

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  
рекомбинационной неустойчивости и локализованной засветки активной  
области структуры**

АФТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

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

Безбородова Александра Валерьевича

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 интересных направлений в современной электронике является функциональная электроника. 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. Представляющими интерес для функциональной электроники являются структуры с длинной активной областью на основе GaAs, так как в них в сильных электрических полях возможно проявление неустойчивостей тока (ганновской, рекомбинационной), а большая длина активной области позволяет локализованно воздействовать на нее, тем самым изменяя характер динамики протекающих электронных процессов.

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

Целью данной работы является установление особенностей нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структурах на основе высокоомного GaAs в условиях рекомбинационной неустойчивости тока и локализованной засветки активной области структуры.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- Анализ научно-технической литературы по данной теме;
- 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;
- Анализ полученных результатов и формулировка выводов.

## **Структура бакалаврской работы.**

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

1. Механизмы развития рекомбинационной неустойчивости тока

2. Математическое моделирование нелинейной динамики пространственного заряда и тока в исследуемой структуре в условиях локализованной засветки активной области структуры

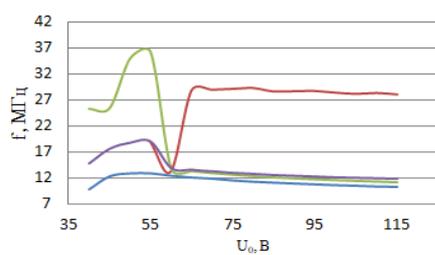
3 Исследование влияния времени жизни на динамику пространственного заряда и тока при различных вариантах локализации области засветки

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

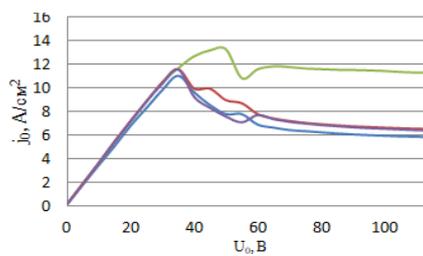
**В разделе 1** проведен анализ научно-технической литературы, посвящённой исследованиям рекомбинационной неустойчивости тока в различных полупроводниках (в том числе, в полуизолирующем GaAs).

**В разделе 2** рассмотрены основные виды математических моделей, используемых при исследовании динамики электронных процессов в полупроводниковых структурах на основе арсенида галлия в сильных электрических полях; сформулирована система уравнений локально-полевой математической модели для исследуемых структур; приведены результаты численных экспериментов по исследованию нелинейной динамики пространственного заряда и тока в структуре при различных вариантах локализации области засветки.

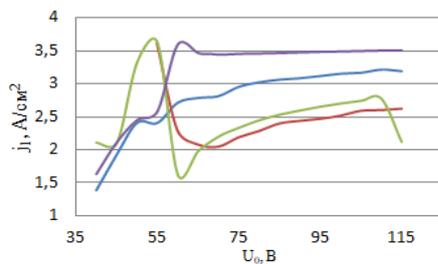
Математическое моделирование проводилось на основе локально-полевой модели, подробно описанной и обоснованной в работах [1,2]. Как видно из рисунка 1, во всех рассматриваемых случаях на вольтамперных характеристиках имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления, свидетельствующий об активных свойствах структуры в этом диапазоне напряжений, и обусловленный проявлением рекомбинационной неустойчивости тока в исследуемой структуре.



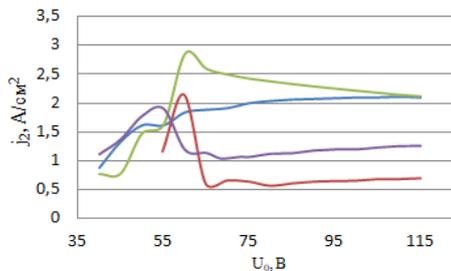
а)



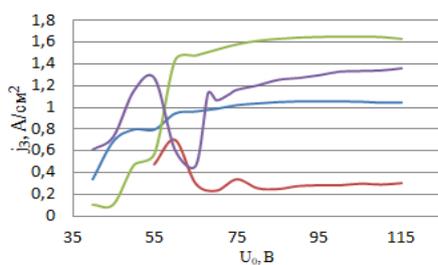
б)



