

На правах рукописи



МАКАРОВ Владимир Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ПРОЦЕССОВ И УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В СИЛЬНОСВЯЗАННЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ
С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация, управление, мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.
Храмов Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Аверин Игорь Александрович** - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», заведующий кафедрой «Нано- и микроэлектроника»

Смоляр Владимир Алексеевич - доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры «Физика»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Защита состоится «24» октября 2016 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.08 при ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» и на сайте www.sstu.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Терентьев Александр Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сильносвязанные полупроводниковые периодические наноструктуры (сверхрешетки) являются уникальным объектом для исследования фундаментальных явлений твердого тела (последовательное и резонансное туннелирование, образование энергетических минизон и др.), представляют практический интерес для процессов генерации и усиления сигналов в субтерагерцовом и терагерцовом (ТГц) диапазонах.

Исследованию сверхрешеток посвящено большое количество публикаций, в том числе, работы L. Esaki, М.И. Овсянникова, R. Tsu, А.Я. Шик, Д.А. Усанова, A. Wacker, D. Hardwick, T.M. Fromhold, Н.Т. Grahn, F.V. Kusmartsev, E. Sholl, M.T. Greenaway, К.Н. Алексеева, А.Г. Баланова, А.П. Силина, А.А. Короновского, А.В. Шорохова, А.Е. Храмова и др.

При этом большинство исследований в этом направлении посвящено изучению блоховского осциллятора, предполагающего отсутствие движущихся доменов, тогда как процессы нестационарного доменного транспорта заряда в периодических наноструктурах остаются слабоизученными. Также практически неизученными остаются нестационарные процессы в системе «полупроводниковая сверхрешетка, связанная с внешней электродинамической структурой», которая может быть использована и для вывода мощности колебаний, и для улучшения характеристик генерации или усиления в полупроводниковой сверхрешетке, и для возбуждения хаотических колебаний в системе. В частности, формирование такого резонатора может быть также связано с паразитными реактивностями, обусловленными контактами и цепями питания.

Следует также отметить, что детальные экспериментальные исследования сложной пространственно-временной динамики заряда в полупроводниковых сверхрешетках ограничены современными возможностями прямых измерений в ТГц-диапазоне, что определяет необходимость создания математических моделей процессов транспорта заряда, имеющих место в полупроводниковых сверхрешетках, а также разработки методов интерпретации результатов натурального эксперимента на их основе.

Вышесказанное определило актуальность настоящей работы и следующие из нее цели и задачи.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса математических моделей и создание программного пакета для моделирования и анализа сильносвязанных полупроводниковых гетероструктур (сверхрешеток) в режиме нестационарного транспорта заряда, помещенных во внешние резонансные системы, а также исследование нелинейной динамики, хаоса, синхронизации и возможности усиления сигналов в подобных системах.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

- Разработка математических моделей нестационарного транспорта заряда в полупроводниковых сверхрешетках, связанных с внешними резонансными системами, и выбор наиболее эффективных алгоритмов решения уравнений для создания численной модели.

- Создание программного пакета для моделирования динамики и исследования характеристик генерации полупроводниковых сверхрешеток, взаимодействующих с внешними добротными резонансными системами.

- Разработка математических методов анализа сложной динамики электронного транспорта в полупроводниковых сверхрешетках, связанных с внешними резонансными системами, в частности, методов расчета показателей Ляпунова для моделей полупроводниковых сверхрешеток во внешнем резонаторе.

- Изучение нелинейной динамики и характеристик автономных и неавтономных колебаний (импеданс, абсорбция сигналов, амплитудно-частотные характеристики колебаний) полупроводниковых сверхрешеток, связанных с внешними резонансными системами, с помощью разработанного программного комплекса.

- Сопоставление и интерпретация натурального эксперимента с полупроводниковыми сверхрешетками на основе разработанной математической модели.

Предметом исследования являются нелинейно-динамические режимы, реализующиеся в автономных и неавтономных полупроводниковых гетероструктурах (сверхрешетках), связанных с внешними добротными резонансными системами.

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется их непротиворечивостью и соответствием опубликованным ранее данным, а также результатам, опубликованным другими авторами. Математические модели и методы, разработанные в ходе работы, базируются на апробированных математических и численных алгоритмах. Ряд численных результатов, полученных в настоящей работе, хорошо согласуются с данными, полученными экспериментально.

Научная новизна работы (соответствует пунктам 1, 4-7 паспорта специальности 05.13.18):

- Разработана математическая модель взаимодействия полупроводниковой гетероструктуры (сверхрешетки) с внешней резонансной системой, характеризующейся собственной резонансной частотой и добротностью.

- На основе разработанной математической модели создан программный комплекс для численного исследования нелинейно-динамических режимов, а также характеристик токовых колебаний, возникающих в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешний резонатор.

- Проведено комплексное исследование динамических режимов, реализующихся в полупроводниковой сверхрешетке, взаимодействующей с внешней резонансной системой. Впервые показано, что присутствие линейного резонатора может привести к возникновению хаотических и квазипериодических режимов колебаний в гетероструктурах, которые в отсутствие резонатора демонстрируют только периодические колебания тока.

- Предложен новый метод расчета спектра показателей Ляпунова для пространственно-распределенной активной среды, взаимодействующей с резонансным контуром, отличающийся возможностью диагностики и классификации возникающих динамических режимов.

- Впервые определено влияние внешнего резонатора на вольт-амперную характеристику полупроводниковой сверхрешетки. Обнаружено, что высокочастотный резонатор приводит к появлению дополнительных максимумов, связанных с переходами между динамическими режимами.

- Обнаружена возможность использования полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор, как генератора хаотических колебаний с широкой полосой генерации в области спектра, соответствующей частоте нестационарного транспорта заряда, что может быть использовано для создания устройств для систем связи и передачи данных, использующих хаотические сигналы, в том числе систем скрытой передачи информации.

- Проведено моделирование взаимодействия полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор, с высокочастотными периодическими сигналами. Проведен расчет импеданса автономной сверхрешетки и сверхрешетки, помещенной в резонатор, определено характерное поведение амплитуды и фазы импеданса внутри областей синхронизации и на их границах.

- Проведено комплексное исследование поглощения внешнего сигнала в полупроводниковой сверхрешетке, подключенной к добротному резонатору. Впервые обнаружена возможность использования сверхрешетки в режиме нестационарного транспорта заряда как усилителя внешнего сигнала на основной частоте и на высших гармониках частоты доменного транспорта.

- Предложен метод интерпретации натурального эксперимента со сверхрешетками, отличающийся возможностью учета паразитных контуров, взаимодействующих со сверхрешеткой. Впервые изучено влияние такого резонатора на динамические режимы, реализующиеся в полупроводниковой гетероструктуре, определен сценарий перехода к хаосу. Проведено экспериментальное исследование такой системы, показавшее хорошую точность результатов численного моделирования.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

- Предложены математические модели и программный комплекс на их основе, которые позволяют исследовать нелинейную динамику и

характеристики генерации полупроводниковых гетероструктур (сверхрешеток), помещенных во внешние резонансные системы.

- Подключение линейного резонатора к полупроводниковой сверхрешетке приводит к появлению хаотических режимов колебаний заряда в гетероструктуре в широком диапазоне управляющих параметров (напряжение питания, резонансная частота и добротность внешнего резонатора). Переход к хаотической динамике в этом случае происходит по сценарию перемежаемости типа I.

