

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

Кафедра физики полупроводников

**Влияние времени жизни носителей заряда на особенности нелинейной
динамики тока в длинных высокоомных структурах
на основе арсенида галлия
в условиях локализованной засветки**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ
студента 2 курса 204 группы
направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»
факультета нано- и биомедицинских технологий
Синицына Павла Валерьевича

Научный руководитель
проф., д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Михайлов А. И.
фамилия, инициалы

Консультант,
ст. преподаватель
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Митин А. В.
фамилия, инициалы

Зав.кафедрой:
проф., д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Михайлов А. И.
фамилия, инициалы

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Арсенид галлия - один из перспективных полупроводниковых материалов, обладающий уникальными нелинейными свойствами, в котором возможно проявление нескольких типов неустойчивостей тока в сильных электрических полях, таких как эффект Ганна, обусловленный междолинным переносом электронов, рекомбинационная неустойчивость тока, что отличает его от других традиционных полупроводниковых материалов, например, таких как кремний, широко используемых в современной интегральной электронике. Являясь нелинейной активной средой, арсенид галлия представляет особый интерес для функциональной электроники в связи с перспективами создания на его основе полупроводниковых приборов и устройств с широкими функциональными возможностями.

Исследования влияния параметров полупроводниковых материалов, таких как арсенид галлия, на особенности возникновения и развития неустойчивостей тока в длинных высокоомных структурах дают основания рассматривать подобные материалы как функциональные для создания различных электронных устройств. Кроме того, благодаря большой длине активной области такие структуры на основе многодолинных высокоомных полупроводниковых материалов предоставляют возможность локализованного нестационарного воздействия внешними физическими факторами, например, светом, на активную область структуры.

Цель и задачи магистерской работы.

Целью данной магистерской работы является исследование влияния времени жизни носителей заряда, генерируемых светом, на особенности нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости

тока при локализованном воздействии оптического излучения на центральную часть активной области структуры.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- проведение анализа научно-технической литературы по тематике исследований
- освоение методики проведения численных экспериментов с использованием математической модели нелинейной динамики пространственного заряда и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости тока и локализованной засветки активной области структуры
- проведение серии численных экспериментов по исследованию нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структуре в условиях локализованной засветки в центре активной области при различных временах жизни неравновесных носителей заряда
- анализ полученных результатов

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

1 Современное состояние исследований неустойчивостей тока в высокоомных многодолинных полупроводниковых материалах

2 Математическое моделирование нелинейной динамики пространственного заряда и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости тока и локализованной засветки активной области структуры при различных временах жизни носителей заряда

Положение, выносимое на защиту. Анализ нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в

длинных высокоомных структурах на основе GaAs в условиях локализованной засветки в центре активной области структуры, проведенный с использованием локально-полевой математической модели, позволил установить диапазон времен жизни неравновесных носителей заряда, в котором происходит существенное (в 2 – 2,5 раза) изменение частоты генерируемых колебаний тока, обусловленное изменением характера динамики электронных процессов в исследуемой системе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 проводится анализ научно-технической литературы, посвященный современному состоянию исследований неустойчивостей тока. Рассматривается ганновская и рекомбинационная неустойчивости тока, особенности локально-полевой математической модели.

В разделе 2 формулируется локально-полевая математическая модель: рассматривается система уравнений, для нее выбираются и обосновываются начальные и граничные условия, перечисляются основные параметры.

Кроме того, описываются результаты численных экспериментов по исследованию влияния времени жизни на особенности динамики пространственного заряда и тока. В результате численного решения системы уравнений при заданных начальных и граничных условиях были получены зависимости плотности полного тока от времени и распределения напряженности электрического поля в активной области структуры в различные моменты времени в заданном диапазоне напряжений (0 – 115 В) для темнового случая и в условиях локализованной засветки в центре активной области при различных значениях времени жизни ($\tau = 1 \cdot 10^{-9}$; $1 \cdot 10^{-8}$; $2 \cdot 10^{-8}$; $3 \cdot 10^{-8}$; $5 \cdot 10^{-8}$; $7 \cdot 10^{-8}$; $9 \cdot 10^{-8}$; $1 \cdot 10^{-7}$ с). Разложение в ряд Фурье полученных зависимостей плотности полного тока от времени позволило получить зависимости постоянной составляющей и амплитуд первых четырех гармонических составляющих плотности полного тока от приложенного постоянного напряжения для всех указанных случаев.

