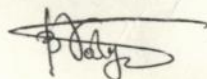


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Голуб Вадим Львович

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МЕДЛЕННЫЕ ВОЛНЫ НЕОДНОРОДНЫХ
МАГНИТОАКТИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУРАХ

Специальность 01.04.08 - физика и химия плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков 1996 г.



00754965 (-)

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Харьковском государственном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кондратенко Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Онищенко Иван Николаевич
(ННЦ ХФТИ, г. Харьков)
кандидат физико-математических наук,
профессор Муратов Владимир Иванович
(ХГУ, г. Харьков)

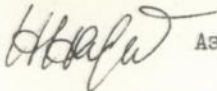
Ведущая организация: Радиоастрономический институт
НАН Украины (г. Харьков)

Защита состоится " 6 " октября 1995 г. на заседании
специализированного совета Д 02.02.12 в Харьковском государственном университете (ЗІОІО8, г. Харьков, пр. Курчатова 31, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке
ХГУ (ЗІО077, г. Харьков, пл. Свободы, 4).

Автореферат разослан "28" августа 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физ.-мат. наук

 Азаренков Н.А.

ЛНБ ім. В Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность. Исследование дисперсионных свойств плазменных волноводов является не только теоретической задачей плазменной электроники, но и представляет практический интерес для создания нового поколения плазменных устройств, таких как СВЧ-генераторов, усилителей, ускорителей. Для увеличения КПД пучково-плазменных систем и повышения их мощности используются релятивистские электронные пучки. При взаимодействии с такими пучками наиболее эффективными являются медленные волны, фазовая скорость которых, не превосходит скорости света в вакууме.

Цель работы. Исследование дисперсионных свойств медленных волн в цилиндрических плазменных структурах для различных конфигураций внешнего магнитного поля и граничных условий; установление зависимостей частоты и фазовой скорости волн от параметров задачи для управления частотным спектром.

Научная новизна.

1. Для волноводов в продольном магнитном поле получены спектры непотенциальных обобщенно-поверхностных волн в различных плазменно-вакуумных структурах с одной и двумя границами раздела. Установлен факт изменения типа дисперсии волны в зависимости от толщины плазменного слоя в трехслойных структурах.

2. Обнаружено сильное влияние на частоту и тип дисперсии волны металлического проводника вблизи оси волновода и найдены выражения для частоты в различных участках спектра.

3. В азимутальном магнитном поле кроме волны, которая является возмущенным решением уравнений немагнитичного волновода, найдена новая ветвь. Представлены зависимости дисперсионных кривых для обеих ветвей от параметров задачи: структуры волновода, радиусов слоев, силы внешнего тока.

4. Обнаружена невязанность обеих ветвей спектра по отношению к направлению распространения волны вдоль оси волновода. Показано, что в пределе бесконечно большого внешнего тока медленной волны не существует, и найдены 'сценарии' ее исчезновения для разных ветвей.

5. Для волноводов в винтовом магнитном поле получены уравнения для полей в плазме. Найдены спектры двуслойных структур с металлическими границами при различном соотношении продольной и азимутальной компонент поля. Обнаружены дополнительные ветви по сравнению с волнами в продольном и азимутальном магнитном полях; обнаружено расщепление каждой ветви несимметричной волны на 4 подветви вследствие двойной невязанности - по отношению к направлению распространения вдоль оси волновода и по отношению к направлению вращения волны вокруг этой оси.

Практическая и научная ценность. Приведенные в диссертации результаты могут быть использованы для управления частотой и фазовой скоростью медленных волн при помощи магнитного поля и граничных условий в плазменно-вакуумных волноводах. Такие структуры могут применяться в устройствах, работа которых основана на синхронизации скорости заряженных частиц и фазовой скорости волны - плазменные усилители, генераторы и ускорители.

Результаты работы могут быть использованы в ИКИ, ФИАН, ХФТИ НАН Украины, РИНАН Украины, ИРЭ НАН Украины и др.

