

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

Кафедра физики полупроводников

**Влияние скоростей захвата и термической генерации электронов глубоким
уровнем на динамику пространственного заряда и тока в структурах на
основе высокоомного арсенида галлия в условиях рекомбинационной
неустойчивости**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 412 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Баранова Владимира Сергеевича

Научный руководитель

старший преподаватель

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

А.В. Митин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

А.И. Михайлов

инициалы, фамилия

Саратов 2020

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика темы.

Функциональная электроника является одним из направлений развития современной микроэлектроники, в котором исследуются возникновение динамических неоднородностей различной физической природы в континуальных средах и их взаимодействие с различными физическими полями, а также разрабатываются приборы и устройства на основе динамических неоднородностей для целей обработки, генерации и хранения информации с использованием принципов физической интеграции и моделирования.

Как перспективные для функциональной электроники могут рассматриваться высокоомные многодолинные (а также и широкозонные) полупроводниковые среды, проявляющие нелинейные активные свойства в сильных электрических полях. К таким материалам можно отнести бинарные соединения группы АІІІВV, в частности, один из наиболее разработанных и используемых полупроводников, – арсенид галлия (GaAs). В структурах на основе полуизолирующего арсенида галлия в сильных электрических полях могут развиваться неустойчивости тока различной физической природы, например, известный эффект Ганна, обусловленный междолинным переносом электронов, а также рекомбинационная неустойчивость тока, связанная с действием одного или нескольких различающихся между собой физических механизмов, приводящих к концентрационной нелинейности.

Цель и задачи бакалаврской работы.

Целью данной работы является исследование влияния коэффициента захвата свободных электронов на глубокий примесный уровень (ГУ) и скорости тепловой генерации электронов с ГУ в зону проводимости на особенности нелинейной динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- проведение анализа научно-технической литературы по теме исследования;
- 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;
- проведение серии численных экспериментов по исследованию влияния скоростей электронных обменных процессов между ГУ и зоной проводимости на нелинейную динамику пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в исследуемых структурах в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости;
- анализ полученных результатов.

Структура бакалаврской работы.

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

1. Исследования обусловленной зависящим от поля захватом электронов на глубокие уровни рекомбинационной неустойчивости тока в высокоомном арсениде галлия.
2. Подходы к математическому моделированию динамики электронных процессов в полупроводниковых структурах.
3. Математическое моделирование нелинейной динамики пространственного заряда и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия в условиях проявления рекомбинационной неустойчивости.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

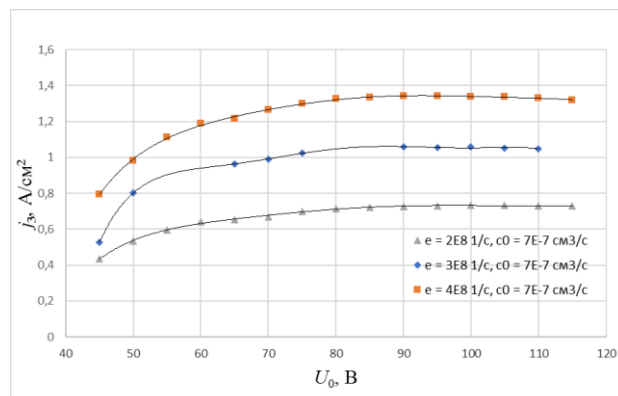
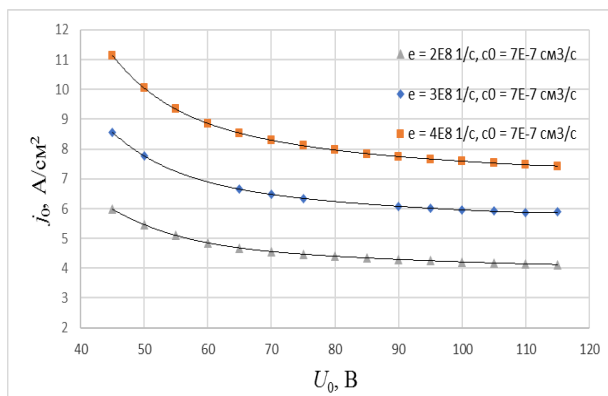
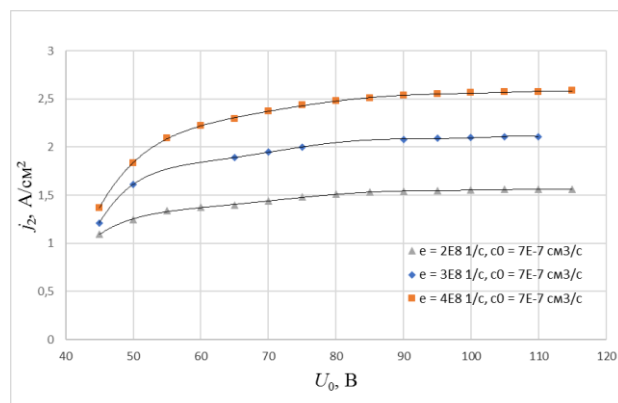
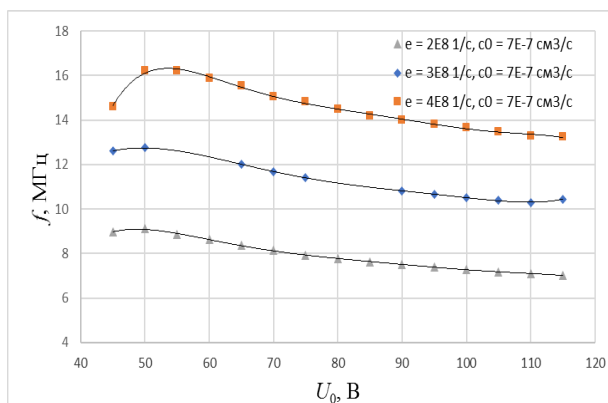
В разделе 1 проведен анализ научно-технической литературы, посвящённой исследованиям медленных доменов сильного поля и рекомбинационной неустойчивости тока в полуизолирующем GaAs.

