

На правах рукописи

**БРАЖЕ Рудольф Александрович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ, УСИЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ  
ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛН СВОБОДНЫХ  
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Специальности:

05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ;

01.04.03 — Радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Ульяновск — 2001

Работа выполнена на кафедре физики радиотехнического факультета Ульяновского государственного технического университета

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Байбурин В.Б.

доктор физико-математических наук, профессор Семенцов Д.И.

доктор физико-математических наук, профессор Четвериков А.П.

Ведущая организация: Институт Радиотехники и Электроники РАН

Защита состоится " 5 " июля 2001 г. в 16 час. на заседании диссертационного совета Д 212.277.02 в Ульяновском государственном техническом университете (432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного технического университета

Автореферат разослан "   " июня 2001 г.  
Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук,  
профессор Крашенинников В.Р.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность направления исследований.** Нелинейные волновые процессы в настоящее время изучаются в самых различных разделах физики и механики: гидро- и газодинамике, геофизике, физике атмосферы, физике плазмы, оптике, акустике, физике полупроводников, биофизике, радиофизике и т.д. В каждой из этих областей имеются свои специфические задачи, однако, многие закономерности волновой динамики описываются аналогичными уравнениями. Это связано с наличием во всех таких задачах общих физических явлений: нелинейности, дисперсии, диссипации и др. Теории нелинейных волн в диспергирующих средах уделялось довольно много внимания, начиная с 70-х гг. XX в.<sup>1</sup> Однако большинство работ в этой области ограничивалось исследованием волновых процессов в гидродинамике<sup>2</sup>, плазме<sup>3</sup> и электронике<sup>4</sup>.

Одним из наиболее замечательных достижений теории нелинейных волн в диспергирующих средах явилось объяснение факта существования уединенных волн, сохраняющих свою форму в процессе распространения, — солитонов<sup>5</sup>. Первым и наиболее простым примером солитонов были уединенные волны на поверхности жидкости (Дж. Скотт Рассел, 1844). Выведенное для таких волн Д. Кортевегом и Г. де Вризом (1895) эволюционное уравнение — уравнение КдВ, оказалось прекрасно приспособленным для описания солитоноподобных образований в плазме, электромагнитных линиях передачи и др. системах.

<sup>1</sup> *УиземДж.* Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

<sup>2</sup> *Карпман В.И.* Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973.

<sup>3</sup> *Кадомицев Б.Б.* Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976.

<sup>4</sup> *Скотт Э.* Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М.: Сов. Радио, 1977.

<sup>5</sup> *ЛэмДж.* Введение в теорию солитонов. М.: Мир, 1983.

Важными результатами 80-х гг. стали исследования неустойчивостей, возникающих при распространении нелинейных волн в системах «сносового» типа: на границе раздела двух жидкостей, одна из которых движется относительно другой, в системе электронный поток — электромагнитная волна и др. (неустойчивость Кельвина - Гельмгольца). В области неустойчивости Кельвина - Гельмгольца происходит усиление волн отрицательной энергии <sup>6</sup> (амплитуда которых растет за счет уменьшения энергии системы волна — среда) и ослабление волн положительной энергии. Исследования энергетических характеристик нелинейных волн в диссипативно-дисперсионных средах с неустойчивостью, условия их ослабления, усиления и генерации представляют интерес как с точки зрения теоретического описания, так и практических приложений.

Средой, сходной по своим свойствам с жидкостями и газами, при некоторых условиях является газ свободных носителей заряда в полупроводниках. В случае баллистического (бесстолкновительного) переноса в слаболегированных примесных полупроводниках распределением свободных носителей заряда по скоростям можно пренебречь, а так как их взаимодействие друг с другом при этих условиях носит коллективный характер, то совокупность свободных зарядов можно рассматривать как некоторую непрерывную среду, описываемую уравнениями гидродинамики. Если, кроме того, толщина полупроводника превышает дебаевский радиус экранирования, то сгустков заряда не образуется, и такая среда ведет себя как несжимаемая квазижидкость, плотность которой равна произведению концентрации носителей и их эффективной массы. Эта особенность полупроводников до сих пор во внимание не принималась, хотя здесь можно ожидать открытия ряда новых физических эффектов, аналогичных известным гидродина-

<sup>6</sup> *Островский Л.А., Рыбак С.А., Цимринг Л.Ш.* Волны отрицательной энергии в гидродинамике // УФН. 1986. Т. 150. Вып. 3 С. 417 — 437.

мическим явлениям. В частности, должны существовать электрогидродинамические аналоги поверхностных <sup>7</sup> и внутренних <sup>8</sup> гравитационных волн в жидкостях. Предварительно проведенные оценки характеристик таких

волн показывают, что по скорости распространения ( $\sim 10^5$  м/с) и рабочим частотам (до  $\sim 10^{12}$  Гц) они представляют исключительный интерес для создания устройств обработки сигналов и других электронных приборов терагерцевого диапазона.

В связи с изложенным выбранное направление исследований является актуальным. Актуальность данной тематики подтверждается также приоритетностью направлений исследований проблем радиотехники и связи, закрепленной межотраслевой научно-технической программой сотрудничества Минобрнауки России и Министерства обороны Российской Федерации.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является развитие нового научного направления — электрогидродинамики полупроводников в рамках математического моделирования процессов распространения, усиления и генерации нелинейных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда и исследования возможностей их применения в электронных устройствах обработки сигналов и других приборах.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Анализ баллистических режимов движения свободных носителей заряда, их статистики и кинетики в полупроводниках и определение условий, при которых динамика возмущений их концентрации может быть описана на основе уравнений гидродинамики. Построение физической модели

<sup>7</sup> Некрасов А.И. Точная теория волн установившегося вида на поверхности тяжелой жидкости // Некрасов А.И. Собр. соч. в 2 т. М.: Физматгиз, 1961. Т. 1. С. 358 — 439.

<sup>8</sup> Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1981.

полупроводника, обеспечивающей возможность существования электрогидродинамических волновых процессов. Сопоставление с этой моделью параметров реальных полупроводников с целью поиска материалов, в которых можно надеяться обнаружить предсказываемые электрогидродинамические волны.

2. Математическое моделирование процессов распространения, усиления и генерации поверхностных, внутренних и контактных волн свободных носителей заряда в полупроводниках, являющихся аналогами соответствующих поверхностных и внутренних (в том числе на границе раздела двух жидкостей) гидродинамических гравитационных и центробежных волн.

3. Исследование возможностей практического применения электрогидродинамических волн в устройствах обработки сигналов, усилителях и генераторах сигналов. Оценка технических характеристик таких устройств и их сопоставление с параметрами известных электронных аналогов.