На защиту выносятся:

1. Дисперсионные зависимости непотенциальных медленных волн в двух- и трехслойных структурах, помещенных в продольное магнитное поле. Влияние магнитного поля на частоты симметричных и несимметричных волн в области релятивистских фазовых скоростей. Качественное изменение дисперсии толщиной слоев волновода.

2. Частотные спектры медленных поверхностных волн в двуслой-

ных структурах при наличии металлических границ. Эффект смены характера дисперсии под влиянием металлической оси волновода и управление частотой волны радиусами внутреннего и внешнего металлических цилиндров.

3. Медленные волны в плазменно-вакуумных волноводах, находящихся в постоянном азимутальном магнитном поле. Возмущение частоты малым полем, невзаимность спектра по отношению к направлению распространения волны вдоль оси волновода.

4. Обнаружение новых ветвей спектра в азимутальном магнитном поле, сценарии исчезновения ветвей в пределе бесконечно большого тока, создающего магнитное поле.

5. Численное исследование законов дисперсии в винтовом магнитном поле при различном соотношении азимутальной и продольной компонент. Эффект расщепления несимметричной волны на 4 подветви.

Апробация работы и публикации. Результаты докладывались на Всесоюзном семинаре 'Плазменная электроника', (Харьков 1988) и Всесоюзной конференции 'Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой' (Душанбе, 1991). Основное содержание диссертации опубликовано в работах [1-7].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, списка литературы, содержащего 82 наименования, заключения. Работа изложена на 101 стр., из них 74 стр. машинописного текста, содержит 54 рисунка.

Содержание работы. Во введении обоснована актуальность темы, указаны области применения, сформулирована цель работы и положения, которые выносятся на защиту.

В I-й главе рассматриваются непотенциальные обобщенно-поверхностные волны в двух- и трехслойных цилиндрических волноводах, помещенных в продольное магнитное поле.

Тензор диэлектрической проницаемости ϵ_x однокомпонентной хо-

лодной плазмы в продольном магнитном поле H_z^0 имеет вид:

$$\epsilon_{ik} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & i\epsilon_2 & 0 \\ -i\epsilon_2 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{pmatrix}, \text{ где}$$

$$\epsilon_1 = 1 - \frac{1}{\mu^2 - u_z^2}, \quad \epsilon_2 = \frac{u_z}{\mu(\mu^2 - u_z^2)}, \quad \epsilon_3 = 1 - \frac{1}{\mu^2},$$

$$\mu = \omega/\omega_p, \quad u_z = \omega_z/\omega_p,$$

ω - искомая, ω_p - плазменная электронная, $\omega_z = eH_z^0/mc$ - циклотронная электронная частоты.

В общем случае несимметричных волн - $E = E(r) \cdot \exp[i(k_z z + m\phi - \omega t)]$ - решение уравнений Максвелла для E_z в плазме можно представить как

$$E_z = E_z^1 + E_z^2, \text{ где } E_z^1 = C^j K_m(k_j r) + D^j I_m(k_j r),$$

Здесь I_m , K_m - функции Бесселя и Макдональда порядка m ,

C^j , D^j - произвольные константы. Поперечные волновые числа k_j могут быть действительными или комплексно-сопряженными. Соответственно, остальные компоненты поля - линейные функции E_z и E_z^* . Известно, что медленная волна обычно имеет 'точку сгущения' слева по продольному продольному волновому числу - q_1 , т.е. такая волна перестает существовать при некотором значении $q < q_1$. В окрестности этой точки k_z фазовая скорость достигает релятивистских значений, и волна является существенно непотенциальной.