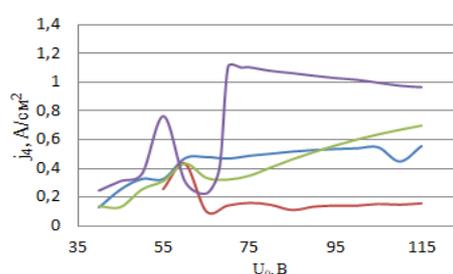
в)



г)



д)



е)

Рисунок 1 – Зависимости частоты  $f$  (а), постоянной составляющей  $j_0$  (б) и амплитуд основной  $j_1$  (в), второй  $j_2$  (г), третьей  $j_3$  (д) и четвертой  $j_4$  (е) гармоник плотности полного тока от величины приложенного напряжения  $U_0$  в «темновом» случае (синий) и в условиях локализованной засветки центральной (зеленый), прикатодной (красный) и прианодной (фиолетовый) частей активной области структуры.

Анализ зависимости  $f(U_0)$ , рассчитанной в «темновом» случае, показал, что при повышении приложенного напряжения от порогового значения до 55 В частота генерируемых колебаний тока увеличивается (на 44 %) и достигает максимального значения, при дальнейшем увеличении приложенного напряжения частота монотонно уменьшается (на 30 %) в диапазоне напряжений от 55 до 115 В. При этом наблюдается тенденция возрастания амплитуд первых

четырёх гармонических составляющих при увеличении приложенного напряжения.

Из рисунка 1 (а) видно, что в диапазоне напряжений 65-115 В при локализованной засветке структуры вблизи катода характер зависимости  $f(U_0)$  практически не изменяется по сравнению с «темновым» случаем, а частота генерируемых колебаний значительно повышается (в 2,5 раза) относительно частоты колебаний в «темновом» случае. Сравнение зависимостей  $j_1(U_0) - j_4(U_0)$ , рассчитанных для случая прикатодной засветки и «темнового» случая, показало, что характер этих зависимостей также в целом остается таким же в указанном диапазоне напряжений в условиях прикатодной засветки по сравнению с «темновым» случаем. При этом локализованная засветка вблизи катода приводит к значительному уменьшению по сравнению с «темновым» случаем амплитуд всех четырех гармонических составляющих тока в указанном диапазоне напряжений.

Как видно из полученных данных (рисунок 1), ВАХ, рассчитанная в условиях локализованной засветки центральной части активной области, незначительно отличается от характеристики, рассчитанной в «темновом» случае. При этом частота основной гармоники генерируемых колебаний тока значительно возрастает (в 3 раза) по сравнению с «темновым» случаем в диапазоне напряжений 40 – 50 В, и оказывается незначительно выше «темновой» частоты при больших напряжениях. Характер зависимостей  $f(U_0)$  для двух рассматриваемых случаев при напряжениях, больших 50 В, одинаков.

Как видно из рисунка 1, ВАХ, рассчитанная в условиях локализованной засветки вблизи анода, незначительно отклоняется от характеристики, рассчитанной в «темновом» случае. При этом частота основной гармоники генерируемых колебаний тока значительно возрастает (в 1.5 раза) по сравнению с «темновым» случаем в диапазоне напряжений 40 – 55 В, и оказывается немного выше (на 20 %) «темновой» частоты при больших напряжениях.

Характер зависимостей  $f(U_0)$  для двух рассматриваемых случаев при напряжениях, больших 55 В, аналогичен.

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда и электрического поля в исследуемой структуре в «темновом» случае показал, что динамика электронных процессов, в общем характеризуется периодическим формированием ( $t_1$ ), движением через активную область ( $t_2$ ) и уходом в анод ( $t_3$ ) динамической неоднородности типа медленного рекомбинационного домена (рисунок 3-6). Увеличение напряженности внешнего поля приводит к увеличению числа электронов с большой энергией и, следовательно, к росту захвата. Поэтому дифференциальная проводимость может стать отрицательной, и в полупроводнике может образоваться область, в которой концентрируется высокое электрическое поле. Если в некоторой локальной области полупроводника возникла неустойчивость в результате роста электрического поля (флуктуация), то такой рост приведет к увеличению скорости захвата на глубокие примесные центры, в результате чего концентрация свободных носителей в этой области уменьшится (рисунок 4). Это в свою очередь приведет к ещё большему росту напряженности поля и, как следствие, к дальнейшему уменьшению концентрации свободных электронов и одновременному увеличению концентрации заполненных центров  $N_T - N_{T-}(x, t)$  (рисунок 5), в результате чего в этой части сформируется отрицательный объемный заряд (рисунок 5). В то же время, в соответствии с выводами авторов работы [3], рядом с такой областью, ближе к аноду, формируется область с объемным положительным зарядом и пониженным значением концентрации заполненных центров, так как приток электронов к ней со стороны катода из области с пониженной концентрацией электронов меньше, чем отток в сторону анода. Поскольку в стационарном состоянии приток электронов со стороны катода соответствует их оттоку к аноду, домен смещается в сторону анода.

