

РЕЗОНАНСНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СЛОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ГЕНЕРАЦИЕЙ ВСПЛЕСКОВ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Е.С. Меркулов¹, Н.С. Ерохин²

¹*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, Россия;*

²*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

E-mail: djo_rj_dyurua@mail.ru

Рассмотрены точные решения линейного уравнения Гельмгольца, описывающие безотражательное прохождение электромагнитной волны через неоднородный слой плазмы с субволновыми структурами ее плотности большой амплитуды. Показано, что плазменный слой может включать достаточно широкие области непрозрачности, а также субслои, в которых имеются всплески волнового поля большой амплитуды. Изменением исходных параметров задачи можно существенно варьировать профиль неоднородности плазмы.

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования ряда точно решаемых моделей, описывающих безотражательное прохождение электромагнитной волны через слой плазмы с субволновыми неоднородностями большой амплитуды. Ранее эти вопросы рассматривались, например, в работах [1-5]. Модели представляют интерес для исследования особенностей взаимодействия электромагнитных волн с неоднородными средами, в частности, возможностей их безотражательного резонансного туннелирования через волновые барьеры. Причины использования для данных взаимодействий точно решаемых моделей заключаются в наличии мелко-масштабных неоднородностей большой амплитуды. Решение и исследование точных моделей важны как для теоретического анализа возможностей туннелирования волн через протяженные, сильно неоднородные слои, так и для практических приложений, в частности, в задачах нагрева плазмы электромагнитным излучением, просветления волновых барьеров, для понимания механизмов выхода излучения от источников, находящихся в плотной плазме в астрофизике. Кроме того, такие модели активно используются для исследований по повышению эффективности просветляющих и поглощающих покрытий в радиодиапазоне и разработки тонких радиопрозрачных обтекателей для антенн [3]. Основное направление исследований связано с поиском 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]. Проведенный ранее анализ (см., например, работы [2-5,7]) показал, что можно обеспечить безотражательное туннелирование электромагнитных волн из вакуума через неоднородный слой несмотря на скачок диэлектрической проницаемости на границе раздела. Следует также отметить, что анализ точно решаемых моделей позволит значительно улучшить имеющиеся представления о пространственно-временной динамике электромагнитных полей в диэлектрических структурах с сильной пространственной дисперсией.

2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

В данном сообщении на основе точно решаемой модели для одномерного уравнения Гельмгольца $d^2F/dx^2 + k_0^2 \cdot \epsilon_{ef}(x) \cdot F = 0$ рассмотрено безотражательное туннелирование поперечной электромагнитной волны через слой неоднородной плазмы, содержащий субволновые структуры, и возникновение в некоторых областях слоя узких всплесков волнового поля с большим его усилением. Здесь $k_0 = \omega/c$, $\epsilon_{ef}(x)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость (квадрат показателя преломления плазмы). Введем также безразмерную плотность плазмы $v(\xi) = \omega_{pe}^2/\omega^2$. Рассмотрим следующие точные решения уравнения Гельмгольца:

$$A(\xi) = \mu + \alpha \cdot \exp(-\eta^2), \quad p(\xi) = 1/A^2(\xi), \\ \epsilon_{ef}(\xi) = [p(\xi)]^2 + h(\xi)/2 \cdot p - 0.75[g(\xi)/p]^2, \quad (1) \\ v(\xi) = 1 - \epsilon_{ef}(\xi), \quad \eta = \gamma \xi,$$

$$A(\xi) = \alpha / \{1 - \chi [1 + \cos(\eta)]\}, \\ p(\xi) = \{1 - \chi [1 + \cos(\eta)]\}^2 / \alpha^2, \quad (2) \\ \epsilon_{ef}(\xi) = [p(\xi)]^2 + h(\xi)/2 \cdot p - 0.75[g(\xi)/p(\xi)^2], \\ v(\xi) = 1 - 0.5 \epsilon_{ef}(\xi) + [D(\xi)]^{0.5}, \\ D(\xi) = 0.25 [\epsilon_{ef}(\xi)]^2 + u^2 [1 - \epsilon_{ef}(\xi)],$$

где $h(\xi) = d^2p/d\xi^2$, $g(\xi) = dp/d\xi$. Формулы (1), (2) относятся к случаям отсутствия внешнего магнитного поля и при его наличии соответственно. Исследуемые пространственные профили волнового поля характеризуются набором свободных параметров, определяющих, например, глубину модуляции диэлектрической проницаемости, характерные размеры мелко-масштабных неоднородностей, усиление волновых полей в некоторых субслоях.