Частотные спектры были получены в основном численно. Аналитическое выражение для частоты удается получить, например, для вакуумной цилиндрической полости, окруженной плазмой (ВАКУУМ-ПЛАЗМА), только при $R = \omega_p r/c$. Так, для симметричной волны ($m=0$) в точке q_1 :

$$\mu \approx \left(\frac{2a}{R} \right)^{1/2}, \quad a = \left(\frac{1 + (1 + u_z^2)^{1/2}}{2} \right)$$

Для несимметричной волны ($m \neq 0$) в области параметров:

$$R \gg 1, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} \gg 1, \quad \gamma^2 / R^2 \ll 1$$

$$\mu = \left[Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + Q_2} \right]^{1/2}$$

$$\text{где } Q_1 = (|\mu| + 1) \left[Ra - 2\gamma^2 |\mu| / R^2 \right]^{-1}, \quad Q_2 = 4(|\mu| + 1)^2 |\mu| \gamma^2 a / R^2$$

Трехслойные плазменно-вакуумные структуры могут быть удобны тем, что существующие в них 2 ветви перекрывают диапазон частот от нуля до плазменной в области релятивистских фазовых скоростей около q_1 . При этом дисперсионная кривая может довольно сильно искажаться, существенно отличаясь от 'родительской' ветви, соответствующей двухслойной структуре.

Численно рассчитаны спектры ветвей как симметричных, так и несимметричных волн в структурах ВАКУУМ-ПЛАЗМА-ВАКУУМ и ПЛАЗМА-ВАКУУМ-ПЛАЗМА для широких ($R_1 > 1$) и узких ($R_1 < 1$) волноводов. В первом из них, спектр высокочастотной ветви очень чувствителен к величине внешнего зазора (рис 1.). Эффект невязности спектра несимметричной волны - зависимость частоты от знака m - имеет место для обеих ветвей. При этом их поведение различно - рис.2.

Во 2-й главе исследуются спектры медленных волн в азимутальном внешнем магнитном поле. Такое поле легко создать при наличии во внутренней части проводника с током. Отдельно рассмотрено влияние граничных условий (металл на оси волновода) и собственно магнитного поля. Показано, что 'металлическая ось' может не только существенно влиять на частоту, но и изменять тип дисперсии. Получены аналитические выражения для частоты в двухслойных структурах, когда влияние металла существенно. Представлены зависимости частоты и фазовой скорости от соотношения между радиусами: волновода — R_2 и металлического цилиндра — R_1 . Показано, что изменяя отношение R_2/R_1 , можно получить 3 различных типа дисперсионных кривых:

- спектр только с аномальной дисперсией ($R_1 = 0$);
- спектр с изменяющейся дисперсией ($R_1/R_2 < 1$);

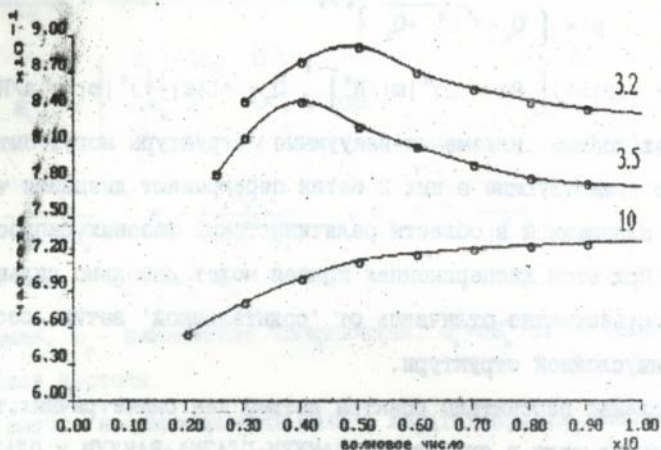


Рис. 1 Структура ПЛАЗМА-ВАКУУМ-ПЛАЗМА:

$$R_1 = 3, m = 0, u_z = 0.2$$

Параметр - внешний радиус R_2

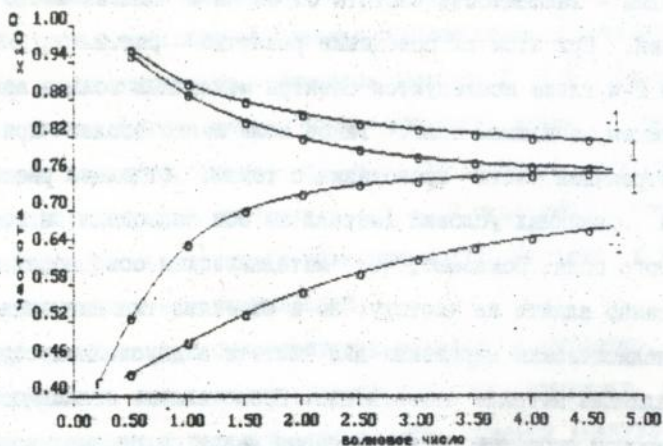


Рис. 2 Структура ПЛАЗМА-ВАКУУМ-ПЛАЗМА: $R_1 = 0.5, R_2 = 1,$

$u_z = 0.4$. Высокочастотная (вверху) и низкочастотная

(внизу) ветви. Параметр - азимутальное число m

- спектр с нормальной дисперсией ($R_1/R_2 \approx 1$).

Влияние 'металлической оси' различно для структур 'ПЛАЗМА-ВАКУУМ' и 'ВАКУУМ-ПЛАЗМА'. При некоторых параметрах 'низкочастотная' ветвь, которая обычно имеет место в I-й структуре, может оказаться выше 'высокочастотной' ветви из 2-й, так что эта классификация теряет смысл. Аналитические формулы получены и для несимметричных волн ($\psi=0$).

Далее рассматривается влияние на спектр азимутального магнитного поля, создаваемого осевым током. Тензор диэлектрической проницаемости ϵ_{ik} в таком поле имеет вид:

$$\epsilon_{ik} = \begin{pmatrix} \epsilon_2 & 0 & -i\epsilon_2 \\ 0 & \epsilon_3 & 0 \\ i\epsilon_2 & 0 & \epsilon_1 \end{pmatrix}$$

Обозначения здесь те же, что и выше, только вместо магнитного поля поля u_z в формулы входит поле $u_\phi = \omega_\phi/\omega_p$, где ω_ϕ - циклотронная электронная частота в поле H_ϕ^0 : $\omega_\phi = eH_\phi^0/mc$. В дальнейшем удобно безразмерную силу тока $J = eJ_z^0/2mc$, так чтобы $u_\phi = J/R$.

Для симметричных волн в азимутальном магнитном поле имеет место разделение на E-волны и H-волны. При этом последние не зависят от магнитного поля, и существуют только в виде быстрых. E-волна может быть как быстрой, так и медленной. Для z-компоненты E-волны в плазме можно получить уравнение:

$$E_z'' + a_1(r)E_z' + a_2(r)E_z = 0.$$

Ненулевая составляющая магнитного поля имеет вид:

$$H_\phi = -\epsilon_1 \frac{k}{\alpha_1^2} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{k_z \epsilon_2}{\epsilon_1} E_z \right], \text{ где } \alpha_1^2 = k_r^2 - \epsilon_1 k^2,$$

$$a_1 = \frac{1}{r} + \frac{\alpha_1^2}{\epsilon_1} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\epsilon_1}{\alpha_1^2} \right),$$

$$a_2 = -\alpha_1^2 + \frac{k_z}{r} \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - \frac{k^2 \epsilon_2^2}{\epsilon_1} + \frac{k_z \alpha_1^2}{\epsilon_1} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\epsilon_2}{\alpha^2} \right),$$

Если известное решение волнового уравнения для E_z в вакууме обозначить через $f(r)$, а решение в плазме - $g(r)$, то дисперсионное уравнение можно записать как :

$$F \frac{1}{\alpha_1^2} \left(\epsilon_1 + \epsilon_2 k_z G \right) = G \frac{1}{\alpha_v^2} \Big|_{r=r_2}.$$

Здесь $F = f(r_2)/f'(r_2)$, $G = g(r_2)/g'(r_2)$, r_2 -- граница 'плазма-вакуум', $\alpha_v^2 = k^2 - k^2$.

Т.к. в дисперсионное уравнение входит не сама функция g , а G , то удобно иметь и уравнение сразу для G :

$$G' = 1 + a_1 G + a_2 G^2.$$

Дисперсионное уравнение решалось в основном численно. Аналитически, по теории возмущений, получена формула для частоты при малом токе J : $\mu(q, J) = \mu(q, 0) + bqJ$.