- Автономная полупроводниковая сверхрешетка может быть использована в качестве усилителя внешних сигналов, частота которых ниже ее частоты генерации. Подключение внешнего добротного резонатора позволяет усиливать внешний сигнал в области высших гармоник частоты колебаний заряда в гетероструктуре.

- Предложен метод интерпретации и сопоставления данных, полученных в ходе натурального эксперимента со сверхрешетками, с результатами численного моделирования процессов нестационарного транспорта заряда в полупроводниковой сверхрешетке с помощью учета паразитных емкостей и индуктивностей, обусловленных контактами наноструктуры.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- Научная значимость определяется тем, что предложенные в настоящей работе математические модели и методы позволяют исследовать новые физические явления в сильносвязанных полупроводниковых гетероструктурах, в том числе исследовать их взаимодействие с внешними резонансными системами, обладающими собственной частотой и добротностью.

- Практическая значимость обусловлена полученными в ходе исследования результатами, открывающими возможность использования полупроводниковых гетероструктур в современных устройствах суб-ТГц и ТГц электроники. В частности, обнаружена возможность усиления внешних сигналов в полупроводниковой сверхрешетке во внешнем резонаторе, а также реализации хаотической и широкополосной генерации в данной системе.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в работе, обсуждались на:

- XV Международной зимней школе-семинаре по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (Саратов, СГУ, 2012);

- XIII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2012») (Москва, МГУ, 2012);

- II Международной заочной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников (третье место в номинации «Моделирование нанопроцессов и наноструктур») (Саратов, СГТУ, 2013);

- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов, СГУ, 2013);
- Международной Научно-Технической Конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР, секция Нано- и микро-электроника (Минск, Беларусь, 2013, БГУИР);
- XIII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2013») (Москва, МГУ, 2013);
- X Международной школе-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, СГУ, 2013);
- 24-й Международной Крымской конференций СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Севастополь, СевГУ, 2014);
- XIV Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2014») (Москва, МГУ, 2014);
- 25-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, СевГУ, 2015);
- III Всероссийской научной молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» (Уфа, УГУ, 2015);
- Международной конференции «Saratov Fall Meeting» (Саратов, СГУ, 2015);
- 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, (Hong Kong, China, 2015).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 20 печатных работах (7 статья, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ, 4 из которых входят в систему цитирования Web of Science и Scopus, 2 в систему цитирования Scopus, трудах 10 конференций, 3 свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ). Список публикаций приведён в конце автореферата.

Личный вклад. Все предложенные в работе математические модели и научные результаты получены лично автором. Постановка задач, обсуждение результатов и их интерпретация проводились либо лично автором, либо совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ.

Достоверность результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени, обусловлена тем, что результаты, полученные с помощью численного моделирования, находятся в хорошем согласии с полученными экспериментальными результатами и не противоречат ранее опубликованным результатам других авторов. Для расчетов использовались апробированные численные схемы и методы.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено описание современного состояния проблемы и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание математической модели нестационарного электронного транспорта в автономной полупроводниковой гетероструктуре, отличающейся возможностью исследования высокочастотного импеданса сверхрешетки, в том числе на высших гармониках колебаний заряда.

Исследуемая структура сверхрешетки представлена на рис.1 а.

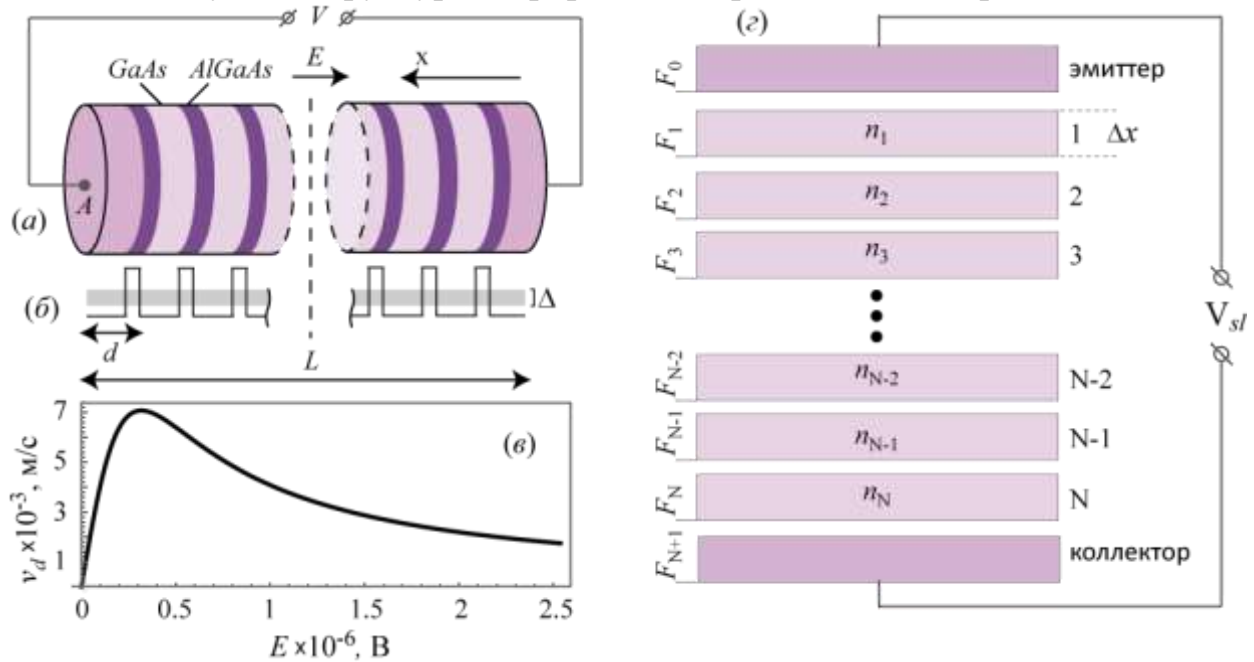


Рисунок 1. (а-б) Схематичное изображение полупроводниковой сверхрешетки (а) и ее зонной структуры (б). На рисунке обозначены: Δ - ширина первой минизоны, L и d - длина сверхрешетки и ее период соответственно. (в) Зависимость дрейфовой скорости электрона в первой минизоне от напряженности поля. (г) Схематичное представление разбиения транспортной зоны сверхрешетки на конечное число слоев для реализации численной схемы.

Она состоит из чередующихся слоев двух полупроводниковых материалов с разной шириной запрещенной зоны (в качестве примера показаны GaAs и AlGaAs), и потенциал электрона в такой структуре может быть описан периодической одномерной моделью прямоугольных ям и барьеров (модель Кронига-Пенни) (рис.1 б). При этом волновые функции электронов в двух соседних ямах перекрываются, и система уровней энергии атомов преобразуется в систему энергетических минизон (ширина которых, Δ , зависит от толщины барьера), в пределах которых электроны могут свободно туннелировать и перемещаться в перпендикулярном к слоям направлении. Дрейфовая скорость электронов в минизоне имеет нелинейную зависимость от приложенного электрического поля (рисунок 1 в), а именно имеет максимум, называемый пиком Есаки-

Тсу, и следующий за ним падающий участок, обусловленный блоховскими колебаниями. Такое поведение отдельных электронов способствует возникновению неустойчивости и формированию движущихся областей высокой концентрации носителей заряда (электронных доменов) в пространстве сверхрешетки, которые приводят к появлению участка отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперной характеристике устройства. Частота прохождения таких доменов может достигать десятков и сотен гигагерц, что делает сверхрешетки перспективными устройствами электроники ТГц диапазона.