Таким образом, тенденцию убывания на зависимостях  $f(U_0)$  и  $j_0(U_0)$  на рисунке 1 при повышении  $U_0$  можно объяснить уменьшением скорости

рекомбинационного домена и электрического поля вне его, соответственно, а тенденцию возрастания на зависимостях всех четырех гармоник  $j_1(U_0) - j_4(U_0)$  – увеличением электрического поля в самом домене, приводящим к существенному возрастанию амплитуды генерируемых колебаний тока, и незначительным изменениям их формы (рисунок 2).

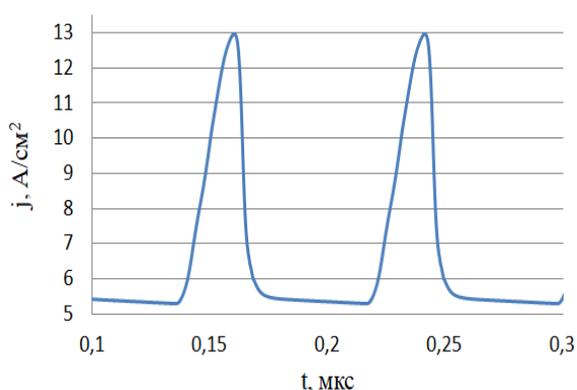


Рисунок 2 – Характерная форма генерируемых колебаний тока в «темновом» случае ( $U_0=60$  В).

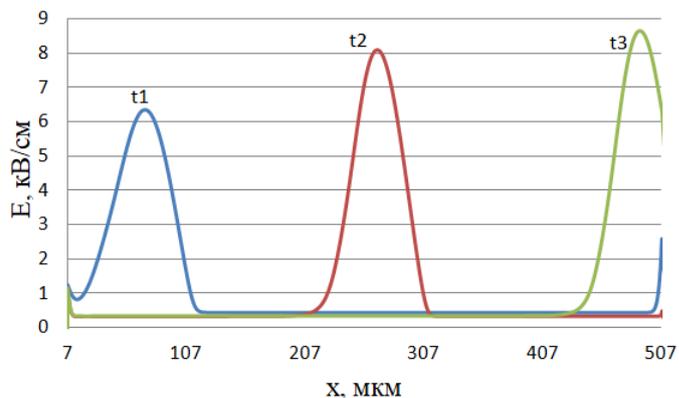


Рисунок 3 – Распределения электрического поля в структуре в «темновом» случае в различные моменты времени ( $U_0=60$  В).

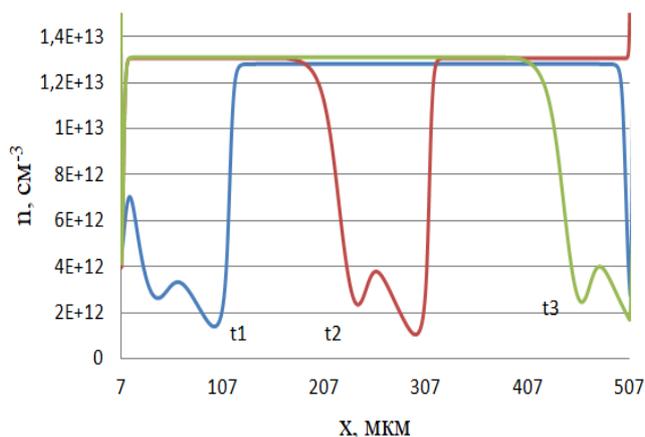


Рисунок 4 – Распределения концентрации электронов в структуре в «темновом» случае в различные моменты времени ( $U_0=60$  В).

