

Харьковский государственный университет

На правах рукописи



ЗАГИНАЙЛОВ Геннадий Иванович

ВОПРОСЫ ВЗАИМНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛНОВОДАХ

01.04.08 - Физика и химия плазмы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Харьков - 1994

АВ 30.962

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Харьковском государственном университете.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777706 (У)

Специальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор Киевского государственного университета КОЦАРЕНКО Николай Яковлевич;
- доктор физико-математических наук, профессор Харьковского педагогического университета ТКАЧ Юрий Владимирович;
- доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории радиоастрономического института АН Украины, г. Харьков, БОЕВ Анатолий Григорьевич.

Ведущая организация - Институт теоретической физики АН Украины.

Защита состоится " 4 " ноября 1994 г. в 15⁰⁰ час. на заседании специализированного ученого совета Д 053.06.01 Харьковского государственного университета /ЗІОІ08, г. Харьков, пр-т Курчатова, ЗІ, ауд. ЗОІ/.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан " 4 " октября 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого
совета

Азаренков Н.А.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вопросы распространения и взаимной трансформации плазменных и электромагнитных волн на резких и плавных неоднородностях в равновесных и неравновесных плазменных волноводах являются ключевыми при разработке и совершенствовании плазменных методов генерации СВЧ и ускорения заряженных частиц, интерпретации экспериментов по взаимодействию мощных волновых и кулпускулярных потоков с ионосферой и лабораторной плазмой. Эти и близкие вопросы затрагивались в ряде монографий и обзоров, а также в большом количестве оригинальных статей. Однако несмотря на это многие из них до сих пор недостаточно исследованы.

Процессы трансформации плазменных волн на продольных границах плазменных волноводов существенно влияют на характер возбуждения колебаний в продольно-ограниченных пучково-плазменных системах, определяя стартовые условия генерации, инкременты нарастания колебаний, а также КПД генерации. Однако методы расчета этих эффектов для реальных геометрий и плотных пучков сопряжены со значительными математическими и вычислительными трудностями. В строгой постановке даже для достаточно идеализированных геометрий данные задачи сводятся к сингулярным интегральным уравнениям общего вида или матричным задачам сопряжения аналитических функций на вещественной оси. В общем случае аналитическое решение подобных задач неизвестно. Традиционный переход к системе уравнений Фредгольма не приводит к значительным упрощениям при численном анализе. В то же время непосредственное применение прямых численных методов анализа сингулярных интегральных уравнений невозможно без дополнительной специальной модификации. Не

всегда эффективными оказываются и ряд современных методов, применяемых для анализа нерегулярных вакуумных и диэлектрических волноводов /метод шивания с учетом особенности на ребре, модифицированный метод вычетов, метод полуобращения и др./. В этой связи поиск новых строгих подходов, позволяющих в ряде частных случаев получить простые приближенные аналитические выражения, а также построить эффективные численные алгоритмы является актуальным.

Плазменным волноводам естественно присущи плавные продольные неоднородности. Плавно нерегулярные участки плазменных волноводов можно использовать как для повышения эффективности пучково-плазменного взаимодействия, так и для повышения согласования плазменного резонатора с выходными трактами. Этим, в основном, и определяется интерес к их исследованию. Однако к настоящему времени отсутствует строгий подход, разработанный специально для плазменных волноводов, позволяющий с единой точки зрения исследовать большое количество практически интересных задач. Как правило, продольно-неоднородные плазменные и пучково-плазменные волноводы рассматривались либо в рамках упрощенных геометрий, которые допускают прямое разделение переменных, после чего задача сводится к хорошо изученному одномерному случаю, либо в рамках теории возмущений или приближения геометрической оптики, пределы применимости которых в двумерно неоднородных случаях не совсем очерчены. В ряде практических задач использовался метод поперечных сечений, который однако не получил широкого распространения, поскольку геометрия конкретных задач была не совсем удобна для его применения. В результате формулировка на основе этого метода оказывалась достаточно сложной. Как известно, в случае открытых волноводов он приводит к бесконечной системе интегродифферен-

циальных уравнений. Поэтому основные закономерности распространения и взаимной трансформации плазменных и электромагнитных волн были изучены недостаточно полно. Как показали исследования, выполненные в рамках настоящей диссертации, часто в случае плазменных волноводов методически более целесообразно рассмотреть эквивалентную закрытую структуру, затем на основании анализа коэффициентов взаимодействия редуцировать полученную бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, далее устремить радиус металлического волновода в бесконечность. В результате мы приходим к более удобной для анализа системе нескольких обычных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, которая позволяет сравнительно просто исследовать основные закономерности взаимной трансформации плазменных и волноводных волн на заданных неоднородностях, а также поставить и исследовать обратную задачу — задачу синтеза плавных неоднородностей, т.е. по заданным коэффициентам трансформации произвести построение необходимого профиля продольной неоднородности. Полученные в этом направлении результаты весьма актуальны для поиска путей совершенствования конструкций плазменных генераторов СВЧ на нерелятивистских и субрелятивистских пучках.