Математическая модель транспорта заряда в гетероструктуре основана на полуклассическом приближении, предполагающем, что межминизонным туннелированием (туннелированием Ландау-Зинера) можно пренебречь, и, как следствие, рассматривать транспорт электронов только в первой минизоне. Такой подход реализован с помощью известной самосогласованной модели, состоящей из уравнений непрерывности и Пуассона, описывающих эволюцию концентрации заряда n и напряженности поля E в каждом слое соответственно:

$$e \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial J(x,t)}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (n(x,t) - n_D), \quad (2)$$

где x - пространственная координата, e - заряд электрона, а ϵ_0 и ϵ_r обозначают электрическую постоянную и относительную диэлектрическую проницаемость материала, соответственно. Ток, протекающий через каждый слой, в данном случае запишется в виде

$$J = en(x,t)v_d(E(x,t)), \quad (3)$$

где зависимость дрейфовой скорости v_d носителей заряда в отсутствие магнитного поля рассчитывается на основании подхода, предложенного Есаки и Тсу:

$$v_d = v_0 \frac{\tau \omega_B}{1 + \tau^2 \omega_B^2}, \quad (4)$$

где $\omega_B = eEd/\hbar$ – частота блоховских колебаний.

Уравнения математической модели (1)-(4) дополняются начальными и граничными условиями. В качестве начальных условий выступает невозмущенное распределение равновесной концентрации носителей заряда в транспортной области сверхрешетки $n(x,0)=n_D$, определяемое уровнем легирования полупроводника. Начальное распределение напряженности электрического поля в структуре предполагается линейным и

удовлетворяющим условию $\int_0^L E_0(x,t) dx = V_{sl}$. Граничные условия

записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} n(0,t) &= n_0, \\ n(L,t) &= n_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где n_0 - концентрация примесей в омических областях эмиттера и коллектора. Ток, протекающий через контакты, при этом запишется как

$$\begin{aligned} J(0,t) &= \sigma E(0,t), \\ J(L,t) &= \sigma E(L,t), \end{aligned} \quad (6)$$

где σ - проводимость контакта, а напряженность электрического поля $E(0,t)$ и $E(L,t)$ может быть найдена из уравнения Кирхгофа

$$V_{sl} = U + \int_0^L E(x,t) dx, \quad (7)$$

где V_{sl} – напряжение, приложенное к сверхрешетке, а U описывает падение напряжения на контактах. Если A – площадь контакта, то, зная распределение плотности тока в сверхрешетке $J(x,t)$, можно вычислить силу тока, протекающего через сверхрешетку:

$$I(t) = A \int_0^L J(x,t) dx, \quad (8)$$

который можно легко измерить в физическом эксперименте. Для исследования динамики системы под внешним периодическим воздействием, которое может рассматриваться как простейшая модель резонатора, к сверхрешетке был приложен внешний сигнал с амплитудой V_{ext} и частотой f_e . Тогда, напряжение V_{sl} , приложенное к сверхрешетке, представляет собой сумму постоянного напряжения V_0 и внешнего сигнала:

$$V_{sl} = V_0 + V_{ext} \cos(2\pi f_{ext} t). \quad (9)$$

Одной из важных характеристик системы в данном случае является высокочастотный импеданс сверхрешетки, представляющий собой комплексное сопротивление на частоте внешнего сигнала и позволяющий оценить поведение наноструктуры в различных схемах устройств суб-ТГц и ТГц диапазона. Для его расчета был использован метод, предложенный в [Jappsen A. et al. J. Appl. Phys. 2002. V. 92, N. 6. p. 3137]. Временная реализация тока, генерируемого сверхрешеткой раскладывалась в спектр с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, в котором проводился поиск гармоники тока, соответствующей частоте внешнего сигнала. Амплитуда $|Z|$ и фаза φ_Z импеданса рассчитывались как

$$|Z| = V_{ext} / I(f_e), \quad \varphi_Z = \varphi_V - \varphi_I(f_e), \quad (10)$$

где $I(f_e)$ и $\varphi_I(f_e)$ – амплитуда и фаза гармоники тока на частоте внешнего воздействия, определяемые по спектру Фурье, φ_V – фаза внешнего воздействия. Для диагностики синхронизации использовалось «число вращений», представляющее собой отношение частоты внешнего воздействия к основной частоте колебаний сверхрешетки - $\rho = f_{ext}/f_0$. При этом рациональные числа вращения будут соответствовать синхронизации в системе.

Исследовалась наноструктура, имеющая параметры, соответствующие реальному образцу, с использованием которого были получены данные натурального эксперимента. Этой наноструктуре

соответствуют следующие размерные параметры основных физических величин, описывающих систему: $d = 8.3$ нм – период сверхрешетки, $L = 115.2$ нм – ее длина, $A = 5 \times 10^{-10}$ – площадь поперечного сечения, $\Delta = 19.1$ мэВ – ширина минизоны, τ – время рассеяния электрона, $n_D = 3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ – равновесная концентрация электронов, определяемая уровнем легирования, $\sigma = 3788$ См и $n_0 = 1 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ – проводимость и концентрация заряда на контактах сверхрешетки, соответственно. Заметим, что в данном случае предполагается рассмотрение сверхрешетки при низкой температуре ($T = 4.2$ К), чтобы пренебречь диффузионной составляющей плотности тока.

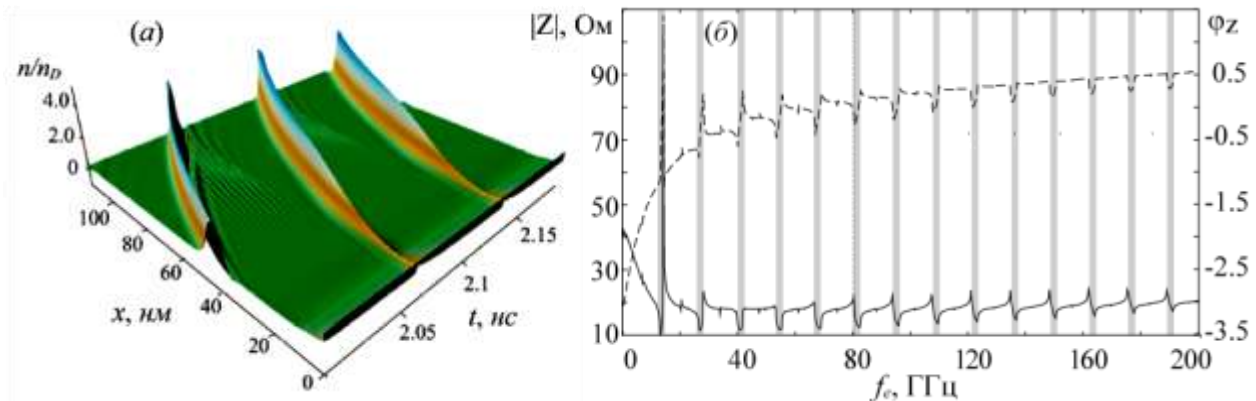


Рисунок 2. (а) Типичное пространственно-временное распределение концентрации заряда в режиме нестационарного транспорта, полученное с помощью разработанной модели. (б) Амплитуда (сплошная линия) $|Z|$ и фаза (пунктирная линия) ϕ_Z импеданса автономной полупроводниковой сверхрешетки в зависимости от частоты внешнего воздействия. Области синхронизации выделены серым