При этом величина b выражается через параметры и амплитуду поля E_z невозмущенной задачи. Отсюда явно видна зависимость от знака произведения qJ , т.е. от взаимного направления распространения волны и внешнего тока (рис.3).

Кроме этого, в спектре найдена ветвь, которая возникает и исчезает вместе с азимутальным полем (рис.4.) Спектры 'попутной' ($qJ > 0$) и 'встречной' ($qJ < 0$) волн обнаруживают различное поведение в зависимости от типа и радиусов волновода.

В 3-й главе представлено численное исследование спектров в более сложных конфигурациях, а именно:

- несимметричные волны в азимутальном магнитном поле;
- спектры структур в продольном магнитном поле, где плазма касается внутренней металлической границы;
- произвольные медленные волны в винтовом магнитном поле (суперпозиция продольного и азимутального).

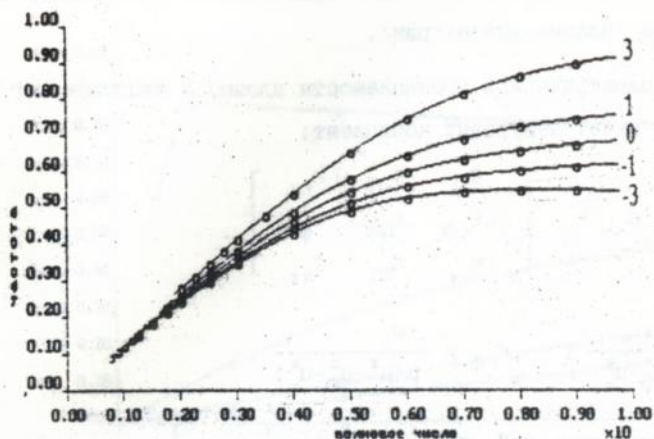


Рис. 3 Структура МЕТАЛЛ-ВАКУУМ-ПЛАЗМА-МЕТАЛЛ:
 $R_1=5$, $R_2=6$, $R_3=7$, $m=0$. Параметр - сила тока J .

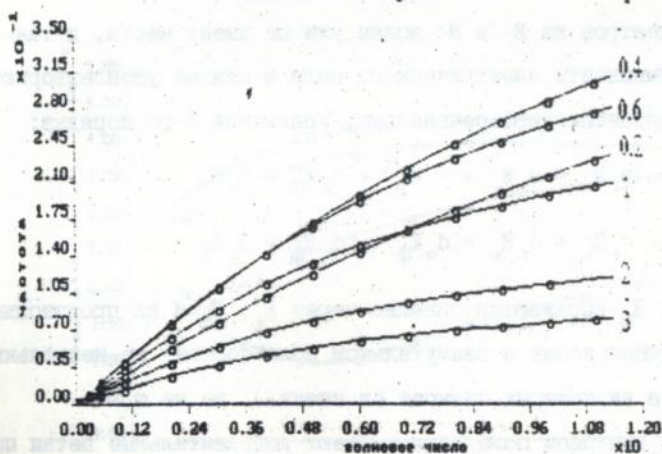


Рис. 4 Структура МЕТАЛЛ-ПЛАЗМА-ВАКУУМ-МЕТАЛЛ:
 $R_1=.55$, $R_2=0.6$, $R_3=1$, $m=0$. Попутная низкочастотная ветвь. Параметр - сила тока J .

зависимость спектра от плавной неоднородности плазменного слоя в структуре 'плазма-диэлектрик'.

Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в винтовом магнитном поле не имеет ненулевых компонент:

$$\epsilon_{ik} = \begin{pmatrix} \epsilon_{rr} & i\epsilon_{r\phi} & -i\epsilon_{rz} \\ -i\epsilon_{r\phi} & \epsilon_{\phi\phi} & \epsilon_{\phi z} \\ i\epsilon_{rz} & \epsilon_{\phi z} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr} &= 1 - \frac{1}{\mu^2 - u_{\phi}^2 - u_z^2}, & \epsilon_{r\phi} &= \frac{u_z}{\mu(\mu^2 - u_{\phi}^2 - u_z^2)}, \\ \epsilon_{rz} &= \frac{u_{\phi}}{\mu(\mu^2 - u_{\phi}^2 - u_z^2)}, & \epsilon_{\phi\phi} &= 1 - \frac{1}{\mu^2} \left(1 + \frac{u_z^2}{\mu^2 - u_{\phi}^2 - u_z^2} \right), \\ \epsilon_{\phi z} &= \frac{u_{\phi} u_z}{\mu^2 (\mu^2 - u_{\phi}^2 - u_z^2)}, & \epsilon_{zz} &= 1 - \frac{1}{\mu^2} \left(1 + \frac{u_{\phi}^2}{\mu^2 - u_{\phi}^2 - u_z^2} \right). \end{aligned}$$

Расщепление спектров на E- и H- волны уже не имеет места, и тангенциальные компоненты электрического поля в плазме удовлетворяют системе 2-х связанных дифференциальных уравнений 2-го порядка:

$$\begin{cases} a_0 E_z' + a_1 E_z + a_2 E_z = E_{\phi}' + b_1 E_{\phi} + b_2 E_{\phi} \\ E_z' + c_1 E_z + c_2 E_z = d_0 E_{\phi}' + d_1 E_{\phi} + d_2 E_{\phi} \end{cases}$$

Компоненты H_z и H_{ϕ} выражаются линейно через E_z , E_{ϕ} и их производные.

Несимметричная волна в азимутальном поле состоит из нескольких ветвей, частота на которых зависит от знака J , но не m .

Спектры в винтовом поле обнаруживают дополнительные ветви по сравнению с волнами при наличии одной из составляющих магнитного поля - рис.5. Сособенность проявляется в расщепление каждой из ветвей несимметричной волны на 4 подветви в зависимости от направления вращения вокруг оси волновода (знак параметра m), и направления распространения волн вдоль этой оси (знак параметра J) - рис.6.

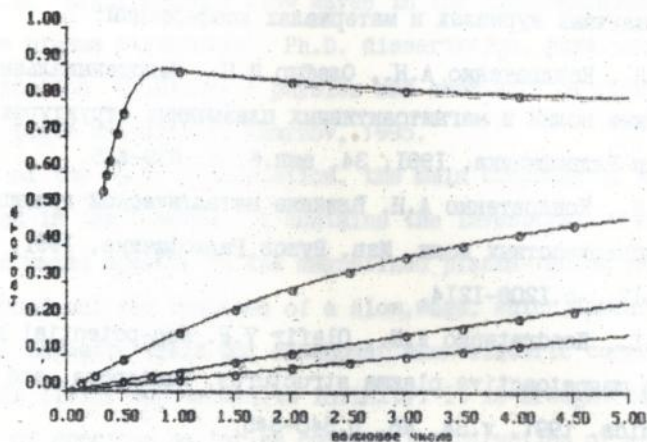


Рис. 5 Структура МЕТАЛЛ-ПЛАЗМА-ВАКУУМ-МЕТАЛЛ:
 $R_1=0.25$, $R_2=0.5$, $R_3=0.75$, $J=0.2$, $u_z=0.6$, $m=0$
 Ветви медленной волны

