

# РЕЗОНАНСНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СЛОЙ НЕОДНОРОДНОЙ КИРАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

*М.В. Поверенный<sup>1</sup>, Н.С. Ерохин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, Россия;*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

Рассмотрено безотражательное прохождение электромагнитной волны с круговой поляризацией через слой неоднородной киральной плазмы в отсутствие внешнего магнитного поля. Показано, что в задаче имеются свободные параметры, изменением которых можно существенно варьировать профиль неоднородности плазмы в слое с включением любого числа различных субволновых структур, областей непрозрачности.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы как в России, так и за рубежом большой интерес проявляется к исследованиям эффекта резонансного туннелирования волн через среды с мелкомасштабными (субволновыми) неоднородностями (см., например, работы [1-5]). В частности, это безотражательное прохождение волн различной природы через достаточно толстые слои неоднородной среды.

Наиболее конструктивный подход в данной проблеме состоит в использовании точно решаемых моделей взаимодействия волн с неоднородной средой. Такие модели дают возможность изучать волновые процессы в условиях, когда приближенные методы непригодны, поскольку рассматриваются неоднородности большой амплитуды. Кроме того, они предсказывают новые эффекты, представляющие большой интерес для целого ряда важных практических приложений. Например, безотражательное туннелирование волн через плазму важно для понимания механизмов выхода излучения от источников, находящихся в плотной плазме в астрофизике, оно представляет интерес для повышения эффективности поглощения мощного электромагнитного излучения при нагреве плазмы до термоядерных температур в результате проникновения волн в область достаточно плотной плазмы.

Далее в радиофизике с этим связано направление исследований по повышению эффективности просветляющих и поглощающих покрытий в диапазоне радиоволн, для разработки тонких радиопрозрачных обтекателей для антенн [3], где интерес представляет поиск оптимального распределения диэлектрической проницаемости по толщине просветляющего слоя, при котором будут обеспечены минимальный коэффициент отражения или эффективная передача электромагнитных сигналов от антенн, покрытых слоем плотной плазмы [6].

Выполненный для ряда ситуаций анализ (см., например, работы [2-5,7]) показал, что можно обеспечить безотражательное туннелирование электромагнитных волн из вакуума в неоднородный слой несмотря на скачок диэлектрической проницаемости на границе раздела.

Здесь необходимо отметить, что анализ точно решаемых моделей позволит значительно улучшить существующие представления о пространственно-

временной динамике электромагнитных полей в неоднородных диэлектрических структурах с сильной пространственной дисперсией.

## 2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ИХ РЕШЕНИЕ

В данном сообщении на основе точно решаемой 1D-модели уравнения Гельмгольца рассмотрено безотражательное резонансное туннелирование поперечной электромагнитной волны круговой поляризации через слой неоднородной киральной плазмы с мелкомасштабными структурами. В анализе учитываются стандартные соотношения между индукциями и полями в киральной среде:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} - i\gamma \mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = i\gamma \mathbf{H} + (\epsilon + \gamma^2) \mathbf{E},$$

где  $\gamma$  – малый параметр киральности (см., например, [7]). Для волн круговой поляризации вводятся функции  $F_{1,2} = (E_x \pm i E_y) \exp(\pm i\gamma \xi)$ , где  $\xi = \omega z/c$  – безразмерная координата вдоль направления неоднородности, которые согласно уравнениям Максвелла подчиняются уравнению Гельмгольца [7]. Исследуемые пространственные профили эффективной диэлектрической проницаемости киральной плазмopodobной среды характеризуются рядом свободных параметров, определяющих, в частности, типичные размеры мелкомасштабных неоднородностей, пространственный профиль поля волны, глубину модуляции диэлектрической проницаемости. Принципиальным моментом анализа является то, что решение может быть представлено в виде, автоматически удовлетворяющем условиям безотражательной сшивки волновых полей на границах плазменного слоя.

На основе точных аналитических решений уравнения Гельмгольца проведены численные расчеты, которые показали, что возможен широкий выбор параметров мелкомасштабных структур, обеспечивающих безотражательное туннелирование падающей из вакуума электромагнитной волны круговой поляризации через неоднородный слой киральной плазмы. Получены пространственные профили нормированной амплитуды волнового поля, безразмерного волнового числа, эффективной диэлектрической проницаемости киральной плазмы, распределения плотности плазмы в слое. Отметим, что ряд вариантов безотражательного резонансного туннелирования электромагнитной волны через неоднородную киральную плазму был рассмотрен в работе [7].

