

На правах рукописи



СЕЛЬСКИЙ Антон Олегович

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУР
В МОДЕЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКТИВНОЙ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ,
СОДЕРЖАЩЕЙ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА

01.04.03 – Радиофизика

01.04.04 – Физическая электроника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2014

Работа выполнена на кафедре физики открытых систем и в отделении физики нелинейных систем НИИ ЕН СГУ ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

Научные руководители:

Короновский Алексей Александрович, д.ф.–м.н., профессор, ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”, профессор кафедры физики открытых систем

Храмов Александр Евгеньевич, д.ф.–м.н., профессор, ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.”, в.н.с. НОЦ “Нелинейная динамика сложных систем”

Официальные оппоненты:

Панкратов Андрей Леонидович, д.ф.–м.н., старший научный сотрудник отдела терагерцевой спектроскопии Института физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород

Прохоров Михаил Дмитриевич, д.ф.–м.н., ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН, г. Саратов

Ведущая организация: Институт прикладной физики Российской Академии наук, г. Нижний Новгород

Защита состоится “17” октября 2014 г. в 17 часов 30 минут в 34 ауд. III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете (410012, г. Саратов, ул. Университетская, 42).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <http://www.sgu.ru/dissertation-council/d-212-243-01/dissertaciya-o-selskogo>.

Автореферат разослан “20” августа 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. В настоящей работе изучена динамика электронных структур в пространственно-распределенной нелинейной активной среде, для которой характерна нелинейная зависимость скорости носителей заряда от напряженности электрического поля с одним или несколькими максимумами. Для исследования динамики электронных структур применялись уравнения непрерывности и Пуассона, широко используемые для описания различных явлений в радиофизике, физической электронике, физике плазмы, физике твердого тела, где пространственно-временная динамика электрического поля самосогласована с динамикой заряда¹. Такие системы способны демонстрировать различные динамические режимы, включая образование структур и динамический хаос². Формирование упомянутых выше электронных структур и управление ими является актуальной задачей для радиофизики и физической электроники в связи с многочисленными практическими приложениями, включая задачи СВЧ-электроники. В ряде работ³ было показано, что сложные режимы динамики электронных структур возможно использовать в целом ряде приборов и устройств микроволновой электроники для генерации и управления высокочастотными колебаниями в терагерцевом диапазоне.

В настоящее время терагерцевый диапазон является одним из наименее освоенных⁴, и, в то же самое время, он обладает большим потенциалом возможного применения. Так, в спектроскопии большая часть информации о химических веществах ассоциируется именно с терагерцевым диапазоном, недоступным для измерения традиционными способами. В медицине терагерцевое излучение можно использовать для разработки новых методов томографии, которые будут значительно более безопасными и функциональными по сравнению с традиционными. Не вызывает сомнений, что возможность работы в терагерцевом диапазоне частот может способствовать существенному улучшению информационно-измерительной и телекоммуникационной техники, такой как беспроводные системы подобные WiFi и Bluetooth, поскольку это позволило бы повысить скорость передачи данных и увеличило бы их полосу пропускания. В связи с вышеперечисленным, изучение динамики электронных структур в нелинейных активных средах, в которых возможно генерировать, усиливать и модулировать микроволновое излучение в терагерцевом диапазоне является важной и актуальной для современной науки задачей.

¹T. Klinger, C. Schroder, D. Block, F. Greiner, A. Piel, G. Bonhomme, V. Naulin, Phys. Plasmas, 8 (5) (2001) 1961; S. Kuhn, Contrib. Plasma Phys. 34 (4) (1994) 495.

²A. Madon, T. Klinger, Physica D, 101 (1997) 355.

³см., например, H. Le. Person, C. Minot, L. Boni, J. F. Palmier, F. Mollot, Appl. Phys. Lett., 60 (19) (1992) 2397.

⁴R.E. Miles, P. Harrison, D. Lippens, Terahertz Sources and Systems, Kluwer, Dordrecht, 2001.

Несмотря на большое число вакуумных приборов, рабочая частота которых достигает необходимых значений⁵, большое внимание исследователей уделяется возможности использовать для работы в терагерцевом диапазоне полупроводниковые приборы⁶. Перспективным среди полупроводниковых структур направлением является работа с полупроводниковыми гетероструктурами⁷, одной из которых является полупроводниковая сверхрешетка.

Возвращаясь к основной задаче настоящей работы, следует отметить, что для вакуумных электронно-волновых систем характерна линейная зависимость скорости носителей заряда от величины электрического поля. В случае полупроводниковых структур было показано, что аналогичная характеристика имеет нелинейный вид. Нелинейность в подобных структурах может быть различной, однако, как правило в данных структурах зависимость скорости электронов от приложенного поля имеет один или несколько максимумов (соответственно, на вольт-амперных характеристиках тоже может наблюдаться несколько максимумов⁸). Следом за максимумом следует падающий участок, чье появление вызывает отрицательную дифференциальную проводимость на вольт-амперной характеристике. Для полупроводниковых сверхрешеток, например, возможность нелинейной характеристики с одним максимумом была показана в работах⁹. В присутствии наклонного магнитного поля данная структура демонстрирует характеристику зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля с несколькими максимумами¹⁰. Данный пример показывает, что рассматриваемая в настоящей работе задача, связанная с влиянием нелинейности на формирование и эволюцию пространственно-временных структур в нелинейных активных средах, при общем фундаментальном характере, является актуальной и для практических приложений.

