

стадий развития неустойчивостей в т. п. Несомненно интересным представляется прежде всего продвинуться в область предельно высоких мод колебаний.

Наконец, будет, по-видимому, целесообразно изучить эмиссионные свойства остриёных катодов с периодическим рельефом в структуре поверхности.

Список литературы

- [1] *Бондаренко Б. В., Рыбаков Ю. Н., Шешин Е. Н.* Обзоры по электронной технике. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. М., 1981. Вып. 4 (814). 59 с.
- [2] *Spindt C. A.* // *J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 47. N 12. P. 5248—5252.
- [3] Автоионная микроскопия / Под ред. Дж. Рена, С. Ранганатана. М.: Мир, 1971. 270 с.
- [4] *Ривьере Х.* // Поверхностные свойства твердых тел / Под ред. М. Грина. М.: Мир, 1972. Гл. 4. С. 193—316.
- [5] *Мюллер Э. В.* // Методы анализа поверхности / Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. Гл. 8. С. 201—220.
- [6] *Зайцев С. В., Суворов А. Л.* Препринт ИТЭФ. № 154. М., 1987. 16 с.
- [7] *Журков С. Н.* Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986. 152 с.
- [8] *Зайцев С. В., Суворов А. Л.* Поверхность. Физика, Химия, Механика. 1985. № 9. С. 104—110.
- [9] *Бугаев А. А., Лукошкин В. А., Урлин В. А., Яковлев Д. Г.* // *ЖТФ.* 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 908—914.
- [10] *Rayleigh J.* // *Phil. Mag.* 1982. Vol. 14. N 1. P. 184—192.
- [11] *Tonks L.* // *Phys. Rev.* 1935. Vol. 18. N 4. P. 592—599.
- [12] *Френкель Я. И.* // *ЖТФ.* 1936. Т. 6. Вып. 4. С. 347—350.
- [13] *Габович М. Л.* // *УФН.* 1983. Т. 140. № 1. С. 137—151.

Поступило в Редакцию
30 мая 1989 г.
В окончательной редакции
2 февраля 1990 г.

01; 04; 09

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОАКТИВНОГО ПЛАЗМЕННОГО ВОЛНОВОДА

Н. А. Азаренков, В. В. Костенко

Исследование электромагнитных свойств плазменного цилиндра, находящегося во внешнем постоянном и однородном магнитном поле, имеет важное значение при решении задач плазменной электроники и в проблеме УТС. В [1, 2] исследованы дисперсионные свойства, топография электромагнитного поля и энергетические характеристики аксиально-симметричных объемных возмущений в электронном плазменном цилиндре, граничащем с вакуумом. Электромагнитные свойства плазменного цилиндра, ограниченного металлическим кожухом, исследовались в работе [3], где получено дисперсионное уравнение аксиально-симметричных волн поверхностного типа

$$\frac{F_1}{k_1} \frac{I_1(k_1 R)}{I_0(k_1 R)} - \frac{F_2}{k_2} \frac{I_1(k_2 R)}{I_0(k_2 R)} = 0 \quad (1)$$

и исследована топография электрического и магнитного полей поверхностных волн. В выражении (1) приняты следующие обозначения:

$$F_{1,2} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} (\epsilon_1 k^2 - k_z^2) + k_{1,2}^2, \quad k_{1,2} = -p_1 \pm \sqrt{p_1^2 - p_2},$$

$$p_1 = \frac{1}{2\epsilon_1} [\epsilon_1 + \epsilon_3] (\epsilon_1 k^2 - k_z^2) - \epsilon_3^2 k^2,$$

$$p_2 = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} [(\epsilon_1 k^2 - k_z^2)^2 - \epsilon_3^2 k^4], \quad k = \frac{\omega}{c}, \quad (1a)$$

R — радиус волновода; ω , k_z — частота и волновое число вдоль оси волновода; ϵ_i — компоненты тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы [4]; $I_0, I_1(x)$ — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Уравнение (1) имеет широкую область определения и в зависимости от условий плотности плазмы, величины внешнего магнитного поля, частоты волны, радиуса цилиндра может описывать объемные моды волновода, когда k_1 и k_2 — мнимые, обобщенно-поверхностные моды (k_1 и k_2 комплексно сопряжены) и истинные поверхностные волны (k_1 и k_2 действительные).