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.

В разделе 3 содержатся формулировка системы уравнений используемой локально-полевой математической модели, а также результаты численных экспериментов.

В работе проведена серия численных экспериментов по исследованию влияния коэффициента захвата электрона зоны проводимости примесным центром в отсутствие электрического поля c_0 ($2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с} - 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$) и вероятности теплового возбуждения в зону проводимости электрона с заполненного примесного уровня e ($1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} - 1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$) на характер динамики пространственного заряда, напряженности электрического поля и тока в длинных высокоомных структурах на основе арсенида галлия.



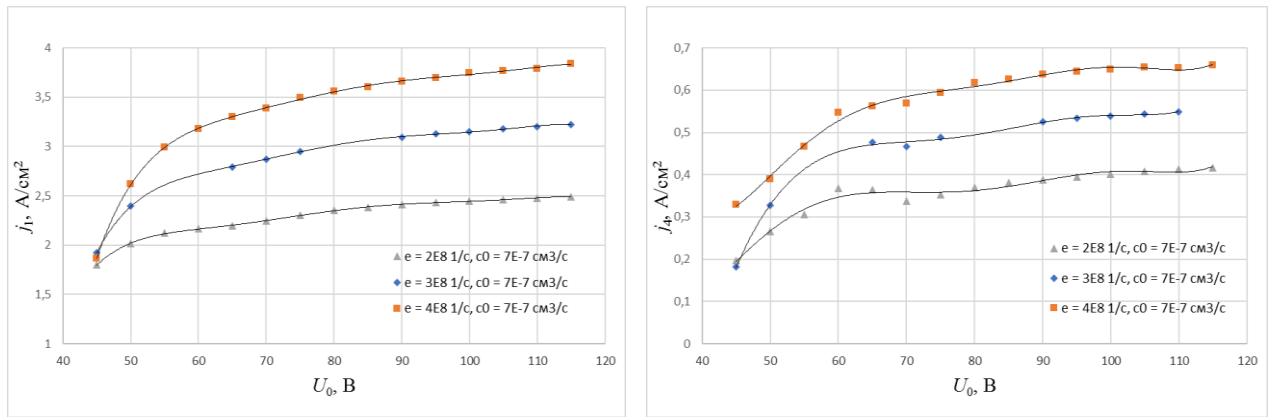
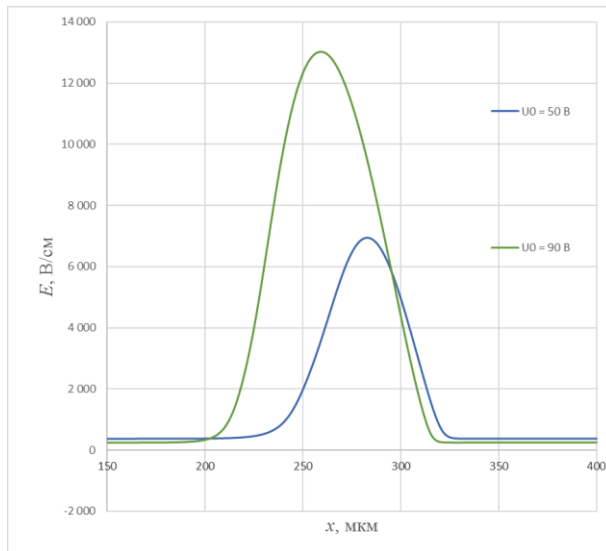
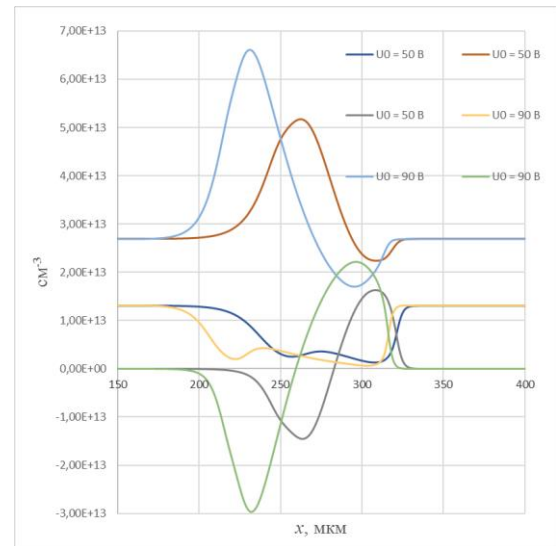


