

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ДЕНИСЕНКО ИГОРЬ БОРИСОВИЧ

ВОЗБУЖДЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА
ГРАНИЦЕ ПЛАЗМОПОДОБНОЙ СРЕДЫ С МЕТАЛЛОМ

01.04.08 - физика и химия плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ХАРЬКОВ - 1996

333.7
716 33.389
Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Харьковском ЛНБ України ім.В.Стефаника



Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Азаренков Николай Алексеевич 00761424 (0)

профессор Азаренков Николай Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Онищенко Иван Николаевич
(ИИИ ХФТИ, г.Харьков)

кандидат физико-математических наук,
доцент Бизюков Александр Анатольевич
(ХГУ г.Харьков)

Ведущая организация : Научный Физико Технологический Центр
Минобразования и НАН Украины
(г.Харьков)

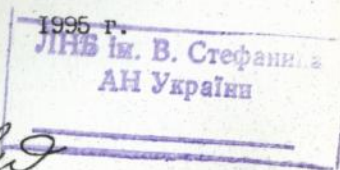
Защита состоится " 22 " декабря 1995 г. на заседании
специализированного совета Д 02.02.12 в Харьковском
государственном университете (310108, г.Харьков,
пр.Курчатова 31, ауд.301) в 17⁰⁰.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ (310077, г.Харьков, пл.Свободы, 4).

Автореферат разослан " 14 " ноября 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физ. - мат. наук

Азаренков Н.А.



I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Изучение дисперсионных характеристик, способов возбуждения и нелинейных свойств поверхностных волн (ПВ) на границе плазмopodobной среды с металлом в настоящее время представляет общезначимый и практический интерес. Общезначимый интерес вызван, главным образом, возможностью использования моделей и методов расчёта волновых свойств рассматриваемых структур в газовой и твердотельной плазме, а также в ряде других областей физики. Практический интерес связан с тем, что структуры плазмopodobная среда- металл находят широкое применение в плазменной и полупроводниковой электронике, физике газового разряда, плазменной технологии, задачах УТС и других областях физики.

Свойства ПВ в структурах плазмopodobная среда - металл по сравнению со свойствами ПВ, распространяющимися на границе раздела сред плазма - диэлектрик и плазма - плазма, на сегодняшний день наименее изучены. Даже линейная теория ПВ, распространяющихся на границе плазмopodobной среды с металлом, ещё далека от завершения. Поэтому и возникла настоятельная необходимость в рассмотрении комплекса вопросов, связанных с линейной теорией, возбуждением и изучением нелинейных свойств ПВ на границе плазмopodobная среда - металл. Так, ряд вопросов линейной теории данных ПВ в холодной плазме, таких как влияние диэлектрической прослойки и конечной проводимости металла на дисперсионные свойства поверхностных волн, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля; изучение дисперсионных свойств ПВ,

распространяющихся на границе раздела полупроводниковой сверхрешётки (СР) с металлом, и ряд других не были отражены в имеющихся на сегодняшний день работах. Кроме того, осталось много нерешённых вопросов, связанных с распространением аксиально - симметричных ПВ и азимутальных поверхностных волн (АПВ), распространяющихся в структуре цилиндрическая металлическая антенна - плазма с вакуумной прослойкой в присутствии внешнего аксиального магнитного поля.

В настоящее время ещё окончательно не решён вопрос о выборе наиболее эффективного способа возбуждения ПВ в структурах плазмopodobная среда - металл. Параметрический и пучковый способы возбуждения ПВ в рассматриваемых структурах частично изучены некоторыми авторами. Вопрос же, связанный с возбуждением ПВ в скрещённых электрическом и магнитном полях вблизи циклотронных частот, остался невыясненным.

Достаточно большое количество вопросов, связанных с нелинейной динамикой ПВ в структурах плазмopodobная среда - металл, на сегодняшний день ещё не изучены.

В настоящее время ПВ интенсивно исследуются также в связи с возможностью их использования для создания и поддержания газовых разрядов. Исследования в основном проводились для газовых разрядов, поддерживаемых ПВ в структурах плазма - диэлектрик. Вопрос же о создании и поддержании плазмы газового разряда ПВ, распространяющейся вдоль металлической антенны, погружённой в магнитоактивную плазму, ранее не рассматривался.

В связи с вышеизложенным становится очевидной необходимость исследования перечисленных выше вопросов.