**Положения, выносимые на защиту.** Построенные математические модели и проведенные на их основе исследования нелинейных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда в полупроводниках позволяют вынести на защиту следующие научные положения:

1. На поверхности слаболегированных примесных полупроводников с толщиной слоя меньшей, чем баллистическая длина свободных носителей заряда, но большей, чем дебаевский радиус экранирования, при наличии поперечного электрического поля внешний сигнал, подаваемый через входное устройство, возбуждает поверхностные электрогидродинамические волны, аналогичные гравитационным и центробежным волнам на поверхности жидкости. Указанные волны возбуждаются на частотах, превы-

шающих частоту максвелловской релаксации, но меньших, чем диффузионная частота носителей заряда.

2. В слоях из слаболегированных примесных полупроводников толщиной меньше баллистической длины свободных носителей заряда (требование превышения толщиной слоя дебаевского радиуса экранирования в этом случае не является определяющим) при наличии градиента их концентрации внешний сигнал, подаваемый через входное устройство, возбуждает внутренние электрогидродинамические волны, аналогичных внутренним гравитационным и центробежным волнам в стратифицированной жидкости. В плавных гетеропереходах такие волны могут переходить в волноводный режим распространения с длиной волны, определяемой характером распределения концентрации свободных носителей заряда и напряженности контактного электрического поля в переходе.

3. На границе раздела двух полупроводниковых слоев с различной концентрацией свободных носителей заряда, например, в  $n - n^+$  или  $p - p^+$  - переходах, в условиях, когда толщина каждого приконтактного слоя удовлетворяет требованиям, приведенным в п. 1, внешний сигнал, подаваемый через входное устройство, возбуждает контактные электрогидродинамические волны, аналогичные гравитационным волнам на границе раздела двух разнородных жидкостей.

4. При взаимодействии контактных электрогидродинамических волн с продольным током дрейфа свободных носителей заряда, протекающем в одном из полупроводниковых слоев, имеет место неустойчивость Кельвина - Гельмгольца. При этом с ростом диссипации энергии затухание волн положительной энергии возрастает, а усиление волн отрицательной энергии ослабляется. Изменяя соотношение концентраций свободных носителей заряда в контактирующих слоях и плотность тока дрейфа, величиной плотности потока энергии и его направлением можно управлять.

5. Электрогидродинамические волны свободных носителей заряда в полупроводниках благодаря своим уникальным характеристикам ( скорость

распространения порядка 10 м/с на частотах, достигающих 10 Гц, при относительно невысоком затухании) могут быть успешно использованы в устройствах обработки сигналов: линиях задержки, фильтрах, конвольверах и корреляторах, модуляторах, дефлекторах и сканерах лазерного излучения, а также усилителях и генераторах терагерцевого диапазона.

**Научная новизна.** На основе проведенных исследований впервые получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны основы нового научного направления — электрогидродинамики полупроводников, в рамках которого теоретически доказана и численными оценками подтверждена возможность существования нового класса волновых процессов в полупроводниках — поверхностных, внутренних и контактных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда.

2. Построены математические модели процессов возникновения и распространения указанных в п. 1 волн. Исследованы линейные и нелинейные, в том числе солитонные, режимы их распространения. Определены физические характеристики этих волн: скорость распространения, диапазон рабочих частот, коэффициент поглощения в среде.

3. Исследованы режимы волноводного распространения внутренних электрогидродинамических волн в гетеропереходе с параболическим распределением контактного электрического поля и в гетеропереходе с размытыми границами.

4. Теоретически исследовано взаимодействие контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках с дрейфовым током свободных носителей заряда. Исследованы электрогидродинамические неустой-



чивости в  $n \rightarrow n^+$  или  $p \rightarrow p^+$  - переходах при наличии тока дрейфа в одном из приконтактных слоев и влияние диссипации энергии на характер неустойчивостей.

5. Исследованы величина и направление фазовой и групповой скорости «холодной» (без дрейфового тока) и «горячей» (при наличии дрейфового тока) контактных электрогидродинамических волн в  $n \rightarrow n^+$  или  $p \rightarrow p^+$  - переходах, а также величина и знак объемной плотности энергии этих волн. Определены области их устойчивости и неустойчивости. Исследованы возможности подавления, усиления и генерации контактных электрогидродинамических волн при их взаимодействии с током дрейфа.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. Построенные математические модели и теоретическое описание процессов распространения, усиления и генерации электрогидродинамических волн свободных носителей заряда в совокупности составляют теоретическую базу для разработки электронных устройств обработки сигналов, усилителей и генераторов терагерцевого диапазона. Данный диапазон пока недоступен для классических электронных, акустических и оптических устройств (за исключением лазеров на свободных электронах, требующих использования дорогой, громоздкой и небезопасной ускорительной техники). В работе доказана реальность создания электрогидродинамических аналогов сверхвысокочастотных электронных и акустоэлектронных приборов, способных работать в субоптическом диапазоне частот.

2. Самостоятельную практическую значимость имеют программные продукты, созданные для расчета дисперсионных и энергетических характеристик контактных электрогидродинамических волн. Они могут быть использованы при проектировании устройств обработки сигналов, усилителей и генераторов на данном классе волн.

3. Некоторые результаты диссертации (методы построения и решения краевых задач, вывода и анализа дисперсионных уравнений, исследования конвективных неустойчивостей в системах «сносового» типа и энергетических характеристик прямых и обратных волн, волн положительной и отрицательной энергии) включены в программу спецкурса «Нелинейные волновые процессы» для аспирантов и магистрантов радиотехнического факультета Ульяновского государственного технического университета и сотрудников Ульяновского Отделения Института Радиотехники и Электроники РАН.

Полезность работы подтверждается также поддержкой проведенных исследований грантами Международного научного фонда Дж. Сороса (1993г.), Фонда поддержки российских физиков (1993 г., распоряжение Министерства науки и технической политики РФ № 2601ф), Российского фонда фундаментальных исследований (1998 — 1999 гг., проект № 98-02-03313) и Федеральной целевой программой «Интеграция» (1998 — 2000 гг., проект № А-0066).

**Личный вклад.** Автором единолично выполнены все теоретические исследования по нелинейным центробежным волнам в вихревых потоках и основам нелинейной электрогидродинамики полупроводников. Часть работ по опубликована в соавторстве с аспирантами Мефтахутдиновым Р.М. и Шустовым М.И., доцентом Ефимовым В.В. и доцентом Новиковой Т.А. Во всех случаях автор являлся инициатором постановки исследуемых задач и принимал непосредственное, и при этом ведущее, участие в совместном их решении, обсуждении результатов и подготовке к публикации. Обсуждение результатов промежуточных исследований, поэтапное планирование текущих исследований и руководство научным направлением полностью осуществлялось автором. Под руководством автора на кафедре физики Ульяновского государственного технического университета создана науч-10