В экспериментальных условиях плазменные волноводы являются также поперечно неоднородными. Влияние поперечной неоднородности на дисперсию поверхностных и объемных волн, на эффективность пучкового возбуждения плазменных волн рассматривалось и ранее. Как правило подобные исследования даже для модельных профилей неоднородности сводится к анализу корней сложных трансцендентных уравнений и возможны только на основе численных методов. Поэтому основные усилия в этой области направлены на преодоление различных вычислительных трудностей и разработку

численных схем анализа. В настоящее время построена численная методика нахождения дисперсионных кривых для плазменного волновода с произвольной радиальной неоднородностью и степенью замагниченности. Однако, численные исследования не совсем удобны для анализа высших радиальных и азимутальных гармоник, а также не позволяют провести столь исчерпывающие качественные исследования, как аналитические. В этой связи поиск модельных геометрий, допускающих получение простых аналитических выражений для спектров и распределения полей собственных волн плазменных волноводов являются актуальным. Полученные в этом направлении результаты могут существенно облегчить как построение численных алгоритмов для более сложных геометрий, так и исследовать влияние неоднородности на более сложные процессы, например, на особенности пучкового возбуждения плазменных волн, нелинейные свойства и др. В настоящей работе для спектров высших радиальных и азимутальных объемных волн в замагниченном плазменном волноводе с параболическим профилем радиальной неоднородности получены простые аналитические формулы, позволяющие провести детальные исследования влияния радиальной неоднородности. В результате созданы благоприятные предпосылки для построения нелинейной многоволновой теории пучково-плазменного взаимодействия, а также для изучения других нелинейных эффектов в радиально неоднородных плазменных волноводах.

Большой интерес для физики плазмы и различных приложений представляет изучение нелинейных механизмов взаимодействия плазменных и электромагнитных волн. Ввиду большого многообразия этих механизмов здесь более подробно остановимся лишь на эффектах излучения солитонов плазменных волн на частоте собственных колебаний поля, а также на параметрической

неустойчивости поверхностных волн в поле внешней электромагнитной волны. Первый эффект рассматривался ранее в приближении безграничной плазмы. Причем рассматривалось излучение, возникающее на гармониках основной частоты. Показано, что он имеет место как в однородной, так и неоднородной плазме и вполне может служить основным каналом диссипации энергии в условиях сильной параметрической турбулентности в магнитоактивной плазме. Данное явление можно использовать для целей диагностики плазменной турбулентности, а также интерпретации различных эффектов, например, искусственного радиоизлучения, возникающего при воздействии на ионосферу пучками мощных электромагнитных волн. В настоящей работе показано, что подобный эффект присущ не только объемным, но и поверхностным солитонам, причем из-за прикатости последних к границе плазмы излучение может быть более эффективно. К тому же данный механизм излучения может проявляться как в магнитоактивной, так и в изотропной плазме.

Исследования параметрической неустойчивости поверхностных волн в поле мощной электромагнитной волны актуальны для идентификации механизмов аномального поглощения лазерного излучения плазмой, а также механизмов взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твердых тел. Как известно сильная деформация и образование скачка плотности плазмы вблизи критического сечения в поле мощного излучения приводят к существенному уменьшению уровня резонансного поглощения /что предсказывается как в рамках стационарного, так и динамического подходов/. Поскольку обычное столкновительное поглощение также убывает с ростом напряженности поля, для объяснения имеющихся экспериментальных фактов привлекается ряд других процессов. В частности аномальное поглощение ла-

зерного излучения может быть обусловлено возбуждением на образующемся вблизи критического сечения скачке плотности поверхностных волн.