На рисунках 1-12 представлены зависимости постоянной составляющей j_0 и амплитуд первых четырех гармонических составляющих j_1, j_2, j_3, j_4 плотности полного тока от постоянного приложенного напряжения, характерная форма генерируемых колебаний тока $j(t)$, а также распределения напряженности электрического поля $E(x,t)$, рассчитанные для темнового случая и при различных значениях времени жизни носителей заряда, генерируемых светом, в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области.

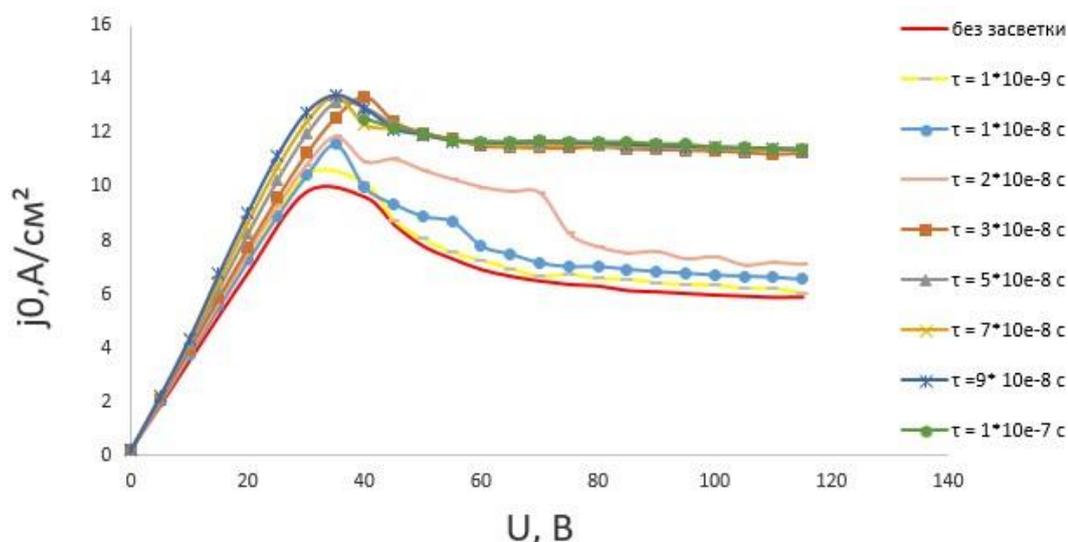


Рисунок 1 – Зависимости $j_0(U)$ в темновом случае и в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области (при различных временах жизни неравновесных носителей заряда).

Особенностью ВАХ (рисунок 1), полученной при значении времени жизни $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с является наличие участка резкого изменения постоянной составляющей плотности полного тока в диапазоне напряжений 70-75 В. Аналогичный, но менее выраженный участок имеется и на ВАХ, полученной при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с, локализованный в диапазоне напряжений 55-60 В.

Сравнительный анализ нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структуре при значениях времени жизни $\tau = 1 \cdot 10^{-9}$, $1 \cdot 10^{-8}$, $2 \cdot 10^{-8}$ с показал, что во всех трех случаях:

- при напряжениях, незначительно превышающих пороговое динамика напряженности электрического поля в активной области структуры характеризуется возникновением динамической неоднородности, представляющей собой домен рекомбинационного типа, в непосредственной близости к катоду в левой относительно области засветки части активной области структуры. Домен формируясь вблизи катода (t_1), развивается (t_2, t_3) и, достигая области засветки, рассасывается (t_4-t_6), далее процесс периодически повторяется (t_7) (рисунок 2), что и обуславливает характерную для данного случая форму генерируемых колебаний тока, представленную на рисунке 3. Такая динамика пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока подобна динамики процессов в темновом случае, с той лишь разницей, что домен рассасывается в области засветки, не достигая анода.