Еще одним вопросом, рассмотренным в настоящей диссертационной работе, является влияние скорости носителей заряда в области высоких значений приложенного электрического поля на динамику пространственно-временных электронных структур. При рассмотрении модельной нелинейной активной распределенной среды, содержащей носители заряда, было показано, что в области больших значений напряженности электрического поля скорость электронов монотонно уменьшается. Также в настоящей диссертаци-

⁵ Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков Т. 2., М.: Физматлит, 2004.

⁶ А.В. Скрипаль, Изв.вузов-Радиоэлектроника, 30 (5) (1987) 53-55; A.L. Pankratov, A.V. Gordeeva, L.S. Kuzmin, Physical Review Letters, 109 (087003) (2012).

⁷ М.Т. Greenaway, A.G. Balanov, E. Schöll, T.M. Fromhold, Phys. Rev. B, 80 (205318) (2009).

⁸ Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Физика полупроводников. Явления переноса в структурах с туннельно-тонкими полупроводниковыми слоями. – Изд-во Саратовского университета, 1996

⁹ Л.В. Келдыш, Физика твердого тела, 4 (1962) 2265; L. Esaki, R. Tsu, IBM Journal of Research and Development, 14 (1) (1970) 61-65.

¹⁰ Т.М. Fromhold, А.А. Krokhin, С.Р. Tench, S. Bujkiewicz, P.B. Wilkinson, F.W. Sheard, L. Eaves, Phys. Rev. Lett., 87 (4) (2001) 046803.

онной работе были рассмотрены модифицированные зависимости скоростей носителей заряда от напряженности электрического поля характеризующиеся монотонным возрастанием скорости носителей заряда в области высоких значений напряженности электрического поля. В рассмотренном ранее примере полупроводниковых гетероструктур с нелинейной характеристикой зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля подобная модификация возможна, например, при учете возможности межминизонного туннелирования¹¹. Следуя данной модификации, в модельной нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда, можно получить нелинейную характеристику зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля с одним или несколькими максимумами и ростом в области высоких значений напряженности электрического поля. Данный тип нелинейности приводит к появлению характерного локального минимума, влияние которого оказывает существенное влияние на динамику пространственно-временных электронных структур.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно утверждать, что в области изучения пространственно-временной динамики электронных структур в распределенных активных средах с нелинейной зависимостью скорости носителей заряда от напряженности электрического поля с несколькими максимумами круг вопросов, требующих дальнейшего изучения, достаточно широк. Детальному изучению описанных выше вопросов и посвящена настоящая диссертационная работа. Соответственно, с учетом сказанного, можно сделать вывод о том, что тема данной диссертационной работы является важной и актуальной для радиофизики, физической электроники, нелинейной динамики и современной теории нелинейных колебаний и волн.

Целью диссертационной работы Основной целью настоящей работы является выявление закономерностей пространственно-временной динамики электронных структур в модельной нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда, характеризующейся нелинейной зависимостью скорости направленного движения носителей заряда от напряженности электрического поля с несколькими максимумами.

Основными вопросами, подробно рассмотренными в диссертационной работе, являются следующие:

- рассмотрение различных типов нелинейности зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля: с одним максимумом, с несколькими максимумами, включая случай уменьшения основного максимума при изменении управляющих параметров;
- изучение пространственно-временной динамики электронных структур для систем с нелинейной характеристикой зависимости скорости носителей

¹¹D.P.A. Hardwick, Quantum and Semiclassical Calculations of Electron Transport Through a Stochastic System. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, 2007.

телей заряда от напряженности электрического поля с несколькими максимумами для различных значений управляющих параметров;

- изучение характеристик тока для различных зависимостей скорости носителей заряда от напряженности электрического поля в модельной нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда;
- исследование влияния характерного локального минимума на пространственно-временную динамику электронных структур для систем с нелинейной характеристикой зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля с несколькими максимумами;

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Изменение соотношения между величинами основных и дополнительных максимумов зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами, сопровождается в модельной нелинейной активной распределенной среде локальным подавлением генерации колебаний, наблюдающимся в ограниченной области значений управляющих параметров, при этом характер динамики пространственно-временных электронных структур в рассматриваемой модельной системе существенно изменяется после повторного возникновения генерации.
2. Переход от колебаний тока, близких к гармоническим, которые наблюдаются непосредственно вблизи порога возникновения генерации, к колебаниям с ярко выраженными всплесками, обусловленными быстрым изменением величины тока, которые являются типичными для рассматриваемой модельной нелинейной активной распределенной среды с нелинейной характеристикой зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами, осуществляется через бифуркацию удвоения периода.
3. В модифицированной модельной системе, описывающей нелинейную активную распределенную среду с нелинейной характеристикой зависимости скорости направленного движения электронов от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами и монотонным увеличением скорости носителей заряда в области высоких значений напряженности электрического поля, в определенном диапазоне значений управляющих параметров можно наблюдать локальное увеличение частоты колебаний тока, сопровождающееся уменьшением их амплитуды.