но-исследовательская лаборатория нелинейных волновых процессов «Солитон», в которой и выполнена настоящая работа.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на 3-м Всероссийском научном семинаре «Динамика волновых процессов и солитоны», г. Москва, МГУ, 1992 г.; на научном семинаре Ульяновского филиала ИРЭ РАН (ныне Ульяновское отделение ИРЭ РАН), 1992 г.; на научном семинаре физико-технического факультета Ульяновского филиала МГУ (ныне Ульяновский государственный университет), 1993 г., 1997 г.; на научном семинаре кафедры электроники и волновых процессов Саратовского государственного университета, 1995 г.; на Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы гражданской авиации», Москва, МГТУГА, 1996 г.; на 2-й Международной школе-конференции по физическим проблемам в науках о полупроводниках, г. Черновцы (Украина), 1997 г.; на 3-й Всероссийской конференции по физике полупроводников «Полупроводники — 97», г. Москва, ФИАН, 1997 г.; на научно-практической конференции с международным участием «Новые методы, средства и технологии в науке, промышленности и экономике (НМСТ — 97)», г. Ульяновск, 1997 г.; на теоретическом междисциплинарном семинаре «Синергетика» при физическом факультете МГУ, 1998 г.; на Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», г. Ульяновск, 1998 г.; на 5-м Международном совещании-семинаре «Инженерно-технические проблемы новой техники», г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998 г.; на Международной научно-технической конференции «Нейронные, реляторные и непрерывнологические сети и модели», г. Ульяновск, 1998 г.; на Международной конференции «Симметрия в естествознании», г. Красноярск, 1998 г.; на Международной конференции «Актуальные проблемы твердотельной П

электроники и микроэлектроники», п. Дивноморское, 1998 г., 1999 г.; на Международной конференции «Методы и средства преобразования и обработки аналоговой информации», г. Ульяновск, 1999 г.; на школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», г. Ульяновск, 1998 г., 1999 г., 2000 г.; на Международной конференции «Математические модели и методы их исследования», г. Красноярск, 1999г.; на 10-й межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи», г. Самара, 2000 г.; на 2-й Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики», г. Саратов, 2000 г.; на Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 г.; на Первой Всероссийской internet-конференции «Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках», Тамбов, 2001 г.; на ежегодных научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников Ульяновского государственного технического университета.

**Публикации.** Основные результаты исследований отражены в 45 научных работах, среди которых одна монография и один сборник научных трудов под редакцией автора.

**Объем и структура диссертации.** Работа изложена на 214 страницах, включает 3 таблицы, 39 рисунков и библиографию из 177 наименований. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы.**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цель и задачи исследований.

## **Первая глава**

### *Гидродинамические волны (аналитический обзор)*

С целью выработки общих принципов математической постановки задач о распространении возмущений волновой природы в нелинейных диссипативно-диспергирующих средах сделан аналитический обзор работ по поверхностным и внутренним гидродинамическим волнам, в том числе и собственных работ автора по центробежным волнам во вращающихся и вихревых потоках.

Проанализирована задача о гравитационных волнах на поверхности плоского слоя жидкости, сводимая, как известно, к интегралу Бернулли — Коппа и уравнению Лапласа для потенциала поля скоростей частиц жидкости. С учетом начальных и граничных условий эта задача сводится к классической задаче Неймана для уравнения Лапласа. В случае волн на мелкой воде решение такой задачи для слабых уровней нелинейности и дисперсии приводит к уравнениям Буссинеска, решение которых для однонаправленных волн дает широко известное уравнение Кортевега - де Вриза (КдВ).

Похожая ситуация имеет место в случае центробежных волн на поверхности поступательно-вращательного потока жидкости. Она полностью аналогична упомянутой выше задаче для азимутальных волн во вращающемся потоке и сводится к ней в случае аксиальных волн в тонком вихревом потоке с постоянной завихренностью, когда уравнение Пуассона можно свести к уравнению Лапласа для угловой компоненты векторного потенциала. В этой части работы проанализировано также влияние диссипации энергии (вследствие вязкости среды) и электропроводности среды. Показано, что при распространении нелинейных волн диссипация приводит к сглаживанию солитоноподобных осцилляции на фронте ударной волны, а электропроводность — к уменьшению амплитуды солитонов во времени.

Далее рассмотрена задача о распространении внутренних гравитационных волн в стратифицированной жидкости. В классическом варианте такая задача решается для несжимаемой жидкости путем линеаризации уравнений движения и непрерывности с последующим введением функции тока и выводом дисперсионного уравнения. При этом обычно ограничиваются случаем коротких по сравнению со «шкалой глубин» волн. Такая ситуация имеет место для обычных условий в океане, когда максимальное относительное изменение плотности жидкости  $\sim 10^{-3}$ . Автором исследован также случай сильно стратифицированной жидкости, когда могут возникать длинные гравитационные волны, допускающие солитонные режимы распространения.

Исследовано также распространение внутренних центробежных волн в вихревых потоках жидкости и газа. Рассмотрены случаи коротких и длинных волн, образование солитонов. Изучено влияние ионизации среды. Получено дисперсионное уравнение, описывающее, в общем случае, магнито-центробежные волны в вихревом потоке, сводимые к центробежным волнам в отсутствие магнитного поля и альвеновским волнам в отсутствие вращения потока.

Отдельно рассмотрена задача о распространении гравитационных волн на границе раздела двух жидкостей. Проанализировано влияние вязкости жидкости и наличия сдвиговых течений на характер распространения таких волн. В случае движения одной жидкости относительно другой они становятся неустойчивыми. При определенной скорости сдвига возникает конвективная неустойчивость типа неустойчивости Кельвина - Гельмгольца. Причем в области устойчивости имеют место волны положительной и отрицательной энергии. В области неустойчивости волны положительной энергии затухают, а волны отрицательной энергии — нарастают.

Результаты проведенного анализа используются в последующих главах диссертации (гл. 3 — 6).

## Вторая глава

### *Введение в электрогидродинамику полупроводников*

Здесь введено представление об электронной или дырочной квазижидкости, каковой, как показано, является совокупность свободных носителей заряда в слаболегированных полупроводниках *n*- или *p*-типа в условиях их баллистического переноса в образце. На основе анализа особенностей статистики и кинетики таких носителей сформулированы следующие модельные представления о полупроводнике, обеспечивающие возможность существования в нем электрогидродинамических волновых явлений:

1. Полупроводник монополярный, *n*- или *p*-типа, невырожденный, слаболегированный. Распределением свободных носителей заряда по скоростям можно пренебречь, так как они располагаются вблизи дна зоны проводимости (электроны) или потолка валентной зоны (дырки) и их кинетические энергии приблизительно одинаковы.

2. Свободные носители заряда возбуждаются термически и характеризуются постоянной изотропной эффективной массой  $m^*$ .

3. Режим движения носителей заряда в поперечном электрическом поле является баллистическим, т.е. выполняется условие  $d < L_b$  где  $d$  — характерная толщина полупроводникового слоя, а  $L_b$  — длина баллистичности, определяемая выражением

$$L_b = \tau_{сп} \left( 2\hbar\omega_0 / m^* \right)^{1/2}.$$

Здесь  $\tau_{сп} \approx 10^{-12} \dots 10^{-13}$  с — время спонтанного испускания оптических

фононов,  $\omega_0$  — их предельная частота.