На Рис.1 представлены пространственные профили нормированной амплитуды поля электромагнитной волны, эффективной диэлектрической проницаемости плазмы, безразмерного волнового числа и неоднородного распределения плотности плазмы в слое для модели (1) при следующих значениях параметров: $\mu = 1$, $\alpha = 9$, $\gamma_1 = 0.2$. Отметим большое усиление амплитуды волны в центре слоя (порядка 10), наличие областей непрозрачности плазмы, в которых $\epsilon_{ef}(\xi) < 0$, а также двугорбый характер профилей $\epsilon_{ef}(\xi)$, $v(\xi)$.

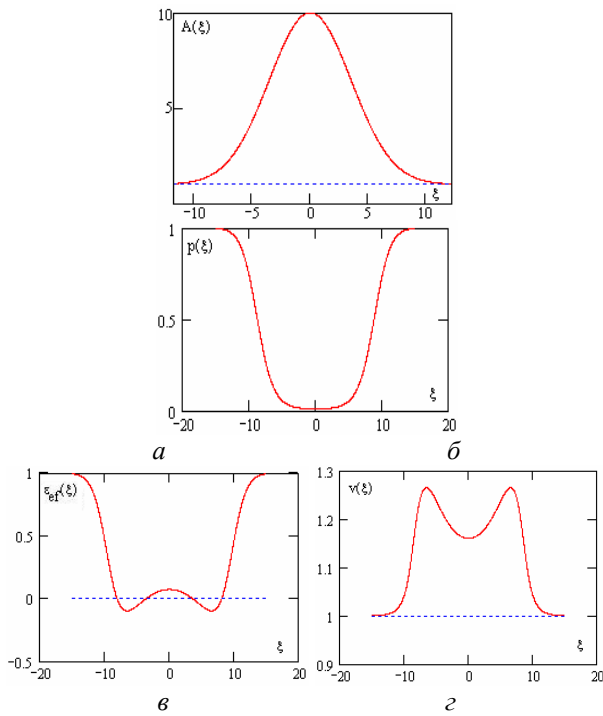


Рис.1. Нормированная амплитуда волны (а);
 профиль безразмерного волнового числа (б);
 график диэлектрической проницаемости (в);
 профиль плотности плазмы (г)

Изменив в этой модели один из параметров, например, γ_1 на $\gamma_2=2$ получим профили характеристик, показанные на Рис.2. Как видим, на графиках произошли качественные изменения. Так на Рис.2,а,б изменилась ширина слоя, а на графиках Рис.2,в,г, кроме того, изменились ещё амплитуды вариаций $\epsilon_{\text{eff}}(\xi)$, $v(\xi)$. Максимальное значение $\epsilon_{\text{eff}}(\xi) > 1$ соответствует распространению электромагнитной волны в магнитоактивной плазме. Следует отметить увеличение толщины областей непрозрачности плазмы и большие пики плотности плазмы с обеих сторон центра слоя.

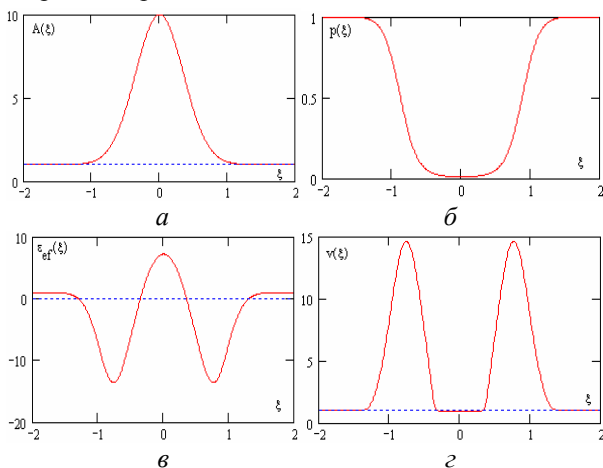


Рис.2. График нормированной амплитуды волны (а);
 профиль безразмерного волнового числа (б);
 график диэлектрической проницаемости (в);
 график плотности плазмы (г)

Графики характеристик волны для модели (2) приведены на Рис.3 для варианта $\chi = 0.4$, $\alpha = 20$, $b = 3$, $\gamma = 2 \cdot \pi/b$. Как видим, в данном случае имеется периодическая модуляция амплитуды волны, волно-

вого вектора, эффективной диэлектрической проницаемости и плотности магнитоактивной плазмы. Согласно Рис.3,а усиление амплитуды волны в максимуме порядка 100. Сильные всплески поля волны, аналогичные рассмотренным ранее в работе [10], наблюдаются в слоях, где величина волнового вектора оказывается весьма малой.