- при дальнейшем увеличении приложенного напряжения происходит изменение характера динамики электронных процессов в активной области структуры, заключающееся в том, что рекомбинационный домен, формируясь вблизи катода, развивается (t_1, t_2) в левой относительно области засветки части активной области структуры и, достигая области засветки (t_3), проходит через нее (t_4), далее домен доходит до анода (t_5, t_6) и рассасывается (t_7), что обуславливает более сложную по сравнению с предыдущим случаем форму генерируемых колебаний тока (рисунок 4). Диапазоны напряжений, в которых происходит описанное изменение характера динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока, различны для указанных времен жизни и соответственно равны 45-50 В при $\tau = 1 \cdot 10^{-9}$ с, 55-60 В при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с, 70-75 В при $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с. Из этих данных видно, что имеется тенденция увеличения напряжения, соответствующего изменению характера динамики процессов в исследуемой системе, при увеличении времени жизни. Это объясняется повышением фактической концентрации неравновесных носителей заряда и уменьшением напряженности электрического поля в области засветки и частях активной области структуры,

непосредственно прилегающей к ней, при увеличении времени жизни, и наблюдающимся вследствие этого смещением напряжения, при котором домен способен преодолевать область засветки, не рассасываясь, в сторону больших значений.

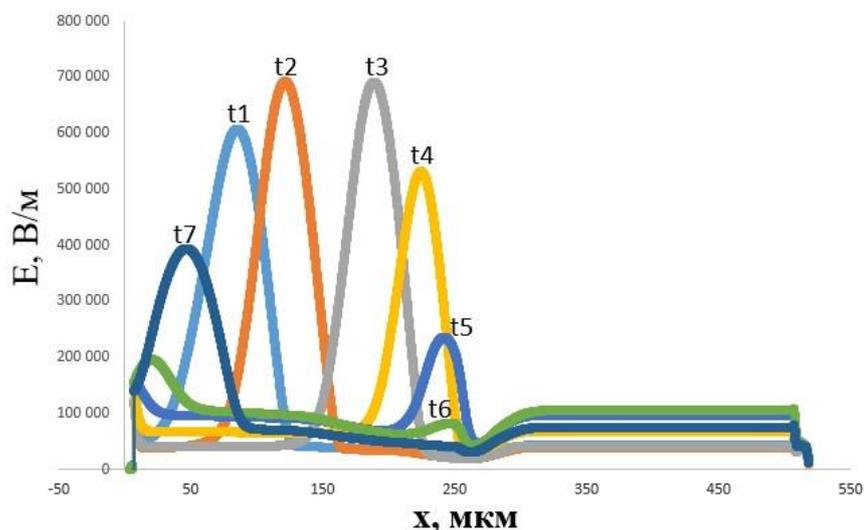


Рисунок 2 – Распределения напряженности электрического поля в активной области структуры в различные моменты времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6 < t_7$ при значении времени жизни носителей $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с и при напряжении $U = 50$ В.

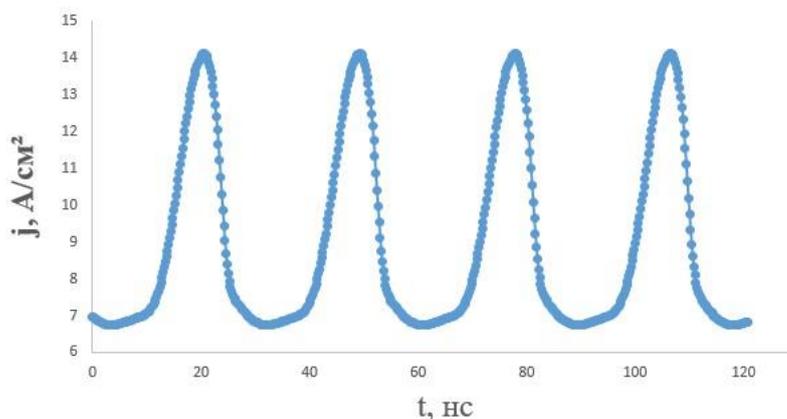


Рисунок 3 – Зависимость плотности полного тока от времени, при напряжении $U=50$ В, значение времени жизни $\tau=1 \cdot 10^{-8}$ с.