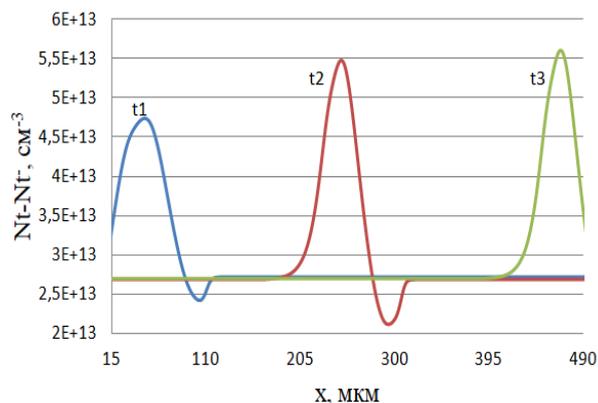


Рисунок 5 – Распределения концентрации заполненных центров в структуре в «темновом» случае в различные моменты времени ( $U_0=60$  В).

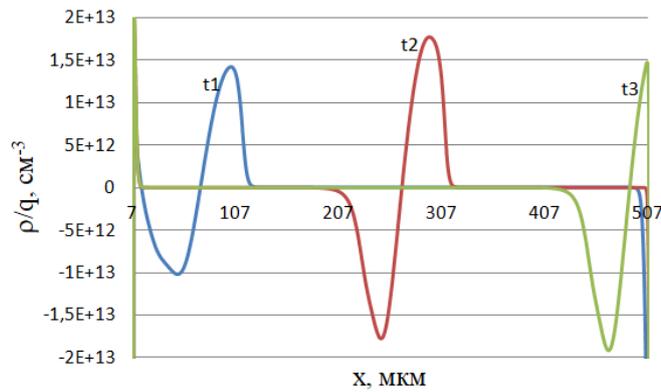


Рисунок 6 – Пространственные распределения приведенной объемной плотности заряда в структуре в «темновом» случае в различные моменты времени ( $U_0=60$  В).

Анализ динамики пространственного заряда и поля в структуре показал, что при локализованной засветке структуры вблизи катода характер динамики электронных процессов существенно изменяется по сравнению с «темновым» случаем, формирование рекомбинационного домена не происходит. Пороговое напряжение возникновения устойчивых колебаний тока оказывается выше (55 В) по сравнению с «темновым» случаем (40 В). В структуре в этом режиме в непосредственной близости от анода формируется область сильного электрического поля (статический домен). Вблизи катода, 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, после чего данная динамическая неоднородность уходит в анод, что сопровождается увеличением плотности полного тока. При увеличении приложенного напряжения характер динамики электронных процессов в структуре сохраняется, но при этом происходит увеличение амплитудных значений напряженности электрического поля в области, локализованной вблизи анода, и движущейся динамической неоднородности (флуктуации электрического поля), сопровождающееся увеличением амплитуды генерируемых колебаний тока (увеличение амплитуды основной гармоники генерируемых колебаний тока в диапазоне напряжений 65-115 В).

Анализ нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в структуре в условиях локализованной засветки центральной части активной области показал, что:

- при напряжениях, незначительно превышающих пороговое (40 – 55 В), динамика напряженности электрического поля в активной области структуры характеризуется возникновением динамической неоднородности, представляющей собой домен рекомбинационного типа, в непосредственной близости от катода, в левой относительно области засветки части активной области структуры. Домен, формируясь вблизи катода, развивается и, достигая области засветки, рассасывается, далее процесс периодически повторяется, что и обуславливает характерную для данного случая форму генерируемых колебаний тока, аналогичную «темновому» случаю. Такая динамика пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока подобна динамике процессов в «темновом» случае, с тем лишь отличием, что домен рассасывается в области засветки, не достигая анода;

- при дальнейшем увеличении приложенного напряжения и достижении им значения 60 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, что обуславливает более сложную по сравнению с предыдущим случаем форму генерируемых колебаний тока, отличающуюся наличием второго характерного максимума. При этом более широкому пику на форме генерируемых колебаний тока соответствует процесс ухода рекомбинационного домена в анод, а узкий пик появляется вследствие прохождения доменом, сформированным вблизи от катода, области засветки.

В процессе прохождения домена через область засветки происходит увеличение концентрации свободных электронов в нем, увеличение ширины

области, соответствующей избыточной концентрации захваченных электронов, по отношению к ширине области, соответствующей недостаточной концентрации захваченных электронов, в домене. Указанные факторы способствуют уменьшению объемной плотности пространственного заряда и электрического поля в домене при прохождении им области с повышенной концентрацией неравновесных носителей заряда.

Наблюдаемое изменение характера динамики электронных процессов в исследуемой структуре в определенном диапазоне напряжений (55 – 60 В) приводит к появлению описанных выше участков резкого изменения на зависимостях  $f(U_0)$ ,  $j_0(U_0)$ ,  $j_1(U_0)$ ,  $j_2(U_0)$ ,  $j_3(U_0)$ ,  $j_4(U_0)$  (рисунок 1) в этом диапазоне напряжений.