Рисунок 1 – Зависимости частоты основной гармоники f , постоянной составляющей и амплитуд первых четырех гармоник j_1, j_2, j_3, j_4 плотности полного тока от напряжения U_0 при различных значениях e ($c_0 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$)

Численные эксперименты, проведенные при различных значениях вероятности теплового возбуждения e в зону проводимости электрона с заполненного примесного уровня и фиксированном значении параметра c_0 (рисунок 1), показали, что характер зависимостей частоты, постоянной составляющей и амплитуд первых четырех гармонических составляющих генерируемых колебаний тока от приложенного постоянного напряжения при изменении значения параметра e в целом сохраняется. На зависимостях $f(U_0)$ и $j_0(U_0)$ прослеживается тенденция убывания, а на зависимостях $j_1(U_0) - j_4(U_0)$ – возрастания при повышении U_0 соответствующих величин для всех указанных значений e .



a



б

Рисунок 2 – Пространственные распределения в домене при различных напряжениях U_0 : *a*– напряженности электрического поля $E(x,t)$; *б* – приведенной объемной плотности пространственного заряда $\rho(x,t)/q$ (нижняя группа кривых), концентрации свободных электронов $n(x,t)$ (средняя группа кривых) и заполненных электронами глубоких примесных уровней $N_T - N_{T-}(x,t)$ (верхняя группа кривых); $e = 3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$, $c_0 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{c}$

Анализ динамики электрического поля в структуре показал, что при повышении приложенного постоянного напряжения происходит увеличение ширины центральной части рекомбинационного домена, максимального значения напряженности электрического поля в нем (и одновременное уменьшение поля за его пределами), а также уменьшение его скорости и изменение формы от вида с заметно вытянутой задней (левой) частью (наличием характерного «хвоста») к более симметричному виду (рисунок 2, *a*). На основе анализа динамики пространственного заряда (рисунок 2, *б*) можно утверждать, что при повышении напряжения происходит увеличение объемного заряда внутри домена, приводящее к увеличению напряженности электрического поля внутри него и соответствующему расширению области с глубоким обеднением свободными электронами. Увеличение отрицательного объемного заряда обусловлено возрастанием количества заполненных глубоких центров (а

следовательно, и захваченных электронов) в области с их избыточной концентрацией, а положительного – убыванием в области с их недостаточной концентрацией, а также увеличением ширины этой области и области с наибольшим обеднением электронами в правой части домена, приводящим к соответствующему расширению области с положительным объемным зарядом.

Таким образом, тенденция убывания на зависимостях $f(U_0)$ и $j_0(U_0)$ на рисунке 1 при повышении U_0 может быть объяснена уменьшением скорости рекомбинационного домена и электрического поля вне его, а тенденция 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 изменением их формы.

