



УДК 537.87

Т.М. Заборонкова, профессор, ФГБОУ «НГТУ им. Р.Е.Алексеева»

Н.Ф. Яшина, доцент, ФГБОУ «НГТУ им. Р.Е.Алексеева»

603951, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

ВОЛНЫ, НАПРАВЛЯЕМЫЕ ПЛОСКИМ ДАКТОМ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Ключевые слова: магнитоактивная плазма, дакты плотности, волноводное распространение, электромагнитные волны

Рассматривается распространение электромагнитных волн, направляемых плоским гиротропным плазменным слоем с повышенной плотностью, расположенным в однородной резонансной магнитоактивной плазме. Показано, что при определенных параметрах слоя и среды, дакт повышенной плотности может поддерживать слабобытекающие волны. Исследованы особенности дисперсионных свойств и структуры полей мод, направляемых такими каналами.

Известно, что в магнитоактивной плазме процессы термодиффузии, имеющие место в окрестности источников, могут приводить к образованию плазменных неоднородностей, ориентированных вдоль внешнего магнитного поля (дактов плотности) [1-3]. Наличие в плазме таких неоднородностей может приводить к заметному увеличению полной мощности излучения источников в свистовом диапазоне [3]. При этом основная часть мощности в случае дактов повышенной плотности идет в моды, направляемые дактом плотности. Настоящая работа посвящена изучению особенностей каналирования электромагнитных волн, направляемых бесконечно протяженным вдоль внешнего магнитного поля гиротропным плоским волноводом с повышенной плотностью, находящимся в однородной резонансной магнитоактивной плазме.

Как известно, магнитоактивная плазма (внешнее магнитное поле $\vec{H}_0 = H_0 \vec{z}_0$), описывается тензором диэлектрической проницаемости следующего вида [4]

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & -ig & 0 \\ ig & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где величины ϵ, g, η определяются параметрами среды и в случае бесстолкновительной холодной плазмы, в диапазоне частот $\omega_{\text{г}} < \omega < \omega_{\text{п}} \ll \omega_{\text{г}}$, допускают для монохроматического поля $\exp(i\omega t)$ следующее представление

$$\epsilon = + \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{г}} - \omega}, \quad g = - \frac{\omega_{\text{п}}^2 \omega_{\text{г}}}{(\omega_{\text{г}} - \omega)^2 \omega}, \quad \eta = - \frac{\omega_{\text{п}}}{\omega},$$

где $\omega_{\text{п}}$ и $\omega_{\text{г}}$ - плазменная и гиро частоты электронов, $\omega_{\text{г}}$ - нижняя гибридная частота.

Рассмотрим бесконечный плоский плазменный слой толщиной $2a$. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости плазмы внутри и снаружи слоя будем обозначать, как $\varepsilon_i, \eta_i, g_i$ и $\varepsilon_a, \eta_a, g_a$ соответственно. Будем решать задачу в декартовой системе координат (x, y, z) . Ось z параллельна внешнему магнитному полю \vec{H}_0 . Компоненты поля волн, направляемых дактом плотности, могут быть записаны в виде [1]

$$\begin{bmatrix} \vec{E}(\vec{r}) \\ \vec{H}(\vec{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{E}(x) \\ \vec{H}(x) \end{bmatrix} \exp(i\omega \mp ik_0 pz) = \sum_{k=1}^{\infty} \begin{bmatrix} \vec{E}_k(x, q_k(p)) \\ \vec{H}_k(x, q_k(p)) \end{bmatrix} \exp(i\omega \mp ik_0 pz), \quad (2)$$

В выражении (2) p - нормированная продольная постоянная распространения, $k_0 = \sqrt{\varepsilon_i}$, знаки « \mp » отвечают волнам, распространяющимся в положительном и отрицательном направлениях оси z . Поперечные волновые числа в дакте и магнитоактивной среде ($q_{i,2}$ и $q_{a,2}$ соответственно) связаны с продольной постоянной распространения p следующими соотношениями:

$$q_k(p) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\varepsilon_i - \frac{g_i^2}{\varepsilon_i} + (1 - \frac{\eta_i}{\varepsilon_i}) p^2 + (-)^k \varepsilon_i R(p)]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\text{где } R(p) = (\eta_i - \varepsilon_i) p^4 + (\varepsilon_i g_i^2 (\eta_i - \varepsilon_i) - (1 - \varepsilon_i)) p^2 + \varepsilon_i - g_i^2 - \eta_i \varepsilon_i^{1/2}.$$