4. Толщина полупроводникового слоя превышает, если не оговорено противное, дебаевский радиус экранирования:  $d > r_D$ , где

$$r_D = \left( \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu p k_B T}{e} \right)^{1/2}.$$

Здесь // — подвижность носителей,  $p$  — удельное сопротивление среды.

5. Температура образца предполагается близкой к комнатной, так что при рабочих напряжениях  $U > 26$  мВ тепловое движение носителей заряда не в состоянии разрушить их упорядоченного перемещения.

Для того, чтобы возмущения концентрации свободных носителей заряда могли распространяться по полупроводнику в виде электрогидродинамических волн, необходимо, чтобы выполнялось еще одно условие, касающееся частоты колебаний  $\omega$ :

$$6. \quad \omega_c \leq \omega \leq \omega_d,$$

$$\omega_c = \frac{en\mu}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad \omega_d = \frac{c_0^2}{D}, \quad D = \frac{\mu k_B T}{e},$$

где  $\omega_c$  — частота максвелловской релаксации, обусловленная проводимостью среды,  $\omega_d$  — диффузионная частота носителей заряда,  $c_0$  — скорость распространения волны возмущения,  $D$  — коэффициент диффузии. Иначе говоря, за период колебаний возмущение не должно успеть релаксировать, но должно успеть продиффундировать на расстояние, превышающее длину волны возмущения.

С целью выяснения, насколько перечисленные модельные предположения удовлетворяются в реальных полупроводниках, было проанализировано большое число элементарных полупроводников и соединений типа  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{III}B^V$ . Выяснилось, что для рассматриваемой цели — возбуждения электрогидродинамических волн — более или менее подходят соединения типа  $A^{II}B^{VI}$  и, в несколько худшей мере, соединения  $A^{III}B^V$ .



Важную роль в возможности практической реализации сформулированных модельных представлений играют поверхности баллистически тонких полупроводниковых слоев. С этой целью исследовано влияние на возможность существования в данных слоях электрогидродинамических волн таких явлений, как образование поверхностных уровней и зон, искривления зон и возникновения области пространственного заряда, изменения поверхностной проводимости и эффекта поля. Показано, что в реальных примесных полупроводниках толщиной менее баллистической длины путем задания нужной электропроводности можно обеспечить толщину рабочей области (за исключением областей пространственного заряда на границах), которая превышала бы дебаевский радиус экранирования. Более того, для внутренних электрогидродинамических волн это требование, в общем случае, не является обязательным.

### **Третья глава**

#### ***Математическое моделирование поверхностных электрогидродинамических волн в полупроводниках***

Здесь построена теория поверхностных электрогидродинамических волн (ПЭГДВ) свободных носителей заряда в полупроводниках, удовлетворяющих указанным выше допущениям. Показано, что линейные ПЭГДВ распространяются со скоростью

$$c_0 = \left( eEh / m^* \right)^{1/2},$$

где  $e$  — элементарный заряд,  $E$  — напряженность приложенного к слою полупроводника толщиной  $h$  электрического поля. Слабонелинейные ПЭГДВ в случае слабой дисперсии удовлетворяют, как и длинные гравитационные волны, уравнению КдВ

$$\eta_t + c_0 \left( 1 + \frac{3\eta}{2h} \right) \eta_x + \frac{1}{6} c_0 h^2 \eta_{xxx} = 0,$$

допускающему односолитонное решение вида

$$\eta = \eta_0 \operatorname{sech}^2 \frac{x - Vt}{L},$$

$$L = \left( \frac{4 h^2}{3 \eta_0} \right)^{1/2}, \quad V = c_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\eta_0}{h} \right), \quad c_0 = \left( \frac{eE}{m^* h} \right)^{1/2},$$

где  $n$  — смещение поверхности зарядовой квазижидкости или возмущение концентрации  $n$  свободных носителей заряда в полупроводнике.

Для сульфида кадмия (CdS) при  $T = 300$  К расчеты дают:  $L_b = 0,12$  мкм,  $r_D = 0,12$  мкм (при  $n = 9,2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ),  $f_{\min} = \omega_c / (2\pi) = 920$  МГц,  $c_0 = 3,0 \cdot 10^5$  м/с (при  $U = 0,10$  В,  $h = 0,12$  мкм),  $f_{\max} = \omega_d / (2\pi) = 1,6 \cdot 10^{13}$  Гц.

Далее показано, что коэффициент поглощения ПЭГДВ в среде складывается из двух слагаемых: обусловленного ее трением о промежуточный диэлектрический подслой ( $a_f$ ) и обусловленного вязкостью зарядовой квазижидкости ( $a_v$ ), причем

$$\alpha_f (\text{дБ}) = \frac{20 \lg e}{2 c_0 h} \left( \frac{\mu \omega k_B T}{2e} \right)^{1/2},$$

$$\alpha_v (\text{дБ}) = 20 \lg e \cdot 2 \frac{\mu \omega^2 k_B T}{e c_0^3}.$$

В рассмотренном примере на частоте  $f = 10^{11}$  Гц  $\alpha_f$  (дБ)  $\ll 2,0 \cdot 10^3$  дБ/см,  $\alpha_v$  (дБ) = 2,3 дБ/см. Отсюда следует, что в верхней части рабочего диапазона частот ПЭГДВ мало привлекательны из-за большого затухания, связанного с трением зарядовой квазижидкости о диэлектрическую подложку.

Влияние диссипации энергии, обусловленной вязкостью среды, сказывается и на распространении нелинейных ПЭГДВ, в частности, солитонов. Минимальная скорость распространения ПЭГДВ, обеспечивающая формирование солитонов в слое CdS толщиной  $h = 0,12$  мкм, как показывают расчеты,  $C_{\min} = 1,9 \cdot 10^6$  м/с, что более, чем на порядок превышает

приведенное выше значение. Чтобы ее достичь, необходима напряженность электрического поля  $E_{min} = 3,3 \cdot 10\text{В/м}$ , что выше пробойного значения в CdS на сверхвысоких частотах. Таким образом, возбуждение солитонов в случае ПЭГДВ также встречает серьезные затруднения.

#### Четвертая глава

### *Математическое моделирование внутренних электрогидродинамических волн в полупроводниках*

В этой главе на основе уравнений движения, непрерывности и состояния среды поставлена и решена задача о возникновении и распространении внутренних электрогидродинамических волн (ВЭГДВ) в полупроводнике с градиентом концентрации свободных носителей заряда. Выведенное здесь дисперсионное уравнение имеет вид

$$k_y^2 = \frac{N_e^2 - \omega^2}{\omega^2} k_x^2 + \frac{\omega^2}{c_s^2} - \frac{N_e^2 + c_s^2 \Gamma_e^2}{c_s^2},$$

аналогичный дисперсионному уравнению для гравитационных волн в атмосфере, где

$$N_e^2 = \frac{(eE / m^*)^2}{c_s^2} (\kappa - 1), \quad c_s^2 = \kappa \frac{k_B T}{m^*}, \quad \Gamma_e = \frac{eE / m^*}{2c_s^2} (2 - \kappa),$$

$N_g$  — электронный аналог частоты Брента - Вайсяля,  $C_s$  — скорость электронного звука (здесь отсутствует сформулированное во второй главе допущение 4, и электронный газ предполагается сжимаемым),  $\Gamma_e$  — электронный аналог коэффициента Эккарта,  $\kappa$  — показатель политропы.