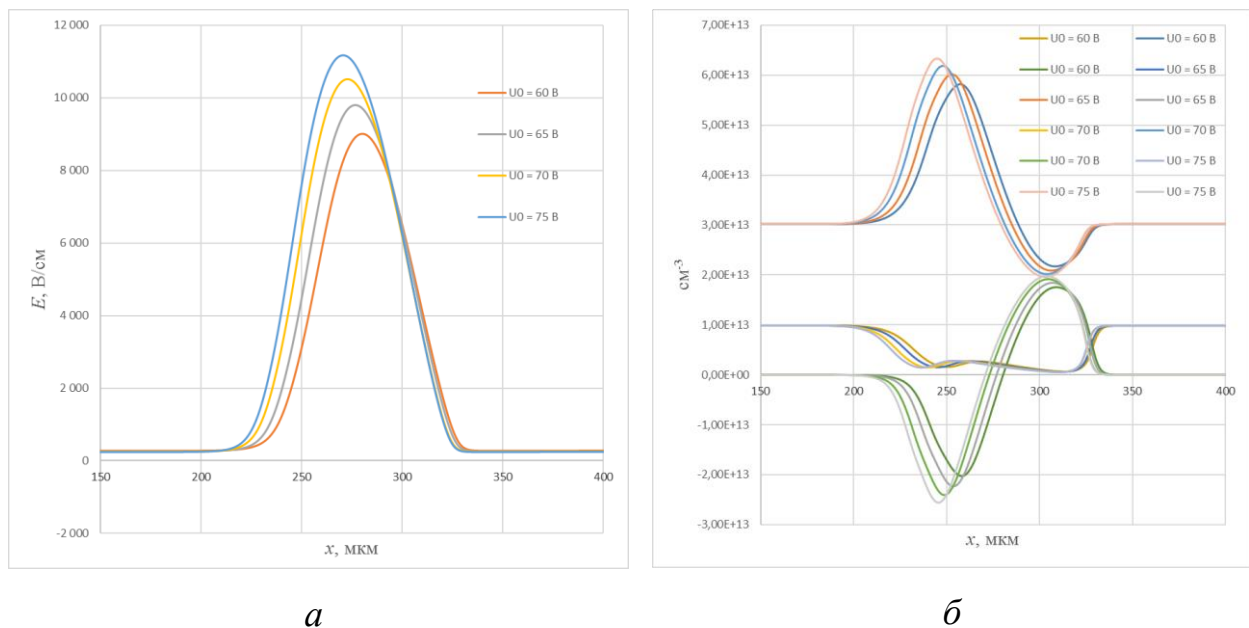
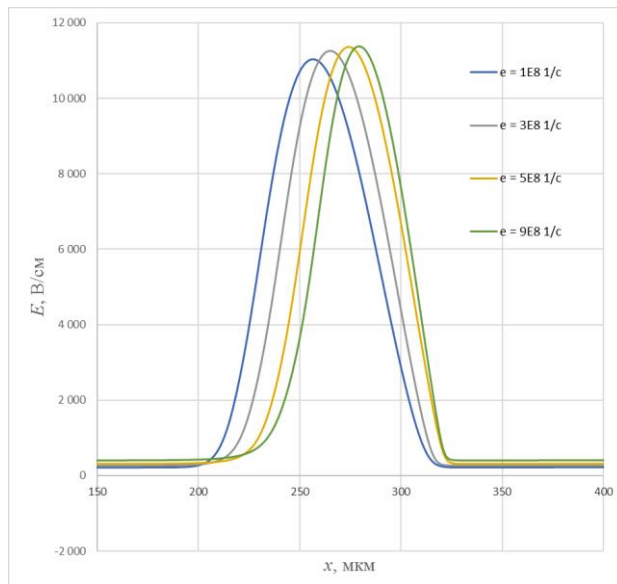
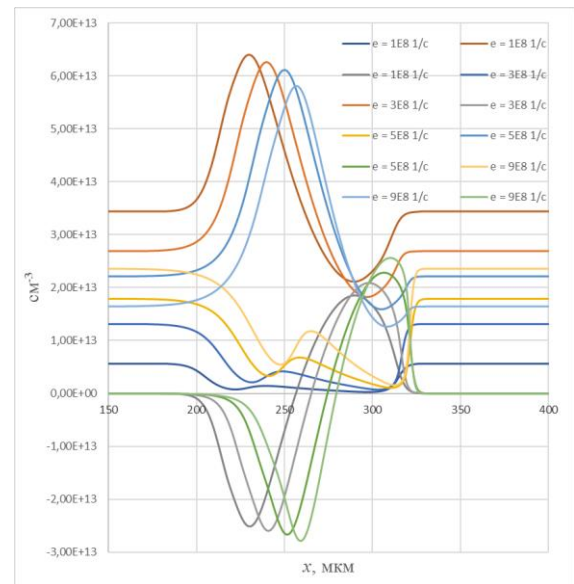


Рисунок 3 – Пространственные распределения в домене при различных напряжениях U_0 : а– напряженности электрического поля $E(x,t)$; б– приведенной объемной плотности пространственного заряда $\rho(x,t)/q$ (нижняя группа кривых), концентрации свободных электронов $n(x,t)$ (средняя группа кривых) и заполненных электронами глубоких примесных уровней $N_T - N_{T-}(x,t)$ (верхняя группа кривых); $e = 2 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$, $c_0 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{c}$

Из рисунка 3 видно, что происходящие при повышении приложенного напряжения изменения в распределениях пространственного заряда и поля в домене при $e = 2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ аналогичны предыдущему случаю. В этом случае понижается концентрация свободных электронов и повышается концентрация заполненных глубоких центров вне области домена вследствие уменьшения скорости тепловой генерации по сравнению с предыдущим случаем.