Целью диссертационной работы является теоретическое

исследование комплекса вопросов, связанных с изучением дисперсионных свойств, возбуждения и нелинейных свойств ПВ в структурах плазмopodobная среда - металл.

При этом ставятся следующие задачи:

- исследование дисперсионных свойств, механизмов затухания и способов возбуждения ПВ в планарных и цилиндрических структурах.
- исследование дисперсионных свойств и генерации второй гармоники поверхностных волн, распространяющихся на боковой поверхности СВ, ограниченной металлом.
- исследование нелинейных свойств потенциальных ПВ, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля в структуре полупроводник n - типа с конечным газокинетическим давлением - металл.
- исследование структуры газового разряда, создаваемого и поддерживаемого ПВ, распространяющейся вдоль внешнего магнитного поля в структуре цилиндрическая металлическая антенна - вакуумная прослойка - плазма.

Научная новизна и практическая ценность. Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Аналитически исследованы дисперсионные свойства ПВ и АПВ, распространяющихся в присутствии внешнего аксиального магнитного поля в структуре цилиндрическая металлическая антенна - вакуумная прослойка - плазма.
2. Изучено влияние диэлектрической прослойки и конечной проводимости металла на дисперсионные свойства ПВ, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля.
3. Исследованы дисперсионные свойства ПВ, распространяющихся на боковой поверхности СВ, ограниченной металлом.
4. Показана возможность возбуждения ПВ, распространяющихся

перпендикулярно скрещенным электрическому и магнитному полям вблизи циклотронных частот.

5. Исследовано нелинейное самовоздействие потенциальных магнитоплазменных ПВ, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля на границе между полупроводником n - типа с конечным газокинетическим давлением и металлом.
6. Впервые изучена резонансная генерация второй гармоники ПВ, распространяющейся поперёк внешнего магнитного поля на боковой поверхности СВ, ограниченной металлом.
7. Впервые исследована структура газового разряда, создаваемого и поддерживаемого ПВ, распространяющейся вдоль внешнего магнитного поля в структуре цилиндрическая металлическая антенна - вакуумная прослойка - плазма.

Результаты исследования дисперсионных свойств могут быть применены в плазменной и полупроводниковой электронике при разработке различных устройств. Результаты, связанные с возбуждением ПВ в скрещенных электрическом и магнитном полях можно использовать для возбуждения волноведущей структуры. Нелинейное самовоздействие ПВ необходимо учитывать в нелинейном режиме работы устройств плазменной и полупроводниковой электроники. Результаты по резонансной генерации второй гармоники ПВ можно применить при разработке полупроводниковых умножителей частоты. Газовые разряды, создаваемые и поддерживаемые ПВ, могут стать альтернативой обычных газовых разрядов, т. к. они имеют ряд преимуществ по сравнению с последними. Вышесказанное определяет практическую ценность работы.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту :

1. Результаты расчётов дисперсионных свойств аксиально - симметричных и азимутальных ПВ, распространяющихся вдоль

цилиндрической металлической антенны, погружённой в магнитоактивную плазму.

2. Результаты исследования влияния диэлектрической прослойки и конечной проводимости металла на дисперсионные свойства и затухание ПВ, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля.

3. Решение задачи о возбуждении ПВ, распространяющихся перпендикулярно скрещённым электрическому и магнитному полям в структуре полуграниченная плазма - металл. Результаты численного расчёта пространственных инкрементов неустойчивости.

4. Выражения для нелинейных сдвигов частоты потенциальных ПВ, распространяющихся на границе полупроводник n - типа с конечным газокINETическим давлением - металл (геометрия Фойгта, диапазон частот $\omega^2 \ll \omega_e^2$).

5. Выражения для коэффициентов связи первой и второй гармоник ПВ, распространяющихся поперёк внешнего магнитного поля на боковой поверхности СР, ограниченной металлом, в случае их резонансного взаимодействия. Оценки характерных пространственных масштабов реализации резонансного взаимодействия гармоник.

6. Результаты численных расчётов параметров газового разряда, создаваемого и поддерживаемого ПВ, распространяющейся вдоль внешнего магнитного поля в структуре цилиндрическая металлическая антенна - вакуумная прослойка - плазма.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, представлялись на 20, 21 Международных

конференциях Института Радиоинженеров по Физике Плазмы (Ванкувер, Канада, 1993; Санта - Фе, США, 1994), На Международной конференции " Физика на Украине" (Киев, 1993), на 21 Международной конференции по УТС и Физике Плазмы (Монпелье, Франция, 1994), на Международной конференции по Физике Плазмы (Фоз до Игуасу, Бразилия, 1994) и докладывались на семинаре Харьковского государственного университета по Физике Плазмы и нелинейным явлениям (Харьков, 1994, 1995).