Зададим безразмерное волновое число  $p = c k/\omega$  формулой:

$$\begin{aligned} p(\xi) &= 1 - \chi \cdot f(\xi) \cdot s(\xi) \cdot [1 - \cos(\alpha \cdot \xi)]; \\ f(\xi) &= 0.5 \cdot \{1 + (\xi - a_1)/[\mu^2 + (\xi - a_1)^2]^{1/2}\}; \\ s(\xi) &= 0.5 \cdot \{1 - (\xi - a_2)/[\mu^2 + (\xi - a_2)^2]^{1/2}\} \end{aligned} \quad (1)$$

с параметрами  $a_1 = b/4$ ;  $a_2 = 3 b/4$ ;  $\mu = 1$ ;  $\alpha = 2\pi/b$ ,  $\chi = 0.5$ . Следовательно, в неоднородном слое  $0 \leq \xi \leq b$  выполняется условие  $p > 0$ . Важно отметить, что согласно (1) в данном случае на границах слоя величина  $p(\xi)$  равна вакуумному значению 1, и поскольку производные  $p_\xi(0) = p_\xi(b) = 0$ , возможна сшивка безотражательного решения

$$F_{1,2}(\xi) = F_0 A(\xi) \exp[i\Psi(\xi)], \quad p(\xi) = d\Psi/d\xi$$

с падающей на слой слева и уходящей от него справа волнами. Введем нормированную амплитуду волны  $A(\xi) = 1/[p(\xi)]^{1/2}$  и безразмерную плотность плазмы  $v(\xi) = 1 - \varepsilon_{ef}(\xi)$ . Связь эффективной диэлектрической проницаемости киральной плазмы  $\varepsilon_{ef}(\xi)$  с волновым числом  $p(\xi)$  указана ниже:

$$\begin{aligned} g(\xi) &= dp/d\xi, \quad h(\xi) = d^2p/d\xi^2, \\ \varepsilon_{ef}(\xi) &= [p(\xi)]^2 + h(\xi) / 2p(\xi) - 0.75 \{g(\xi) / p(\xi)\}^2. \end{aligned}$$

Графики результатов расчетов  $A(\xi)$ ,  $p(\xi)$ ,  $v(\xi)$ ,  $\varepsilon_{ef}(\xi)$  показаны на Рис. 1, а-г для  $b = 20$ .

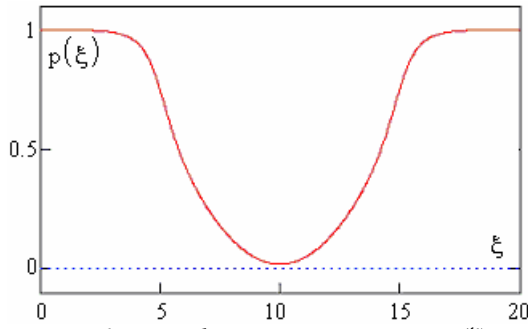


Рис. 1, а. Профиль волнового числа  $p(\xi)$

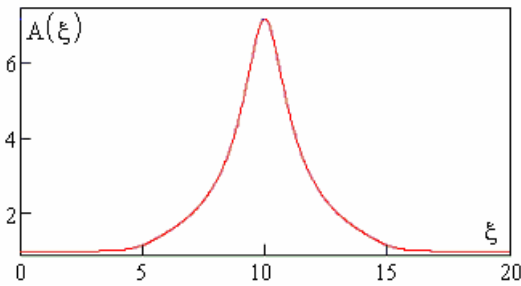


Рис. 1, б. График нормированной амплитуды волны  $A(\xi)$

Согласно Рис. 1, а в центре плазменного слоя имеется сильное уменьшение волнового вектора  $p(\xi)$ . Вследствие этого наблюдается значительное усиление амплитуды волны  $A(\xi)$  порядка 7. Профиль эффективной диэлектрической проницаемости носит сложный характер с узким подслоем в центре, в котором  $\varepsilon_{ef}(\xi)$  отрицательно. Сложный профиль с вариациями имеет и безразмерная плотность плазмы  $v(\xi)$  на Рис. 1, в. Меняя параметры и функции  $f(\xi), s(\xi)$ , можно получать неограниченное количество различных профилей неоднородности в слое киральной плазмы с субволновыми структурами, для которых реализуется безотражательное прохождение электромагнитной волны с круговой поляриза-

цией. В качестве примера на Рис. 2 приведен вариант квазипериодической неоднородности плазменного слоя, включающий области непрозрачности плазмы. Толщину слоя можно увеличивать многократно, однако безотражательное туннелирование волны через него сохраняется.