a

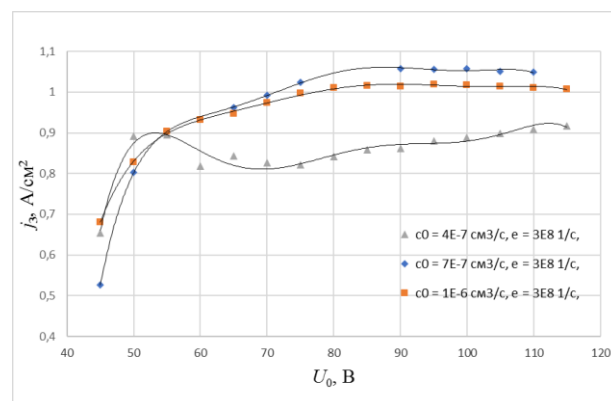
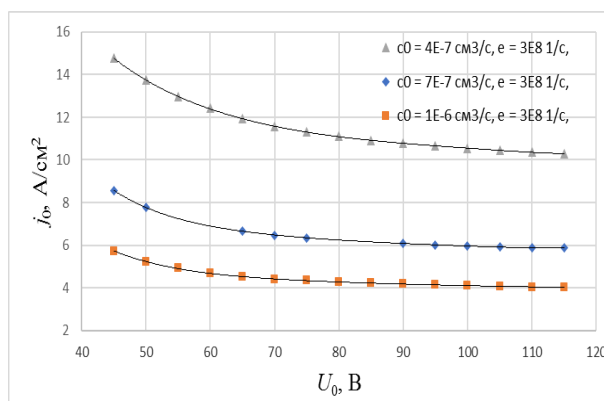
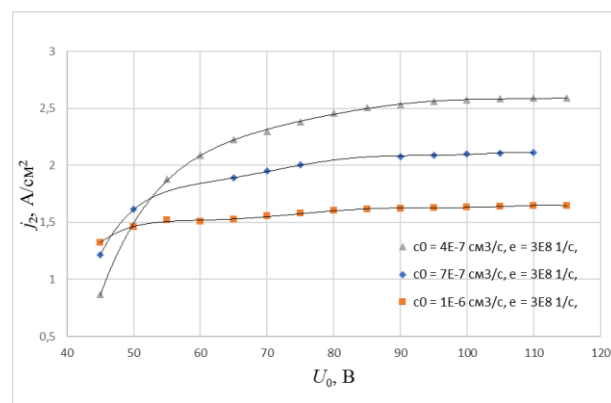
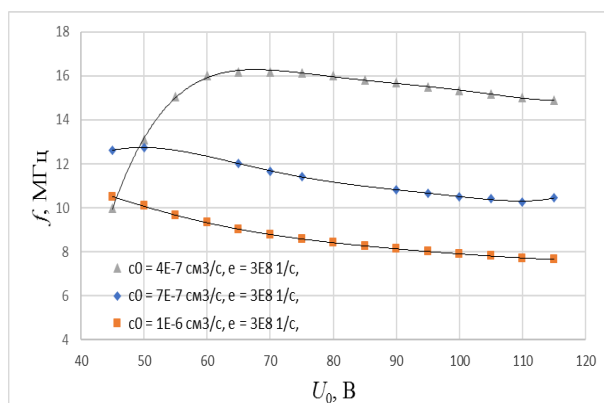


б

Рисунок 4 – Пространственные распределения в структуре при различных значениях e : *a* – напряженности электрического поля $E(x,t)$; *б* – приведенной объемной плотности пространственного заряда $\rho(x,t)/q$ (нижняя группа кривых), концентрации свободных электронов $n(x,t)$ (средняя группа кривых) и заполненных электронами глубоких примесных уровней $N_T - N_T(x,t)$ (верхняя группа кривых); $c_0 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$, $U_0 = 75 \text{ В}$

Анализ динамики напряженности электрического поля (рисунок 4, *a*) и пространственного заряда (рисунок 4, *б*) показал, что при повышении скорости термической генерации электронов с глубокого примесного уровня наблюдается увеличение напряженности электрического поля как в домене, так и вне его, а также увеличение скорости изменения по координате объемной плотности положительного пространственного заряда на правой границе домена,

приводящее к появлению характерного «излома» на этой границе, обусловленное сужением областей с максимальным обеднением электронами и недостаточной концентрацией заполненных глубоких примесных центров. Происходящее при этом расширение области с избыточной концентрацией заполненных глубоких примесных центров и, соответственно, области отрицательного объемного заряда, сопровождающееся вытягиванием распределений этих величин по координате на левой границе домена, обуславливает наличие более выраженного «хвоста» у домена при больших значениях параметра e . Увеличение скорости термической генерации электронов с глубокого уровня приводит к повышению концентрации свободных электронов и одновременному понижению концентрации заполненных электронами примесных центров как внутри домена, так и вне его.