Параметрическая неустойчивость квазистатических поверхностных волн /частота падающей волны лежит вблизи частоты отсечки поверхностных волн/ подробно изучена в работах. Показано, что вследствие большого затухания поверхностных волн, низкочастотные движения имеют несобственный характер. Когда частота падающей волны существенно меньше частоты отсечки для поверхностных волн, возможна неустойчивость с возбуждением поверхностных волн на комбинационных частотах $\omega_s = \omega_1 + \omega_2$. Причем этот эффект возможен лишь для E поляризации и при наклонном падении волны накачки. Линейная стадия данной неустойчивости рассматривалась ранее. Однако вопрос об эффективности передачи энергии плазме вследствие развития данной неустойчивости требует исследования нелинейной стадии, когда амплитуды возбуждаемых волн не малы по сравнению с амплитудой волны накачки. Отметим, что нелинейная теория параметрических неустойчивостей в ограниченной плазме недостаточно разработана в отличие от случая безграничной плазмы.

Целью диссертационной работы является:

- развитие теории дифракции волн поверхностного типа на резких неоднородностях плазменного волновода;
- теоретическое изучение процессов распространения и взаимной трансформации плазменных и электромагнитных волн в продольно неоднородных плазменных волноводах;
- исследование некоторых нелинейных механизмов взаимодействия плазменных и электромагнитных волн в ограниченной плазме.

Научная ценность и новизна. Результаты проведенных исследований позволяют расширить, углубить и строго обосновать ряд теоретических аспектов, касающихся распространения, трансформации и дифракции плазменных волн в неоднородных плазменных волноводах.

Полученные в диссертации результаты позволяют наметить пути совершенствования плазменных генераторов СВЧ, дать интерпретацию некоторых экспериментальных фактов по взаимодействию мощного лазерного излучения с плазмой и металлом, по аномальному рассеянию волн Трайвелписа-Гоудда на низкочастотных колебаниях в двумерно неоднородной плазме, а также по аномальному затуханию мощных импульсов поверхностных волн.

1. Предложен оригинальный строгий подход к анализу дифракции волн поверхностного типа на резких неоднородностях плазменного волновода. В ряде наиболее интересных случаев исследования доведены до простых аналитических выражений, удобных при анализе экспериментальных фактов.
2. Известными методами решен в замкнутом виде ряд конкретных задач по дифракции поверхностных волн, распространяющихся на границе плазма-металл, на кромке металлической полуплоскости. В ряде предельных случаев полученные результаты представлены в виде простых аналитических формул удобных для проведения оценок и численных расчетов.
3. Представлено асимптотическое решение задачи дифракции на клиновидных структурах, позволяющих сделать оценку электрической прочности клиновидных геометрий, возникающих в приборах плазменной и вакуумной электроники.
4. Развита новый численно-аналитический подход к решению широкого класса двумерных задач дифракции. Приведены кон-

кретные численные результаты, демонстрирующие погрешность и скорость сходимости численного решения к точному.

5. Предложена строгая математическая модель для описания взаимодействия плазменных и волноводных волн в продольно-неоднородных волноводах, частично заполненных плазмой. Построена теория синтеза продольно-неоднородных плазменных волноводов, позволяющая по заданным коэффициентам преобразования построить необходимые профили продольных неоднородностей. Полученные результаты применены для плавно неоднородных волноводных переходов, повышающих согласование плазменных резонаторов на медленных волнах с выходными трактами.
6. Предсказан и исследован эффект излучения поверхностных солитонов, распространяющихся в ограниченных плазменных и полупроводниковых структурах. Обсуждается механизм затухания поверхностных солитонов на основе данного эффекта, а также его роль при формировании солитонов.
7. Рассмотрена нелинейная стадия параметрической неустойчивости поверхностных волн в полуграниченной плазме. Численно исследована динамика выхода неустойчивости на стационар. На основе полученных результатов обсуждается эффективность поглощения электромагнитной энергии плазмой, в результате развития данной неустойчивости. Детально проанализированы случаи сильной и слабой надпороговости.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- I. Изучены дифракционные эффекты, наблюдающиеся при распространении поверхностных волн в плазменном волноводе с реакими неоднородностями. В ряде практических случаев

приведены аналитические выражения для коэффициентов отражения, прохождения, а также диаграммы направленности излучения в дальней зоне. Показано, что эффективность трансформации в излучение увеличивается с уменьшением замедления поверхностной волны. При этом диаграмма направленности становится более узкой, а ее максимум смещается к оси волновода.