Уравнения описанной выше модели были реализованы в виде явной конечно-разностной численной схемы, решаемой методом Эйлера с пересчетом, в которой транспортная область сверхрешетки разбивается на N слоев, каждый из которых имеет ширину $\Delta x = 0.24$ нм (см. рисунок 1 з). Временной шаг расчета динамики системы составляет $\Delta t = 10^{-15}$ с, при этом $\Delta x / \Delta t = 2.4 \cdot 10^5$, что удовлетворяет условию Куранта $\Delta x / \Delta t > v_{max}$, где $v_{max} = 7 \cdot 10^3$ – максимальная дрейфовая скорость электрона в первой минизоне сверхрешетки при выбранных параметрах исследуемой структуры. Разработанная численная модель легла в основу программного пакета для моделирования динамики сверхрешетки (пространственное-временное распределение концентрации заряда в режиме нестационарного транспорта приведено на рис.2 а), с помощью которого был впервые исследован высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки в области высших гармоник колебаний заряда в наноструктуре (рисунок 2 б). Особенностью расчета стал выбор оптимальной длины временного ряда, раскладываемого в спектр, а именно равного целому количеству периодов внешнего воздействия, что позволило снизить влияние численных эффектов и изучить поведение импеданса на высших гармониках колебаний заряда. Впервые показано, что синхронизация способствует уменьшению

амплитуды импеданса, фаза импеданса при этом совершает скачок от 0 до π/n , где n – номер клюва синхронизации. В асинхронном режиме исследуемые величины изменяются слабо.

В результате в первой главе диссертационного исследования разработаны математическая модель и программный пакет для исследования динамики полупроводниковой гетероструктуры, и впервые исследован высокочастотный импеданс на высших гармониках колебаний тока сверхрешетки под внешним периодическим воздействием.

Во второй главе диссертационной работы впервые предложена модель, описывающая динамику системы полупроводниковая «сверхрешетка - внешний добротный резонатор» (схематичное изображение приведено на рисунке 3 а), отличающаяся возможностью исследования взаимодействия полупроводниковой сверхрешетки с внешней резонансной системой, имеющей собственную частоту и добротность, а также позволяющей проводить расчет токов и напряжений, возбуждаемых колебаниями сверхрешетки во внешнем резонаторе.

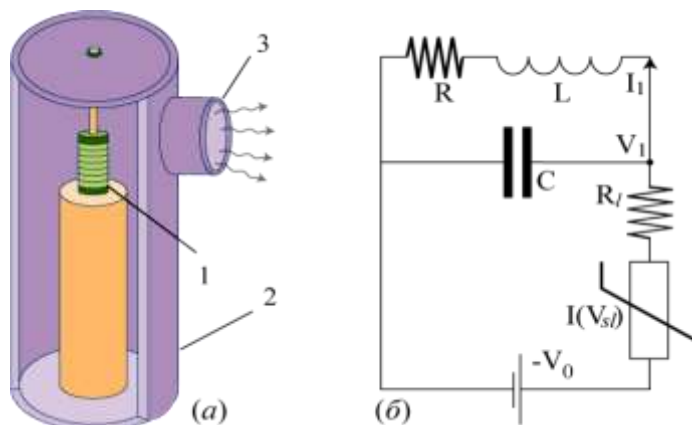


Рисунок 3. (а) Схематичное изображение исследуемой системы, 1 - полупроводниковая сверхрешетка, 2 - внешний резонатор, 3 - вывод мощности. (б) Эквивалентная схема сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор. Сверхрешетка представлена как нелинейное сопротивление, зависящее от напряжения $I(V_{sl})$

Полупроводниковая сверхрешетка связана с внешним резонатором через граничное условие (7), которое начинает зависеть не только от напряжения питания V_0 , приложенного к системе, но и от колебаний напряжения во внешнем резонаторе, к которому подключена сверхрешетка. Для расчета эволюции напряжения в резонаторе используется одномодовое приближение, в соответствии с которым колебания напряжения во внешнем контуре (см. рисунок 3 б) могут быть найдены на каждом шаге интегрирования уравнений сверхрешетки (1)-(8), описанных в первой главе диссертационной работы, с помощью нестационарных уравнений Кирхгофа:

$$C \frac{dV_1}{dt} = I(V_{sl}) - I_1, \quad (11)$$

$$L \frac{dI_1}{dt} = -RI_1 + V_0 - V_{sl} + R_n I(V_{sl}), \quad (12)$$

где L , C , R - эквивалентные индуктивность, емкость и сопротивление, соответственно, R_l - сопротивление нагрузки, V_0 - напряжение питания, $I(V_{sl})$ – ток, генерируемый сверхрешеткой и рассчитываемый с помощью уравнения (8) модели, описанной в главе 1. Напряжение V_{sl} в уравнении (7), приложенное к сверхрешетке, в данном случае имеет вид

$$V_{sl} = V_0 - V_1, \quad (13)$$

где V_1 - напряжение в резонаторе, эволюция которого вычисляется с помощью уравнений (11) - (12). Частота и добротность такого контура будут определяться соответственно как:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}, \quad Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (14)$$

Уравнения, описывающие эволюцию напряжений и токов в колебательном контуре решаются с использованием метода Эйлера с пересчетом самосогласованно с уравнениями, описывающими динамику заряда в сверхрешетке. На основе разработанной модели создан программный пакет, позволяющий исследовать нелинейную динамику и характеристики генерации системы «полупроводниковая сверхрешетка - внешний резонатор». Функциональная схема взаимодействия подпрограмм в программном пакете представлена на рисунке 4. Численная модель, используемая для расчета пространственно-временной динамики заряда в слоях сверхрешетки, реализована в подпрограммах SL_CONTINUITY и POISSON, которые, соответственно, рассчитывают изменение концентрации электронов (4) и напряженности поля (5) в каждом слое наноструктуры с учетом предыдущего состояния и приложенного напряжения питания. Результирующий ток, генерируемый сверхрешеткой, вычисляется в подпрограмме SL_CURRENT (6), после чего подпрограмма SL_RESONATOR (7) осуществляет расчет напряжений и токов во внешнем контуре.

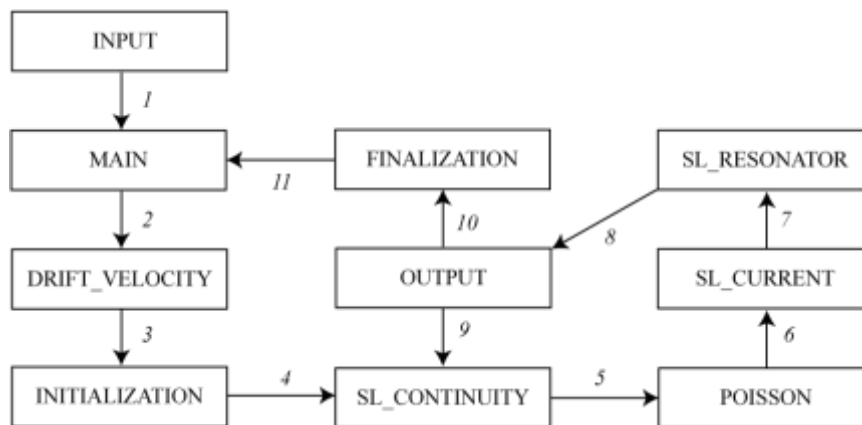


Рисунок 4. Функциональная схема взаимодействия подпрограмм в программном пакете

С помощью созданного программного пакета впервые исследовано влияние резонансной системы на вольт-амперную характеристику (ВАХ) полупроводниковой гетероструктуры, в ходе которого было установлено, что подключение внешнего добротного резонатора приводит к появлению

пиков в области отрицательной дифференциальной проводимости (рисунок 5 а). При этом в области пиков существуют участки хаотической динамики (области 2, 4, 6 на рисунке). Таким образом, определено, что в отличие от автономной сверхрешетки, которая демонстрирует только периодические колебания тока, данная система может демонстрировать хаотическую генерацию (рисунок. 5 б), переходы к хаотической генерации в системе происходят по сценарию перемежаемости, что обусловлено возникновением турбулентных фаз при увеличении напряжения питания (рисунок 5 в). Определено, что сценарий соответствует перемежаемости первого типа, что подтверждено анализом отображений Пуанкаре, которые демонстрируют характерный для данной бифуркации коридор, и зависимостью средней длительности ламинарных фаз от параметра надкритичности (рисунок 5 г), которая имеет вид степенного закона $\langle \tau \rangle = (V_0 - V_{0crit})^\gamma$, где показатель степени γ соответствует значению -0.5 .