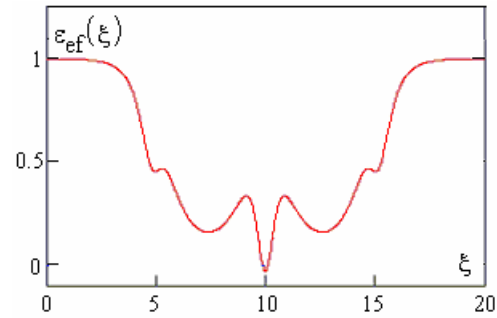


Рис. 1, в. Эффективная диэлектрическая проницаемость плазмы  $\varepsilon_{ef}(\xi)$

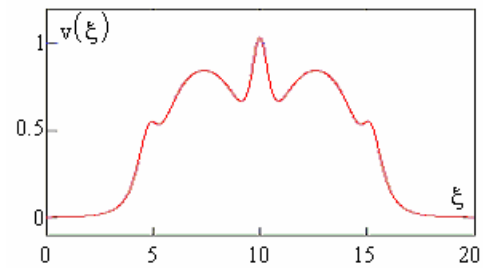


Рис. 1, г. Профиль безразмерной плотности плазмы в неоднородном слое

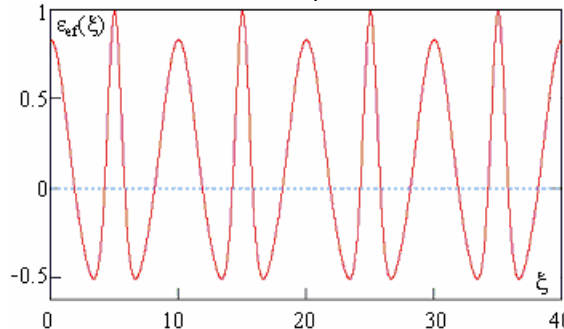


Рис. 2. Профиль эффективной диэлектрической проницаемости в слое киральной плазмы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная выше методика исследования точных решений волнового уравнения при сильной неоднородности киральной плазмы представляет несомненный интерес, например, для рассмотренных ранее задач согласования [8,9] характеристик плазмы и падающей из вакуума электромагнитной волны в целях существенного увеличения эффективности поглощения электромагнитного излучения в слоях плазменных резонансов. Кроме того, эта методика анализа распространения волн на основе точных аналитических решений вполне пригодна и для исследований резонансного туннелирования других типов волн через барьеры в неоднородных средах. Например, при взаимодействии внутренних гравитационных или звуковых волн с неоднородными слоями в океане и атмосфере резонансное туннелирование представляет интерес, в частности, для задач дистанционного зондирования этих сред

[10, 11]. Эффект резонансного туннелирования важен и для исследований взаимодействия низкочастотных электромагнитных волн с неоднородной ионосферой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Л. Гинзбург, А.А. Рухадзе. *Электромагнитные волны в плазме*. М.: «Наука», 1970, 341 с.
2. А.Б. Шварцбург // *УФН*. 2000, т.170, р.1297.
3. Б.А. Лаговский // *Радиотехника и электроника*. 2006, т.51, с.74.
4. Н.С. Ерохин, Л.А. Михайловская, Н.Н. Ерохин. *Некоторые примеры точных решений математических моделей, описывающих колебания неперывных сред*: Препринт ИКИ РАН, Пр-2109, М.: ИКИ РАН, 2005, с.14.
5. Н.С. Ерохин, В.Е. Захаров // *ДАН*. 2007, т.416, с.1.
6. S.V. Nazarenko, F.C. Newell, V.E. Zakharov // *Physics of Plasmas*. 1994, v.1, 2827 p.
7. Г.В. Гах, Н.С. Ерохин // *Вопросы атомной науки и техники*. 2008, № 4, с.119.
8. А.А. Жаров, А.Л. Котов // *Физика плазмы*. 1984, т.10, с.615.
9. А.Н. Козырев, А.Д. Пиляя, В.И. Федоров // *Физика плазмы*. 1979, т.5, с. 322.
10. Т.Г. Талипова, Е.Н. Пелиновский, Н.С. Петрухин // *Океанология*. 2009, т.49, № 5, с. 673.
11. В.И. Власенко // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1987, т.23, №3, с.225.

*Статья поступила в редакцию 19.05.2010 г.*

#### RESONANT TUNNELING OF ELECTROMAGNETIC WAVES THROUGH CHIRAL INHOMOGENEOUS PLASMA LAYER

*M.V. Poverenny, N.S. Erokhin*

We consider the reflectionless transmission of electromagnetic waves with circular polarization through a layer of chiral inhomogeneous plasma in the absence of an external magnetic field. It is shown that the problem there are free parameters, which change can vary considerably profile of plasma inhomogeneities in the layer with the inclusion of any number of different sub-wavelength structures, areas of opacity.

#### РЕЗОНАНСНЕ ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ ЧЕРЕЗ ШАР НЕОДНОРІДНОЇ КІРАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ

*M.V. Поверенний, М.С. Єрохін*

Розглянуто безвідбивальне проходження електромагнітної хвилі з круговою поляризацією через шар неоднорідної кіральної плазми за відсутністю зовнішнього магнітного поля. Показано, що у задачі є вільні параметри, зміною яких можна істотно варіювати профіль неоднорідності плазми у шарі з включенням будь-якої кількості різних субхвильових структур, областей непрозорості.