Анализ формы колебаний тока при локализации области засветки вблизи анода при различных напряжениях позволил установить, что при достижении напряжения 55-60 В происходит значительное изменение формы колебаний, заключающееся в появлении выраженного второго максимума, аналогичное наблюдаемому в случае засветки центральной части активной области. Отличие от предыдущего случая заключается в относительно более близком расположении двух пиков на форме генерируемых колебаний, что в свою очередь, можно объяснить тем, что область засветки располагается ближе к аноду, а появление дополнительного (более узкого) пика на форме колебаний в случае засветки в середине активной области, как показано ранее, было обусловлено процессом прохождения рекомбинационного домена через область засветки.

Дальнейший анализ подтвердил сходство динамики пространственного заряда и электрического поля в активной области структуры при локализованной засветке вблизи анода со случаем засветки в середине активной области.

Анализ результатов численных экспериментов по исследованию динамики пространственного заряда и тока при различных временах жизни

неравновесных носителей заряда, проведенный в рамках работы (в разделе 3), показал, что даже в предположении постоянства времени жизни неравновесных электронов и дырок, изменение его величины может оказывать существенное влияние на динамику электронных процессов в активной области структуры и спектр генерируемых колебаний тока.

Сравнительный анализ 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 для случая прикатодной локализации области засветки при различных значениях времени жизни, показал, что изменение времени жизни в этом случае практически не изменяет характера зависимостей  $f(U_0)$  и  $j_0(U_0)$  во всем диапазоне прикладываемых напряжений, а также зависимостей  $j_1(U_0)$ ,  $j_2(U_0)$ ,  $j_3(U_0)$ ,  $j_4(U_0)$  при напряжениях 65-115 В. При этом в диапазоне напряжений 40-65 В при изменении времени жизни наблюдаются более существенные изменения амплитуд всех четырех гармоник тока. Анализ динамики пространственного заряда, электрического поля и тока позволил установить, что при всех рассматриваемых временах жизни, процессы, протекающие в структуре, имеют схожий характер и мало отличаются от рассмотренных выше (для времени жизни  $\tau=1 \cdot 10^{-8}$ с).

На вольтамперной характеристике, полученной при значении времени жизни  $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$  с при локализованной засветке центральной части активной области, наблюдается участок резкого изменения постоянной составляющей плотности полного тока в диапазоне напряжений 70-75 В. Похожий, но менее выраженный участок имеется и на ВАХ, полученной при  $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$  с, расположенный в диапазоне напряжений 55-60 В. При достижении напряжения 55 – 60 В при  $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$  с, как отмечалось ранее, наблюдаются и резкие изменения амплитуд первой, второй и третьей гармоник: амплитуда первой гармоники при достижении указанного напряжения резко уменьшается, а второй и третьей – возрастает. При большем времени жизни  $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$  с данный участок смещается в сторону больших напряжений (70-75 В). При этом в указанном диапазоне напряжений амплитуды первой и третьей гармоник

увеличиваются, а второй и четвертой уменьшаются, в отличие от предыдущего случая ( $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$  с). Необходимо отметить, что был обнаружен промежуточный характер динамики электронных процессов, наблюдаемый только при времени жизни  $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$  с в диапазоне напряжений 50 - 70 В. А выход структуры из этого динамического режима происходил при напряжении 70 – 75 В. Наблюдаемый промежуточный характер динамики электронных процессов в структуре отличается от рассмотренных ранее для времени жизни  $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$  с режимов тем, что после достижения доменом области засветки и рассасывания в ней, новый домен вблизи катода не формируется, а электрическое поле перераспределяется между частями активной области, разделенными областью засветки, причем скорость нарастания поля в правой половине оказывается выше, что приводит к формированию в ней динамической неоднородности иного типа (флуктуации электрического поля), распространяющейся в сторону анода. Достигнув анода, флуктуация рассасывается, и только после этого возникает новый рекомбинационный домен вблизи катода. Далее процесс периодически повторяется. Переход к этому промежуточному характеру динамики электронных процессов происходит при напряжении 45-50 В. При времени жизни  $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$  с характер динамики электронных процессов принципиально отличается от описанных выше случаев (рисунок 1). 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.

