**РЕЗОНАНСНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАДИЕНТНЫЕ БАРЬЕРЫ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ**

**Н.С. Ерохин1,2, С.Н. Артеха1, Н.С. Артеха2**

*1 Институт космических исследований РАН, г. Москва,* [*sergey.arteha@gmail.com*](mailto:sergey.arteha@gmail.com)

*2 Российский университет дружбы народов, г. Москва,* [*nerokhin@yandex.ru*](mailto:nerokhin@yandex.ru)

**Аннотация.** Исследование взаимодействия электромагнитных волн с неоднородной плазмой позволяет значительно улучшить существующие представления о динамике волн в сильно неоднородных и нестационарных диэлектрических средах, а также имеет большое значение для различных практических приложений, таких как нагрев плазмы, диагностика и интерпретация экспериментальных данных. Представляет интерес анализ возможностей реализации безотражательного прохождения волн через волновые барьеры на основе разработки точно решаемых физико-математических моделей. В работе проведён анализ такой модели на основе нелинейного уравнения, определяющего профиль эффективной диэлектрической проницаемости плазмы в зависимости от выбора профиля безразмерного волнового вектора с учётом положительности профиля безразмерной плотности плазмы. В работе рассмотрено распространение электромагнитных волн для случая периодических возмущений и для случая локализованных неоднородностей. Показано, что при соответствующем выборе параметров задачи могут получаться достаточно сложные пространственные профили, реализующие безотражательное распространение электромагнитной волны через неоднородную плазму.

**Ключевые слова:** волновые барьеры, неоднородная плазма, безотражательное прохождение волн, точно решаемые модели.

**Abstract.** The study of the interaction of electromagnetic waves with inhomogeneous plasma can significantly improve the existing concepts about the dynamics of waves in highly inhomogeneous and non-stationary dielectric media, and is also of great importance for various practical applications, such as plasma heating, diagnostics and interpretation of experimental data. It is of interest to analyze the possibilities of implementing reflectionless wave passage through wave barriers based on the development of exactly solvable physical and mathematical models. This paper analyzes such a model based on a nonlinear equation that determines the effective dielectric permittivity profile of the plasma depending on the choice of the dimensionless wave vector profile, taking into account the positive profile of the dimensionless plasma density. The propagation of electromagnetic waves for the case of periodic perturbations and for the case of localized inhomogeneities is considered. It is shown that with an appropriate choice of the parameters of the problem, rather complex spatial profiles can be obtained that implement reflectionless propagation of the electromagnetic wave through the inhomogeneous plasma.

**Key words:** wave barriers, inhomogeneous plasma, reflectionless passage of waves, exactly solvable models.

1. **Введение**

В настоящее время активно развиваются исследования взаимодействия электромагнитных волн с неоднородными средами [1...4], включая лабораторную и космическую плазму [5...8]. Важную роль при этом играют различные резонансные эффекты. Поэтому большое значение представляет анализ возможностей реализации безотражательного прохождения волн через волновые барьеры на основе разработки точно решаемых физико-математических моделей [8...11]. Анализ таких резонансных эффектов представляет значительный интерес для различных практических приложений, в частности, для задачи нагрева заданной области плотной плазмы электромагнитным излучением, или, наоборот, для создания условий для выхода заданного излучения от источников внутри плазмы с диагностическими целями. Эти исследования могут также иметь значение для корректной интерпретации астрофизических данных по наблюдаемому электромагнитному излучению.

Обычно используемые приближения общеизвестны и хорошо себя зарекомендовали [5, 12...16]. Но они могут оказаться несколько грубоватыми для детектирования резонансных эффектов, а если в плазме присутствуют субволновые неоднородности большой амплитуды, то применение стандартных, приближённых методов решения задачи становится вообще невозможным. В этом случае развитие точно решаемых моделей для описания безотражательного взаимодействия волны с неоднородной плазмой позволяет значительно улучшить существующие представления о динамике электромагнитных волн и импульсов в сильно неоднородных и нестационарных диэлектрических средах и предложить методы нахождения нужных параметров плазмы для создания подобных, заранее выбранных резонансных реализаций.

