

# ТОЧНО РЕШАЕМАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ИЗОТРОПНОЙ ПЛАЗМЕ С МЕЛКОМАСШТАБНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Н.С. Ерохин, В.Е. Захаров, Л.А. Михайловская

Институт космических исследований РАН  
E-mail: nerokhin@iki.rssi.ru

**Аннотация.** На основе точно решаемой одномерной модели рассмотрено резонансное туннелирование электромагнитной волны через плазму с мелкомасштабными неоднородностями большой амплитуды, включая области непрозрачности, для сложных типов неоднородности. Численными расчетами сложных аналитических формул изучены пространственные профили волнового вектора, амплитуды волны и эффективной диэлектрической проницаемости плазмы, выявлены их особенности. Показано, что набор профилей может быть весьма разнообразным при реализации просветления плазмы.

## 1. Введение

В последние годы весьма интенсивно исследуется взаимодействие электромагнитных волн с неоднородными средами, включая плазму при наличии субволновых структур большой амплитуды (см., например, работы [1-7]), в целях поиска возможностей безотражательного прохождения волн. Основным методом состоит в использовании точно решаемых физико-математических моделей. Анализ эффектов просветления волновых барьеров, обусловленных мелкомасштабными неоднородностями, представляет большой интерес для многих практических приложений, например, для нагрева плотной плазмы электромагнитным излучением, для понимания механизмов выхода излучения от источников, находящихся в плотной плазме и корректной интерпретации астрофизических данных по наблюдаемому электромагнитному излучению. Кроме того, это важно для повышения эффективности просветляющих и поглощающих покрытий в радиофизике, например, разработки тонких радиопрозрачных обтекателей для антенн. Построение

точно решаемых моделей позволит выявлять новые особенности в динамике колебаний и в распространении волн в сильно неоднородных средах, а также установить возможности перспективных практических приложений при контролируемых изменениях параметров неоднородной среды.

## 2. Содержание

В настоящей работе выполнен анализ дополнительных к рассмотренным ранее точно решаемых моделей резонансного туннелирования электромагнитной волны через слой неоднородной плазмы с мелкомасштабными структурами плотности большой амплитуды. Исследованы различные варианты выбора исходных параметров задачи, показана сильная зависимость профилей неоднородности от их выбора. Рассмотрим линейную одномерную задачу о резонансном туннелировании электромагнитной волны через слой плазмы с субволновыми структурами плазменной плотности в случае электромагнитной волны s-поляризации в плазме без внешнего магнитного поля либо при распространении волны поперек однородного внешнего магнитного поля в магнитоактивной плазме. Используя для волнового поля представление  $E(x,t) = \text{Re} [F(x) \exp(-i\omega t)]$ , где  $\omega$  частота волны, для функции  $F(x)$  получаем уравнение Гельмгольца. Удобно перейти к безразмерным координате  $\xi = k_0 x$  и волновому вектору  $p(\xi) = c k_x(x) / \omega$ . Решение уравнения для  $F(x)$  записывается в виде

$$F(\xi) = F_0 \exp[i\Psi(\xi)] [1/p(\xi)]^{1/2}, \quad d\Psi/d\xi = p(\xi), \quad F_0 = \text{const.}$$

Для точного решения эффективная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r(x)$  связана с безразмерным волновым вектором  $p(\xi)$  следующим нелинейным уравнением

$$\epsilon_r(\xi) = [p(\xi)]^2 + (d^2p/d\xi^2)/2p - 0.75(dp/d\xi)^2/p^2.$$

Введём нормированную амплитуду  $|F/F_0| \equiv A(\xi) = [1/p(\xi)]^{1/2}$ , которая является решением следующего нелинейного уравнения  $d^2A/d\xi^2 + \epsilon_r(\xi)A - [1/A(\xi)]^3 = 0$ . Методика анализа решений уравнения для функции  $F(x)$  состоит в задании функции  $p(\xi)$  аналитическими выражениями и последующих расчётах эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r(\xi)$ , соответствующей резонансному туннелированию электромагнитной волны через слой неоднородной плазмы.