Показано, что при  $\omega \gg N_e$  записанное уравнение аналогично дисперсионному уравнению для ленгмюровских волн в изотропной плазме, однако пространственная дисперсия электронно-звуковых волн обусловле-

на стратификацией свободных носителей заряда в полупроводнике под действием электрического поля, а не их распределением по скоростям.

При  $w \leq N_e$  полученное дисперсионное уравнение описывает ВЭГДВ. В этом случае исследованы режим коротких волн ( $k \gg \Gamma_e$ ,  $w \rightarrow N_e$ ), когда дисперсионное уравнение принимает вид

$$\omega = N_e \cos \theta,$$

и режим длинных волн ( $k \ll \Gamma_e$ ,  $w \ll N_e$ ), для которого

$$\omega = N_e \cos \theta \left[ 1 + (1/2 \alpha/k)^2 \right]^{-1/2}.$$

Это уравнение можно разложить по степеням  $1/k$  и представить в виде

$$\omega = c_0 k - \beta k^3,$$

$$c_0 = (2/\alpha) N_e \cos \theta, \quad \beta = 1/2 (2/\alpha)^3 N_e \cos \theta,$$

отвечающем эволюционному уравнению КдВ

$$\Delta n_t + c_0 (1 + \Delta n/n_0) n_x + \beta \Delta n_{xxx} = 0,$$

где  $\Delta n \ll n_0$  — малое возмущение концентрации носителей заряда.

Численные оценки для CdS дают

$$\omega_d = 4 \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{e}{\mu m^*} \approx 3,9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \text{ (при } \kappa = \gamma, \text{ где } \gamma \text{ — показатель адиабаты}$$

электронного газа, равный 5/3),  $\omega_c \approx 7,0 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ,  $N_e \approx 2,3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$  (при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $E \sim 10^6 \text{ В/м}$ ),  $f_{\max} = N_e / (2\pi) \approx 360 \text{ ГГц}$ ,  $f_{\min} = \omega_c / (2\pi) \approx 11 \text{ МГц}$ ,

$c_{0\max} \approx 1,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ . В солитонном режиме, при  $\Delta n / n_0 \sim 0,1$ , максимальная скорость распространения солитона и его длина соответственно равны  $V_{\max} \approx 2,0 \cdot 10^5 \text{ м/с}$  и  $L \approx 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

Далее исследованы особенности распространения ВЭГДВ в гетеропереходах, где роль внешнего электрического поля играет контактное поле, представляемое в виде параболического распределения по толщине пере-

хода или, более приближенно к реальным условиям, распределения по закону гиперболического секанса. В обоих случаях имеет место волноводный режим распространения ВЭГДВ из-за пространственной ограниченности перехода. В первом случае длина ВЭГДВ в волноводе

$$\Lambda = 2K(k)d\left(\sqrt{1 + \omega / N_{em}} - \sqrt{1 - \omega / N_{em}}\right),$$

где  $K(k)$  — полный эллиптический интеграл Лежандра первого рода,  $d$  — ширина перехода,

$$k = \left( \frac{2}{1 + \left[1 - (\omega / N_{em})^2\right]^{-1/2}} \right)^{1/2},$$

$$N_{em} = \frac{d^2 e^2 (n_{02} - n_{01})}{4 \cdot 2\varepsilon_0 \varepsilon d} \left( \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{m^*}{k_B T} \right)^{1/2},$$

$n_{01}$  и  $n_{02}$  — соответственно равновесные концентрации свободных носителей заряда в контактирующих полупроводниках вдали от перехода. Во втором случае

$$\Lambda = \pi \frac{d}{a}.$$

Здесь  $a$  — подгоночный параметр, определяемый степенью выбранного приближения реального распределения электрического поля в переходе к заданному закону

$$|E_0| = E_{0m} \operatorname{sech}\left(a \frac{y}{d}\right),$$

где  $y$  — координата в поперечном к переходу направлении.

## Пятая глава

### Математическое моделирование контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках

В этой главе построена теория контактных электрогидродинамических волн (КЭГДВ) свободных носителей заряда на границе раздела двух полупроводниковых слоев во внешнем электрическом поле и в  $n - n^+$  - или  $p - p^+$  - переходах, когда роль этого поля играет контактное поле перехода. В последнем случае дисперсионное уравнение имеет вид

$$a\omega^2 \operatorname{th}kd_2 + \omega^2 \operatorname{th}kd_1 - (1-a)kw \operatorname{th}kd_1 \operatorname{th}kd_2 = 0,$$

$$a = \frac{n_1}{n_2}, \quad w = \frac{eE_{\max}}{m^*}, \quad E_{\max} = \frac{en_{1,2}d_{1,2}}{\epsilon_0\epsilon},$$

где  $n_1$   $n_2$  — соответственно концентрации свободных носителей заряда в высокоомном и низкоомном слоях перехода, толщиной  $d_1$ ,  $d_2$  соответственно,  $w$  — эффективное ускорение носителей заряда в контактном электрическом поле.

Фазовая скорость КЭГДВ определяется формулой

$$c = \left( \frac{w}{k} \frac{1-a}{a \operatorname{cth}kd_1 + \operatorname{cth}kd_2} \right)^{1/2}.$$

В линейном режиме ( $\operatorname{th}kd_{1,2} = kd_{1,2}$ ) дисперсионное уравнение имеет вид

$$(a+b)\omega^2 - (1-a)bk^2wd_2 = 0, \quad b = d_1/d_2,$$

откуда ясно, что в тонких слоях полупроводников нелинейность возбуждаемых КЭГДВ не проявляется:

$$c_0 = \left( \frac{1-a}{a+b} bwd_2 \right)^{1/2}.$$

С точностью до членов второго порядка разложения,

$$\text{th}kd_{1,2} \approx kd_{1,2} - (1/3)k^3 d_{1,2}^3,$$

и дисперсионное уравнение принимает вид

$$\omega = c_0 k - \beta k^3,$$

где параметр

$$\beta = 1/6 c_0 d_2^2 (1 + b^2).$$

Соответствующее эволюционное уравнение имеет такой же вид, что и для ПЭГДВ, где в данном случае величина  $h = (1 - a)bd_2 / (a + b)$  является эффективной толщиной рабочего слоя.