Научная новизна. Все основные результаты диссертационной работы являются новыми. В частности, в рамках настоящей работы впервые получены следующие результаты:

- В рамках настоящей диссертации впервые изучены зависимости среднего значения, частоты и амплитуды тока, протекающего в модельной нелинейной активной распределенной среде, от приложенного к ней напряжения для различных нелинейных характеристик зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля.
- Впервые обнаружено и исследовано явление бифуркации удвоения периода при генерации колебаний тока в модельной нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда.
- В рамках диссертационной работы также впервые подробно исследована сложная пространственно-временная динамика электронных структур в рассматриваемой модельной системе для различных значений типов зависимости скорости направленного движения электронов от напряженности электрического поля, изучены характеристики генерации тока и вольт-амперные характеристики для модельной системы, характеризующейся несколькими максимумами и характерным локальным минимумом на зависимости скорости электронов от напряженности электрического поля для различных значений управляющих параметров.
- Впервые подробно исследована сложная пространственно-временная динамика электронных структур в модельной системе с зависимостью скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами и локальным минимумом.

Научная и практическая значимость работы. Диссертационная работа направлена на изучение процессов образования и эволюции пространственно-временных структур в модельной нелинейной активной распределенной среде, характеризующейся нелинейной зависимостью с несколькими максимумами скорости направленного движения носителей зарядов от напряженности электрического поля. Данные исследования являются важными, обладают необходимой общностью, и могут быть полезны с практической точки зрения, так как подобная зависимость скорости носителей заряда от напряженности электрического поля может быть характерна для приборов, способных генерировать колебания сверхвысокочастотного (а в перспективе и субтерагерцевого) диапазона. В ходе выполнения работы были обнаружены эффекты, которые могут оказать непосредственное влияние на применение приборов с рассматриваемым типом нелинейности.

Рассмотрев характеристики генерации тока в системе и вольт-амперные характеристики, а также исследовав пространственно-временную динамику

электронных структур, было показано, что при определенных условиях имеет место переход ведущей роли во влиянии на пространственно-временную динамику электронных структур (областей высокой концентрации носителей заряда, которые с течением времени перемещаются вдоль активной нелинейной среды) от основного максимума к дополнительным на профиле зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля. При различных значениях управляющих параметров подобное поведение может приводить к различным эффектам, связанными с нелинейной динамикой, срыву генерации колебаний и поведению, характерному в нелинейных системах после бифуркации удвоения периода. Подобные эффекты могут играть важную роль при практическом использовании приборов с характеристикой зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, подобной рассматриваемой в модельной системе, в качестве генераторов высокочастотных сигналов.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс по подготовке бакалавров и магистров по направлению “Радиофизика” в ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных математических моделей, обоснованным выбором параметров численных методов. Достоверность полученных результатов подтверждает сопоставление известных аналитических и полученных численно результатов, отсутствие противоречий результатов опубликованных работ других авторов.

Личный вклад. Представленные в диссертации результаты получены лично соискателем, им проведены все аналитические и численные расчеты. Постановка задач, разработка методов их решения, а также объяснение результатов были осуществлены автором совместно с научными руководителями.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на все-российских и международных научных конференциях и семинарах и опубликованы в сборниках тезисов докладов: XV научной школы “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики — Нелинейные волны-2010” (Нижний Новгород, 6-12 марта 2010 года), Conference for young scientists “Presenting Academic Achievements to the World” (Саратов, 29-30 марта 2010 года), IX Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур” ХАОС-2010 (Саратов, 4-9 октября 2010 года), Конкурса научных работ “Студенческая наука 2011” (Саратов, 1-17 июня 2011 года, диплом за 1 место в номинации “Технические и точные науки”), XV Международной юбилейной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радио-

физике (Саратов, 6-11 февраля 2012 года), 22-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2012)(Севастополь, Украина, 10-14 сентября 2012 года), 23-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2013) (Севастополь, Украина, 9-13 сентября 2013 года), VIII Всероссийской Научной Конференции Молодых Ученых “Наноэлектроника, Нанопотоника И Нелинейная Физика — 2013” (Саратов, 3-5 сентября 2013 года), всего 8 публикаций в трудах конференций. Результаты, изложенные в диссертационной работе, обсуждались на расширенных научных семинарах кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ по гранту Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013” в следующих проектах “Хаос, образование и взаимодействие паттернов в связанных структурах, цепочках и сетях, содержащих автоколебательные и автоволновые системы (модели и методы анализа)” (государственный контракт № П1136 от 27.08.2009. Руководитель — чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., Трубецков Д.И.), “Нелинейная динамика электронного транспорта в периодических полупроводниковых наноструктурах в присутствии электрического и наклонного магнитного полей и новые способы генерации в терагерцевом диапазоне” (2009-1.5-508-008. Руководитель — к.ф.-м.н., Баланов А.Г.), “Хаотическая синхронизация, механизмы ее установления и новые методы анализа синхронной динамики в связанных хаотических системах” (государственный контракт № П586 от 18.05.2010. Руководитель — д.ф.-м.н., Короновский А.А.), “Нелинейная динамика электронных доменов в полупроводниковых сверхрешетках в присутствии наклонного магнитного поля” (соглашение № 14.132.21.1707. Руководитель — Сельский А.О.); Программы поддержки ведущих научных школ России на 2012-2013 “Сети, цепочки и их элементы в виде распределенных систем в присутствии регулярных воздействий и шумов (автоколебания, синхронизация, образование и взаимодействие паттернов)” (НШ-3407.2010.2 Руководитель — чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., Трубецков Д.И.), “Основы теории нелинейных и нестационарных фундаментальных явлений в новых вакуумных и твердотельных устройствах терагерцевого диапазона и их экспериментальное моделирование на более низких частотах” (НШ-1430.2012.2. Руководитель — чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., Трубецков Д.И.); Программы поддержки молодых российских кандидатов наук (МК-672.2012.2. Руководитель — к.ф.-м.н. Москаленко О.И.) и докторов наук (МД-345.2013.2. Руководитель — д.ф.-м.н. Храмов А.Е.); Фонда некоммерческих программ “Династия” и Московского Международного Центра Фундаментальной Физики (лауреат конкурса стипендиальной программы в