Нетрудно получить, что векторные функции $\vec{E}(x)$ и $\vec{H}(x)$ для волн распространяющихся в положительном направлении оси z могут быть записаны в виде при $|x| < a$ $|x| > a$

$$\begin{aligned} E_x &= - \sum_{k=1}^2 B_k \frac{n_{ik} p + g_i}{\varepsilon_i} \begin{Bmatrix} \cos(k_0 q_{ik} x) \\ \sin(k_0 q_{ik} x) \end{Bmatrix}, & E_x &= - \sum_{k=1}^2 C_k \frac{n_{ak} p + g_a}{\varepsilon_a} \begin{Bmatrix} \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \\ \pm \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \end{Bmatrix}, \\ E_y &= i \sum_{k=1}^2 B_k \begin{Bmatrix} \cos(k_0 q_{ik} x) \\ \sin(k_0 q_{ik} x) \end{Bmatrix}, & E_y &= i \sum_{k=1}^2 C_k \begin{Bmatrix} \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \\ \pm \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \end{Bmatrix}, \\ E_z &= \frac{i}{\eta_i} \sum_{k=1}^2 B_k n_{ik} q_{ik} \begin{Bmatrix} -\sin(k_0 q_{ik} x) \\ \cos(k_0 q_{ik} x) \end{Bmatrix}, & E_z &= \frac{i}{\eta_a} \sum_{k=1}^2 C_k n_{ak} q_{ak} \begin{Bmatrix} \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \\ \pm \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \end{Bmatrix}, \\ H_x &= -i \frac{p}{Z_0} \sum_{k=1}^2 B_k \begin{Bmatrix} \cos(k_0 q_{ik} x) \\ \sin(k_0 q_{ik} x) \end{Bmatrix}, & H_x &= -i \frac{p}{Z_0} \sum_{k=1}^2 C_k \begin{Bmatrix} \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \\ \pm \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \end{Bmatrix}, \\ H_y &= - \frac{1}{Z_0} \sum_{k=1}^2 B_k n_{ik} \begin{Bmatrix} \cos(k_0 q_{ik} x) \\ \sin(k_0 q_{ik} x) \end{Bmatrix}, & H_y &= - \frac{1}{Z_0} \sum_{k=1}^2 C_k n_{ak} \begin{Bmatrix} \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \\ \pm \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \end{Bmatrix}, \\ H_z &= \frac{1}{Z_0} \sum_{k=1}^2 B_k q_{ik} \begin{Bmatrix} \sin(k_0 q_{ik} x) \\ -\cos(k_0 q_{ik} x) \end{Bmatrix}. & H_z &= -i \frac{1}{Z_0} \sum_{k=1}^2 C_k q_{ak} \begin{Bmatrix} \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \\ \pm \exp(\mp ik_0 q_{ak} x) \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

где B_k и C_k - некоторые константы; $n_k = \sqrt{\varepsilon_i [p^2 + q_k^2 + \frac{g_i^2}{\varepsilon_i} - \eta_i]}$, верхние знаки

соответствуют полям при $x > a$, а нижние - полям при $x < -a$, верхние строки в фигурных скобках относятся к полям для четной моды, а нижние - к полям для нечетной моды.

Из условия непрерывности тангенциальных компонент поля на границах слоя ($|x| = a$) можно получить дисперсионное уравнение, позволяющие определить продольные постоянные распространения мод, каналируемых дактом плотности. Дисперсионное уравнение для четных мод имеет вид

$$\begin{aligned}
& \frac{ctg(k_0 q_{i1} a)}{q_{i1} (n_{i1} - n_{i2})(n_{a1} - n_{a2})} \left(\frac{(n_{i1} - n_{a1}) \left(\frac{\eta_i}{\eta_a} n_{a2} - n_{i2} \right)}{q_{a1}} - \frac{(n_{i1} - n_{a2}) \left(\frac{\eta_i}{\eta_a} n_{a1} - n_{i2} \right)}{q_{a2}} \right) - \\
& - \frac{ctg(k_0 q_{i2} a)}{q_{i2} (n_{i1} - n_{i2})(n_{a1} - n_{a2})} \left(\frac{(n_{i2} - n_{a1}) \left(\frac{\eta_i}{\eta_a} n_{a2} - n_{i1} \right)}{q_{a1}} - \frac{(n_{i2} - n_{a2}) \left(\frac{\eta_i}{\eta_a} n_{a1} - n_{i1} \right)}{q_{a2}} \right) + \\
& + i \frac{\eta_i}{\eta_a} \frac{ctg(k_0 q_{i1} a) ctg(k_0 q_{i2} a)}{q_{i1} q_{i2}} - \frac{i}{q_{a1} q_{a2}} = , \tag{5}
\end{aligned}$$

Дисперсионное уравнение для нечетных мод получается из (5) заменой $ctg(k_0 q_{i1} a) \rightarrow g(k_0 q_{i1} a)$.

