

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

Кафедра физики твердого тела

**Влияние локализации и интенсивности оптического воздействия на
особенности ганновской неустойчивости тока в структурах
полуизолирующего арсенида галлия**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2252 группы

направления 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

институт физики

Шпак Никиты Валериевича

Научные

руководители:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

ст. преподаватель

должность, ученая степень, ученое звание

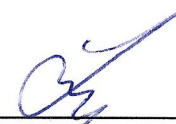
Зав. кафедрой

физикитвердого

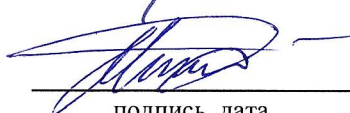
тела:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание


подпись, дата

Михайлов А.И.
фамилия, инициалы


подпись, дата

Митин А.В.
фамилия,
инициалы


подпись, дата

Скрипаль Ал.В.
фамилия, инициалы

Саратов 2023

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика темы.

Современная твердотельная электроника развивается по двум основным направлениям – интегральная электроника, или микроэлектроника, и функциональная электроника. В отличие от интегральной электроники, которая основана на схемной радиотехнике с использованием статических неоднородностей (потенциальных барьеров) и технологической интеграции, в функциональной электронике изучается возникновение и взаимодействие динамических неоднородностей в континуальных средах с физическими полями. На основе динамических неоднородностей в функциональной электронике создаются приборы и устройства для целей обработки, генерации и хранения информации.

Для создания быстродействующих функциональных устройств одним из наиболее перспективных физических эффектов является эффект Ганна. Примером приборов, реализованных с помощью данного эффекта, являются генераторы и усилители в СВЧ и КВЧ диапазонах.

Немаловажную роль, при создании таких приборов, играет влияние внешних физических условий на ганновские колебания в нелинейных активных средах. К таким можно отнести: влияние локализованного оптического воздействия, захвата электронов глубокими примесными центрами, магнитного поля, давления, температуры, контактов и неоднородностей. С помощью данных факторов осуществляется управление динамикой доменов сильного поля в условиях ганновской неустойчивости.

В последние годы большую актуальность приобрели работы, направленные на разработку и создание оптически управляемых СВЧ устройств. К числу таких устройств относятся, в частности, и диоды Ганна. Поэтому исследование особенностей проявления ганновской неустойчивости в условиях локализованного оптического воздействия является перспективным направлением для создания данных устройств.

В связи с этим, целью данной работы является исследование влияния локализации и интенсивности оптического воздействия на особенности нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия в условиях ганновской неустойчивости тока.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Анализ научно-технической литературы по теме исследования;
- Формулировка системы уравнений локально-полевой модели, позволяющей исследовать влияние локализации и интенсивности оптического воздействия на особенности нелинейной динамики пространственного заряда, электрического поля и тока в исследуемой структуре;
- Проведение серии численных экспериментов;
- Анализ полученных результатов и формулировка выводов.

Структура магистерской работы.

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

1. Физическая картина эффекта Ганна.
2. Локально-полевая математическая модель $n^+-n^-n^+-GaAs$ структур.
3. Результаты численных экспериментов.

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 разделе 3 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 при различных значениях интенсивности и ширины освещаемой области структуры (рисунок 1) с использованием локально-полевой математической модели.

Как видно из приведенных рисунков, в интервале значений ширины засвечиваемой области от 10 мкм до 100 мкм и локализации области засветки в центральной части активной области структуры при достижении напряжения 260 В наблюдается резкое уменьшение частоты, амплитуды основной гармоники и увеличение амплитуд первой и второй гармоник тока. Подобные участки изменения указанных величин имеются и на соответствующих зависимостях, рассчитанных при значениях ширины засвечиваемой области 120 мкм, 150 мкм, 200 мкм и 250 мкм. Как видно из полученных данных положение этого участка при увеличении ширины освещаемой области до 150 мкм смещается в область больших напряжений (320В), а в случае когда ширина освещаемой области равна половине активной области структуры (250 мкм) участок смещается в область меньших напряжений (220 В).