2. Построена строгая теория коаксиального вывода энергии из плазменного резонатора. Показано, что при продвижении в миллиметровый диапазон генерации возможно ухудшение согласования плазменного резонатора с коаксиальной линией.
3. На основе строго полученных результатов сделаны оценки дифракционных эффектов, наблюдающихся при падении поверхностных волн, распространяющихся на границе плазма-металл, на кромку металлической подушечности.
4. Предложен численно-аналитический подход к двумерным задачам дифракции, позволяющий построить устойчивый численный алгоритм для широкого круга дифракционных задач, возникающих при математическом описании процессов в электродинамических структурах приборов плазменной и вакуумной электроники.
5. Показано, что солитоны поверхностного типа, распространяющиеся в ограниченных плазмоподобных средах, способны излучать электромагнитные волны в окружающее пространство на основной частоте. Получены эффективные инкременты затухания, обусловленного данным механизмом.
6. Исследование эффективности взаимной трансформации плазменных и волноводных волн на продольных неоднородностях волноводов с плазменным заполнением. Поставлена и решена за-

дача синтеза неоднородных плазменных волноводов, обеспечивающих широкополосное преобразование плазменных волн в электромагнитные.

7. Исследование спектра высших радиальных и азимутальных волн Трайвелписа-Гоудда в неоднородных замагниченных плазменных волноводах. Показано, что радиальная неоднородность приводит к большей локализации энергии волн Трайвелписа-Гоудда вблизи оси. В низкочастотной области дисперсионные кривые близки к соответствующим кривым однородного волновода с той же погонной плотностью.
8. Предложен новый подход к изучению распространения плазменных волн в двумерно неоднородной плазме. Получены оценки эффектов отражения и трансформации в высшие радиальные гармоники вблизи точки критической плотности в двумерно неоднородной плазме. Показано, что эти эффекты могут играть существенную роль в механизме аномального рассеяния волн Трайвелписа-Гоудда на низкочастотных колебаниях.
9. Изучена нелинейная стадия параметрической неустойчивости поверхностных волн. Показано, что в случае большой надпороговости данный процесс может существенно влиять на эффективность передачи энергии плазме. Плотность энергии поверхностных волн на поверхности плазмы в режиме насыщения может существенно превосходить плотность энергии падающей волны. Наблюдается существенная нелинейная модификация коэффициента отражения. В случае слабой надпороговости /когда линейный инкремент много меньше ионной ленгмюровской частоты/ влияние рассмотренных эффектов ослабляется из-за быстрой стабилизации данной неустойчивости на низком уровне, за счет нелинейного сдвига частот поверхностных волн.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: Международной конференции по поверхностным волнам в плазме /Благоевград, Болгария, 1981/, Международной конференции по физике плазмы /Киев, 1987/, Международных симпозиумах по волнам и неустойчивости в плазме полупроводников /Вильнюс, 1987, Паланга, 1990/, Международном симпозиуме по антеннам и распространению /Саппоро, Япония, 1992/, Международном симпозиуме по методу дискретных особенностей в задачах математической физики /Харьков, 1993/, на III - VI Всесоюзных конференциях "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой" /Алма-Ата, 1982; Ташкент, 1985, 1989; Душанбе, 1991/, I V Всесоюзной конференции "Взаимодействие лазерного излучения, плазменных и электронных потоков с веществом" /Фрунзе, 1990/, VIII Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике /Свердловск, 1990/, V Всесоюзном симпозиуме "Метод дискретных особенностей в задачах математической физики" /Одесса, 1991/, Всесоюзных семинарах по турбулентности и нелинейным явлениям в плазме /Москва ФИАН, 1985-1988 гг., рук. член.-корр РАН Силин В.П./, I Украинском симпозиуме "Физика и техника ММ и СВЧМ радиоволн" /Харьков, 1992/, II Всесоюзном семинаре по коллективному взаимодействию пучков с плазмой /Новосибирск, 1989/, на семинаре в НИИ "Харьковский Физико-технический Институт" /Харьков, 1994/, руководителем академик АН Украины Файнберг Я.Б. и частично вошли в монографию А.Н. Кондратенко, В.М. Куклина "Основы плазменной электроники". - М.: Энергоатомиздат, 1988, - 320 с.

