жизни. Зависимости постоянной составляющей (а), частоты (б), амплитуд основной (в), второй (г) гармоник тока от величины приложенного постоянного напряжения при $\tau = 4, 6, 7, 9, 10$ нс представлены на рисунке 3. При увеличении времени жизни в диапазоне $\tau = 4-10$ нс наблюдается смещение U_n в область больших значений приложенного напряжения.

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда показал, что при меньших значениях времени жизни наблюдаются и меньшие значения концентрации генерируемых светом неравновесных электронов и дырок в области засветки и прилегающих к ней областях (а, следовательно, и меньшее увеличение проводимости) на расстояниях, определяемых диффузионным и дрейфовым смещением неравновесных носителей, и, как следствие, меньшее увеличение напряженности поля (понижение дрейфовой скорости электронов) вне этой области, вызываемое локальным оптическим воздействием, что, в свою очередь, обусловливает более высокие частоты генерируемых колебаний тока при напряжениях, меньших U_n .

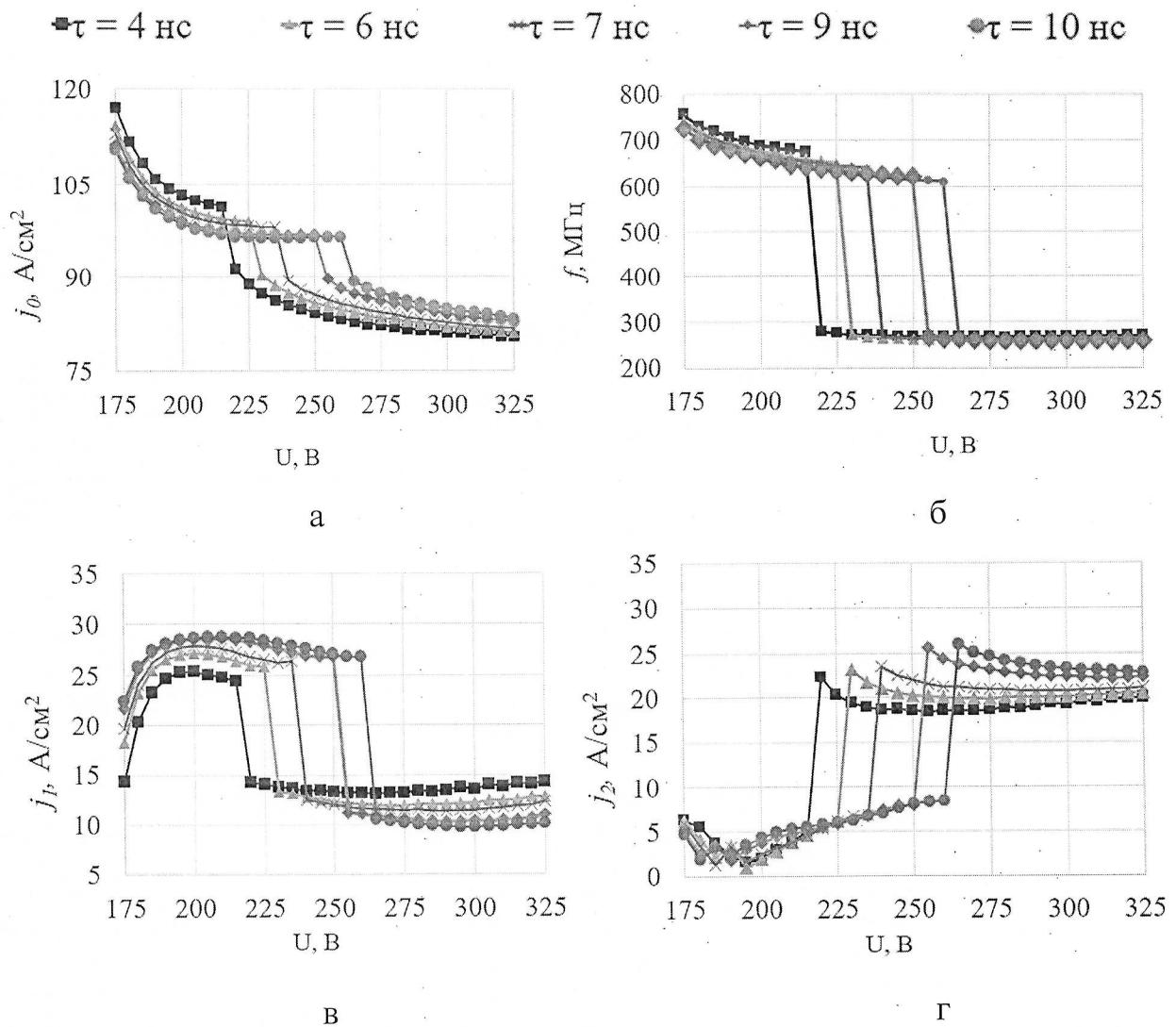


Рисунок 3 – Зависимости постоянной составляющей (а), частоты (б), амплитуд основной (в) и второй (г) гармоник тока от величины приложенного постоянного напряжения, при различных значениях τ

Оценка времени прохождения домена через область засветки при $\tau = 1 \text{ нс}$ показала соизмеримость этой величины со значением времени жизни неравновесных носителей заряда. Напряженность электрического поля в домене за счет рекомбинации электронов с дырками уменьшается и как следствие домен оказывается не способным преодолеть область с повышенной концентрацией неравновесных носителей заряда при напряжениях перехода, соответствующих значениям времени жизни $\tau = 2 - 7 \text{ нс}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе реализованной в процессе выполнения выпускной квалификационной работы локально-полевой математической модели с использованием языка программирования Python был проведен ряд численных экспериментов, направленных на исследование влияния времени жизни неравновесных носителей заряда на особенности эффекта Ганна в структурах полуизолирующего арсенида галлия.

Анализ результатов исследования влияния времени жизни неравновесных носителей заряда на нелинейную динамику пространственного заряда, электрического поля и тока в структурах полуизолирующего арсенида галлия в условиях ганновской неустойчивости тока и локализованного оптического воздействия позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Во всем рассматриваемом диапазоне значений времени жизни $\tau = 1 - 10$ нс характерно наличие двух различающихся режимов колебаний тока, разделенных напряжением перехода U_p из одного режима в другой.
2. Показано, что U_p во всем рассматриваемом диапазоне значений времени жизни $\tau = 1 - 10$ нс немонотонно зависит от значения времени жизни. В диапазоне значений времени жизни $\tau = 1 - 3$ нс при увеличении времени жизни наблюдается уменьшение U_p . В диапазоне значений времени жизни $\tau = 4 - 10$ нс происходит увеличение U_p при увеличении времени жизни.
- 3.1. Уменьшение U_p при увеличении значения времени жизни в диапазоне значений времени жизни $\tau = 1 - 3$ нс, по всей видимости, обусловлено уменьшением влияния рекомбинационных процессов на динамику пространственного заряда при сопоставимости времени жизни неравновесных носителей заряда и времени, определяющего пролет дипольного домена через область повышенной концентрации неравновесных носителей заряда.

3.2. Увеличение U_n в диапазоне значений времени жизни $\tau = 4 - 10$ нс при увеличении значения времени жизни обусловлено увеличением дрейфового и диффузионного смещения неравновесных носителей заряда из области засветки (изменением эффективной ширины области засветки), приводящим к перераспределению электрического поля между этой областью и остальными частями структуры.

4. Обнаруженные особенности в динамике электронных процессов и существенные изменения спектра колебаний тока, происходящие в структуре вследствие влияния времени жизни, представляются интересными 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).