Уравнение (5) исследовалось численно. При проведении расчетов использовались следующие значения параметров плазмы: $\frac{N_i}{Na} = .1$ и 3.2 , gyro- и плазменная частоты электронов $\omega_H = .32 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$, $\omega_{pa} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ [5]. Заметим, что при выбранных параметрах среды (внутри и снаружи дакта) имеет место условие $\varepsilon \eta < 1$, при котором магнитоактивная плазма является резонансной.

Численные расчеты показали, что в рассматриваемом частотном интервале плазменный дакт может поддерживать слабовытекающие квазилокализованные волны (т.е. волны с малой мнимой частью продольной постоянной распространения). Внутри дакта мода имеет объемный характер. Влияние неоднородных структур с незначительным перепадом плотности плазмы на характеристики излучения источников, как правило, невелико. Большой практический интерес представляют дакты со значительным перепадом плотности. Ниже мы приведем результаты численных расчетов комплексной постоянной распространения четной и нечетной слабовытекающих мод для $\frac{N_i}{Na} = 3.2$ при различных значениях толщины дакта и частоты волны.

$a = 1.01 \text{ м}, x = \frac{\omega}{\omega_H} = 1.1$		$a = 1.01 \text{ м}, x = \frac{\omega}{\omega_H} = 1.15$	
четная	нечетная	четная	нечетная
$p=21.15-i0.02$	$p=21.259-i0.1$	$p=21.025-i0.02$	$p=21.22-i0.078$
$p=24.2-i0.25$	$p=24.2-i0.015$	$p=24.05-i0.35$	$p=23.475-i0.01$
$p=28.7-i0.3$	$p=27.75-i0.205$	$p=26.572-i0.002$	$p=27.33-i0.315$
$p=31.445-i0.05$	$p=33.07-i0.45$		
$a = 1.015 \text{ м}, x = \frac{\omega}{\omega_H} = 1.1$		$a = 1.015 \text{ м}, x = \frac{\omega}{\omega_H} = 1.15$	
четная	нечетная	четная	нечетная
$p=20.596-i0.03$	$p=20.61-i0.002$	$p=20.582-i0.03$	$p=20.55-i0.000015$
$p=22.165-i0.05$	$p=22-i0.065$	$p=21.9-i0.008$	$p=21.9135-i0.085$
$p=24.079-i0.0214$	$p=24.443-i0.18$	$p=23.73-i0.1$	$p=24.005-i0.075$
$p=26.87-i0.2$	$p=26.951-i0.04$	$p=26.454-i0.15$	$p=25.739-i0.065$
$p=30.115-i0.25$	$p=29.35-i0.11$	$p=27.566-i0.06$	
$p=31.992-i0.01$	$p=32.925-i0.29$		

Как следует из расчетов, число слабовытекающих мод, поддерживаемых данной структурой уменьшается с увеличением частоты и растет с увеличением перепада плотности плазмы и толщины дакта. При определенных условиях взаимодействие таких волн в рассматриваемых структурах может привести к развитию параметрической неустойчивости и их усилению.

Список литературы:

- [1]. Kondrat'ev I.G., Kudrin A.V, Zaboronkova T.M. Electrodynamics of Density Ducts in Magnetized Plasmas. Gordon and Breach, Amsterdam, 1999.
- [2]. Kostrov A.V., Kudrin A.V., Kurina L.E., Luchinin G.A., Shaykin A.A., and Zaboronkova T.M. // Physica Scripta. 2000. V. 62, Pt.1, P.51—65.
- [3]. Kudrin A.V., Lyakh M. Yu., Zaboronkova T.M. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2001. V. 49. No. 12. P. 1645—1648.
- [4]. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука. 1967.
- [5]. Golubyatnikov G.Yu., Egorov S.V., Eremin B.G., Litvak A.G. et. al. // Sov. Phys. JETP. 1995. 80 (2). 234-239.

ELECTROMAGNETIC WAVES GUIDED BY A PLANE DUCT WITH ENHANCED DENSITY IN MAGNETOPLASMA

T.M. Zaboronkova and N.F. Yashina

Key words: magnetized plasma, ducts of density, waveguide propagation волноводное распространение, electromagnetic waves.

The propagation of electromagnetic waves guided by the plane gyrotropic plasma slab with enhanced plasma density in uniform resonant background magnetoplasma is considered. It is shown that under certain condition the duct with enhanced plasma density is able to support the leaky waves. The dispersion characteristics and structures of the guided modes are analyzed.