Численные оценки для  $n - n^+$ -перехода на основе CdS дают при  $d_1 = d_n = 0,09$  мкм,  $d_2 = d_n^+ = 0,02$  мкм ( $b = 4,5$ ),  $\rho_1 = \rho_n = 5,0 \cdot 10^{-2}$  Ом·м,  $\rho_2 = \rho_n^+ = 1,0 \cdot 10^{-2}$  Ом·м ( $a = 0,2$ ),  $c_0 = 9,3 \cdot 10^4$  м/с,  $f_{\min} = 1,9 \cdot 10^{11}$  Гц,  $f_{\max} = 9,5 \cdot 10^{12}$  Гц. В нелинейном режиме  $h = 3,6 \cdot 10^{-3}$  мкм. Полагая  $\eta_0 / h = 0,1$ , получаем параметры солитона:  $V = 9,8 \cdot 10^4$  м/с,  $L = 0,002$  мкм.

Теория затухания КЭГДВ, похожая на аналогичную теорию для ПЭГДВ, дает для этого случая коэффициент поглощения, определяемый вязкостью более плотной электронной квазижидкости низкоомного слоя,  $a_v(\text{дБ}) = 7,7$  дБ / см ( $T = 300$  К,  $f \sim 10^{11}$  Гц). Поскольку в  $n - n^+$ -переходе КЭГДВ распространяются вдоль границы раздела полупроводников, экспоненциально затухая вглубь перехода, то их затухание вследствие трения о диэлектрик здесь во внимание не принимается. Таким образом, для практического использования наибольший интерес представляют именно такие электрогидродинамические волны.

## Шестая глава

*Математическое моделирование процессов усиления и генерации электрогидродинамических волн в полупроводниках* Глава начинается с построения теории взаимодействия КЭГДВ с током дрейфа свободных носителей заряда, протекающем в одном из контактирующих полупроводниковых слоев (высокоомном слое). Записанное выше дисперсионное уравнение в этом случае принимает следующий вид (с учетом вязкости  $v^{\wedge}$  зарядовой квазижидкости низкоомного слоя):

$$a(\omega - Uk)^2 \text{thkd}_2 + \omega^2 \text{thkd}_1 - (1 - a)kw \text{thkd}_1 \text{thkd}_2 = -4i v_2 \omega k^2 \text{thk}_1 d_2, \\ k_i^2 = k^2 - i\omega / v_2.$$

Анализ определяемых этим уравнением дисперсионных характеристик показывает наличие областей существования прямых и обратных волн, волн положительной и отрицательной энергии, областей устойчивости и неустойчивости этих волн. В отсутствие диссипации ( $v^{\wedge} = 0$ ) область неустойчивости Кельвина - Гельмгольца имеет место при значениях волнового

числа  $k > (1 - a^2)w / (aU^2)$ . Здесь волны положительной энергии затухают, а волны отрицательной энергии нарастают. В работе показано, что наличие диссипации энергии приводит к неустойчивости КЭГДВ во всем диапазоне волновых чисел, причем затухание волн положительной энергии возрастает с ростом диссипации, а усиление волн отрицательной энергии ослабляется.

Далее в этой главе рассмотрены фазовая и групповая скорости и энергетические характеристики исследуемых КЭГДВ. В отсутствие диссипации объемная плотность энергии волны, связанная с линеаризованными уравнениями электрогидродинамики, находится из выражения

$$W = \omega \frac{\partial D}{\partial \omega} A^2,$$



где  $D(\omega, k)$  — левая часть дисперсионного уравнения, а  $A$  — амплитуда КЭГДВ.

Показано, что взаимодействие возбуждаемых в  $n - n^+$  - переходе КЭГДВ с током дрейфа свободных носителей заряда приводит к изменению взаимных направлений фазовой и групповой скоростей рассматриваемых волн и, как следствие, направления переноса их энергии. Изменяя соотношение концентраций свободных носителей заряда в  $n - n^+$  - переходе и плотность тока дрейфа, величиной и знаком плотности потока энергии КЭГДВ в некоторых пределах можно управлять.

В заключение данного раздела по аналогии с теорией ламп бегущей волны из классической электроники СВЧ выведено дисперсионное уравнение системы «холодная» КЭДВ — быстрая или медленная волна пространственного заряда (соответственно БВПЗ или МВПЗ) токового пучка. Анализ этого уравнения численными методами приводит к следующим выводам:

1. Взаимодействие прямой КЭГДВ с БВПЗ тока приводит к подавлению входного сигнала, причем при определенных значениях тока возможно его полное подавление.

2. Взаимодействие прямой КЭГДВ с МВПЗ приводит к усилению первой.

- 3. Взаимодействие обратной КЭГДВ с БВПЗ приводит к подавлению входного сигнала, но полное его подавление возможно лишь при бесконечной длине пространства взаимодействия.

4. Взаимодействие обратной КЭГДВ с МВПЗ позволяет создать генератор КЭГДВ за счет усиления шумового сигнала.

## **Седьмая глава**

### *Возможности практического применения электрогидродинамических волн*

*в полупроводниках* В последней главе диссертации обсуждаются возможности применения электрогидродинамических волн свободных носителей заряда в полупроводниках (главным образом, КЭГДВ как наиболее перспективных с точки зрения меньших потерь на затухание) в электронных устройствах, предназначенных для работы в терагерцевом диапазоне. Показано, что для их возбуждения и приема могут быть использованы известные из техники поверхностных акустических волн однофазные и решетчатые двухфазные преобразователи.

В качестве устройств обработки сигналов терагерцевой электроники на ЭГДВ предложены линии задержки, фильтры для радио- и видеоимпульсов, а также ЛЧМ сигналов, конвольверы и корреляторы. Показано, что линии задержки на основе КЭГДВ могут обеспечить время задержки до  $\sim 1$  мкс на частотах  $\sim 10^{11}$  Гц. Созданные на их основе фильтры для одиночных радиоимпульсов являются более широкополосными, чем аналогичные фильтры на поверхностных акустических волнах, так как имеют более высокие рабочие частоты. Переход на КЭГДВ позволяет увеличить также рабочие частоты фильтров для видеоимпульсов и ЛЧМ сигналов, причем в последних могут использоваться дисперсионные свойства нелинейных электрогидродинамических волн. Показано, что нелинейное взаимодействие встречно бегущих КЭГДВ можно использовать для их свертки или получения функции корреляции. Время взаимодействия в таких конвольверах и корреляторах, в силу более высокой скорости распространения КЭГДВ, меньше, чем в аналогичных устройствах на поверхностных акустических волнах, зато полоса пропускания шире.

Возможность дифракции света на электрогидродинамических волнах, длина волны которых соизмерима с длиной волны света, может быть использована в оптоэлектрогидродинамических устройствах обработки сигналов: модуляторах, дефлекторах и сканерах, фильтрах, процессорах, линиях задержки с плавно регулируемым временем задержки и т. п. аналогов соответствующих акустооптических устройств.