2011 года, конкурса поддержки аспирантов и молодых ученых без степени в 2013 году). В 2011 году Сельский А.О. стал лауреатом премии по поддержке талантливой молодежи от Министерства образования и науки РФ в рамках приоритетного национального проекта “Образование”.

Публикации. Результаты работы опубликованы в центральных реферируемых научных журналах (6 статей), рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в трудах конференций (8 тезисов докладов). По материалам диссертации получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 116 страницы текста, включая 40 иллюстраций. Список литературы содержит 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения и результаты, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов.

Первая глава посвящена изучению вопроса о том, каким образом, с теоретической точки зрения, в модельной нелинейной активной пространственно-распределенной среде, содержащей носители заряда, могут возникать нелинейные зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующиеся несколькими максимумами. В разделе 1.1 рассматривается динамика отдельного электрона в периодическом потенциале в присутствии внешних электрического и наклонного магнитного полей, и находятся зависимости скорости направленного движения носителей заряда от величины напряженности электрического поля, подробно описана модельная система и получены безразмерные уравнения движения для отдельного электрона

$$\begin{aligned}
 \frac{dX}{d\tau} &= V_0 \sin(-P_z \operatorname{tg}\theta + f\tau + \phi), \\
 \frac{dZ}{d\tau} &= SP_z, \\
 \frac{dP_z}{d\tau} &= g, \\
 \frac{dg}{d\tau} &= -\Omega^2 \cos^2 \theta P_z + A\Omega^2 \sin 2\theta \sin(-P_z \operatorname{tg}\theta + f\tau + \phi),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

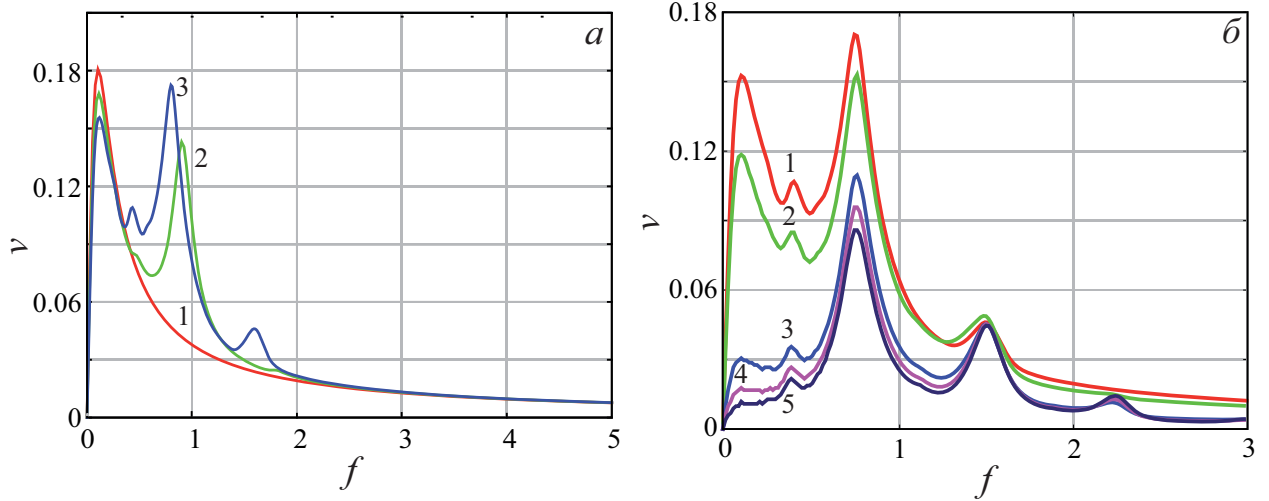


Рис. 1: *а* – Зависимость скорости v от напряженности продольного электрического поля f ($\Omega = 8.9, \Theta = 0$). Кривая 1 соответствует $\theta = 0^\circ$, кривая 2 – $\theta = 30^\circ$, кривая 3 – $\theta = 40^\circ$. *б* – Зависимость скорости v от напряженности продольного электрического поля f ($\Omega = 8.9, \theta = 40^\circ$). Кривая 1 соответствует $\Theta = 0.04$, кривая 2 – $\Theta = 0.45$, кривая 3 – $\Theta = 1.8$, кривая 4 – $\Theta = 2.7$, кривая 5 – $\Theta = 3.6$