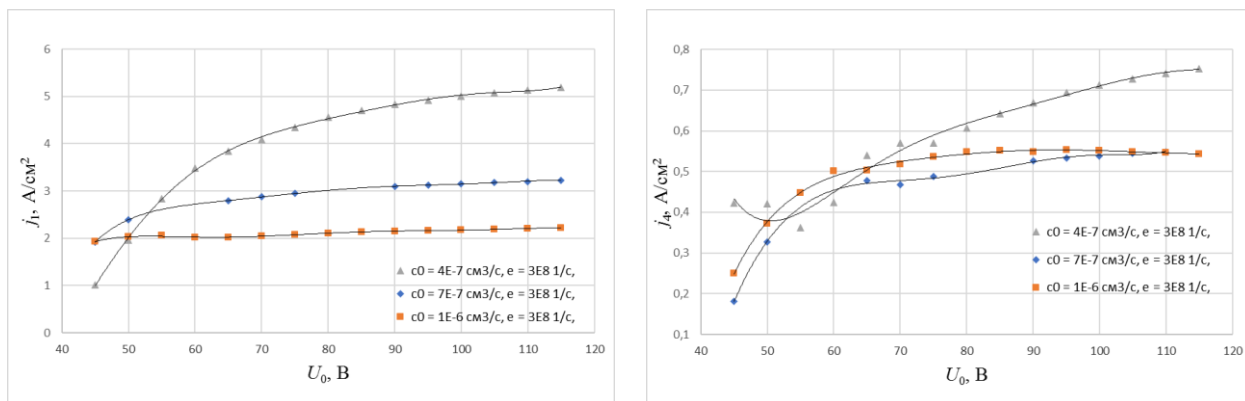
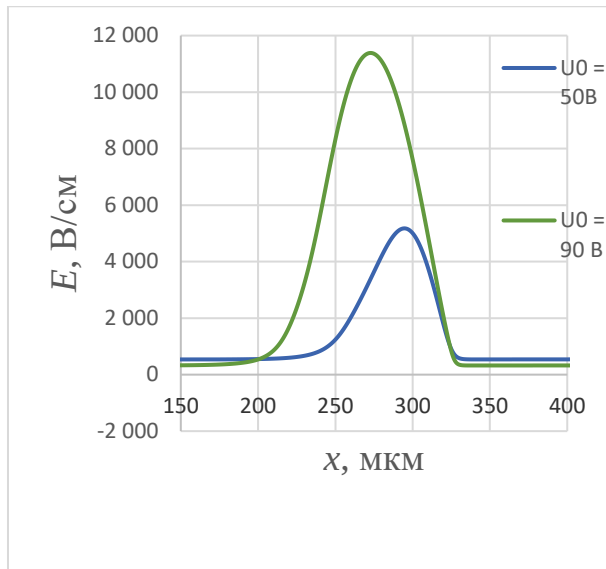
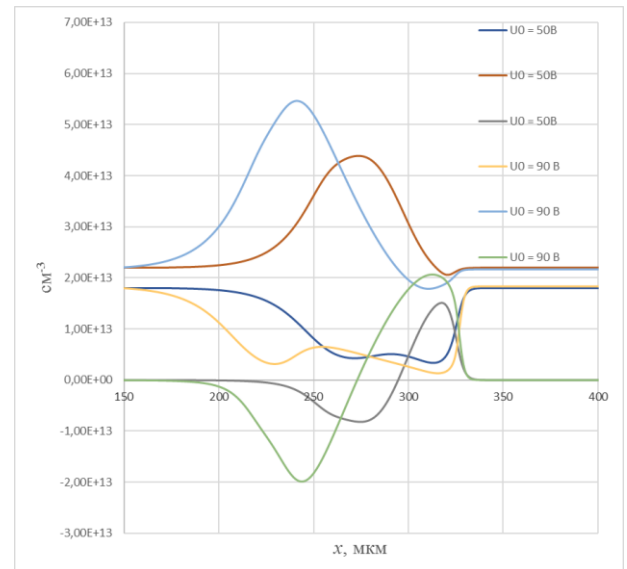


Рисунок 5 – Зависимости частоты основной гармоники f , постоянной составляющей j_0 и амплитуд первых четырех гармоник j_1, j_2, j_3, j_4 плотности полного тока от напряжения U_0 при различных значениях c_0 ($e = 3 \cdot 10^8$ 1/с)

Из рисунка 5 видно, что при $c_0 = 7 \cdot 10^{-7}$ см³/с и $c_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ см³/с соответствующие зависимости подобны зависимостям, полученным при вариации параметра e на рисунке 1, а влияние на них параметра c_0 инверсно предыдущему случаю и адекватно представлениям о взаимосвязи параметров e и c_0 с температурой кристалла. При $c_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ см³/с практически все зависимости, за исключением $j_4(U_0)$, в области напряжений $U_0 > 50 - 55$ В демонстрируют устойчивую тенденцию смещения вниз относительно аналогичных зависимостей, полученных при $c_0 = 7 \cdot 10^{-7}$ см³/с, что по характеру их изменения соответствует уменьшению e и температуры кристалла. А при $c_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ см³/с такой характер относительного изменения (по сравнению со случаем $c_0 = 7 \cdot 10^{-7}$ см³/с) наблюдается только на зависимостях $f(U_0)$, $j_1(U_0)$ и $j_2(U_0)$ при $U_0 > 50 - 55$ В, зависимости $j_4(U_0)$ при $U_0 > 65 - 70$ В и на зависимости $j_0(U_0)$ во всем диапазоне напряжений. Вне указанных диапазонов у перечисленных зависимостей и у зависимости $j_3(U_0)$ при $U_0 > 55$ В относительное изменение становится противоположным по знаку. Кроме того, зависимости $f(U_0)$, $j_3(U_0)$ и $j_4(U_0)$ при этом значении c_0 характеризуются наличием выраженных экстремумов.



a



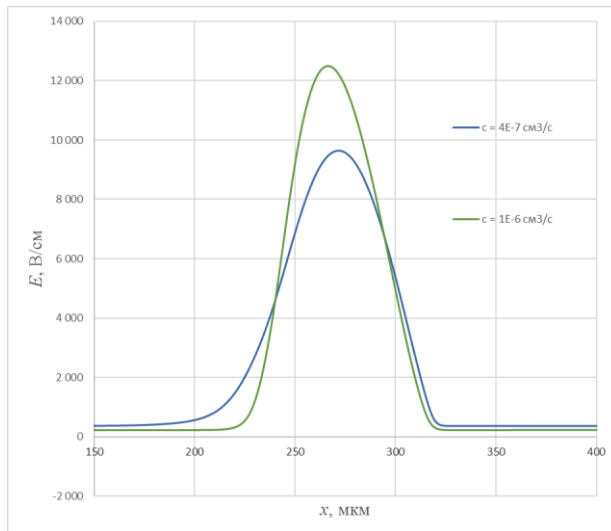
б

Рисунок 6 – Пространственные распределения в домене при различных напряжениях U_0 : *a* – напряженности электрического поля $E(x,t)$; *б* – приведенной объемной плотности пространственного заряда $\rho(x,t)/q$ (нижняя группа кривых), концентрации свободных электронов $n(x,t)$ (средняя группа кривых) и заполненных электронами глубоких примесных уровней $N_T - N_T(x,t)$ (верхняя группа кривых); $e = 3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$, $c_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$