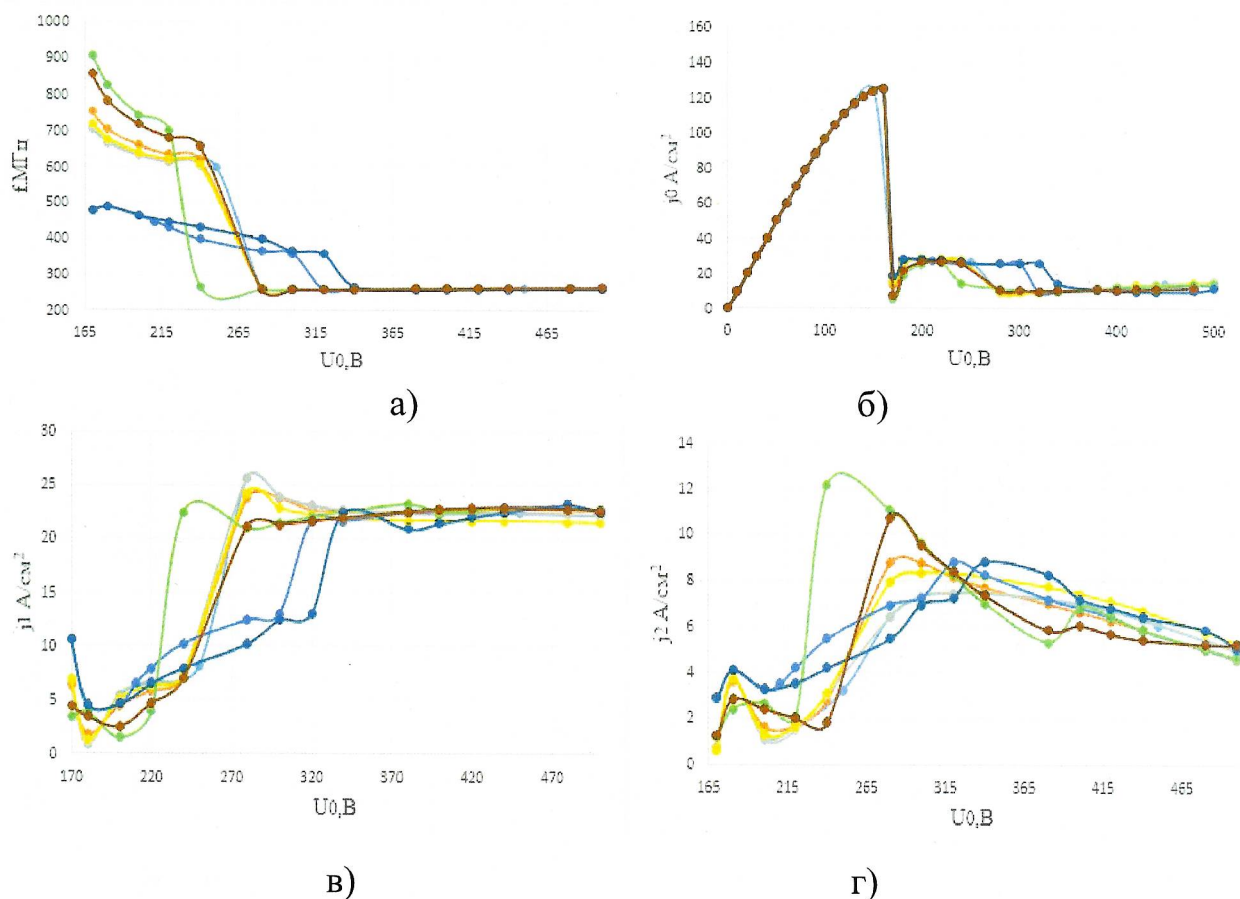


Рисунок 1 – Зависимости частоты (а), постоянной составляющей (б), амплитуд основной (в), второй (г) гармоник тока от величины приложенного постоянного напряжения при ширине освещаемой области: 10 мкм (серая кривая); 30 мкм (голубая кривая); 50 мкм (желтая кривая); 100 мкм (оранжевая кривая); 120 мкм (синяя кривая); 150 мкм (тёмно-синяя кривая); 200 мкм (коричневая кривая); 250 мкм (зеленая кривая).

Зависимости $f(U_0)$ на рисунке 1 (а), соответствующих варианту локализованного оптического воздействия в центре активной области и ширине засвечиваемой области от 10 мкм до 100 мкм, характеризуются наличием двух диапазонов приложенного постоянного напряжения, соответствующих участкам монотонного изменения частоты, разделенных участком резкого изменения частоты генерируемых колебаний тока.

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структуре в условиях локализованной засветки в центре активной области при указанных значениях ширины области оптического воздействия показал,

что при напряжениях менее $U_0=260$ В колебания тока, в основном, обусловлены процессами формирования (практически синфазного), развития и исчезновения (в различные моменты времени) двух динамических неоднородностей: обогащенного слоя в прикатодной области, преобразующегося в процессе движения в домен сильного поля, и рассасывающегося левее области засветки (в области с повышенной концентрацией неравновесных носителей), и обогащенного слоя в правой (относительно области засветки) части активной области структуры, амплитуда электрического поля в котором возрастает по мере его смещения в сторону анода. При этом этапу формирования новых обогащенных слоев предшествует этап перераспределения электрического поля на обе относительно области засветки части активной области структуры.

Исследование динамики пространственного заряда и тока показало, что при напряжениях, превышающих $U_0=260$ В, в структуре наблюдается другой характер динамики электронных процессов. 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. Следует отметить, что формирование этих динамических неоднородностей происходит также практически синфазно.

Численные эксперименты показали, что увеличение значения ширины освещаемой области от 100 до 250 мкм приводит к существенным

изменениям анализируемых зависимостей, как видно из рисунка 1 (а,б,в,г). Зависимости $f(U_0)$, показанные на рисунке 1 (а), рассчитанные при значениях ширины освещаемой области от 120 до 250 мкм, также характеризуются наличием двух диапазонов приложенного постоянного напряжения с монотонным изменением частоты, разделенных участком резкого изменения частоты генерируемых колебаний тока.