где X, Z – безразмерные координаты электрона; P_z – z -компонента импульса электрона; τ – безразмерное время; $V_0 = 0.366$; $S = 7.53$; $A = 0.29$ – безразмерные параметры системы; $\phi = P_z(0) \tan \theta + P_x(0)$ – определяет начальные условия; θ – угол наклона магнитного поля; f – безразмерная напряженность электрического поля; Ω – безразмерный параметр, определяющий вид нелинейности зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля ($\Omega = 0$ соответствует характеристике с одним максимумом, $\Omega = 8.9$ – с несколькими максимумами). С помощью данной системы безразмерных уравнений в разделе 1.2 с помощью численного моделирования рассматривается поведение отдельного электрона. Построены траектории электронов в пространстве безразмерных переменных для различных значений управляющих параметров.

В разделе 1.3, на основе системы безразмерных уравнений движения, рассмотренных в разделе 1.1, были получены зависимости скорости направленного движения носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующиеся несколькими максимумами. Также в этом разделе рассмотрен вопрос о возможности изменения соотношения между максимумами на профиле зависимости скорости электронов от напряженности электрического поля с помощью изменения значений управляющих параметров, при этом показано, что возможен переход ведущей роли от основного максимума на характеристике зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля к дополнительным (рисунок 1).

Во **второй главе** диссертационной работы рассматривается пространственно-временная динамика электронных структур в модельной системе с

зависимостью скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами, для различных значений управляющих параметров. Пространственно-временные структуры представляют собой области высокой концентрации носителей заряда, перемещающихся вдоль системы. При выходе из пространства взаимодействия системы пространственно-временная структура вызывает всплеск тока и, одновременно, появление на входе в систему новой структуры. В рамках второй главы диссертационной работы было проведено детальное исследование пространственно-временной динамики электронных структур, включающее изучение вольт-амперных характеристик, частоты и амплитуды колебаний тока, протекающего через исследуемую модельную систему, а также построение пространственно-временных диаграмм, характеризующих динамику концентрации носителей заряда.

В разделе 2.1 рассматривается модель, использованная для расчета динамики концентрации носителей заряда в системе и тока, протекающего через нее. В качестве такой модели используются согласованные уравнение Пуассона и уравнение непрерывности в безразмерном виде:

$$\frac{df}{dx} = \nu(n - 1), \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\beta \frac{dJ}{dx}, \quad (3)$$

где n – безразмерная концентрация электронов; J – безразмерная плотность тока; x, t – безразмерная координата и время; $\beta = 0.031$; $\nu = 15.769$ – безразмерные параметры.

Следующий раздел 2.2 посвящен исследованию динамики электронных структур в рассматриваемой модельной нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда для различных зависимостей скорости носителей заряда от напряженности электрического поля. В первой части раздела изучаются вольт-амперные характеристики, а также зависимость амплитуды и частоты колебаний тока от напряжения, приложенного к системе. Для случая с несколькими максимумами на характеристике зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля частота, амплитуда, среднее значение тока и значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний, оказываются выше, чем в случае единственного максимума. Во второй части раздела 2.2 подробно рассматривается пространственно-временная динамика электронных структур в рассматриваемой модельной системе. Для объяснения особенностей нелинейной динамики электронных структур были подробно проанализированы пространственно-временные диаграммы для концентрации электронов, наглядно показывающие характер и скорость движения электронных паттернов в активной среде,