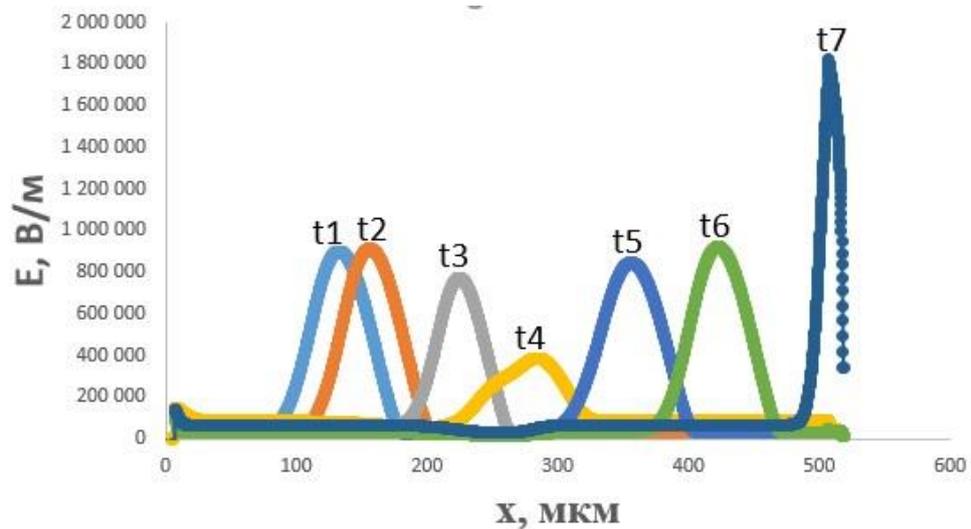


Рисунок 4 – Распределения напряженности электрического поля в активной области структуры в различные моменты времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6 < t_7$ при значении времени жизни носителей $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с и при напряжении $U = 50$ В.

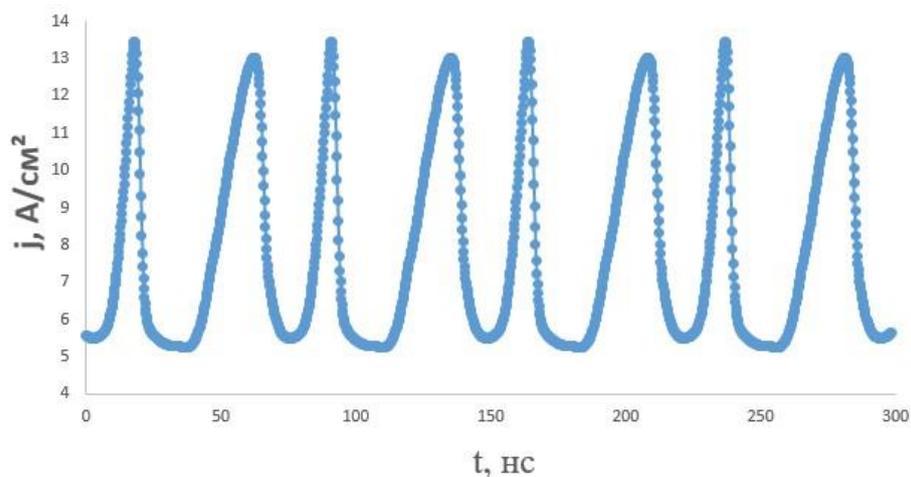


Рисунок 5 – Зависимость плотности полного тока от времени, при напряжении $U = 60$ В, значение времени жизни $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с.

При значениях времени жизни $\tau = 3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$ с вольт-амперные характеристики максимально отличаются от ВАХ, соответствующей темновому случаю. В данном случае характер динамики электронных процессов принципиально отличается от описанных выше случаев (рисунок 6). В структуре в непосредственной близости от анода формируется область сильного электрического поля (статический домен). В то же время, немного

левее этой области, но правее границы освещаемой области формируется динамическая неоднородность в виде флуктуации электрического поля, которая движется по направлению к аноду, по мере приближения флуктуации к статическому домену напряженность электрического поля в нем возрастает, достигая максимума. Далее происходит уход флуктуации в анод, сопровождающийся уменьшением напряженности электрического поля в статическом домене и формирование новой флуктуации.