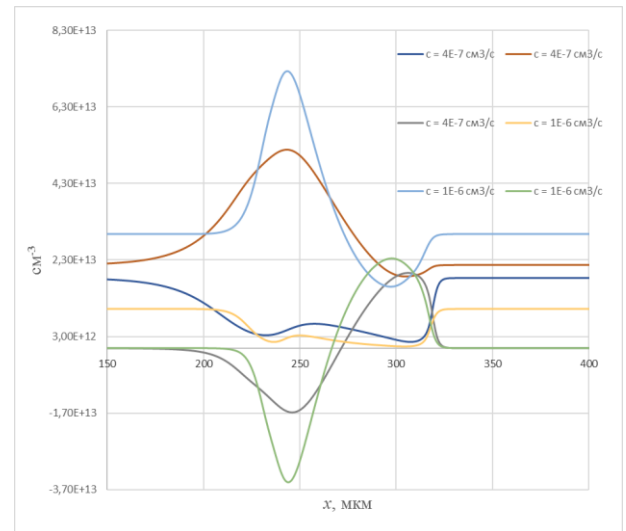
Анализ динамики напряженности электрического поля (рисунок 6, *a*) и пространственного заряда (рисунок 6, *б*) в исследуемой структуре при $\{c_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}, e = 3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}\}$ показал, что при повышении приложенного постоянного напряжения на анализируемых распределениях наблюдаются изменения, аналогичные рассмотренным выше. Поэтому рассуждения, проведенные ранее, справедливы и в данном случае.

Отличительной особенностью этого случая по сравнению с предыдущими является более выраженная асимметрия формы рекомбинационного домена, характеризующаяся наличием у него во всем диапазоне напряжений протяженной левой части и резкой правой части. Всем распределениям на рисунке 6, *б* также свойственно наличие протяженных участков в задней части домена и сильная зависимость скоростей изменения рассматриваемых величин

по координате в этой части домена, а также на правой его границе от величины приложенного напряжения. Возможно, эта особенность и приводит к немонотонному виду зависимостей $j_3(U_0)$ и $j_4(U_0)$. Анализ распределений на рисунке 6, б показывает, что в данном случае область с избыточной концентрацией заполненных глубоких центров занимает практически все пространство домена при всех значениях приложенного напряжения. Прослеживается более выраженное по сравнению с предыдущими случаями увеличение в левой и правой (существеннее) частях, а также уменьшение в центральной части домена глубины обеднения электронами (на распределениях концентрации свободных электронов) при повышении приложенного напряжения. В правой части домена, как и в рассмотренных ранее случаях, происходит увеличение ширины области с наибольшим обеднением электронами. Вследствие относительно небольшой (по сравнению с предыдущими случаями) ширины области с недостаточной концентрацией заполненных примесных центров, формирование положительного объемного заряда в домене в этом случае, в основном, определяется шириной и степенью обеднения области с наименьшей концентрацией свободных электронов в правой части домена.



a



б

Рисунок 7 – Пространственные распределения в структуре при различных значениях c_0 : *a* – напряженности электрического поля $E(x,t)$; *б* – приведенной объемной плотности пространственного заряда $\rho(x,t)/q$ (нижняя группа кривых), концентрации свободных электронов $n(x,t)$ (средняя группа кривых) и заполненных электронами глубоких примесных уровней $N_T - N_T(x,t)$ (верхняя группа кривых); $e = 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^3/\text{c}$, $U_0 = 75 \text{ В}$

Анализ динамики пространственного заряда и напряженности электрического поля в структуре при различных значениях параметра c_0 показал, что при увеличении значения этого параметра происходят значительные изменения формы рекомбинационного домена от формы с протяженной левой частью (характерным «хвостом») и крутой передней (правой) частью к форме с обеими резкими границами и скоростью изменения поля по координате на правой границе меньшей, чем на левой (рисунок 7, *a*). Эти изменения сопровождаются повышением напряженности электрического поля внутри домена и понижением поля за его пределами, а также уменьшением его скорости. Повышение поля вне домена, как уже указывалось выше, наблюдается при увеличении e и коррелирует с данными о повышении поля вне домена при увеличении температуры кристалла. Таким образом, и в этом случае изменение значений параметра c_0 приводит к противоположным по отношению к

наблюдаемым при изменении параметра e изменениям (увеличение c_0 соответствует уменьшению температуры).