Исследования выполнялись в рамках важнейшей тематики кафедры общей и прикладной физики ХГУ "Разработка методов повышения эффективности преобразования кинетической энергии частиц в энергию электромагнитного излучения с целью созда-

нии плазменных генераторов и усилителей /номер госрегистрации 0186.0134719/.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 29 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 215 страниц, в том числе 30 рисунков и списка цитируемой литературы на 22 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследований, проанализировано современное состояние рассматриваемых вопросов, сформулирована цель работы и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе диссертации рассматривается дифракция поверхностных волн на резких неоднородностях плазменных волноводов, а также развита строгая теория коаксиального вывода энергии из плазменного резонатора. Использован подход на основе метода Винера-Хопфа в интерпретации Джонса. Дифракционное поле представлено в виде бесконечных рядов с бесконечным количеством констант, которые удовлетворяют бесконечной системе алгебраических уравнений. Показано, что полученные ряды сходятся.

В разделе I.I. рассмотрен случай слоистой геометрии. В ряде наиболее интересных частных случаев выражения для дифракционных полей доведены до простых аналитических формул. Показано, что диаграмма направленности излучения имеет одно-

лестковый вид. Эффективность преобразования энергии поверхностной волны в излучение увеличивается при уменьшении замедления поверхностной волны. При этом угловое распределение излучения становится более узконаправленным. Максимум диаграммы направленности смещается к оси волновода.

В разделе 1.2. метод и результаты обобщаются на случай цилиндрической геометрии. Подробно проанализирован случай оптически тонкого плазменного волновода. Показано, что с уменьшением радиуса волновода, эффективность излучения уменьшается, ширина диаграммы направленности увеличивается, так же как и коэффициент отражения.

Полученные результаты находятся в соответствии с результатами рассеяния поверхностных волн на плавных неоднородностях, а также с результатами экспериментальных исследований.

В разделе 1.3. построена строгая теория коаксиального вывода энергии из плазменного резонатора. Для коэффициентов отражения получена система линейных алгебраических уравнений. В случае хорошего согласования полученная оценка для коэффициента отражения основной плазменной волны совпадает с приведенной ранее. Показано, что когда длина волны становится порядка радиуса плазменного волновода, приводимые ранее оценки становятся некорректными.

Вторая глава диссертации посвящена решению ряда дифракционных задач в случае полуограниченных плазменных структур.

В разделе 2.1. рассматривается задача дифракции и возбуждения поверхностной волны, распространяющейся на границе плазма-металл при учете пространственной дисперсии на кремке металлической полуплоскости. Дифракционное поле найдено в замкнутом виде. В ряде предельных случаев сделаны оценки

потерь на излучение при отражении поверхностной волны краем металлической полуплоскости. Также приведены оценки эффективности возбуждения данных волн плоскими и обычными поверхностными волнами, распространяющимися на границе плазма-вакуум.

В разделе 2.2. рассматривается дифракция поверхностных волн, распространяющихся на границе плазма-металл поперек магнитного поля, на кромке металлической полуплоскости. Показано, что в интервале частот $\omega_2 < \omega \ll \omega_e$, ω_2 - нижняя гибридная частота, ω_e - электронная циклотронная частота, преобразование энергии данной волны в излучение может быть значительным.

В разделе 2.3. предложен новый численно-аналитический подход к двумерным задачам дифракции, сводящимся к модифицированному уравнению Винера-Хопфа, либо к системе сингулярных интегральных уравнений. Построен численный алгоритм, сделана оценка скорости сходимости численного решения к точному. Эффективность численного решения иллюстрируется на примере дифракции электромагнитной волны на клиновидной структуре.

В разделе 2.4. предложено асимптотическое решение задачи дифракции электромагнитной волны на прямоугольной клиновидной структуре, в результате которого найдена аналитическая связь между амплитудой падающей волны и полем вблизи ребра. На основе полученного решения можно сделать оценку эффектов увеличения плотности энергии вблизи ребер клиновидных геометрий, встречающихся в приборах плазменной и вакуумной электроники, в зависимости от амплитуд распространяющихся волн.

В третьей главе рассматриваются вопросы взаимной трансформации поверхностных и волноводных волн в продольно неод-

нородных плазменных волноводах.

В разделе 3.1. обоснована целесообразность применения метода поперечных сечений к анализу продольно неоднородных волноводов с плазменным заполнением. Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений описывающая взаимодействие плазменных и волноводных волн. Получены и проанализированы коэффициенты связи. Основное внимание уделено волноводам с изменяющимся радиусом и продольным градиентом плотности плазмы. Сделаны оценки параметров неоднородных волноводных переходов, необходимых для повышения согласования плазменного резонатора с выходными трактами.