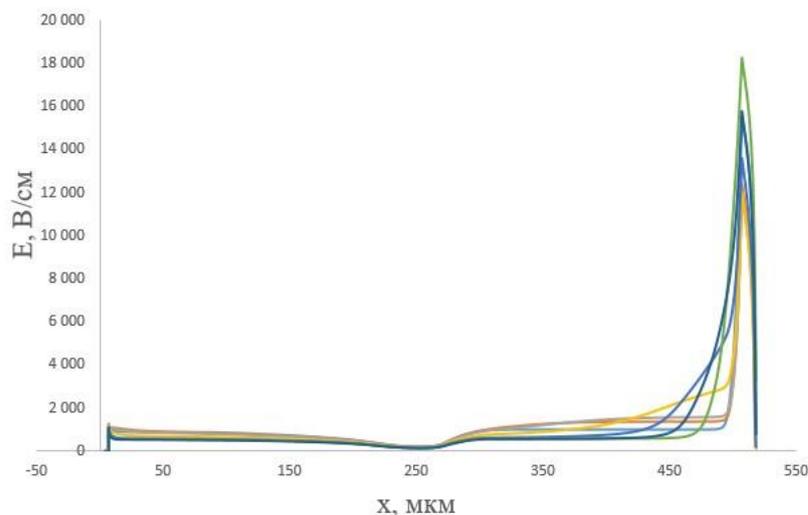


Рисунок 6 – Распределения напряженности электрического поля в активной области структуры в различные моменты времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6 < t_7$ при значении времени жизни носителей $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ с и при напряжении $U = 60$ В.

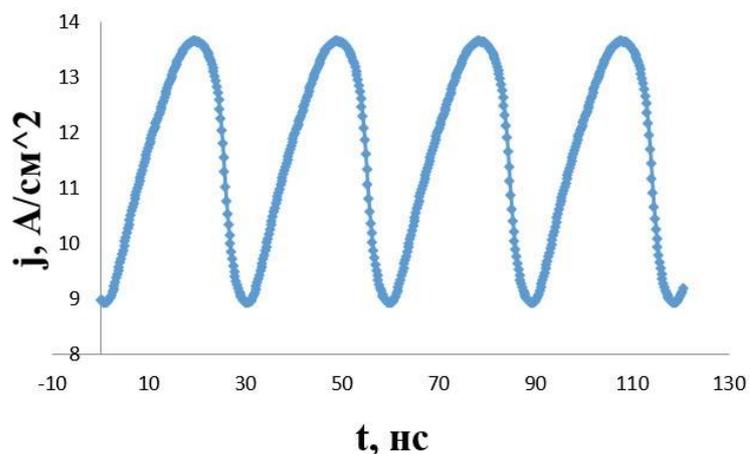


Рисунок 7 – Зависимость плотности полного тока от времени, при напряжении $U = 60$ В, значение времени жизни $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ с.

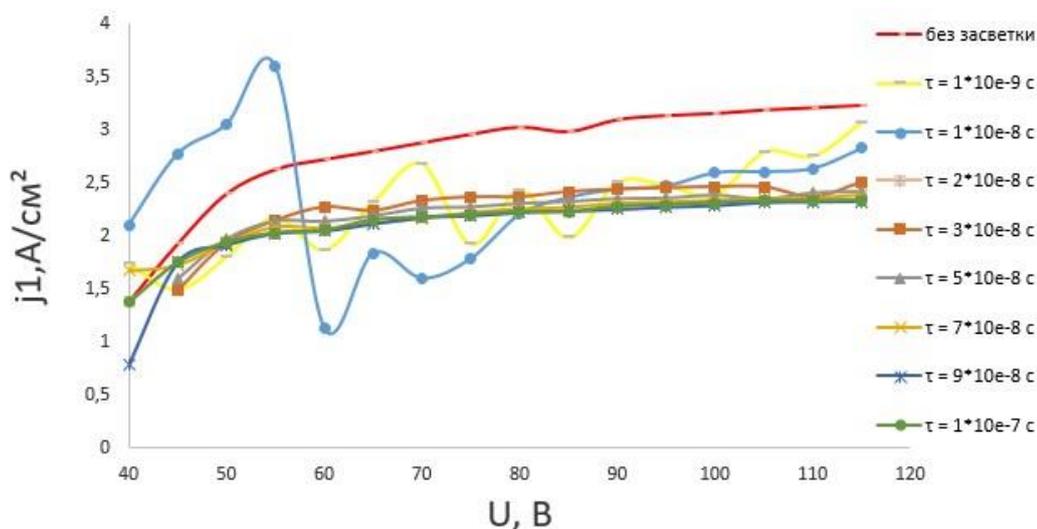


Рисунок 8 – Зависимости $j_1(U)$ в темновом случае и в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области (при различных временах жизни неравновесных носителей заряда).

Из рисунка 8 видно, что на зависимости $j_1(U)$, соответствующей времени жизни $\tau=1 \cdot 10^{-8}$ с, в диапазоне напряжений 55 – 60 В наблюдается резкое изменение амплитуды первой гармоники тока, что, по всей видимости, обусловлено рассмотренным выше изменением характера динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структуре (рисунки 2 - 5) в этом диапазоне напряжений. Вероятно, этим же механизмом может быть объяснено и заметное изменение амплитуд второй, третьей и четвертой гармонических составляющих тока в этом диапазоне напряжений при времени жизни $\tau=1 \cdot 10^{-8}$ с (рисунки 9-11).