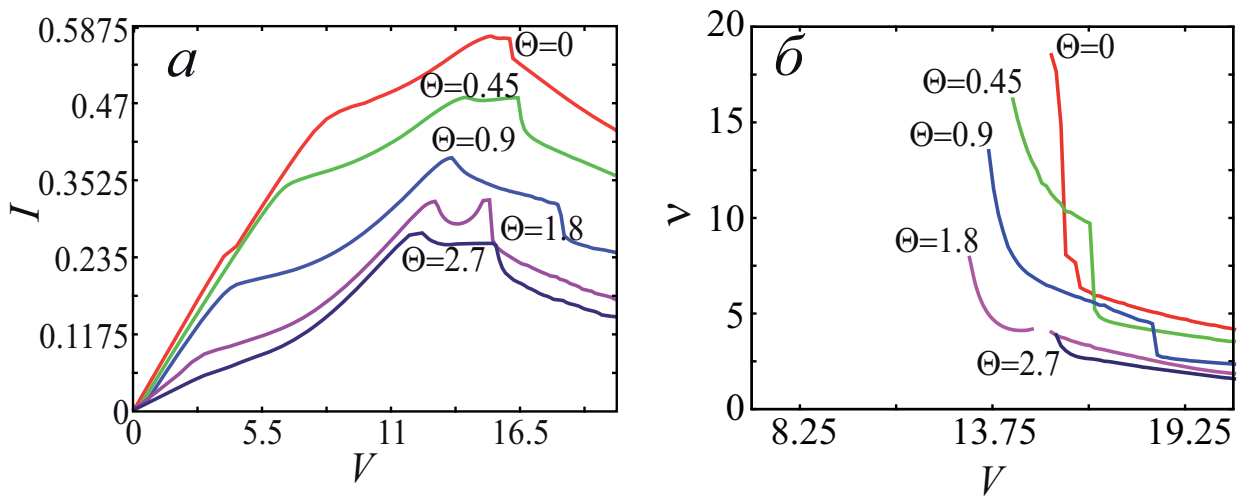


Рис. 2: *a* – Безразмерные вольт-амперные характеристики для нелинейной зависимости скорости носителей зарядов от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами. В случае режима генерации колебаний для построения характеристики были взяты усредненные по времени значения тока. *б* – Зависимость безразмерной частоты колебаний тока, протекающего через систему, от напряжения, приложенного к ней, для нелинейной зависимости скорости носителей зарядов от напряженности электрического поля с несколькими максимумами

а также эволюция распределения напряженности электрического поля вдоль продольной оси системы.

В разделе 2.3 изучено влияние соотношения между максимумами профиля зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля на динамику пространственно-временных электронных структур в рассматриваемой нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда. Раздел 2.3 делится на две основные части: первая часть посвящена изучению динамики тока, протекающего через систему, и характеристик поведения самой системы; вторая часть посвящена исследованию пространственно-временной динамики электронных структур. Особенно интересен эффект перестройки колебаний тока при некоторых значениях управляющих параметров в случае нескольких максимумов на профиле зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, сопровождающийся локальным срывом генерации. (рисунок 3). Данный эффект связан с переходом ведущей роли от основного максимума к дополнительным на профиле зависимости скорости электронов от напряженности электрического поля. Показано также, что переход от колебаний, близких к гармоническим, которые наблюдаются непосредственно вблизи порога возникновения генерации, к колебаниям с ярко выраженным максимумом, которые являются типичными для рассматриваемой модельной системы, осуществляется через бифуркацию удвоения периода.

В **третьей** главе диссертационной работы рассматривается динамика пространственно-временных электронных структур для модифицированной

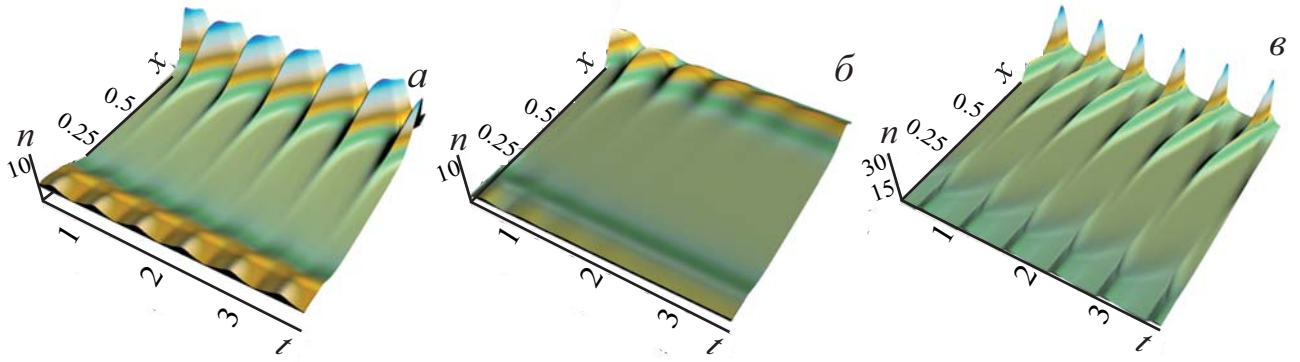


Рис. 3: Пространственно-временная диаграмма, характеризующая эволюцию пространственно-временных электронных структур в зависимости от времени и координаты для $\Theta = 1.8$ и напряжения (а) $V = 14.78$; (б) $V = 15.05$; (в) $V = 15.32$