В разделе 3.2. развита теория оптимальных волноводных переходов. В ее основе лежит задача синтеза профиля продольной неоднородности по заданной матрице рассеяния. Для поверхностных волн синтезированы неоднородные переходы с изменяющимся радиусом и плотностью плазмы, обеспечивающие минимальные потери на отражение при минимальной длине в широком диапазоне частот. Полученные результаты применены для совершенствования конструкций плазменных генераторов СВЧ.

В разделе 3.3. рассмотрено взаимодействие поверхностных и волноводных волн на неоднородных переходах содержащих критические сечения. Показано, что в этом случае эффективность трансформации может быть высокой (~40%), даже при плавном изменении параметров волновода, а также при небольшом изменении параметров на всем неоднородном участке.

В четвертой главе рассматриваются дисперсионные свойства и трансформация волн Трайвелписа-Гоудда /ТГ/ в двумерно неоднородных плазменных волноводах.

В разделе 4.1. для замкнутого плазменного волновода

с параболическим радиальным профилем плотности плазмы получены простые аналитические выражения для спектра высших радиальных и азимутальных TE мод.

Показано, что радиальная неоднородность приводит к понижению фазовой скорости TE мод и большей локализации полей вблизи оси волновода. В низкочастотном пределе дисперсионные кривые для TE мод близки к соответствующим кривым однородного плазменного волновода с той же погонной плотностью.

В разделе 4.2. рассматриваются вопросы распространения TE мод в двуметрно-неоднородной плазме. Показано, что в случае кусочнооднородного поперечного профиля эффективность отражения и возбуждения высших гармоник возрастает вблизи точки критической плотности. Сделаны оценки эффектов отражения и трансформации также в случае параболического профиля поперечной неоднородности. На основе полученных результатов дана интерпретация эффектов аномального рассеяния TE мод ионнозвуковых колебаниях вблизи критической точки в двуметрно-неоднородной плазме.

В разделе 4.3. рассматриваются эффекты преобразования объемных плазменных волн в волноводные на участке волновода с изменяющимся радиусом и заполнением в виде трубчатой плазмы. Показано, что для оптимального профиля неоднородности трансформация плазменной волны в волноводную может достигать величины $\sim 90\%$.

Пятая глава посвящена изучению некоторых нелинейных механизмов взаимодействия плазменных и электромагнитных волн.

В разделе 5.1. показано, что распространение поверхностных солитонов в ограниченных плазменных системах сопровождается излучением в вакуум. Для солитона огибающей высокочас-

тотной поверхностной волны сделана оценка эффективности излучения. Найдены условия, когда он может конкурировать с ними.

В разделе 5.2. сделаны оценки излучательного механизма диссипации для солитонов, распространяющихся в полупроводниковых пластинах. Показано, что данный эффект может привести к существенному повышению пороговой мощности, необходимой для образования солитона. Однако в рассмотренном случае данный механизм затухания не может конкурировать с линейными.

В разделе 5.3. изучена нелинейная стадия параметрической неустойчивости поверхностных волн на комбинационных частотах в поле внешней волны. Показано, что в случае сильной надпороговости /или в плазме с бесконечно тяжелыми ионами/ плотность энергии поверхностных волн на границе плазмы в режиме насыщения может существенно превышать плотность энергии волны накачки. В результате возможна сильная нелинейная модификация коэффициента отражения.

В случае слабой надпороговости рассматриваемая неустойчивость стабилизируется на существенно более низком уровне /за счет влияния ионных нелинейностей на сдвиг частот поверхностных волн, что приводит к рассогласованию условий пространственно-временного синхронизма/. В результате влияние рассматриваемого процесса на эффективность передачи энергии плазме оказывается малой.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Загинайлов Г.И. Электромагнитное излучение поверхностных солитонов. // Письма в ЖТФ. - 1988. - Т. 14, № 14, С. 1426-1429.
2. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Прохоренко Е.М. Эффективный метод вывода энергии интенсивных медленных волн из плазменного волновода. // Письма в ЖТФ. - 1989. - Т. 15, № 10, С. 42-45.
3. Загинайлов Г.И., Синюгин А.В. О спектре волн Трайвелписа-Гоулда в неоднородном замагниченном плазменном волноводе. // Письма в ЖТФ. - 1994. - Т. 20, № 1, С. 67-70.
4. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Прохоренко Е.М. К проблеме вывода СВЧ энергии из плазменного волновода. // ЖТФ. - 1988. - Т. 58, № 8, С. 1637-1639.
5. Загинайлов Г.И., Куклин В.М. Нелинейная теория параметрического возбуждения поверхностных волн в сильно неизотермической плазме. // Физика плазмы. - 1986. - Т. 12, № 9, С. 1051-1056.
6. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Куклин В.М. К вопросу о выводе энергии поверхностной волны из плазменного волновода. // Изв. вузов, Радиофизика. - 1984. - Т. 27, № 9, С. 1178-1184.
7. Загинайлов Г.И., Щербинина И.Б. Особенности дифракции поверхностных волн на продольном скачке плотности цилиндрического плазменного волновода. // Изв. вузов, Радиофизика. - 1988. - Т. 31, № 7, С. 855-861.

8. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Кушлин В.М. Об одной возможности вывода энергии поверхностной волны из плазменного волновода. // Радиотехника и электроника. - 1984. - Т. 28, № 4, С. 800-802.
9. Азаренков Н.А., Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н. Дифракция и возбуждение поверхностных волн, распространяющихся на границе плазма-металл. // Радиотехника и электроника. - 1986. - Т. 31, № 10, С. 1889-1894.
10. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Кушлин В.М. и др. К нелинейной теории взаимодействия излучения с поверхностными волнами плазмы. // Болг. физ. журнал. - 1983. - Т. 10, № 3, С. 353-368.
11. Загинайлов Г.И., Кушлин В.М., Севидов С.М. Особенности нелинейной динамики параметрической неустойчивости при воздействии электромагнитного поля на поверхность плазмы. // УФН. - 1983, - Т. 28, № 11, С. 1753-1755.
12. Загинайлов Г.И. До питання поширення хвиль Трайвелліса-Гюудда у двовимірній-неоднорідній плазмі. // УФН. - 1994. - Т. 39, № 7, С. 822-825.
13. Загинайлов Г.И., Прохоренко Е.М. Распространение поверхностных волн в продольно неоднородных плазменных волноводах. // В сб.: Взаимодействие и самовоздействие волн в нелинейных средах. - 1988. - Т. 1. Душанбе: Дониш, С. 204-213.

14. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Куклин В.М. и др. Механизмы стабилизации параметрических неустойчивостей поверхностных волн в плазме. // В сб.: Взаимодействие и самовоздействие волн в нелинейных средах. - Т. I. Душанбе: Дониш. - 1988, С. 127-138.
15. Загинайлов Г.И., Прохоренко Е.М. Особенности распространения поверхностных волн в плазменном волноводе при наличии критических сечений. // В сб.: Проблемы ядерной физики и космических лучей. - 1989. - вып. 31, С. 58-61.
16. Загинайлов Г.И., Прохоренко Е.М. О взаимодействии медленных и быстрых волн в продольно неоднородных волноводах с плазменным заполнением. // В сб.: Проблемы ядерной физики и космических лучей. - 1991. - вып. 34, С. 72-75.
17. Azarenkov N.A., Zaginailov G.I., Kondratenko A.N. et al. The parametric instabilities of surface waves. // Int. Conf. Surface waves in plasmas. Bulgaria, Contrib. Pap., 1981, P. 300 - 304.
18. Gandel Y.V., Zaginailov G.I. A new numerical method to solve wide variety of diffraction problems. // Proceedings of ISAP'92, Japan, 1992, Contrib. Pap., V. I, P. 225 - 228.
19. Zaginailov G.I. Asymptotic solution of diffraction problems in the cases of wedge geometries. // Proceedings of ISAP'92, Japan, 1992, V. 2, P. 625 - 628.
20. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н. Дифракция поверхностных волн, распространяющихся на границе плазма-металл. Деп. УкрНИИТИ № 2074 - 84 Деп.

21. Загинайлов Г.И., Кондратенко А.Н., Куклин В.М. О дифракционном способе вывода энергии поверхностной волны из плазменного волновода. // В сб.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Алма-Ата, 1982, С. 142-144.
22. Загинайлов Г.И. О согласовании плазменных мод с модами коаксиальной линии в плазменных СВЧ генераторах. // В сб.: VI Всесоюзная конференция "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Тезисы докладов, Душанбе, 1991, С. 115.
23. Загинайлов Г.И. О применении сингулярных интегральных уравнений в задачах дифракции на ступенчатых неоднородностях в волноводах. // В сб.: Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума "Метод дискретных особенностей в задачах математической физики", Ч. I, Одесса, 1991, С. 62.
24. Гандель Д.В., Загинайлов Г.И. Об одном подходе к решению задач дифракции на структурах с перпендикулярными границами. // В сб.: I Украинский симпозиум "Физика и техника ММ и СВЧМ радиоволн", Харьков, 1991, Тезисы докладов, Ч. I, С. 24-25.
25. Загинайлов Г.И., Прохоренко Е.М. Оптимальный профиль продольной неоднородности для собственных волн плазменного волновода. // В сб.: Всесоюзная конференция "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой". Тезисы докладов, Ташкент, 1989, С. 173.