В [3, 5, 6] рассматривались решения дисперсионного уравнения (1) в пределе больших радиусов ($|k_1, 2R| \gg 1$ — плоская граница раздела). Численное исследование (1) проводилось в [7], однако параметры плазмы и волновода были выбраны такими, что $|k_1, 2R| \gg 1$

Таким образом, случай полуограниченной плазмы исследован достаточно подробно, поэтому необходимо рассмотреть особенности волноведущей структуры в случаях $|k_1, 2R| \sim 1$ и так называемого тонкого цилиндрического волновода, т. е. $|k_1, 2R| \ll 1$. В [3] без достаточного обоснования было отмечено, что волны поверхностного типа в тонком волноводе не существуют.

Предположим, что $|k_1, 2R| \ll 1$, тогда дисперсионное уравнение (1) преобразуется к виду

$$F_1\left(1 + \frac{k_1 R}{2}\right) - F_2\left(1 + \frac{k_2 R}{2}\right) = 0. \quad (2)$$

Если пренебречь малыми добавками в скобках, то $F_1 = F_2$, откуда следует $k_1 = k_2$, что означает отсутствие плазменных поверхностных волн в узком волноводе, ограниченном металлом [8]. При учете же малых добавок уравнение (2) сводится к виду

$$k_1 + k_2 - \frac{R}{2} \left(\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} (\epsilon_1 k^2 - k_z^2) - \sqrt{p_2} \right) = 0. \quad (3)$$

Дисперсионное уравнение (3) имеет решения в виде волн поверхностного типа лишь в случае $|k_1 R| > 1$, что выходит за область определения уравнения (3). Следовательно, уравнение (1), имеющее решения в виде волн поверхностного типа при $|k_1, 2R| \gg 1$, при $|k_1, 2R| \ll 1$ не имеет решений.

Что же тогда происходит с дисперсионными характеристиками при уменьшении радиуса волновода? Как показывают численные исследования уравнения (1) (для диапазона частот $\omega_2 < \omega < \omega_s$, где ω_2 — нижняя гибридная частота [4], ω_s — электронная циклотронная частота), при уменьшении радиуса волновода происходит уменьшение фазовой скорости волн. Снижение фазовой скорости сопровождается уменьшением действительной части радиального волнового числа, как показано на рис. 1. Кривые 1—3 соответствуют $A = (\omega_s R)/c = 10, 2, 1$ при $\beta = \Omega_s/\omega_s = 3$ (Ω_s — ленгмювская частота электронов плазмы). Однако при этом происходит увеличение мнимой части волнового числа (кривые 1'—3'). Таким образом, уменьшение радиуса волновода приводит к такому изменению его дисперсионных характеристик, что действительные части радиальных волновых чисел уменьшаются, а мнимые части увеличиваются и одновременно обе величины $|k_1 R|$ и $|k_2 R|$ не могут быть меньше единицы. При этом обобщенно-поверхностная волна вырождается в чисто объемную. Этот переход при заданном k_z происходит при определенном значении радиуса волновода. На рис. 2 приведены зависимости радиусов волновода, при которых происходит переход от обобщенно-поверхностных волн в объемные, от продольного волнового числа для различных значений $\beta = 5, 3, 2$ (соответственно кривые 1—3). Из рисунка видно, что с увеличением плотности плазмы радиусы перехода уменьшаются.

При определенных k_z обобщенно-поверхностная волна становится чисто поверхностной [5—8]. Этот переход происходит без особенностей на дисперсионных кривых, при этом комплексно-сопряженные k_1 и k_2 переходят в действительные, что наглядно показано на рис. 3 для $A = 5, \beta = 2$. При $\omega \rightarrow \omega_s$ в области чисто поверхностных волн $|k_1 R| \ll 1$, а $|k_2 R| \gg 1$.

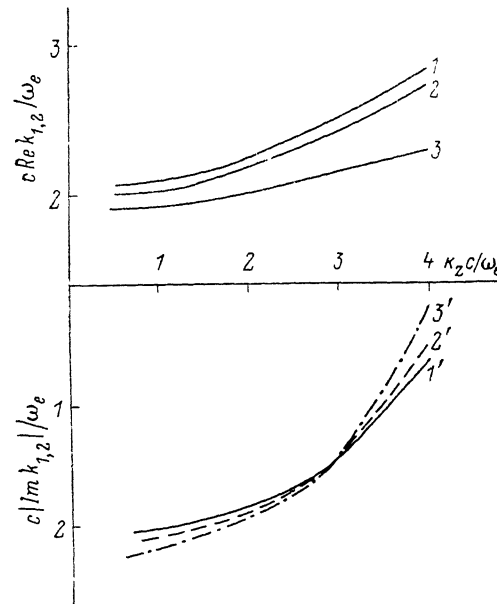


Рис. 1.