На основе описанной в гл. 6 теоретической модели взаимодействия КЭГДВ с дрейфовым током сделан вывод о возможности создания усилителей и генераторов терагерцевого диапазона.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. На основе анализа большого числа работ по гидродинамическим гравитационным волнам на поверхности плоского слоя жидкости, внутренним волнам в стратифицированной жидкости и на границе раздела двух разнородных жидкостей, а также авторских работ по их центробежным аналогам во вращающихся и вихревых потоках жидкости и газа разработаны общие принципы построения краевых задач и вывода дисперсионных уравнений, описывающих эволюцию малых возмущений волновой природы в таких средах. Проанализированы линейные и нелинейные, в том числе солитонные, режимы распространения указанных волн. Исследовано влияние вязкости и электропроводности среды на структуру волнового фронта и возможности образования солитонов.

2. На основе анализа баллистического режима движения свободных носителей заряда, их статистики и кинетики в слаболегированных примесных полупроводниках определены условия существования электрогидродинамических волновых явлений в полупроводниках, аналогичных вышеупомянутым гидродинамическим волнам. Построена физическая модель

полупроводника, обеспечивающая выполнение условий для существования электрогидродинамических волновых процессов и путем численных оценок исследованы возможности их существования в реальных полупроводниках с учетом явлений на поверхности образца.

3. Теоретически предсказано и численными расчетами обосновано существование поверхностных электрогидродинамических волн (ПЭГДВ) свободных носителей заряда в полупроводниках. Выведено соответствующее дисперсионное уравнение. Исследованы линейные и нелинейные режимы распространения ПЭГДВ, в том числе солитонного характера. Построена теория затухания линейных ПЭГДВ. Показано, что большое затухание, связанное с трением зарядовой квазижидкости о диэлектрический подслой, ограничивает возможности практического применения ПЭГДВ. Исследовано влияние диссипации на распространение нелинейных ПЭГДВ. Показано, что она приводит к сглаживанию солитонных осцилляций вблизи фронта ударной волны и ограничивает возможности возбуждения солитонов.

4. Теоретически предсказано и численными расчетами обосновано существование внутренних электрогидродинамических волн (ВЭГДВ) в полупроводниках с градиентом концентрации свободных носителей заряда и в гетеропереходах. Показано, что в последнем случае может иметь место волноводный режим распространения ВЭГДВ. Выведены выражения для длины волны в соответствующем волноводе для резкого гетероперехода и гетероперехода с размытыми границами.

5. Теоретически предсказано и численными расчетами обосновано существование контактных электрогидродинамических волн (КЭГДВ) на границе раздела двух полупроводниковых слоев, а также в  $n - n^+$  - и  $p - p^+$  - переходах. Показано, что, вследствие относительно малого затуха-

ния, КЭГДВ являются наиболее предпочтительными для практического использования в устройствах обработки сигналов терагерцевого диапазона.

6. Исследовано взаимодействие КЭГДВ с током дрейфа свободных носителей заряда в одном из контактирующих слоев. Выведено дисперсионное уравнение для «горячей» КЭГДВ, в общем случае, для диссипативной среды. Исследованы возникающие при этом неустойчивости типа Кельвина - Гельмгольца и их зависимость от величины диссипации энергии. Определены условия существования прямых и обратных волн, волн положительной и отрицательной энергии. Найдена объемная плотность энергии для всех указанных волн. На основе рассмотрения взаимодействия «холодной» КЭГДВ с быстрой и медленной волнами пространственного заряда в токовом пучке построена теория усиления и генерации КЭГДВ в  $n - n^+$  и  $p - p^+$  - переходах с продольным током дрейфа.

7. Рассмотрены возможности практического применения ЭГДВ в устройствах обработки сигналов: линиях задержки, фильтрах, конвольверах и корреляторах, оптоэлектрогидродинамических устройствах (модуляторах, дефлекторах, сканерах, линиях задержки с плавно регулируемым временем задержки), а также усилителях и генераторах терагерцевого диапазона. Сделан вывод о перспективности использования электрогидродинамических волн в полупроводниках как основы для терагерцевой электроники.

Основные положения диссертации отражены в **следующих работах:**

1. Браже Р.А. Центробежные солитоны в поступательно-вращательном потоке жидкости // ПММ. 1988. Т. 52. Вып. 3. С.516 — 519.
2. Браже Р.А. Влияние вязкости на условия формирования центробежных солитонов в поступательно-вращательном потоке жидкости // ПММ. 1989. Т. 53. Вып. 3. С.1035 — 1037.

3. Браже Р.А. Центробежные волны и солитоны в поступательно-вращательных потоках // Вещество и поле. / Под ред. Е.Г. Сменковского. Ульяновск, 1991. С. 10—16.
4. Браже Р.А. Внутренние центробежные волны и солитоны в радиально-стратифицированных вихревых потоках // Динамика волновых явлений и солитоны. Тр. 3-го Всерос. научн. сем. Москва, МГУ, 1992. С. 91 — 94.
5. Браже Р.А. Внутренние центробежные волны и солитоны в вихревых потоках // Частицы. Волны. Вещество. / Под ред Р.А. Браже. Ульяновск, 1993. С. 26—33.
6. Браже Р.А. Вихревые и солитонные явления в атмосферном электричестве. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993. — 72 с.
7. Браже Р.А. Внутренние волны свободных носителей заряда в полупроводниках // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. № 3. С. 370 — 377.
8. Браже Р.А., Садулин В.В. Контактные электрогидродинамические волны свободных носителей заряда на границе раздела двух полупроводниковых слоев // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. № 9. С. 1164 — 1171.
9. Brazhe R.A. Charge carriers electrohydrodynamic waves in semiconductors as a basis for teraelectronics // Proc. 2-d Int. School-Conf. on Phys. Problems in Material Science of Semiconductors. Chernovtsi (Ukraine), 1997. P.265.
10. Браже Р.А., Ефимов В.В., Новикова Т.А. Нелинейные электрогидродинамические явления в полупроводниках в режиме баллистического переноса свободных носителей заряда // Тез. докл. 3-й Всерос. конф. «Полупроводники — 97», Москва, 1997. С. 200.
11. Браже Р.А. Нелинейная электрогидродинамика полупроводников // Вестник УлГТУ. 1997. Юб. вып. С. 162 — 167.
12. Браже Р.А., Новикова Т.А. Контактные электрогидродинамические волны отрицательной энергии в полупроводниках // Тез. докл. НПК с

межд. участ. «Новые методы, средства и технологии в науке, промышленности и экономике (НМСТ — 97)», Ульяновск, 1997. Ч. 2. С. 7 — 8.

13. Браже Р.А., Ефимов В.В. Туннельное взаимодействие встречных контактных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда // Там же. С. 5 — 6.

14. Браже Р.А., Ефимов В.В., Новикова Т.А. Электрогидродинамический гироскоп: теория, проблемы, перспективы // Там же. С. 3 — 5.

15. Браже Р.А. Высокоскоростные конвольверы и корреляторы на электрогидродинамических волнах в полупроводниках // Тр. Межд. НТК «Нейронные, реляторные и непрерывнологические сети и модели». Т. 4. «Математические и физические модели технических объектов». Ульяновск, 1998. С. 52—54.