На основе результатов серии численных экспериментов, проведенных для случая локализованной засветки структуры в прианодной области при различных временах жизни, можно указать следующие обнаруженные особенности:

- на зависимостях  $f(U_0)$ ,  $j_0(U_0)$ ,  $j_1(U_0)$ ,  $j_2(U_0)$ ,  $j_3(U_0)$ ,  $j_4(U_0)$ , рассчитанных при всех значениях времени жизни, имеются характерные участки резкого коррелированного изменения анализируемых величин в определенном диапазоне напряжений (55-60 В при  $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$  с, 75-80 В при  $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$  с, 95-100 В при  $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$  с); достижение указанного диапазона напряжений сопровождается существенным уменьшением частоты и увеличением амплитуды (за исключением случая  $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$  с) основной гармоники генерируемых колебаний тока, появлением характерных участков немонотонности на зависимостях амплитуд высших гармоник от приложенного напряжения, а также незначительным увеличением постоянной составляющей плотности тока;

- динамика пространственного заряда, электрического поля и тока в исследуемой структуре при изменении времени жизни в целом соответствует характеру, описанному ранее (для случая  $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$  с); увеличение времени жизни приводит к повышению напряжения, при котором наблюдается изменение динамического состояния системы (рекомбинационный домен, достигая области засветки, не рассасывается в ней, а преодолевает и уходит в анод), обуславливающее указанные особенности в спектре генерируемых колебаний тока; наблюдаемое при увеличении времени жизни увеличение напряжения, соответствующего изменению состояния системы, может быть обусловлено повышением концентрации электронов и дырок, генерируемых светом, электропроводности и, как следствие, уменьшением напряженности электрического поля в области засветки (и смежных областях) при больших временах жизни.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в длинных высокоомных структурах на основе GaAs в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости тока и локализованной засветки активной области структуры позволяет сформулировать следующие выводы:

- Наблюдаемое *при локализованной засветке прикатодной области* структуры *значительное увеличение частоты и уменьшение амплитуды основной гармоники*, а также уменьшение амплитуд высших гармоник в спектре генерируемых колебаний тока *в широком диапазоне напряжений* обусловлено принципиально иным характером (по сравнению с «темновым» случаем) динамики электронных процессов в структуре, заключающимся в формировании в этом режиме в непосредственной близости от анода области сильного электрического поля (статического домена) и динамической флуктуации электрического поля (в отличие от формирования медленного рекомбинационного домена в «темновом» случае), движение которой через активную область и уход в анод обуславливают возникновение более высокочастотных и меньших по амплитуде колебаний тока.

- *В результате локализованной засветки центральной или прианодной части активной области* структуры *при достижении определенного напряжения происходит изменение динамического режима*, заключающееся в изменении характера процесса прохождения рекомбинационным доменом области засветки, обуславливающее значительное изменение формы генерируемых колебаний тока (появление выраженного второго максимума) и *возникновение соответствующих участков резкого изменения величин на зависимостях частоты и амплитуд всех спектральных составляющих от напряжения в узком диапазоне напряжений*, а также

существенное влияние приложенного напряжения на спектр тока вне этого диапазона.

- 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 значительным изменением дрейфового и диффузионного смещения неравновесных носителей заряда из области засветки, приводящим к перераспределению электрического поля в активной области структуры, и изменением влияния рекомбинационных процессов на динамику пространственного заряда и электрического поля в структуре при изменении времени жизни.

- *Особенности в динамике электронных процессов и соответствующие изменения амплитуды, формы и частоты генерируемых колебаний тока*, происходящие в структуре вследствие локализованного оптического воздействия, представляются перспективными с точки зрения *функциональной электроники*, поскольку открывают способ эффективного оптического управления **спектром** генерируемых колебаний тока (в том числе, в определенных диапазонах напряжений и на определенные спектральные составляющие).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Михайлов А.И., Митин А.В., Терентьева А.И. Особенности проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках в условиях оптического воздействия // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сборник статей / Под общей редакцией проф. А.И. Михайлова. Саратов: Издательский центр «Наука», 2013. С. 130 – 153.

2 Михайлов А. И., Митин А. В., Терентьева А. И. Исследование влияния концентрации глубоких примесных уровней на возникновение устойчивых рекомбинационных и ганновских колебаний тока в длинных высокоомных структурах  $n^+-n^-n-n^+-GaAs$  // Микроэлектроника СВЧ. Всероссийская конференция. – Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. – 2012. – С. 4-7.

3 Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977.