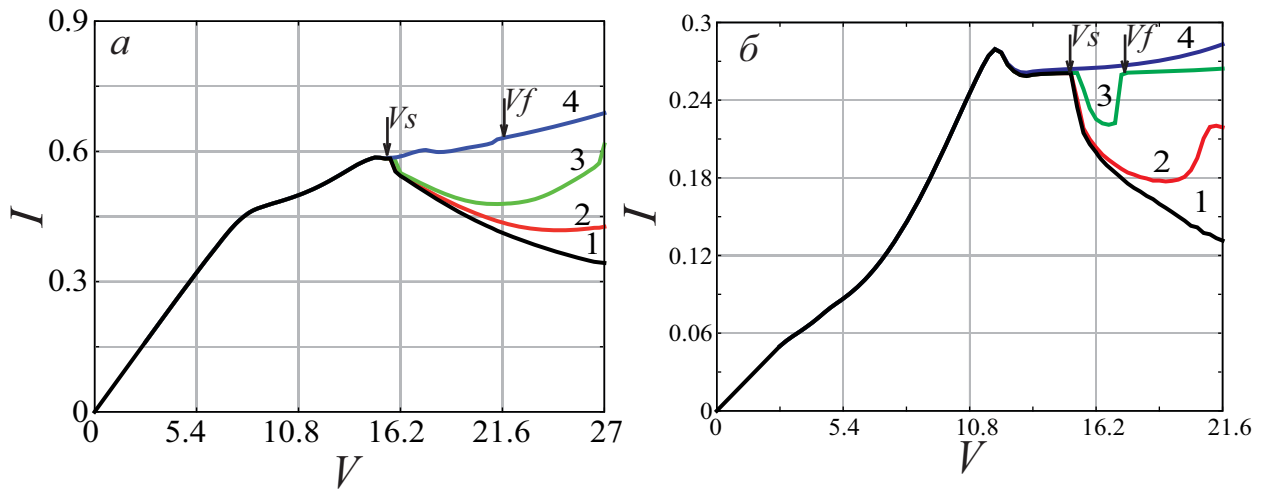


Рис. 4: Вольт-амперные характеристики для различных параметрах ϵ , при (а) $\Theta = 0$, (б) $\Theta = 2.7$, $\Omega = 8.9$, $\theta = 40^\circ$: кривая 1 соответствует немодифицированной скорости носителей заряда; кривая 2 – $\epsilon = 7.85$; кривая 3 – $\epsilon = 6.96$; кривая 4 – $\epsilon = 5.81$. На рисунках стрелками помечены значения напряжения, соответствующие возникновению (V_s) и прекращению (V_f) генерации колебаний тока

модельной системы с несколькими максимумами и локальным минимумом на характеристике зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля для различных значений управляющих параметров. В двух предыдущих главах диссертационной работы рассматривались системы, в которых при больших значениях напряженности электрического поля скорость электронов уменьшается. В данной главе рассмотрена модификация системы, при которой в области больших значений напряженности электрического поля скорость электронов монотонно увеличивается, что приводит к появлению характерного локального минимума после последнего максимума.

В разделе 3.1 рассматривается способ модификации модельной системы, при которой скорость направленного движения электронов при больших значениях напряженности электрического поля монотонно возрастает. Исполь-

зованная модификация имеет вид

$$v_{mod}(f) = (1 - T(f))v(f) + T(f)v_f(f), \quad (4)$$

где $v(f)$ – немодифицированная зависимость скорости электронов от напряженности электрического поля f ; $T(f)$ – имеет смысл вероятности перехода электрона к линейно-зависимой от напряженности электрического поля скорости $v_f(f)$. Следуя предыдущей работе¹², $T(f)$ и $v_f(f)$ определена как

$$T(f) = \exp\left(-\gamma \frac{\epsilon^2}{f \cos \theta}\right), \quad (5)$$

$$v_f(f) = \alpha f \cos \theta^2, \quad (6)$$

здесь $\gamma = 2.0976$ и $\alpha = 7.34819$ безразмерные параметры; ϵ – безразмерная переменная, определяющая, наряду с напряженностью электрического поля, f , вероятности перехода электрона к линейно-зависимой от напряженности электрического поля скорости $v_f(f)$.

Используя полученные зависимости скорости направленного движения носителей заряда от напряженности электрического поля, были получены вольт–амперные характеристики, приведенные в разделе 3.2 диссертационной работы, а также зависимости амплитуды и частоты колебаний тока от напряжения, приложенного к системе с зависимостью скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризуемой несколькими максимумами и характерным локальным минимумом (рисунок 4).

Далее, в разделе 3.3 были исследованы пространственно-временная динамика электронных структур и эволюция распределения напряженности электрического поля вдоль рассматриваемой системы для случая зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами и характерным локальным минимумом. При изучении распределения напряженности электрического поля вдоль системы учитывалось появление новой характерной точки: помимо максимумов рассматривалось также значение напряженности электрического поля, соответствующее минимуму скорости (данная точка лежит между последним максимумом и началом участка роста скорости электронов).

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

1. Показано, что в рассматриваемой модельной нелинейной активной распределенной среде, содержащей носители заряда, в случае зависимости

¹²D.P.A. Hardwick, Quantum and Semiclassical Calculations of Electron Transport Through a Stochastic System. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, 2007.

скорости носителей заряда от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами, частота и амплитуда колебаний тока оказываются больше, чем в случае зависимости с единственным основным максимумом.

2. Установлено, что в изучаемой модельной системе переход от режима колебаний, близких к гармоническим, к колебаниям с ярко выраженными всплесками, обусловленными быстрым изменением величины тока, осуществляется через бифуркацию удвоения периода.
3. Показано, что в рассматриваемой модельной пространственно-распределенной системе изменение соотношения между величинами основных и дополнительных максимумов зависимости скорости носителей заряда от напряженности электрического поля сопровождается в ограниченной области значений управляющих параметров локальным срывом генерации колебаний и существенным изменением характера динамики пространственно-временных электронных структур.
4. Установлено, что в модельной системе с модифицированной нелинейной зависимостью скорости направленного движения электронов от напряженности электрического поля, характеризующейся несколькими максимумами и характерным минимумом, возможно локальное увеличение частоты колебаний тока в ограниченном диапазоне значений напряжения, приложенного к системе, при одновременном снижении их амплитуды.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Баланов А.Г., Журавлев М.О., Короновский А.А., Сельский А.О., Ханенко М.В., Храмов А.Е., Шурыгина С.А. К вопросу о моделировании распределения электронов по импульсам в полупроводниковой сверхрешетке // Вестник ТГУ. 2010. Т. 15. №2. С. 519-523.
- [2] Баланов А.Г., Короновский А.А., Сельский А.О., Храмов А.Е. Влияние температуры на дрейфовую скорость электронов в полупроводниковой сверхрешетке в продольном электрическом и наклонном магнитном полях // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18. № 3. С. 128-139.
- [3] Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Moskalenko O.I., Alekseev K.N., Greenaway M.T., Wang F., Fromhold T.M., Shorokhov A.V., Khvastunov N.N., Balanov A.G. Effect of temperature on resonant electron transport through stochastic conduction channels in superlattices // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. 235311. P. 1-12.