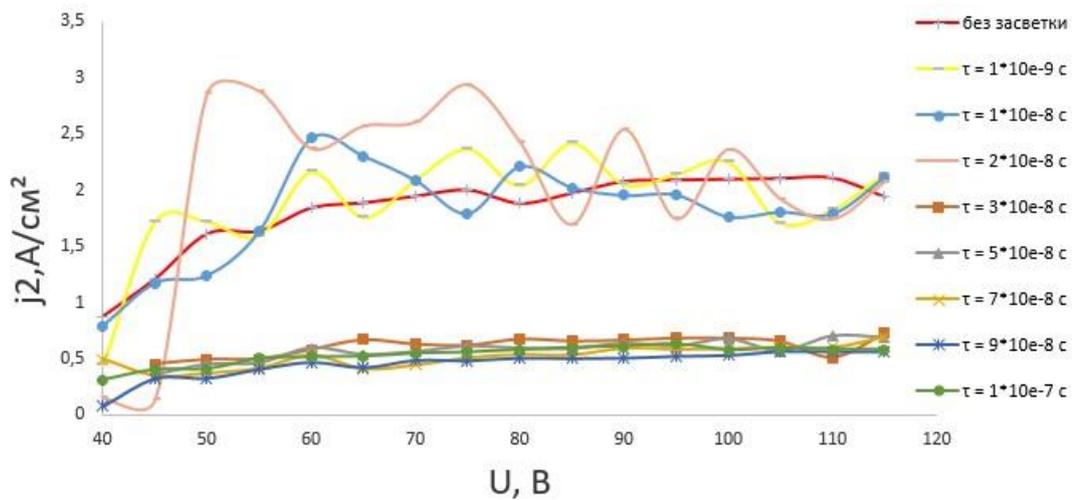


Рисунок 9 – Зависимости $j_2(U)$ в темновом случае и в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области (при различных временах жизни неравновесных носителей заряда).

На основе анализа зависимостей амплитуд высших гармонических составляющих от приложенного напряжения (рисунки 9-11) можно указать следующие особенности в их поведении:

- При временах жизни неравновесных носителей заряда $\tau = 3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ общий уровень амплитуд высших гармонических составляющих во всем диапазоне напряжений существенно меньше по сравнению с темновым случаем. Изменение времени жизни в этом диапазоне слабо влияет на амплитуды второй, третьей и четвертой гармоник плотности полного тока. Зависимости мало отличаются друг от друга, то есть практически совпадают и характеризуются незначительным изменением амплитуды гармоники при изменении приложенного напряжения.

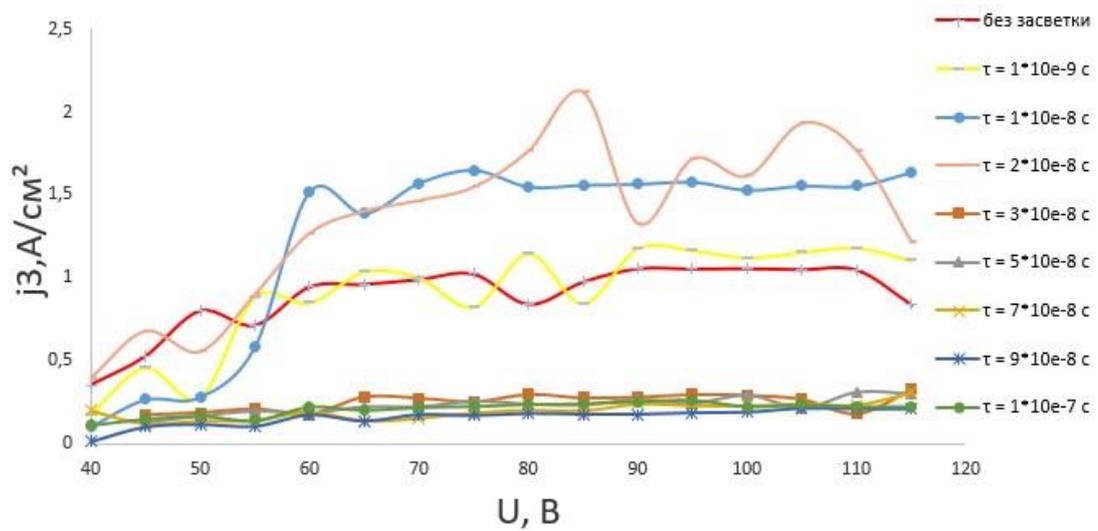


Рисунок 10 – Зависимости $j_3(U)$ в темновом случае и в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области (при различных временах жизни неравновесных носителей заряда).