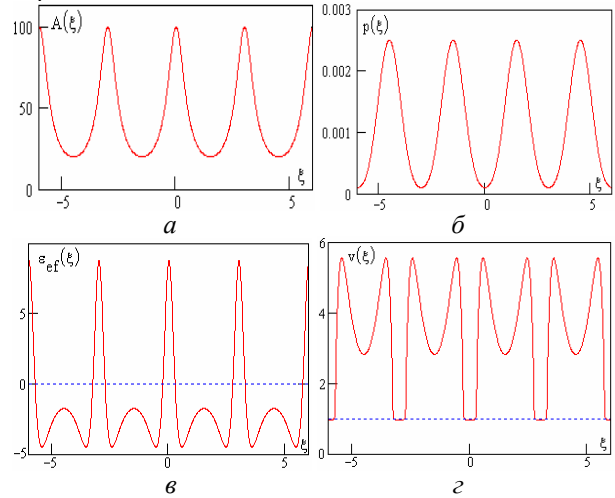


Рис.3. График нормированной амплитуды волны (а);
 профиль безразмерного волнового числа (б);
 график диэлектрической проницаемости (в);
 график плотности плазмы (г)

Интересно, что большая часть неоднородного плазменного слоя непрозрачна и, тем не менее, реализуется безотражательное туннелирование электромагнитной волны через неоднородный слой. Обратим также внимание на вариации плотности плазмы большой амплитуды в слое. Здесь следует отметить принципиальное обстоятельство: приведенные выше графики не изменятся при увеличении толщины слоя плазмы в любое целое число раз при неизменных прочих параметрах. Следовательно, безотражательное прохождение волны реализуется для слоя произвольной, сколь угодно большой толщины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе точных решений одномерного уравнения Гельмгольца, описывающих взаимодействие волны с неоднородным слоем плазмы, показано, что набор субволновых плазменных структур большой амплитуды может быть весьма разнообразным и в каждом случае происходит безотражательное прохождение падающей из вакуума электромагнитной волны через неоднородный плазменный слой.

Получены профили пространственного распределения нормированной амплитуды поля электромагнитной волны, эффективной диэлектрической проницаемости плазмы, безразмерного волнового числа и неоднородного распределения плотности плазмы в слое, демонстрирующие большие вариации характеристик волны и плазменного слоя.

В некоторых областях плазменного слоя возможно возникновение всплесков волнового поля большой амплитуды.

Использованный в работе подход представляет также интерес для задач согласования [8,9] парамет-

ров плазмы и падающей из вакуума электромагнитной волны в целях повышения эффективности поглощения электромагнитного излучения в слоях плазменных резонансов. Следует также отметить, что развиваемая методика анализа распространения волн на основе точных 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 жидкости в океане, что представляет интерес, в частности, для задач дистанционного зондирования. Можно ожидать, что исследуемый эффект резонансного туннелирования будет проявляться и при взаимодействии УНЧ-волн с неоднородной ионосферой.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Л. Гинзбург, А.А. Рухадзе. *Электромагнитные волны в плазме*. Москва: «Наука», 1970, с.342.
2. А.Б. Шварцбург //УФН. 2000, т.170, с.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 непрерывных сред*: Препринт ИКИ РАН, Пр-2109, ИКИ РАН, Москва, 2005, 14 с.
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, p.2827.
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. Пилия, В.И. Федоров // *Физика плазмы*. 1979, т.5, с.322.
10. N.S. Erokhin, V.E. Zakharov // *Сборник трудов, Международной конференции МСС-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность"*. Москва: Изд-во "URSS", 2009, с.164.

Статья поступила в редакцию 01.06.2010 г.

RESONANCE TUNNELING OF ELECTROMAGNETIC WAVES THROUGH A LAYER OF INHOMOGENEOUS PLASMA WITH GENERATION PEAK OF WAVE FIELDS

E.S. Merkulov, N.S. Erohin

We consider exact solutions of the linear Helmholtz equation, describing the reflectionless transmission of electromagnetic waves through an inhomogeneous plasma layer with subwavelength structures of the density of large amplitude. It is shown that the plasma layer can include a wide enough field of opacity, as well as sublayers, in which there are bursts of large amplitude wave field. By varying the initial parameters of the problem can vary significantly profile of plasma inhomogeneities.

РЕЗОНАНСНЕ ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ ЧЕРЕЗ ШАР НЕОДНОРІДНОЇ ПЛАЗМИ З ГЕНЕРАЦІЄЮ СПОЛОХІВ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ

Є.С. Меркулов, М.С. Єрохін

Розглянуто точні розв'язки лінійного рівняння Гельмгольца, що описують безвідбивальне проходження електромагнітної хвилі через неоднорідний шар плазми з субхвильовими структурами її густини великої амплітуди. Показано, що плазмовий шар може включати достатньо широкі області непрозорості, а також субшари, в яких є сполохи хвильового поля великої амплітуди. Зміною вихідних параметрів задачі можна істотно варіювати профіль неоднорідності плазми.