Характеристика методологии. При решении рассматриваемых задач использовались известные методики теории плазмы и неустойчивостей, математической физики, математического анализа и нелинейной теории волн. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, а в ряде предельных случаев совпадают с результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад автора. В работах [1-2, 4-10] автору принадлежат аналитические, численные расчёты и обсуждение полученных результатов, а в работе [3] численные расчёты и обсуждение полученных результатов.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 10 работах.

Объём и структура диссертации. Общий объём диссертации составляет 132 страницы машинописного текста. Диссертация содержит 14 рисунков, список литературы 190 наименования и состоит из введения, трех глав и заключения.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан анализ современного состояния затронутых в диссертации проблем, обоснована актуальность исследований,

определён круг исследуемых задач и кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена некоторым ранее не исследованным вопросам линейной теории и возбуждения поверхностных волн в структурах плазмopodobная среда - металл. В некоторых случаях предполагалось наличие тонкой вакуумной (диэлектрической) прослойки между плазмopodobной средой и металлом.

В разделе I.1 изучаются дисперсионные свойства ПВ, распространяющихся в структуре цилиндрическая металлическая антенна - магнитоактивная плазма [1]. Рассматриваются так называемые "щелевые волны", распространяющиеся вдоль границы вакуумной прослойки, окружающей антенну, с плазмой. Под вакуумной прослойкой подразумевается узкий переходной слой от металла к плазме, ширина которого может варьироваться изменением отрицательного напряжения, прилагаемого к антенне. В диссертационной работе получены дисперсионные уравнения для аксиально - симметричных ПВ и АПВ и в ряде предельных случаев проведен их анализ. Показано, что в зависимости от диапазона частот рассматриваемая волна может быть поверхностной или псевдоповерхностной. Получена зависимость дисперсионных свойств поверхностных волн от параметров антенны и магнитоактивной плазмы. Полученные результаты сравниваются с результатами экспериментальных работ и теоретических исследований других авторов и показано, что они находятся в хорошем согласии с ними. Наилучшее согласие с экспериментальными результатами достигается в области частот $\omega \leq 0,6 \omega_e$ (где ω_e - электронная циклотронная частота). Вычислены также поверхностные импедансы аксиально - симметричных и АПВ для

различных параметров задачи.

В разделе 1.2 изучены дисперсионные свойства поверхностных волн, распространяющихся поперек внешнего магнитного поля на границе полуограниченной плазмopodobной среды с металлом при учете влияния диэлектрической прослойки и конечной проводимости металла [2]. Проведены численные оценки для величин фазовых скоростей и волновых чисел поверхностных волн в различных частотных диапазонах существования волн при учете вышеуказанных факторов. Показано влияние диэлектрической прослойки и конечной проводимости металла и проведено сравнение вклада обоих факторов на значение волнового числа поверхностной волны и импеданса волноведущей структуры. В частности, учёт конечной проводимости металла ведёт к уменьшению модуля фазовой скорости волны во всех диапазонах частот. Численные оценки проведены при параметрах исследуемой структуры, взятых из эксперимента.

В разделе 1.3 исследуются линейные поверхностные возмущения, распространяющиеся на боковой поверхности полупроводниковой сверхрешётки (поверхности, перпендикулярной слоям периодической структуры), ограниченной металлической плоскостью, в условиях квантового эффекта Холла [5]. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси сверхрешётки. Рассмотрение проведено в рамках модели однородной анизотропной среды для поверхностных возмущений, распространяющихся под произвольным углом относительно магнитного поля. Получены дисперсионные уравнения для поверхностных возмущений. Найдены условия, при которых происходит квантование волновых чисел ПВ.