Рассмотрим безотражательное прохождение поперечной электромагнитной волны через слой плазмы, занимающий область  $0 \leq \xi \leq b$ , который слева ( $\xi = 0$ ) и справа ( $\xi = b$ ) граничит с вакуумом. Одной из моделей, обеспечивающих на границах плазменного слоя условия безотражательной сшивки с падающей из вакуума ( $\xi < 0$ ) и уходящей вправо от плазменного слоя ( $\xi > b$ ) волнами, является  $p(\xi) = 1 - 0.5 f(\xi) [1 - \cos(\gamma \xi)]$ , где  $f(\xi)$  ограниченная функция,  $\gamma = 2\pi / b$ . Множитель  $[1 - \cos(\gamma \xi)]$  обеспечивает выполнение условий безотражательной сшивки поля волны на границах плазма-вакуум. В качестве примера рассмотрим следующий вариант выбора функции  $f(\xi)$

$$f(\xi) = 0.25 \mu [1 + 0.5 \cos(\gamma \xi) - \cos(2\gamma \xi) - \cos(3\gamma \xi) + 0.5 \cos(5\gamma \xi)],$$

описывающий мелкомасштабную модуляцию плотности плазмы в слое. Для случая  $b = 30$ ,  $\mu = 0.8$  графики функций  $p(\xi)$ ,  $\varepsilon_f(\xi)$  представлены на рис.1. Как видим, в данном случае имеются большие вариации волнового вектора  $p(\xi)$  причем  $\min p \approx 0.037$ ,  $\max p = 1$ . В окрестности двух минимумов  $p(\xi)$  возникают сильные всплески амплитуды поля волны  $\max A \approx 5.22$ , а  $\min A = 1$ . Кроме того наблюдаются два сильных всплеска эффективной диэлектрической проницаемости с  $\max \varepsilon_f(\xi) \approx 5.284$ , соответствующие субслоям верхнего гибридного резонанса плазмы.

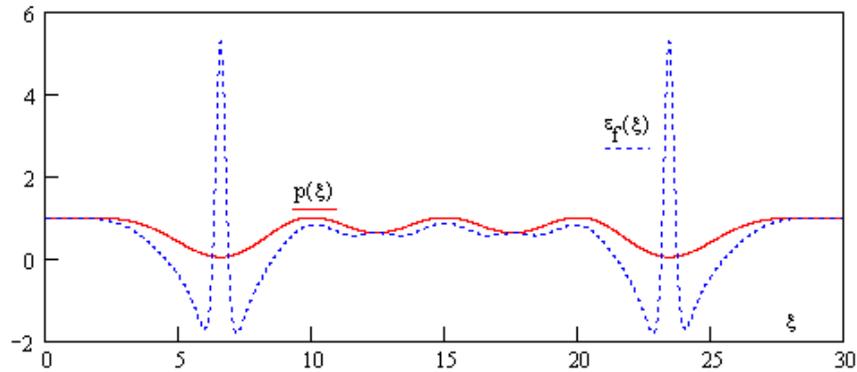


Рис.1.

Отметим также, что вне слоев гибридного резонанса имеется корреляция положения максимумов  $p(\xi)$  с максимумами  $\varepsilon_f(\xi)$ , а

положение минимумов  $p(\xi)$  также коррелируют с максимумами  $\varepsilon_f(\xi)$ . Для расположения минимумов эффективной диэлектрической проницаемости согласно рис.1 в данном варианте выбора параметров задачи нет корреляций с положением экстремумов волнового вектора  $p(\xi)$ . Согласно графика  $\varepsilon_f(\xi)$ , в неоднородном плазменном слое существуют 4 зоны непрозрачности. Если в этом варианте выбора функции  $f(\xi)$  увеличить параметр  $b$  взяв  $b = 40$ , то рост  $b$  понижает значения максимумов  $\varepsilon_f(\xi)$ ,  $A(\xi)$ , но слегка увеличивает минимумы  $p(\xi)$ . Здесь также имеются 4 зоны непрозрачности  $\varepsilon_f(\xi) < 0$ , расположенные в окрестности всплесков эффективной диэлектрической проницаемости плазмы.

При выборе параметров  $b = 20$ ,  $\mu = 0.6$  графики  $p(\xi)$ ,  $\varepsilon_f(\xi)$  представлены на рис.2.