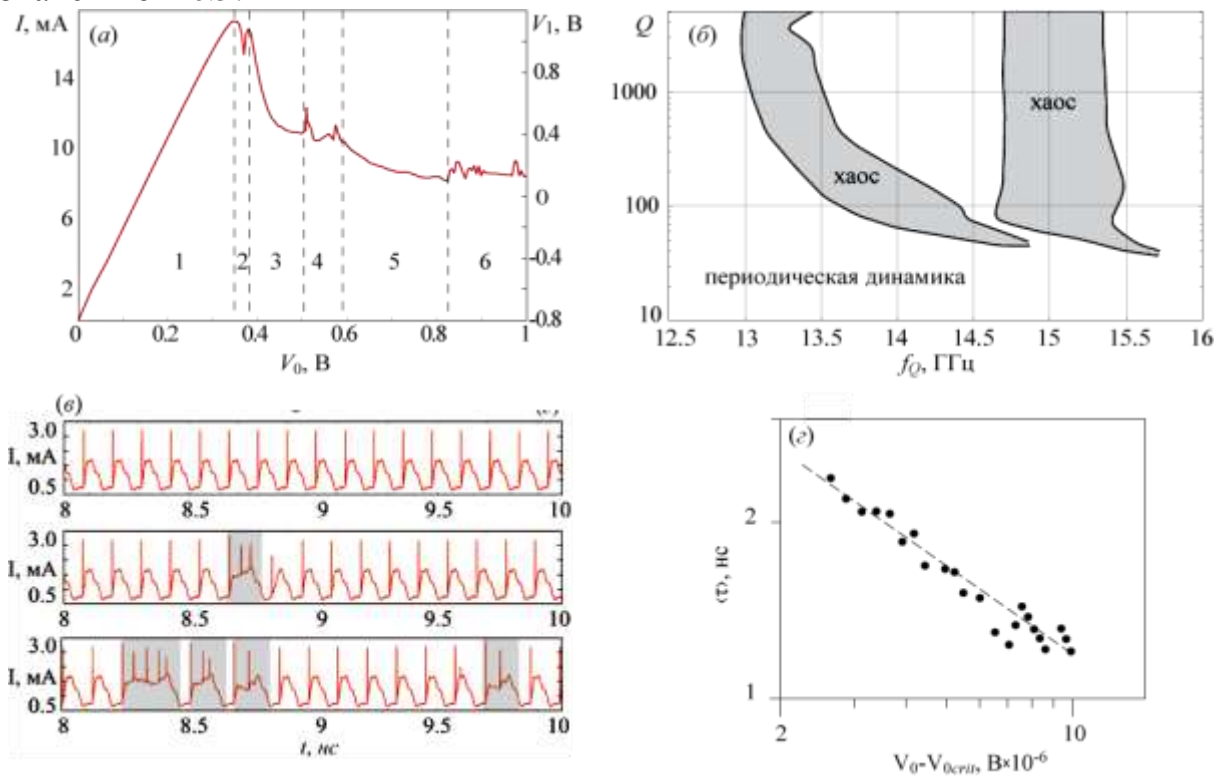


Рисунок 5. (а) Вольт-амперная характеристика (сплошная линия) полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор. Область 1 соответствует отсутствию генерации, области 2, 4, 6 - хаотическим колебаниям, области 3 и 5 - периодическому режиму. (б) Область хаотической генерации в пространстве параметров частота - добротность внешнего резонатора. (в) Временные реализации тока, текущего через сверхрешетку в области перехода к хаосу при увеличении напряжения питания (сверху вниз). Турбулентные фазы выделены серым. (г) Зависимость средней длительности ламинарных фаз от параметра надкритичности (точки) и его аппроксимация степенным законом $\langle \tau \rangle = (V_0 - V_{0crit})^{-0.5}$

Для того чтобы подтвердить наличие хаотической динамики, а также классифицировать наблюдаемые динамические режимы, был разработан

новый метод расчета показателей Ляпунова, отличающийся возможностью классификации динамических режимов в системах, содержащих пространственно-распределенную активную среду, динамика которой описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, и конечномерную динамическую систему, описываемую обыкновенными дифференциальными уравнениями. В качестве пространственно-распределенной активной среды в данном случае выступает сверхрешетка, внешний колебательный контур при этом представляет собой конечномерную динамическую систему. Анализ динамики системы с помощью предложенного метода показал его высокую точность - реализация хаотической динамики сопровождается положительными значениями первого показателя Ляпунова, в то время как второй показатель равен нулю. Данный метод может быть эффективно использован в дальнейших исследованиях динамических режимов, возникающих в периодических гетероструктурах.

В области высоких напряжений питания полупроводниковая сверхрешетка, помещенная во внешний резонатор, может демонстрировать хаотические колебания тока с широкой полосой генерации в области основной частоты нестационарного транспорта заряда (рисунок 6), которая при данных параметрах системы соответствует $f_0=13.7$ ГГц (рисунок 6 б-з). При этом, анализ спектрального состава показал, что ширина полосы на уровне -3 дБ может достигать 30% от основной частоты колебаний (рисунок 6 а).

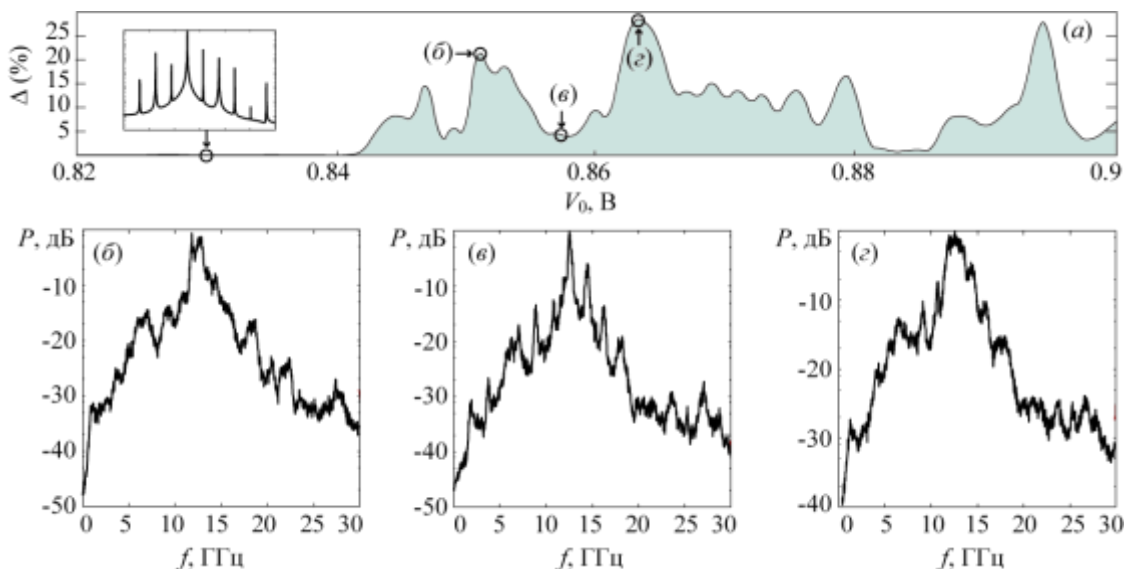


Рисунок 6. Ширина полосы хаотической генерации (а) в зависимости от напряжения питания, а также спектры мощности (б-з), соответствующие различным участкам зависимости

Таким образом, в данной главе предложены новая математическая модель и программный пакет для исследования динамики полупроводниковых гетероструктур, помещенных во внешние резонансные

системы, впервые обнаружена возможность реализации хаотических режимов генерации, что подтверждено спектральным составом колебаний тока.