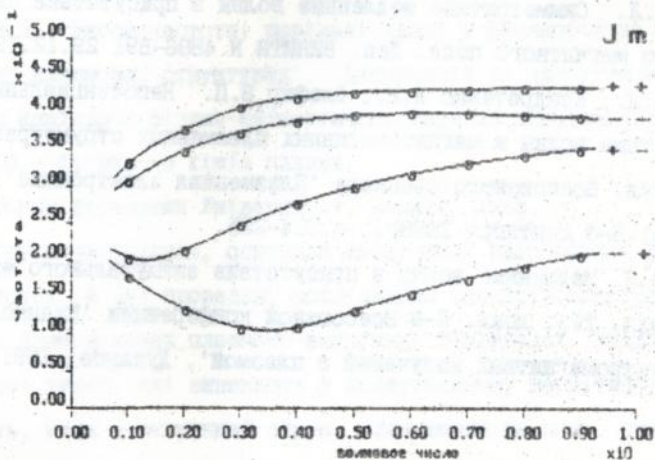


Рис. 6 Структура МЕТАЛЛ-ВАКУУМ-ПЛАЗМА-МЕТАЛЛ:
 $R_1=0.25$, $R_2=0.5$, $R_3=0.75$, $u_z=2$, $J=\pm 2$, $m=\pm 2$
 Расщепление несимметричной волны.

Основное содержание диссертации изложено в 7 работах, опубликованных в научных журналах и материалах конференций:

1. Голуб В.Л., Кондратенко А.Н., Олефир В.П. Непотенциальные поверхностные волны в магнитоактивных плазменных структурах. Изв. Вузов Радиофизика, 1991, 34, вып.6. с. 639-645.
2. Голуб В.Л., Кондратенко А.Н. Влияние металлической границы на спектр поверхностных волн. Изв. Вузов Радиофизика, 1991, 34, вып. 10-12. -с.1209-1214.
3. Golub V.L., Kondratenko A.N., Olefir V.P. Non-potential surface waves in magnetoactive plasma structures. Radiophys. and quantum electronics. 1991, v.34, №6, p.540-545.
4. Golub V.L., Kondratenko A.N. Effect of metal boundaries on slow waves spectrum in plasma-vacuum structures. Radiophys. and quantum electronics. 1991, v.34, №10-12, p.934-938.
5. Голуб В.Л. Симметричные медленные волны в присутствии азимутального магнитного поля. Деп. ВИНТИ N 4886-В91 29.12.1991.
6. Голуб В.Л., Кондратенко А.Н., Олефир В.П. Непотенциальные поверхностные волны в магнитоактивных плазменных структурах. Тез. докл. Всесоюзного семинара 'Плазменная электроника', Харьков: 6-8 сентября 1988г., с.234-235.
7. Голуб В.Л. Медленные волны в присутствии азимутального магнитного поля. Тез. докл. 6-й Всесоюзной конференции 'Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой', Душанбе, 1991 с. 34.

ABSTRACT

Golub V.L. 'Highfrequency slow waves in the inhomogeneous magnetoactive plasma structures'. Ph.D. dissertation, phys.-math. sci., specialization 01.04.08. - physics and chemistry of plasma. Kharkov State University, Kharkov, 1995.

Defence of the Ph.D. dissertation, the main content of which was published in the 7 works. It contains the investigation of electromagnetic waves spectra in the magnetized plasma-vacuum waveguides. It is found out the branches of a slow wave, which appear in the azimuthal magnetic field but disappear when electric current, creating this field, approaches to infinity. It is brought out an unmutuality of spectrum as far as concern the direction of propagation along the waveguide's axis in the azimuthal and spiral external magnetic fields.

АНОТАЦІЯ

Голуб В.Л. 'Високочастотні повільні хвилі у неоднорідних магнітоактивних плазмових структурах'. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика та хімія плазми. Харківський Державний Університет, Харків, 1995.

Захищається дисертація, основний зміст якої надруковано у 7 наукових роботах. В неї проведено дослідження спектрів електромагнітних хвиль у замагнічених плазмово-вакуумних хвилеводах. Знайдено гілки повільної хвилі, які виникають у азимутальному магнітному полі, та зникають, коли електричний струм, створюючий це поле, прямує до нескінченності. Виявлено невзаємність хвилі що до напрямку її розповсюдження уздовж осі хвилеводу в азимутальному та гвинтовому полях.

Ключові слова: плазма, хвилевід, магнітне поле, граничні умови, хвиля, спектр, частота, фазова швидкість, дисперсія, невзаємність.

454479

AB 32.941

AB 32.941