В разделе 1.4 рассматриваются вопросы, связанные с

возбуждением и изучением дисперсионных свойств ПВ, распространяющихся перпендикулярно скрещенным электрическому и магнитному полям на границе плазмopodobной среды с металлом [6,8]. Магнитное поле параллельно границе раздела сред, а электрическое перпендикулярно. Поскольку исследуемые волны распространяются поперек внешнего магнитного поля, то их возбуждение с помощью пучков заряженных частиц затруднено и продолжается поиск альтернативных методов возбуждения. В диссертационной работе исследуется дрейфовый способ возбуждения волн вблизи циклотронных частот. Дрейф частиц создается в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях. При этом возникает дрейфовый поток заряженных частиц вдоль направления распространения поверхностной волны. Найдены условия, при которых имеет место возбуждение магнитоплазменных однонаправленных волн поверхностного типа в условиях нормального эффекта Доплера и определена эффективность процесса. Показано, что возбуждение возможно в случае, если дрейф частиц совершается в направлении противоположном распространению ПВ (при этом скорость дрейфа частиц должна быть значительно меньше фазовой скорости ПВ) в областях частот $\omega_1 < \omega < \omega_e$ и $\omega < \omega_1$ (ω_1 , ω_1 - нижнегибридная и ионная циклотронная частоты).

Во второй главе исследуются некоторые нелинейные эффекты, возникающие при распространении поверхностных волн конечной амплитуды в структурах полуограниченная полупроводниковая плазма-металл.

В разделе 2.1 проведено исследование процесса самовоздействия потенциальных поверхностных магнитоплазменных волн, распространяющихся поперек внешнего магнитного поля на границе полупроводник с конечным

газокинетическим давлением n -типа -металл [3]. Рассмотрена нелинейность, обусловленная непараболичностью спектра электронов. Исследование проводилось в двух диапазонах частот: $\omega \ll \omega_e$ и $\omega \approx \omega_e$ (в обоих случаях предполагалось выполнение неравенства $\omega^2 \ll \Omega_e^2/\epsilon_0$, где Ω_e - плазменная частота, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная решётки полупроводника и, что частота колебаний значительно превышает частоты фононных колебаний). Нелинейные свойства ПВ рассмотрены в приближении слабой нелинейности. Учёт непараболичности спектра электронов ведёт к двум эффектам: самовоздействию ПВ и генерации третьей гармоники ПВ. Получены нелинейные дисперсионные уравнения и нелинейные уравнения Шредингера (НУШ) для огибающей поля ПВ в обоих исследуемых диапазонах частот. Результаты нелинейного самовоздействия существенно различаются в веществах с нормальной и инверсной зонной структурой ($\epsilon_g > 0$ и $\epsilon_g < 0$, соответственно, где ϵ_g - ширина запрещённой зоны). Показано, что самовоздействие приводит к уменьшению или к росту фазовой скорости волн в зависимости от диапазона частот и от типа зонной структуры полупроводника. Проведенные численные оценки показывают, что изучаемый нелинейный механизм особенно существенный в узкощелевых полупроводниках. Изучен эффект генерации третьей гармоники ПВ. Показано, что в зависимости от диапазона частот третья гармоника может быть чисто поверхностной, псевдоповерхностной или суперпозицией объёмных и поверхностных мод. В последнем случае это приводит к появлению нелинейного затухания ПВ, связанного с выносом энергии объёмной модой.

В разделе 2.2 рассматривается резонансная генерация

второй гармоники ПВ, распространяющихся на боковой поверхности полупроводниковой сверхрешётки, ограниченной идеально проводящим металлом перпендикулярно внешнему магнитному полю, направленному вдоль оси CP [4]. Приводятся условия, при выполнении которых возможна резонансная генерация. На основе полученной динамической системы уравнений для амплитуд и фаз первой и второй гармоник исследован нелинейный процесс перекачки энергии из первой гармоники во вторую и обратно. Показано влияние непараболичности спектра электронов на генерацию второй гармоники.

Третья глава диссертации посвящена изучению газового разряда, создаваемого и поддерживаемого ионизирующей ПВ, распространяющейся вдоль цилиндрической металлической антенны с диэлектрической (вакуумной) прослойкой, окружённой магнитоактивной плазмой [7, 10].

В разделе 3.1 исследования проводились с использованием феноменологического соотношения между поглощаемой на единице длины разряда энергией ПВ и плотностью создаваемой плазмы. Рассмотрение выполнено для случая, когда все волновые возмущения A слабо изменяются вдоль направления распространения ПВ ($\frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial z} \ll k_z$, k_z - волновое число вдоль оси z). Радиус создаваемого плазменного столба предполагался малым по сравнению с его длиной. Аналитически и численно получены аксиальные распределения электромагнитных полей, плотности плазмы, волновых чисел и других параметров системы в предельных случаях тонкой антенны и плоской геометрии. Результаты исследований показали, что рост величины магнитного поля ведёт к некоторому уменьшению длины разряда, но существенному увеличению его толщины.