В третьей главе диссертационной работы обсуждается взаимодействие полупроводниковой гетероструктуры, помещенной во внешний резонатор с внешними периодическими сигналами, и показана возможность использования исследуемой системы в качестве усилителя суб-ТГц сигналов. Внешний усиливаемый сигнал при этом представляет собой периодическую модуляцию напряжения на сверхрешетке, в результате чего напряжение, приложенное к сверхрешетке, имеет вид

$$V_{sl} = V_0 - V_1 + V_{ext} \cos(2\pi f_{ext} t). \quad (15)$$

Для определения возможности использования системы «полупроводниковая сверхрешетка – внешний резонатор» в качестве усилителя было рассчитано поглощение внешнего сигнала ($V_{ext} \cos(2\pi f_{ext} t)$) на единицу длины вещества, через которое оно проходит, и определяемое как [Nyart T. et al. Physical Review B. 2008. V. 77. N. 16. p. 165330.]

$$\alpha(f_{ext}) = \frac{\text{Re}[\sigma(f_{ext})]}{n_r \varepsilon_0 c_0}, \quad (16)$$

где $\text{Re}[\sigma(f_{ext})]$ - действительная часть комплексной проводимости на частоте внешнего сигнала, n_r - коэффициент преломления материала сверхрешетки (GaAs), ε_0 и c_0 - электрическая постоянная и скорость света в вакууме соответственно. Величина $\sigma(f_{ext})$ является обратной импедансу, и ее расчет проводился методом, описанным в главе 1 (уравнение (10)). При этом отрицательные значения исследуемой величины $\alpha(f_{ext})$ будут свидетельствовать об усилении сигнала в наноструктуре в данной частотной области. Предполагая, что усиливаемый сигнал выводится в пространство резонатора, коэффициент усиления может быть рассчитан как

$$K(f_{ext}) = 20 \lg \frac{V_1(f_{ext})}{V_{ext}}, \quad (17)$$

где $V_1(f_{ext})$ - амплитуда колебаний напряжения в резонаторе на частоте внешнего сигнала, определяемая разложением соответствующей реализации в спектр Фурье.

Предварительное исследование поглощения в автономной сверхрешетке выявило возможность использования ее как усилителя в диапазоне частот, расположенном ниже основной частоты колебаний заряда в системе (рисунок 7 а); кроме того, локализация областей усиления сильно зависит от амплитуды внешнего сигнала. Изучение системы, содержащей внешний резонатор, показало, что усиление в данном случае возможно также на гармониках основной частоты генерации. Кроме того, подключение внешнего добротного резонатора позволяет эффективно управлять распределением мощности в спектре токовых осцилляций сверхрешетки, в частности увеличение его резонансной частоты способствует увеличению основной частоты доменного транспорта, а также росту мощности ее гармоник (рисунок 7 б). Последнее также способствует появлению областей

усиления на более высоких частотах (серые области на рисунке 7 б). Коэффициент усиления в точках 1, 2 и 3, отмеченных на рисунке 7 б достигает $K_1=25$ дБ, $K_2=19$ дБ, $K_3=16$ дБ.

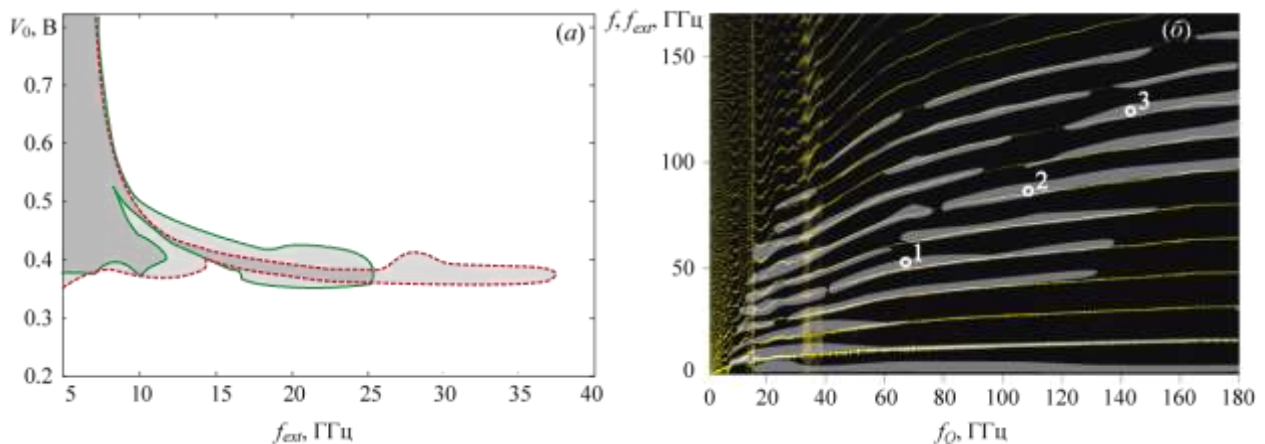


Рисунок 7. (а) Области отрицательной абсорбции в автономной полупроводниковой сверхрешетке. Сплошная линия соответствует внешнему сигналу с амплитудой 60 мВ, пунктирная линия - 20 мВ. (б) Спектральный состав колебаний тока полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор, при изменении частоты внешнего резонатора, белый цвет соответствует большой спектральной мощности. Серым показаны области усиления внешнего сигнала в системе

В ходе исследования показано, что колебания полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор, могут быть синхронизованы со слабым периодическим сигналом даже в режиме хаотической генерации, что представляет интерес для разработки новых систем скрытой передачи информации.

В данной главе также исследован высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор. Определено характерное поведение амплитуды и фазы импеданса внутри и на границах синхронного режима, что может найти применение в дальнейших экспериментальных исследованиях сверхрешеток.

Следовательно, в третьей главе диссертационной работы впервые показана возможность усиления сигналов в полупроводниковой наноструктуре, помещенной во внешний резонатор, а также управления характеристиками усиления с помощью параметров резонансной системы.