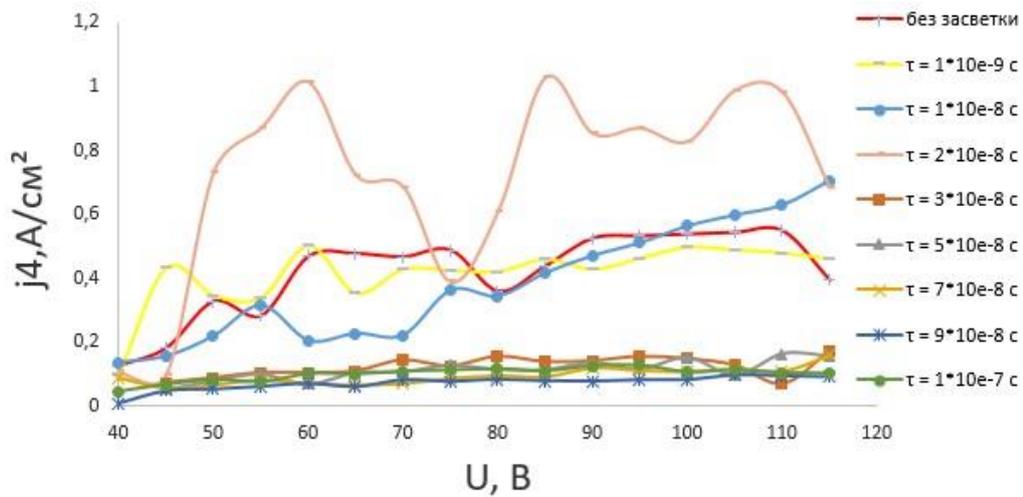


Рисунок 11 – Зависимости $j_4(U)$ в темновом случае и в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области (при различных временах жизни неравновесных носителей заряда).

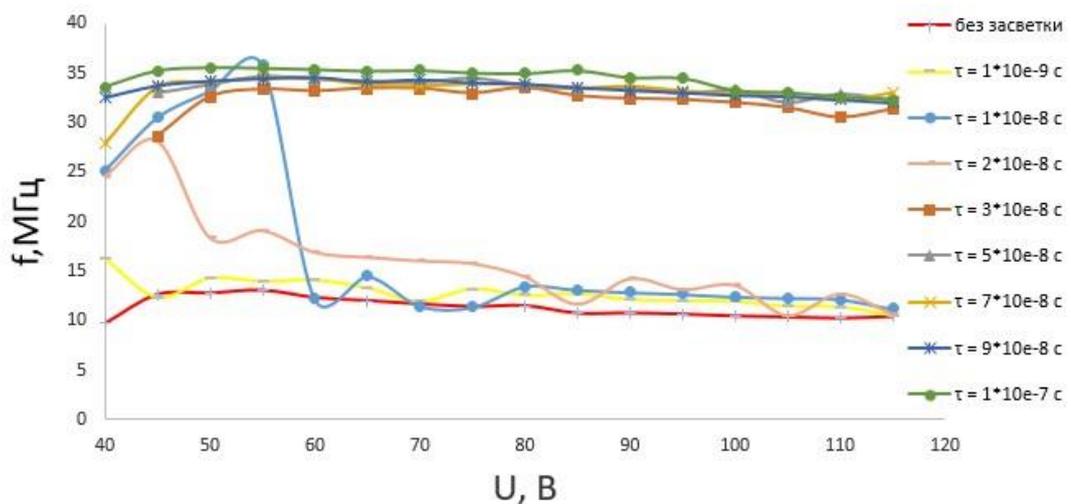


Рисунок 12 – Зависимости частоты генерируемых колебаний от приложенного постоянного напряжения в темновом случае и в условиях локализованной засветки структуры в центре активной области (при различных временах жизни неравновесных носителей заряда).