В случае локализованного оптического воздействия на центральную часть активной области структуры исследуемого образца при значениях ширины освещаемой области 120 и 150 мкм наблюдается смещение напряжения перехода (из одного режима в другой) в область больших напряжений и составляет 300 и 320 В, соответственно. Однако при значениях ширины освещаемой области 120 и 150 мкм частота основной гармоники генерируемых колебаний тока оказывается примерно на 37% меньше при напряжениях, меньших напряжения перехода.

Анализ динамики пространственного заряда и электрического поля в активной области исследуемого образца показал, что в диапазоне напряжений 170-320 В при значениях ширины освещаемой области 120 и 150 мкм колебания тока, в основном характеризуются процессами формирования (практически синфазного), развития и исчезновения (в различные моменты времени) двух динамических неоднородностей: домена сильного поля, который в процессе формирования не преодолевает освещенную область и рассасывается левее области локализованного оптического воздействия, и обогащенного слоя в правой (относительно области засветки) части активной области структуры, амплитуда электрического поля в котором возрастает по мере его смещения и ухода в анод. При этом при указанных значениях ширины области оптического воздействия происходит заметное уменьшение концентрации неравновесных дырок в освещаемой области, а также их заметное дрейфовое смещение в сторону катода. При этом домен проходя область с повышенной концентрацией неравновесных дырок при тех же значениях напряжения не

способен преодолеть область локализованного оптического воздействия, что, вероятно, и приводит к смещению напряжения перехода в область больших напряжений. Кроме того, наблюдается заметное уменьшение скорости перераспределения поля между формирующимся обогащенным слоем и остальной частью активной области структуры, что приводит к более медленному формированию динамической неоднородности и уменьшению частоты основной гармоники генерируемых колебаний тока.

При напряжениях порядка $U_0=320$ В происходит переход структуры в другой динамический режим. На рисунке представлена форма генерируемых колебаний тока при напряжении $U_0=320$ В и процесс формирования динамических неоднородностей подобный наблюдаемому при ширине освещаемой области 100 мкм.

Анализ зависимостей, показанных на рисунке 1 (а,б,в,г) рассчитанных при ширине области локализованного оптического воздействия 250 мкм показал, что увеличение ширины засвечиваемой области до 250 мкм приводит к существенным изменениям на анализируемых зависимостях. Однако частота колебаний, рассчитанная при ширине засвечиваемой области 250 мкм почти на 30% превышает частоту, рассчитанную при ширине засвечиваемой области 100 мкм, и в 2 раза превышает частоту, рассчитанную при ширине освещаемой области равной 120 мкм при напряжениях, меньших напряжения перехода структуры из одного режима в другой. Это может быть обусловлено тем, что обогащенный слой, который образуется в правой относительно освещаемой области части структуры, оказывается полностью сформировавшимся существенно ближе к аноду, что и приводит к увеличению частоты колебаний в этом диапазоне напряжений. При напряжениях порядка $U_0=235$ В происходит переход структуры в другой динамический режим, подобный наблюдаемому при ширине освещаемой области 100 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной выпускной квалификационной работы можно сделать следующие выводы:

- На основе анализа научно-технической литературы установлено, что исследование особенностей проявления ганновской неустойчивости тока в образцах полуизолирующего арсенида галлия в условиях внешнего оптического воздействия представляет интерес для современной функциональной микроэлектроники, а для анализа динамики электронных процессов в таких образцах использование локально-полевой математической модели является корректным и обоснованным.
- Проведены анализ, настройка и адаптация варианта локально-полевой математической модели, позволяющего исследовать влияние локализации и интенсивности оптического воздействия на динамику пространственного заряда, электрического поля и тока в исследуемых структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия.
- Изменение ширины области оптического воздействия в интервале от 100 до 250 мкм при ее **локализации в центральной части активной области** структуры приводит к **существенному и немонотонному** изменению частоты основной гармоники колебаний тока при напряжениях, меньших напряжения перехода, а также к изменению напряжения перехода структуры из одного динамического режима в другой. На основе анализа динамики распределения электронов и дырок в структуре установлено, что при изменении ширины освещаемой области происходит заметное перераспределение дырок в структуре приводящее к возникновению двух противоборствующих факторов, определяющих немонотонный характер зависимостей частоты основной гармоники от напряжения: *а) изменение соотношения скоростей перераспределения напряженности*

электрического поля между формирующимся обогащенным слоем и остальной частью активной области структуры; б) изменение ширины области, в которой формируется и движется обогащенный слой.

- При увеличении значения ширины освещаемой области от **100 до 150 мкм** происходит уменьшение частоты основной гармоники колебаний тока в указанном диапазоне напряжений и увеличение напряжения перехода, что, по всей видимости, обусловлено доминированием первого фактора.
- При увеличении значения ширины освещаемой области от **150 до 250 мкм** наблюдается увеличение частоты основной гармоники колебаний тока в указанном диапазоне напряжений и уменьшение напряжения перехода, что, вероятно, связано доминированием второго фактора.