В четвертой главе впервые предложен метод моделирования реактивностей, обусловленных элементами подключения полупроводниковой наноструктуры, отличающийся возможностью учета влияния паразитного резонатора, образованного ими, для сопоставления данных натурального эксперимента с численными исследованиями полупроводниковых гетероструктур. Для этого в университете г. Лафборо, Великобритания, было проведено экспериментальное исследование перехода к хаотической генерации при изменении напряжения питания полупроводниковой сверхрешетки, подключенной к внешней резонансной системе, представляющей собой полосковый резонатор. Анализ

экспериментальных данных, в частности электродинамических свойств макета, показал, что для моделирования исследуемой системы «сверхрешетка – внешний резонатор» с учетом влияния паразитного контура может быть одномодовое приближение. Динамика токов и напряжений во внешних резонансных контурах вычисляется на каждом шаге интегрирования уравнений сверхрешетки (1)-(8), описанных в первой главе с помощью уравнений Кирхгофа:

$$C_1 \frac{dV_1}{dt} = I(V_{sl}) - I_1, \quad (17)$$

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = -R_1 I_1 + V_1 - V_2, \quad (18)$$

$$C_2 \frac{dV_2}{dt} = I(V_{sl}) - I_2, \quad (19)$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} = -R_2 I_2 + V_2, \quad (20)$$

где $I(V_{sl})$ - ток, генерируемый сверхрешеткой, а управляющее напряжение V_{sl} в граничном условии (7) имеет вид

$$V_{sl} = V_0 - (V_1 + V_2), \quad (21)$$

где V_0 - напряжение питания. Для создания численной модели вышеописанные уравнения дискретизованы и реализованы в виде явной конечно-разностной схемы, которая решается с помощью метода Эйлера с пересчетом совместно с уравнениями, описывающими динамику заряда в сверхрешетке. Численная модель реализована в виде программного пакета, позволяющего исследовать нелинейную динамику такой системы.

В данной системе хаотическая генерация реализуется в более широком диапазоне управляющих параметров, при этом уменьшение расстройки между частотами резонаторов и основной частоты транспорта заряда сверхрешетки приводит к расширению областей хаоса. Переход к хаосу в данной системе происходит по сценарию разрушения квазипериодических колебаний, что показано на рисунке 8 а.

Для определения точных параметров данного паразитного контура были проанализированы электродинамические свойства экспериментального образца с помощью лицензионного программного обеспечения CST Microwave Studio. После этого было осуществлено сравнение численных результатов, полученных с использованием параметров реального макета (рисунок 8 б-г), и экспериментальных данных, представляющих собой спектры колебаний тока в сверхрешетке при увеличении напряжения питания (рисунок 8 д-ж). Обнаружено, что результаты, полученные с помощью математической модели, находятся в хорошем согласии с реальными данными, в частности переход к хаосу в эксперименте также происходит по сценарию разрушения квазипериодических колебаний. Последнее говорит о хорошей точности разработанной математической модели и реализованного на ее основе

программного пакета, и возможности их применения в дальнейших исследованиях сильносвязанных полупроводниковых гетероструктур.

Таким образом, разработанный в четвертой главе новый метод успешно апробирован при сопоставлении данных натурального эксперимента с полупроводниковой сверхрешеткой, помещенной во внешний резонатор с численным моделированием, впервые определен сценарий перехода к хаосу в такой системе.

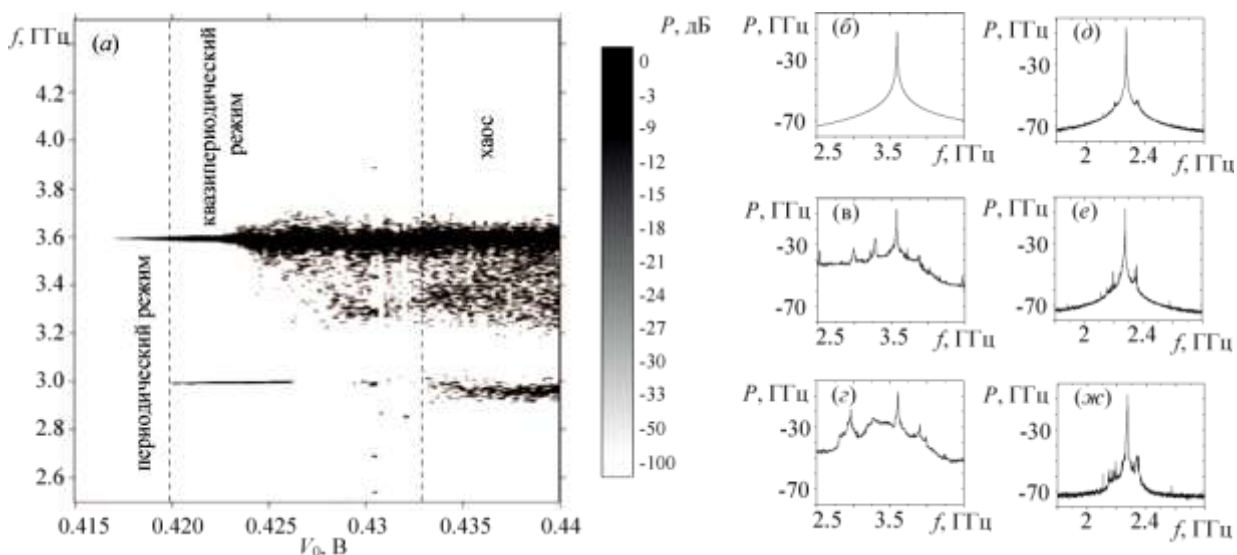


Рисунок 8. Спектральный состав токовых колебаний системы "полупроводниковая сверхрешетка в двух внешних резонаторах" при изменении напряжения питания (а), а также спектры генерации при переходе к хаосу в численной модели (б-г) и эксперименте (д-ж)

В заключении приводится обобщение полученных результатов исследований, а также обсуждаются перспективы дальнейшего использования разработанных моделей и программных пакетов для исследования нелинейной динамики и характеристик генерации полупроводниковых гетероструктур в контексте проектирования новых устройств ТГц-диапазона на их основе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Предложена математическая модель, отличающаяся возможностью исследования динамики заряда в полупроводниковых сверхрешетках, помещенных во внешние резонансные системы, характеризующиеся своими собственными резонансными частотами и добротностями, а также исследовать взаимодействие данной системы с внешними гармоническими сигналами.

- Созданы программные комплексы для численного исследования нелинейно-динамических режимов, характеристик токовых колебаний, позволяющие изучать усиление внешних сигналов в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешний резонатор.

- Впервые показано, что подключение внешнего линейного резонатора может привести к возникновению квазипериодических и

хаотических режимов колебаний в гетероструктурах, которые в отсутствие резонатора демонстрируют только периодические колебания заряда.

- Выявлено, что переход к хаосу в системе полупроводниковая сверхрешетка - внешний резонатор происходит по сценарию перемежаемости типа I, что подтверждено распределением длительности ламинарных фаз в зависимости от параметра надкритичности.

- Предложен новый метод расчета показателей Ляпунова, отличающийся возможностью классификации динамических режимов в системах, описывающих взаимодействие пространственно-распределенной активной среды и динамической системы с сосредоточенными параметрами.

- Обнаружено, что при больших напряжениях питания полупроводниковая сверхрешетка, помещенная во внешний резонатор, может быть использована для генерации широкополосных колебаний, причем ширина полосы генерации достигает 30%.

- Определено, что высокочастотный резонатор приводит к появлению дополнительной области отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ сверхрешетки. Данная область характеризуется высокочастотными хаотическими колебаниями заряда малой мощности.

- Выявлено характерное поведение амплитуды и фазы импеданса внутри и на границах области синхронизации колебаний сверхрешетки с внешним сигналом, в том числе в системе, взаимодействующей с внешним резонатором.