Анализ распределений на рисунке 7, б показывает, что при увеличении c_0 наблюдается уменьшение концентрации свободных электронов и увеличение концентрации заполненных глубоких примесных центров как в домене, так и за его пределами, значительное сужение области с избыточной концентрацией заполненных центров и области отрицательного объемного заряда и одновременное расширение области с недостаточной концентрацией заполненных глубоких примесных центров и области положительного объемного заряда при уменьшении общей ширины домена, происходит увеличение объемного заряда в домене. Вследствие этого уменьшается наклон на распределении приведенной объемной плотности пространственного заряда на правой границе, а характер всех распределений на левой границе домена, напротив, изменяется от пологого к более крутому, что в совокупности обуславливает рассмотренные изменения формы рекомбинационного домена.

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 рекомбинационной неустойчивости тока при различных значениях скоростей захвата и генерации электронов глубоким уровнем можно сформулировать следующие выводы:

1) Параметры развивающейся динамической неоднородности существенно зависят от конкретных значений параметров глубоких примесных центров e и c_0 , а также величины приложенного напряжения, изменение которых приводит к значительным изменениям характера распределений свободных и захваченных электронов и соответствующим изменениям объемной плотности пространственного заряда и напряженности электрического поля внутри рекомбинационного домена (формы домена):

- *при повышении приложенного постоянного напряжения* происходит увеличение ширины центральной части рекомбинационного домена, максимального значения напряженности электрического поля в нем (и одновременное уменьшение поля за его пределами), а также уменьшение его скорости и изменение формы от вида с вытянутой задней (левой) частью к более симметричному виду. Увеличение отрицательного объемного заряда обусловлено возрастанием количества заполненных глубоких центров (а следовательно, и захваченных электронов) в области с их повышенной концентрацией, а положительного – убыванием в области с их пониженной концентрацией, а также увеличением ширины этой области и области с наибольшим обеднением электронами в правой части домена, приводящим к соответствующему расширению области с положительным объемным зарядом. Изменение характера распределений концентрации свободных электронов, заполненных электронами глубоких примесных центров и приведенной объемной плотности пространственного заряда при повышении напряжения,

заключается в возрастании скоростей изменения указанных величин по координате в задней части домена – на левой границе области с отрицательным объемным зарядом.

- *при повышении e* наблюдается увеличение напряженности электрического поля как в домене, так и вне его, увеличение его скорости, увеличение скорости изменения по координате объемной плотности положительного пространственного заряда на передней границе домена, приводящее к изменению формы домена на этой границе (появлению характерного «излома»), обусловленное сужением областей с максимальным обеднением электронами и пониженной концентрацией заполненных глубоких примесных центров. Происходящее при этом расширение области с повышенной концентрацией заполненных глубоких примесных центров и области отрицательного объемного заряда, сопровождающееся «вытягиванием» распределений этих величин по координате на задней границе домена, обуславливает наличие более выраженного «хвоста» у домена при больших значениях параметра e . Увеличение e приводит к повышению концентрации свободных электронов и одновременному понижению концентрации заполненных электронами примесных центров как внутри домена, так и вне его.

- *при увеличении c_0* происходят значительные изменения формы рекомбинационного домена от вида с протяженной (более полой) задней частью и крутой передней частью к форме с обеими резкими границами и скоростью изменения поля по координате на правой границе меньшей, чем на левой. Эти изменения сопровождаются повышением напряженности электрического поля внутри домена и понижением поля за его пределами, а также уменьшением его скорости. Таким образом, изменение значений параметра c_0 приводит к противоположным по отношению к наблюдаемым при изменении параметра e изменениям поля вне домена. При увеличении c_0 наблюдается уменьшение концентрации свободных электронов и увеличение концентрации заполненных глубоких примесных центров как в домене, так и за его пределами, значительное сужение области с избыточной концентрацией

заполненных центров и области отрицательного объемного заряда и одновременное расширение области с недостаточной концентрацией заполненных глубоких примесных центров и области положительного объемного заряда при уменьшении общей ширины домена, происходит увеличение объемного заряда в домене. Вследствие этого уменьшается наклон на распределении приведенной объемной плотности пространственного заряда на правой границе, а характер всех распределений на левой границе домена, напротив, изменяется от пологого к более крутому, что в совокупности обуславливает рассмотренные изменения формы рекомбинационного домена.

2) Изменение параметров c_0 и e оказывает взаимно противоположное действие на частоту, постоянную составляющую и амплитуды первой и второй гармонических составляющих плотности полного тока, что качественно согласуется с известными данными о характере влияния температуры на параметры медленных рекомбинационных доменов в полуизолирующем арсениде галлия и представлениями о взаимосвязи температуры и параметров e и c_0 .

3) Амплитуды третьей и четвертой гармоник в спектре колебаний тока в большинстве рассмотренных случаев увеличиваются при повышении приложенного напряжения и значения параметра e и характеризуются немонотонной зависимостью от значений параметра c_0 .

4) Определены пограничные значения параметров e и c_0 , при которых колебания в исследуемых структурах не возникают. Полученный результат также коррелирует с результатами из других работ.