- [4] Баланов А.Г., Гринавей М.Т., Короновский А.А., Москаленко О.И., Сельский А.О., Фромхолд Т.М., Храмов А.Е. Влияние температуры на нелинейную динамику заряда в полупроводниковой сверхрешетке в присутствии магнитного поля // *ЖЭТФ*. 2012. Т. 141. № 5. С. 960-965.
- [5] Баланов А.Г., Короновский А.А., Максименко В.А., Москаленко О.И., Сельский А.О., Храмов А.Е. Безразмерные нелинейные уравнения для описания динамики полупроводниковой сверхрешетки в полуклассическом приближении // *Вестник ТГУ*. 2012. Т. 17. № 4. С. 1118-1120.
- [6] Сельский А.О. Изучение поведения электронов вблизи блохциклотронных резонансов // *Вестник ННГУ*. 2013. Т. 1. № 3. С. 186-189.
- [7] Сельский А.О. Моделирование движения электрона в сверхрешетке под действием электрического и наклонного магнитного полей // *Материалы XV научной школы «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики – Нелинейные волны – 2010»*. Нижний Новгород, 2010. С. 115–116.
- [8] Selskii A.O. Simulation of the electron motion in a semiconductor superlattice under the influence of the external electric and tilted magnetic fields // *Papers from the conference for young scientists «Presenting Academic Achievements to the World»*. Саратов. 2010. С. 118-120.
- [9] Баланов А.Г., Короновский А.А., Сельский А.О., Храмов А.Е. Исследование влияния температуры на ток, протекающий через полупроводниковую сверхрешетку // *Материалы IX Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур» ХАОС-2010*. Саратов. 2010. С. 133-134.
- [10] Сельский А.О. Нелинейная динамика электронных доменов в полупроводниковой сверхрешетке // *Работа для конкурса научных работ “Студенческая наука 2011”*. Саратов. 2011. С. 11–14.
- [11] Короновский А.А., Храмов А.Е., Москаленко О.И., Баланов А.Г., Сельский А.О. Нелинейная динамика электронных доменов в полупроводниковой сверхрешетке // *Материалы XV Международной юбилейной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике*. Саратов. 2012. С. 27-28.
- [12] Короновский А.А., Храмов А.Е., Москаленко О.И., Баланов А.Г., Сельский А.О. Влияние температуры на дрейфовую скорость электронов в полупроводниковой сверхрешетке под действием наклонного магнитного поля // *Материалы 22-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012)*. Севастополь, Крым, Украина. 2012. С. 183-184.

- [13] Короновский А.А., Храмов А.Е., Москаленко О.И., Баланов А.Г., Сельский А.О. Влияние межминизонного туннелирования на генерацию тока в полупроводниковой сверхрешетке // Материалы 23-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"(КрыМиКо'2013). Севастополь, Крым, Украина. 2013. С. 135-136.
- [14] Короновский А.А., Храмов А.Е., Москаленко О.И., Баланов А.Г., Сельский А.О. Электронный транспорт в полупроводниковых сверхрешетках с различным периодом и шириной энергетической минизоны // Материалы VIII Всероссийской Научной Конференции Молодых Ученых "Наноэлектроника, Нанофотоника И Нелинейная Физика - 2013". Саратов. 2013. С. 195-197.
- [15] Короновский А.А., Сельский А.О., Храмов А.Е., Баланов А.Г. *Программа расчета дрейфовой скорости электрона в сверхрешетке, под действием электрического и наклонного магнитного полей*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610355, 2010.
- [16] Короновский А.А., Сельский А.О., Баланов А.Г. *Программа для моделирования распределения электронов по импульсам в сверхрешетке*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613661, 2010.
- [17] Москаленко О.И., Баланов А.Г., Короновский А.А., Храмов А.Е., Сельский А.О. *Программа для ЭВМ для расчета дрейфовой скорости электрона в полупроводниковой сверхрешетке с учетом влияния температуры и конечной ширины запрещенной зоны*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610107, 2014.

СЕЛЬСКИЙ Антон Олегович

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУР В
МОДЕЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКТИВНОЙ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ НОСИТЕЛИ
ЗАРЯДА

Автореферат

Подписано к печати 05.07.2013. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура “Times”
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экз. Заказ № 145-Т.

Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография СГУ.
410012, Саратов, Большая Казачья, 112а, корпус 8.