В этом случае дисперсионное уравнение (1) можно исследовать аналитически. Из (1а) следует, что при $\omega \leq \omega_e$

$$k_1 \approx \sqrt{2 \frac{\Omega_e^2}{c^2} - k_z^2 \frac{\omega_r^2 - \omega^2}{\omega^2}}, \quad k_2 \approx k_z,$$

$$F_1 \approx \frac{\Omega_e^2}{c^2}, \quad F_2 \approx k_z^2 \frac{\omega_r^2}{\omega^2}.$$
(4)

Из (4) видно, что поскольку $k_2 \gg k_1$ и $F_2 \gg F_1$, то в зависимости от R может реализоваться ситуация, при которой $|k_1 R| \ll 1$, а $|k_2 R| \gg 1$. При таких условиях на радиальные волновые числа уравнение (1) принимает следующий вид:

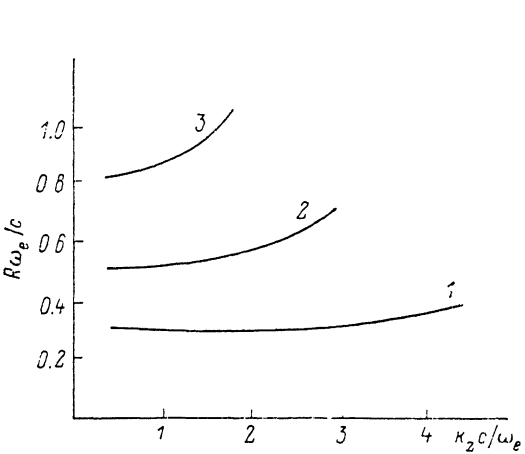


Рис. 2.

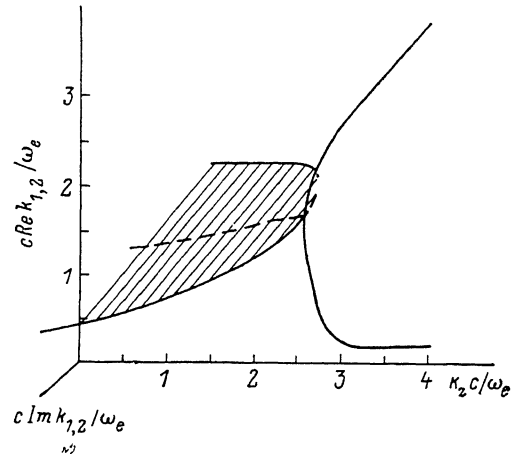


Рис. 3.

$$F_1 \frac{k^2 R}{2} - F_2 = 0.$$
(5)

Решая (5), получим, что

$$\omega^2 = 2k_z \frac{\omega_e^2 c^2}{R \Omega_e^2}.$$
(6)

Поскольку (6) получено для частот $\omega \leq \omega_e$, то отсюда следует условие на k_z при заданных радиусе волновода и плотности электронов плазмы

$$k_z \leq \frac{R \Omega_e^2}{2c^2}.$$
(7)

Таким образом, в работе показано, что в тонком магнитоактивном плазменном волноводе, заключенном в металлический кожух, обобщенно-поверхностные волны не существуют, а истинные поверхностные волны имеют ограниченную область существования по продольному волновому числу. Построены также зависимости радиусов волноводов, при которых происходит переход обобщенно-поверхностных волн в объемные, от продольных волновых чисел.

Авторы благодарны А. Н. Кондратенко за стимулирующие дискуссии.

Список литературы

- [1] Файнберг Я. Б., Горбатенко М. Ф. // ЖТФ. 1959. Т. 29. Вып. 5. С. 549—562.
- [2] Алексеев Э. Г., Иванов С. Т. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 12. С. 1508—1512.
- [3] Азаренков Н. А., Загинайлов Г. И., Кондратенко А. Н. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 3. С. 635—640.
- [4] Электродинамика плазмы / Под ред. А. И. Ахизера, И. А. Ахизера, Р. В. Половина и др. М.: Наука, 1974. 719 с.
- [5] Кондратенко А. Н. Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [6] Давыдов А. Б., Захаров В. А. // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 1. С. 201—207.
- [7] Онищенко И. Н., Сотников Г. В. Препринт ХФТИ. № 88-24. Харьков. 1988.
- [8] Азаренков Н. А., Дементий О. И., Костенко В. В. // ПриЭ. 1988. Т. 33. № 3. С. 546—549.