Основная цель настоящей работы - исследовать возможности осуществления безотражательного прохождения электромагнитных волн через неоднородные слои плазмы (с различными типами неоднородностей) при определённых модуляциях профиля плазмы.

1. **Основные уравнения модели и анализ решений резонансного прохождения**

Рассмотрим вначале задачу для случая распространения поперечной электромагнитной волны в плазме без внешнего магнитного поля либо при распространении электромагнитной волны поперёк однородного внешнего магнитного поля в магнитоактивной плазме (). Записывая волновое поле в виде , где *ω* - частота волны, получаем для амплитуды волны *F*(*x*) уравнение Гельмгольца:

, (1)

где ось *Х* соответствует направлению неоднородности,  - вакуумное волновое число,  - эффективная диэлектрическая проницаемость (квадрат показателя преломления).

Перейдём к безразмерной координате  и безразмерному волновому вектору . Решение уравнения (1) ищем в виде:

 (2)

В результате строго решения получаем нелинейную связь эффективной диэлектрической проницаемости с безразмерным волновым вектором:

 (3)

Таким же образом можно записать уравнение для нормированной амплитуды:

 (4)

Из этого нелинейного уравнения при известной функции эффективной диэлектрической проницаемости  можно определить пространственный профиль безразмерной амплитуды электромагнитной волны *A*. Либо, наоборот, задавая профиль функции  аналитическими выражениями с таким набором параметров, который позволяет автоматически удовлетворять всем граничным условиям, можно по формуле (3) получать профили эффективной диэлектрической проницаемости , для которых реализуется резонансное туннелирование электромагнитной волны через слой неоднородной плазмы с различными структурами плотности.

Физически, безотражательное прохождение означает следующее. Каждый элемент плазменного слоя является источником вторичных волн, в том числе отражённых назад. При этом фазы отражённых волн меняются в слое от точки к точке. Если фазы меняются так, что в точке падения все отражённые волны в сумме гасят друг друга, то итоговая отражённая волна отсутствует, и вся энергия волны проходит сквозь слой плазмы без потерь. Разумеется, такой стационарный режим устанавливается после некоторого переходного процесса.

Рассмотрим безотражательное прохождение поперечной электромагнитной волны через слой плазмы в области , который слева и справа граничит с вакуумом. Необходимо удовлетворить условиям сшивки для поля и его производной внутри плазмы с полями и их производными на границах плазменного слоя для падающей из вакуума () и уходящей вправо от плазменного слоя () электромагнитными волнами. Для этого используем следующее выражение для безразмерного волнового вектора:

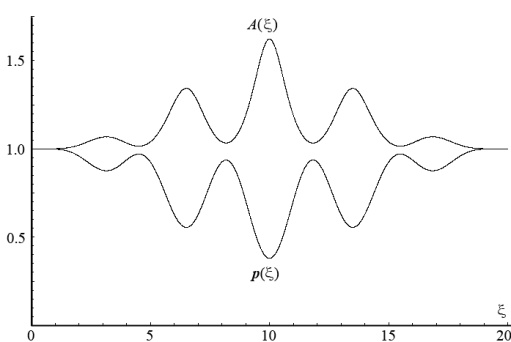
, (5)

где  - произвольный параметр и произвольная функция, удовлетворяющие единственному условию: должно быть , т.е. .

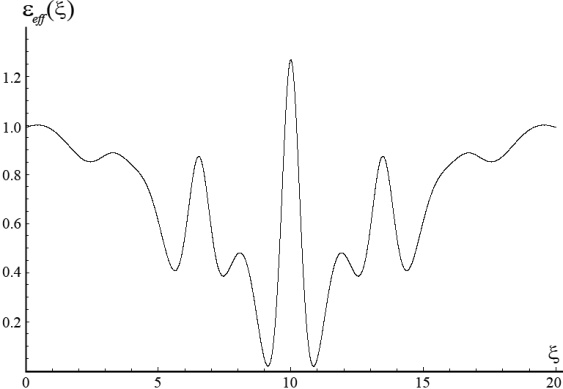
Пусть для определённости b = 20. Выберем вначале периодическое возмущение с периодом, отличающимся от *b*:

, (6)

где . Тогда можно получить следующие зависимости для безразмерного волнового вектора, нормированной амплитуды и эффективной диэлектрической проницаемости соответственно:



***Рис. 1.*** *Профили безразмерного волнового вектора и нормированной амплитуды*



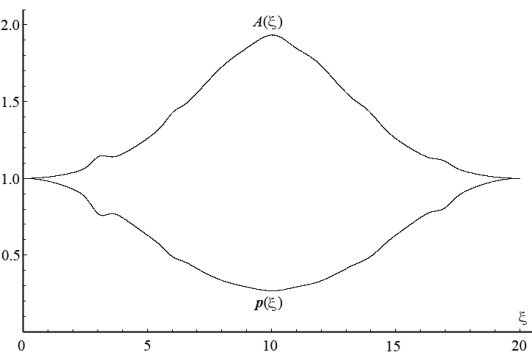
***Рис. 2.*** *Профиль эффективной диэлектрической проницаемости*

Пусть теперь  и мы имеем локальные неоднородности, образующие непериодическую структуру:

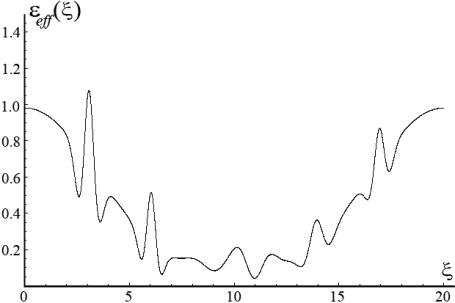


. (7)

Тогда можно получить следующие зависимости для безразмерного волнового вектора, нормированной амплитуды и эффективной диэлектрической проницаемости соответственно:



***Рис. 3.*** *Профили безразмерного волнового вектора и нормированной амплитуды*



***Рис. 4.*** *Профиль эффективной диэлектрической проницаемости*

Чисто математически, это строгое решение работает и для участков с затуханием и для областей непрозрачности. Далее, возникает вопрос об интерпретации состояния плазмы с заданным профилем эффективной диэлектрической проницаемости. Теоретические выражения для диэлектрической проницаемости плазмы можно взять из [16,17]. Например, для максвелловской плазмы:

 (8)

 (9)

где  - электронная ленгмюровская частота,  - дебаевский радиус,  - средняя тепловая скорость электронов, функция



Для плазмы без внешнего магнитного поля, независящее от *k* предельное значение (и продольной и поперечной) диэлектрической проницаемости:

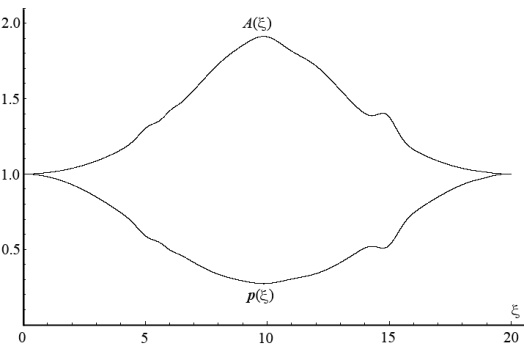
. (10)

В этом случае регионы с затуханием соответствуют величинам , а области непрозрачности соответствуют значениям . Если плазма неоднородна, но мы хотим создать её без барьеров (без туннелирования), то для этой величины необходима дополнительная проверка, чтобы профиль безразмерной плотности плазмы был всегда положительным. Можно так подобрать модуляцию профиля, чтобы и это дополнительное условие было выполнено. Пусть, например, мы имеем локальные неоднородности, амплитуда, интенсивность и пространственное распределение которых случайны (не периодичны):