26. Загинайлов Г.И., Прохоренко Е.М. Оптимизация согласования плазменного резонатора с выходными трактами и сильноточных СВЧ приборах. // В сб.: УШ Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Свердловск, 1990, Тезисы докладов. Ч. 2, С. 43-45.
27. Загинайлов Г.И. Об электромагнитном излучении, возникающем при распространении нелинейных плазменных волн в полупроводниковых пластинах. // В сб.: УП Всесоюзный симпозиум "Плазма и неустойчивости в полупроводниках", Палланга, 1969, Тезисы докладов, Ч. I, С. 147-149.
28. Загинайлов Г.И., Куклин В.М., Панченко И.П. К нелинейной теории параметрического воздействия мощного излучения на поверхность плазмopodobной среды. // В сб.: УI Всесоюзный симпозиум "Плазма и неустойчивости в полупроводниках". - 1966, Вильнюс, Тезисы докладов, С. 71-72.
29. Загинайлов Г.И., Куклин В.М. Насыщение параметрических неустойчивостей поверхностных волн в электрон-ионной плазме. // В сб.: IV Всесоюзная конференция "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой". Тезисы докладов, Ташкент. - 1985, С. 91-92.

Загинайлов Г.И. "Вопросы взаимной трансформации плазменных и электромагнитных волн в неоднородных плазменных волноводах". Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика и химия плазмы, Харьковский госуниверситет, Харьков, 1994.

Защищается 29 научных работ. Рассматриваются вопросы взаимной трансформации плазменных и электромагнитных типов волн на резких и плавных продольных неоднородностях плазменных волноводов. Рассмотрены также некоторые нелинейные механизмы трансформации плазменных и электромагнитных волн в ограниченных плазменных системах. Показано, что трансформация поверхностных и объемных волн в электромагнитные как на резких так и на плавных продольных неоднородностях может быть достаточно высокой. Рассмотрена и решена задача синтеза продольно-неоднородных плазменных волноводов, позволяющая построить оптимальный волноводный переход для эффективного преобразования плазменных волн в электромагнитные в широком диапазоне частот.

Предсказан и изучен эффект электромагнитного излучения, возникающего при распространении поверхностных солитонов в ограниченных плазмоподобных средах. Изучена параметрическая неустойчивость высокочастотных поверхностных волн, возникающая при падении мощной электромагнитной волны на поверхность плазмы. Приведены параметры плазмы, при которых она приводит к существенной модификации отражения и уровня диссипации в плазме.

Ключевые слова: трансформация, плазменный волновод, дифракция.

Zaginsailov G.I. Questions of mutual transformation of plasma and electromagnetic waves in inhomogeneous plasma waveguides. Doctor of Science thesis in physics and mathematics on speciality OI.04.08 - physics and chemistry of plasma. Kharkov State University, Kharkov, 1994.

29 scientific works are defended. The mutual transformation of plasma types of waves and electromagnetic ones on sharp and smooth inhomogeneities in plasma waveguides have been considered. Besides some nonlinear mechanisms of mutual transformation plasma and electromagnetic waves have been considered. It is shown that conversion of plasma surface and volume waves into electromagnetic ones can be rather high. The synthesis problems of longitudinally inhomogeneous plasma waveguides have been formulated and solved. They provide to construct optimal waveguide transition for efficient conversion of plasma waves into electromagnetic ones in wide frequency range.

The effect of electromagnetic radiation from surface plasma solitons has been predicted and treated. The parametric instabilities of surface waves in external electromagnetic wave field have been studied. The plasma parameters when they lead to the sufficient nonlinear modification of reflection level and dissipation in plasma are obtained.

Подписано в печать 26.09.94. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Усл.п.л. 2,0. Уч.-изд.л. 2,0. Тираж 100. Заказ №172.

Харьков-310108, ротاپринт ННЦ ХФТИ

1150002

AB 30.962

AB 30.962