16. Браже Р.А., Новикова Т.А. Устройства обработки сигналов на электрогидродинамических волнах в полупроводниках как компонент радиотехнических систем // Тез. докл. Всерос. НПК с участ. стран СНГ «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». Ульяновск, 1998. С. 73 — 74.

17. Браже Р.А., Вельмисов П.А., Логинов Б.В. Нелинейные проблемы в естествознании // Тр. Ульяновского Научного Центра «Ноосферные знания и технологии» РАЕН. 1997. Т. 1. Вып. 1. С. 62 — 72.

18. Браже Р.А. Терагерцевые устройства обработки сигналов на электрогидродинамических волнах в полупроводниках // Тез. докл. 5-го Межд. сов. — сем. «Инженерно-физические проблемы новой техники». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. С. 234 — 235.

19. Браже Р.А., Новикова Т.А. Электрогидродинамические волны в полупроводниках — новый тип волновых процессов, перспективный для терагерцевой электроники // Тез. докл. 5-й Всерос. НТК с межд. участ.

«Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники (ПЭМ— 98)». Дивноморское, 1998. С. 105.

20. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М. Неустойчивости Кельвина - Гельм-гольца в  $n - n^+$  - и  $p - p^+$  - переходах при наличии продольного тока дрейфа свободных носителей заряда // Тез. докл. шк. - сем. «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». Ульяновск, 1998. С. 5—6.

21. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Конвективные и абсолютные неустойчивости, вызванные взаимодействием контактных электрогидродинамических волн в  $n - n^+$  - и  $p - p^+$  - переходах с током дрейфа // Там же. С. 5.

22. Браже Р.А. Затухание электрогидродинамических волн свободных носителей заряда в полупроводниках. Ульяновск, 1999. — 10 с. — Деп. в ВИНТИ 27.01.99. № 261—В99.

23. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М. Условия распространения контактных электрогидродинамических волн свободных носителей заряда в полупроводниках. Ульяновск, 1999. — 17 с. — Деп. в ВИНТИ 05.04.99. №1042—В99.

24. Браже Р.А. Устройства обработки информации на электрогидродинамических волнах свободных носителей заряда в полупроводниках // Тр. Межд. конф. «Методы и средства преобразования и обработки аналоговой информации». Ч. 1. «Теория и общие вопросы обработки аналоговой информации» Ульяновск, 1999. С. 115 — 117.

25. Браже Р.А., Новикова Т.А. Усиление контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках током дрейфа свободных носителей заряда // Вестник УлГТУ. 1999. Т. 1/99. С. 30 — 35.

26. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Математическое моделирование электрогидродинамических волновых явлений в полупро-



- водниках // Тез. докл. Межд. конф. «Математические модели и методы их исследования». Красноярск, 1999. С. 48 — 49.
27. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М. Внутренние электрогидродинамические волны в гетеропереходах // Тез. докл. 6-й Межд. НТК «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники». Дивномор-ское, 1999. С. 5.
28. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Усиление контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках // Там же. С. 6.
29. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Усиление и генерация контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках // Радиоэлектронная техника. / Под. Ред. Д. В. Андреева. Ульяновск, 1999. С. 32 — 39.
30. Браже Р.А., Новикова Т.А. Взаимодействие контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках с токами // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 1 — 4.
31. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Анализ режимов усиления КЭГДВ в полупроводниках током свободных носителей заряда // Тез. докл. шк. - сем. «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». Ульяновск, 1999. С. 32 — 33.
32. Браже Р.А., Ефимов В.В. Интерференция встречных ВЭГДВ в полупроводниках при наличии диссипации энергии // Там же. С. 33 — 34.
33. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Электрогидродинамические неустойчивости в  $n - n^+$  - и  $p - p^+$  - переходах с продольным током дрейфа // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 11. С. 1105 — 1110.
34. Браже Р.А. Контактные электрогидродинамические волны в  $n - n^+$  - и  $p - p^+$  - переходах // Уч. записки УлГУ. Сер. Физическая. 1999. Вып.1(6).С.51—53.

35. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Математическое моделирование энергетических свойств контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках // Тр. 10-й Межвуз. конф. «Математическое моделирование и краевые задачи». Ч. 2. Самара, 2000. С. 30 — 32.
36. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М. Волноводное распространение внутренних электрогидродинамических волн в гетеропереходах // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 4. С. 452 — 455.
37. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Симметрия и асимметрия контактных электрогидродинамических волн в полупроводниках // Тез. докл. Межд. конф. «Симметрия и дифференциальные уравнения». Красноярск, 2000. С. 51 — 52.
38. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Электрогидродинамические волны в полупроводниках — окно в терагерцевую электронику // Матер. Второй Межд. конф. «Фундаментальные проблемы физики». Саратов, 2000. С. 48.
39. Браже Р.А., Ефимов В.В. Интерференция внутренних электрогидродинамических волн в полупроводниках с диссипацией энергии // Вестник УлГТУ. 2000. Вып. 2(10). С. 12 — 16.
40. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М. Волноводное распространение внутренних электрогидродинамических волн в гетеропереходах с размытыми границами // Там же. С. 17 — 19.
41. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Шустов М.И. Электрогидродинамические неустойчивости в  $n - n^+$  - и  $p - p^+$  - переходах с продольным током дрейфа в низкоомном слое // Тез. докл. шк.- сем. «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». Ульяновск, 2000. С. 24 — 25.
42. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Шустов М.И. Энергетические характеристики контактных электрогидродинамических волн в  $n - n^+$  - и

$P \rightarrow P^+$  - переходах с продольным током дрейфа в низкоомном слое // Там же. С. 25.

43. Браже Р.А., Мефтахутдинов Р.М., Новикова Т.А. Электродинамика — новое научное направление в физике и технике полупроводников // Тез. докл. Всерос. конф. «Необратимые процессы в природе и технике». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. С. 246 — 247.
44. Браже Р.А., Шустов М.И. Математическое моделирование процессов распространения электрогидродинамических волн в полупроводниках // Матер. Первой Всерос. научной internet-конф. «Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках». Вып. 1. Тамбов, 2001. С. 57—58.
45. Браже Р.А., Шустов М.И. Неустойчивость Кельвина - Гельмгольца в  $n \rightarrow n^+$  - переходе с током дрейфа в низкоомном слое. Ульяновск, 2001. —7с.—Деп. в ВИНТИ 13.02.01. №354—В 2001.35

Автореферат БРАЖЕ Рудольф

Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ, УСИЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ  
ЭЛЕКТРОГИГРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛН СВОБОДНЫХ  
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Подписано в печать 31.05.01. Формат 60x84/16. Бумага писчая.  
Печать офсетная. Усл.п.л.2,25. Уч.-изд.л. 2,025 Тираж 110 экз. Заказ  
1490.

Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Типография УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.