- Обнаружена возможность использования сверхрешетки в режиме нестационарного транспорта заряда как усилителя внешнего сигнала в широком диапазоне частот. Построены зависимости поглощения (абсорбции) внешнего сигнала в полупроводниковой гетероструктуре при различных параметрах внешнего резонатора.

- Предложен метод моделирования «паразитного» резонатора, образованного элементами подключения сверхрешетки, отличающийся возможностью сопоставления данных натурального эксперимента с численным моделированием.

- Определено влияние паразитного резонатора на динамические режимы, реализующиеся в полупроводниковой гетероструктуре, показано, что переход к хаосу в такой системе происходит по сценарию разрушения квазипериодических колебаний.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в центральных изданиях,
включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ*

1. **Макаров В.В.** Исследование возникновения хаотических режимов колебаний пространственного заряда в полупроводниковой сверхрешетке во внешнем резонаторе / В.В. Макаров // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. № 1. С. 75-80;

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ,
входящие в базу цитирования SCOPUS*

2. **Макаров В.В.** Влияние внешнего резонатора на пространственную динамику заряда в полупроводниковой сверхрешетке / В.В. Макаров, С.А. Куркин, А.А. Короновский, К.Н. Алексеев, А.Е. Храмов, А.Г. Баланов // Изв. РАН. Сер. физическая. 2013. Т. 77. № 12. С. 1743-1746;

3. **Макаров В.В.** Модель для исследования коллективного транспорта заряда на омических контактах сильносвязанной полупроводниковой наноструктуры / В.А. Максименко, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, В.В. Макаров, О.И. Москаленко, К.Н. Алексеев, А.Г. Баланов // Изв. РАН. Сер. физическая. 2014. Т. 78. № 12. С. 1573-1577;

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ,
входящие в базы цитирования Web of Science и Scopus*

4. **Makarov V.V.** Subterahertz Chaos Generation by Coupling a Superlattice to a Linear Resonator / A.E. Hramov, V.V. Makarov, A.A. Koronovskii, S.A. Kurkin, M.B. Gaifullin, N.V. Alexeeva, K.N. Alekseev, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, A. Patanè, F.V. Kusmartsev, V.A. Maksimenko, O.I. Moskalenko, A.G. Balanov // Physical Review Letters. 2014. V. 112. P. 116603.

5. **Makarov V.V.** Sub-terahertz amplification in a semiconductor superlattice with moving charge domains / V.V. Makarov, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, K.N. Alekseev, V.A. Maksimenko, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, O.I. Moskalenko, A.G. Balanov // Applied Physics Letters. 2015. V. 106. P. 043503;

6. **Макаров В.В.** Высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки во внешней резонансной системе / В.В. Макаров, В.А. Максименко, А.А. Короновский, Ю.М. Скворцова, А.Е. Храмов // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 24. С. 44-50;

7. **Makarov V.V.** Intermittency route to chaos and broadband high-frequency generation in semiconductor superlattice coupled to external resonator / A.E. Hramov, **Makarov V.V.**, Maksimenko V.A., Koronovskii A.A., Balanov A.G. // Phys. Rev. E. 2015. V. 92. P. 022911.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

8. Короновский А.А., Храмов А.Е., **Макаров В.В.** Программа для моделирования динамики полупроводниковой сверхрешетки, находящейся

во внешнем резонаторе «SuperLattice_Resonator». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2013610193, 2013 // Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 09.01.2013.

9. Максименко В.А., Храмов А.Е., Короновский А.А., **Макаров В.В.** Программа для моделирования электронного транспорта в полупроводниковой наноструктуре с омическими контактами (SuperlatticeWithOmicContactSimulation). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2014617871, 2014 // Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 05.08.2014.

10. Максименко В.А., **Макаров В.В.**, Храмов А.Е., Короновский А.А. Программа расчета спектра показателей Ляпунова для полупроводниковой сверхрешетки, связанной с внешней резонансной системой (SLResonatorLES). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616526, 2015 // 11.06.2015 г.

Публикации в других изданиях

11. **Макаров В.В.** Исследование возникновения хаотических режимов колебаний пространственного заряда в полупроводниковой сверхрешетке во внешнем резонаторе / В.В. Макаров, А.А. Короновский, С.А. Куркин, А.Е. Храмов, А.Г. Balanov, К.Н. Alekseev, М.В. Gaifullin, N. Alexeeva, F.V. Kusmartsev, М.Т. Greenaway, А. Patan'e, and Т.М. Fromhold // Труды XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов, 2012. С. 65-68.

12. **Макаров В.В.** Высокочастотный импеданс и абсорбция полупроводниковой сверхрешетки, находящейся под внешним периодическим воздействием / В.В. Макаров, О.И. Москаленко, А.О. Сельский, А.Г. Баланов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов // Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2012»): тр. XIII Всерос. школы-семинара. Секция 4. М., Звенигород, 2012. С. 8-11.

13. **Макаров В.В.** Численное моделирование и экспериментальный анализ динамики пространственного заряда в полупроводниковой сверхрешетке во внешних резонансных системах / В.В. Макаров // Сборник материалов II Международной заочной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников (третье место в номинации «Моделирование нанопроцессов и наноструктур»). Саратов, 2013. С. 137.

14. **Макаров В.В.** Усиление высокочастотного сигнала в полупроводниковой сверхрешетке в режиме доменного транспорта / В.В. Макаров, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, В.А. Максименко, О.И. Москаленко, С.А. Куркин, К.Н. Алексеев, А.Г. Баланов // Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. науч. школы-семинара. Саратов, 2013. С. 217.

15. **Макаров В.В.** Использование внешнего резонатора для усиления высокочастотного сигнала полупроводниковой сверхрешеткой /

В.В. Макаров, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, С.А. Куркин, К.Н. Алексеев, А.Г. Баланов // Труды Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР. Секция «Нано- и микроэлектроника». Минск, 2013. С. 77.

16. **Макаров В.В.** Синхронизация колебаний тока на сверхрешетке, помещенной во внешнюю резонансную систему с внешним гармоническим сигналом / В.В. Макаров, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, С.А. Куркин, К.Н. Алексеев, А.Г. Баланов // Хаотические автоколебания и образование структур: материалы X Междунар. школы-конф. Саратов, 2013. С. 106.

17. **Макаров В.В.** Влияние внешнего резонатора на динамику доменов в полупроводниковой сверхрешетке / В.В. Макаров, С.А. Куркин, А.А. Короновский, К.Н. Алексеев, А.Е. Храмов, А.Г. Баланов // Физика и применение микроволн («Волны-2013»): тр. XIV Всерос. школы-семинара. Секция 5. М., Красновидово, 2013. С. 39-41.

18. **Макаров В.В.** Переход к хаосу в полупроводниковой сверхрешетке, связанной с внешним резонатором / В.В. Макаров, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, В.А. Максименко, А.Г. Баланов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 24-й Междунар. Крым. конф., 7-13 сентября 2014 г. Севастополь, Крым, 2014. С. 147.

19. **Макаров В.В.** Переменяемость в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешнюю резонансную систему / В.В. Макаров, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, В.А. Максименко, К.Н. Алексеев, А.Г. Баланов // Ученые записки физического факультета МГУ. 2014. С. 144319.

20. **Makarov V.V.** Sub-THz/THz amplification in a semiconductor superlattice / A.E. Hramov, V.V. Makarov, A.A. Koronovskii, K.N. Alekseev, V.A. Maximenko, N.S. Frolov, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, O.I. Moskalenko, and A.G. Balanov // IEEE Proceedings on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2015 40th International Conference. Pp. 1-2.

Подписано в печать 20.07.16

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 49

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru