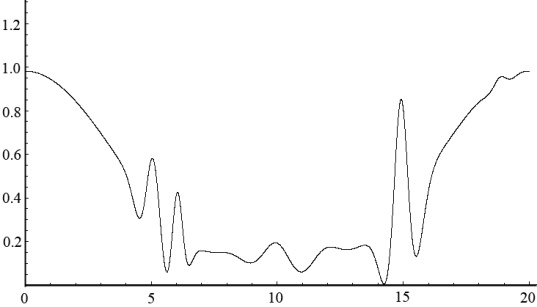


. (11)

Тогда, при , можно получить следующие зависимости для безразмерного волнового вектора, нормированной амплитуды и эффективной диэлектрической проницаемости соответственно:



***Рис. 5.*** *Профили безразмерного волнового вектора и нормированной амплитуды*



***Рис. 6.*** *Профиль эффективной диэлектрической проницаемости*

1. **Заключение**

Таким образом, на основе точно решаемой модели уравнения Гельмгольца в работе исследованы некоторые новые варианты резонансного туннелирования электромагнитных волн через слои неоднородной плазмы. Пространственный профиль неоднородности плазмы зависит от ряда свободных параметров, определяющих глубину модуляции диэлектрической проницаемости в плазменном слое, характерные размеры структур плотности, их количество, толщину слоя неоднородной плазмы, характеристики зон непрозрачности. Так как функция *f* является произвольной, то количество вариантов резонансного туннелирования волн через градиентные барьеры фактически неограниченное. Рассмотрены сложные профили неоднородности плазмы и показано, что набор этих структур может быть весьма разнообразным при реализации безотражательного прохождения через плазменный слой падающей из вакуума волны. Следует отметить, что профиль неоднородности плазмы может включать и случайную компоненту.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Dykhne A.M., Sarychev A.K., Shalaev V.M. Resonant transmittance through metal films with fabricated and light-induced modulation // Physical Review B. 2003. Vol. 67. No. 19. Pp. 195402.

2. Шварцбург А.Б. Оптика нестационарных сред // УФН. 2005. Т. 175. № 8. С. 833-861.

3. Fourkal E., Velchev I., Ma C.M., Smolyakov A. Resonant transparency of materials with negative permittivity // Physics Letters A. 2007. Vol. 361. No. 4-5. Pp. 277-282.

4. Шалин А.С. Широкополосное просветление среды, модифицированной внедрённым слоем из нанополостей // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. № 12. С. 705-711.

5. Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. М.: Наука, 1975, 256 с.

6. Жаров А.А., Кондратьев И.Г., Миллер М.А. Резонансное согласование электромагнитных волн с изотропной неоднородной плазмой // Физика плазмы. 1979, Т. 5. № 2. С. 261-270.

7. Nazarenko S.V., Newell A.C., Zakharov V.E. Communication through plasma sheaths via Raman (three‐wave) scattering process // Physics of Plasmas. 1994. Vol. 1. No. 9. Pp. 2827-2834.

8. Ерохин Н.С., Захаров В.Е. О нелинейном просветлении волновых барьеров для электромагнитного излучения в неоднородной плазме // Доклады Академии наук. 2007. Т. 416. № 3. С. 332-334.

9. Ерохин Н.С., Захаров В.Е. Безотражательное прохождение электромагнитной волны через неоднородные плазменные слои // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 9. С. 818-823.

10. Поверенный М.В., Ерохин Н.С. Безотражательное распространение электромагнитных волн в неоднородной киральной плазме с мелкомасштабными структурами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2013. № 4(86). С.133-135.

11. Ерохин Н.С., Захаров В.Е., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. Точно решаемая модель резонансного туннелирования электромагнитной волны в плазме с мелкомасштабными неоднородностями. Физика плазмы, 2015, Т.41, № 2, С. 200-205.

12. Шафранов В.Д. Электромагнитные волны в плазме // Вопросы теории плазмы. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 3.

13. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684 с.

14. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. М.: Наука, 1977. 432 с.

15. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Т. 1, 2. М.: Мир, 1981.

16. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: "Высшая школа", 1988. 424 с.

17. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979, 528 с.