На рисунке 12 представлены зависимости частоты основной гармоники генерируемых колебаний тока от приложенного постоянного напряжения. Как видно из представленных зависимостей:

- В диапазоне времен жизни $\tau = 3 \cdot 10^{-8} \text{ с} - 1 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ частота основной гармоники генерируемых колебаний тока оказывается в 2-2,5 раза выше частоты основной гармоники, соответствующей времени жизни $\tau = 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, и слабо зависит от времени жизни и приложенного напряжения в диапазоне прикладываемых напряжений от 50 до 115 В. Это, обусловлено особенностями динамики электронных процессов в исследуемой структуре в этом диапазоне времен жизни, а именно, отсутствием изменения характера динамики поля и тока при изменении времени жизни и приложенного напряжения. Динамика во всем диапазоне указанных параметров определяется формированием в узкой прианодной области статического домена и динамических неоднородностей в виде флуктуаций напряженности электрического поля, приводящих к возникновению более высокочастотных колебаний тока.

- Наблюдаемое резкое изменение частоты основной гармоники генерируемых колебаний тока в диапазонах напряжений 45-50 В при $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$

и 55-60 В при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с обусловлено переходом структуры из одного динамического режима в другой. При $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с и напряжениях меньших 55 В динамика характеризуется возникновением рекомбинационного домена в непосредственной близости к катоду в левой относительно области засветки части активной области структуры, который формируясь вблизи катода, развивается и, достигая области засветки, рассасывается, далее процесс периодически повторяется. При $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с и напряжениях больших 55 В происходит изменение характера динамики электронных процессов в активной области структуры, заключающееся в том, что рекомбинационный домен, формируясь вблизи катода, развивается в левой относительно области засветки части активной области структуры и, достигая области засветки, проходит через нее, далее домен доходит до анода и рассасывается.

• ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа результатов проведенного с использованием локально-полевой математической модели исследования особенностей нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях локализованной засветки в центре активной области при различных временах жизни неравновесных носителей заряда можно сформулировать следующие выводы:

1 В результате численного моделирования установлено, что изменение времени жизни в условиях локализованного оптического воздействия на активную область структуры в центре в таком высокоомном многодолинном полупроводниковом материале как арсенид галлия оказывает значительное влияние на особенности проявления рекомбинационной неустойчивости тока.

При временах жизни от $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ с до $\tau = 1 \cdot 10^{-7}$ с частота основной гармоники генерируемых колебаний тока оказывается в 2-2,5 раза выше, чем при $\tau = 1 \cdot 10^{-9}$ с; общий уровень амплитуд второй, третьей и четвертой гармонических составляющих во всем диапазоне напряжений существенно меньше, чем в темновом случае, зависимости $j_2(U)$, $j_3(U)$, $j_4(U)$ характеризуются незначительным изменением амплитуды гармоники при изменении приложенного напряжения.

При $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с (в диапазоне напряжений 55-60 В) и при $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с (в диапазоне напряжений 45-50 В) наблюдается резкое изменение частоты основной гармоники, а также амплитуд первой – третьей (при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с) и второй и четвертой (при $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с) гармоник генерируемых колебаний тока, обусловленное изменением характера динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в исследуемой системе.

2 В ходе численных экспериментов были выявлены следующие особенности динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структуре:

- при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с (в диапазоне напряжений 40-55 В) и при $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с (в диапазоне напряжений 45-50 В) характер динамики электронных процессов обусловлен периодическим формированием в левой части активной области структуры относительно области засветки подвижного рекомбинационного домена, достигающего области засветки и рассасывающегося в ней.

- при $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с (в диапазоне напряжений 55-60 В) и при $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с (в диапазоне напряжений 70-75 В) происходит изменение характера динамики электронных процессов в активной области структуры, заключающееся в том, что рекомбинационный домен, формирующийся вблизи катода, развивающийся в левой относительно области засветки части активной области структуры, достигая области засветки, проходит через нее и уходит в анод.

- при временах жизни от $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ с до $\tau = 1 \cdot 10^{-7}$ с в структуре в непосредственной близости от анода формируется статический домен. В то же время, немного левее этой области, но правее границы освещаемой области периодически формируется динамическая неоднородность в виде флуктуации электрического поля, которая движется по направлению к аноду, по мере приближения флуктуации к статическому домену напряженность электрического поля в нем возрастает, достигая максимума. Далее происходит уход флуктуации в анод, сопровождающийся уменьшением напряженности электрического поля в статическом домене и формирование новой флуктуации.