В разделе 3.2 рассмотрение проведено для антенны с большим радиусом (плоский случай) с использованием уравнений температурного баланса и баланса концентрации частиц (учтены процессы диффузии, теплопроводности, рекомбинации). Получено хорошее согласие с результатами раздела 3.1. Кроме того, найден закон изменения амплитуды ПВ вдоль оси антенны.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Wave properties of a cylindrical antenna immersed in magnetoactive plasma. J. Plasma Physics, 1993, V.50, N 3, p. 369 - 384.
2. Азаренков Н.А., Денисенко И.Б., Остриков К.Н. Волноводные свойства структуры плазма - металл при учете диэлектрической прослойки и конечной проводимости металла. - ЖТФ, 1994, т. 64, №9, с. 23 - 29.
3. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Nonlinear Self-Interaction of Surface Magnetoplasmons at the Interface Between a Narrow-Gap Electron Semiconductor and a Metal. Physica Scripta, 1994, V.49, p. 502-508.
4. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Second harmonic generation of the surface magnetoplasmon on the lateral surface of the semiconductor superlattice bounded by a metal. Surface Review & Letters, 1995, V.2, N5, p.579-585.

5. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Low-frequency magnetoplasma surface waves in semiconductor superlattice bounded by metal. Physics in Ukraine. Intern. Conf. Kiev 22-27 June 1993. Proc. Contr. Papers. Plasma Physics, p. 26-29.
6. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Dispersion and excitation of the surface waves in crossed electrical and magnetic fields. International Conference on Plasma Physics, Foz do Iguacu Brazil, 31 Oct.-4 Nov. 1994. Proc. Contr. Papers, Vol.2, p. 5 - 8.
7. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Structure of microwave plasma discharge produced and sustained by the surface wave propagating along a metal wire. Bulletin of the American Physical Society. November 1994, V.39, N7, p.1765.
8. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Dispersion and excitation of the surface waves in the plasma-metal contact immersed in crossed E and H fields. Bulletin of the American Physical Society. November 1994, V.39, N7, p.1765.
9. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Microwave plasma discharge produced and sustained by the surface wave propagating along a metal wire. 1994 IEEE ICOPS, June 6 - 8, 1994, Santa-Fe, USA, Conf. Record, Abstracts, p.19.
10. Azarenkov N.A., Denisenko I.B., Ostrikov K.N. Microwave gas discharge produced and sustained by the surface wave propagating along a metal wire. Preprint SCPT N9, Scient. Centre Phys. Technologies, Kharkov, 1995.10p.

Денисенко І.Б. Збудження і нелінійні властивості поверхневих хвиль на межі плазмподібного середовища з металом. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико - математичних наук зі спеціальності 01.04.08 - фізика та хімія плазми. Харківський держ. ун.-т, Харків, 1995 (рукопис).

Захищається 10 наукових робіт, які містять теоретичне дослідження дисперсійних характеристик, способів збудження та нелінійних властивостей поверхневих хвиль на межі плазмподібного середовища з металом. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані як у газовій так і у твердотільній плазмі напівпровідників.

Denisenko I.B. Excitation and nonlinear properties of the surface waves at the interface between a plasma-like medium and a metal.

Competitor's dissertation (manuscript) scientific grade of candidate of physics and mathematics speciality 01.04.08 - Plasma Physics and Chemistry, Kharkov State University, Kharkov, 1995.

Defended are 10 scientific papers containing theoretical researches of dispersion characteristics, methods of excitation and nonlinear properties of the surface waves at the interface between a plasma-like medium and a metal. The results of the Theses are applicable both for gaseous and semiconductor plasmas.

Ключові слова: Поверхнева хвиля, збудження, межа плазмподібного середовища, нелінійні властивості.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Денисенко Игорь Борисович

**ВОЗБУЖДЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН
НА ГРАНИЦЕ ПЛАЗМОПОДОБНОЙ СРЕДЫ С МЕТАЛЛОМ**

Автореферат диссертации

Подписано в печать 30.10.95г.

Печ.л. - 1,1.

Уч.-изд.л. 0,9.

Формат бумаги 60x84/16.

Тир. 80

Зак.12/238-95

Типография ХВУ

406133

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Дисертация на тему: "Изучение влияния температуры на свойства полупроводниковых материалов".

Всё это
А.И. Купцов

446133

AB 33.384