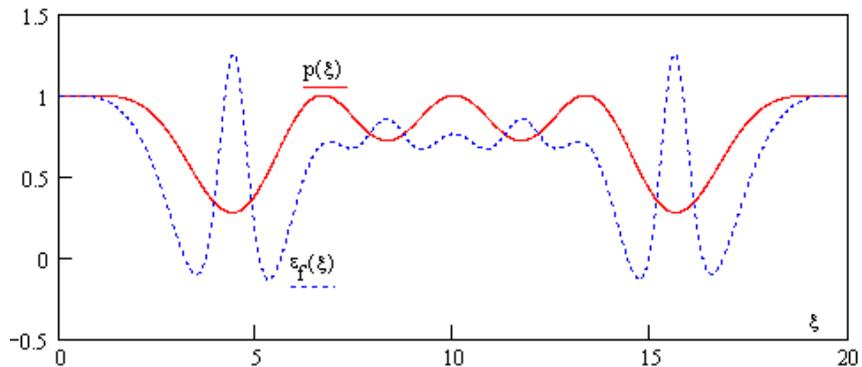


Рис.2.

Как следует из сравнения рис.1 и рис.2, уменьшение параметров  $b$  и  $\mu$  приводит к сужению зон непрозрачности плазменного слоя, величина главного минимума  $p(\xi)$  становится несколько больше, а значение максимумов  $\varepsilon_f(\xi)$  уменьшается в несколько раз. Так для  $\xi = 4.42$  и  $\xi = 15.68$  имеем  $\max \varepsilon_f(\xi) \approx 1.25$ . Отметим также, что значительные вариации волнового вектора и эффективной диэлектрической проницаемости плазмы реализуются вне середины плазменного слоя. Рассмотренные выше примеры соответствуют неоднородной магнитоактивной плазме, но возможны случаи и плазмы без магнитного поля, в частности, это будет при следующем выборе исходных параметров  $b = 20$ ,  $\mu = 0.3$ .

### 3. Выводы

В настоящей работе на основе точно решаемой модели уравнения Гельмгольца исследован ряд вариантов резонансного туннелирования электромагнитной волны через слой неоднородной плазмы с мелкомасштабными неоднородностями плотности, которые могут включать и зоны непрозрачности плазмы. Пространственный профиль неоднородности плазмы зависит от ряда свободных параметров, определяющих глубину модуляции волнового вектора и диэлектрической проницаемости, характерные размеры мелкомасштабных структур плотности, толщину слоя неоднородной плазмы, субслоев непрозрачности. Поскольку связь безразмерного волнового вектора  $p(\xi)$  с эффективной диэлектрической проницаемостью плазмы  $\epsilon_r(\xi)$  описывается нелинейным дифференциальным уравнением, возникают существенно нелокальные соотношения между  $p(\xi)$  и  $\epsilon_r(\xi)$  за счет присутствия в плазме субволновых структур большой амплитуды.

Исследован ряд профилей неоднородности плазмы и показано, что набор мелкомасштабных структур плотности плазмы может быть весьма разнообразным при реализации резонансного туннелирования через плазменный слой падающей из вакуума волны (просветление градиентных волновых барьеров). Из расчётов следует, что резонансное туннелирование электромагнитной волны через неоднородный плазменный слой возможно как при наличии внешнего магнитного поля, так и в его отсутствие.

Вполне очевидно, что задача о резонансном туннелировании электромагнитных волн через градиентные барьеры представляет интерес для различных практических приложений. Исследуемые точно решаемые модели могут выявлять новые особенности в динамике волновых процессов в неоднородной плазме, особенностях нелинейных процессов при сильной неоднородности. В качестве примера можно указать нагрев достаточно плотной плазмы мощным электромагнитным излучением, объяснение механизма выхода электромагнитного излучения из областей его генерации, находящихся глубоко в плотной плазме в астрофизических объектах. Это важно и для

возможности дистанционного зондирования через плотную плазменную оболочку, генерацию электромагнитных волн в неоднородной плазме пучками заряженных частиц и передачи сигналов через слои плотной плазмы, например, от антенн с плотной плазменной оболочкой в космической плазме.

### Литература

- [1]. A.M.Dykhne, A.K.Sarychev, V.M.Shalaev. Phys. Rev. B. 2003, v.67, 195402.
- [2]. Шварцбург А.Б. УФН. 2005, т.175, № 8, с.833.
- [3]. E.Fourkal, I.Velchev, C.V.Ma, A.Smolyakov. Physics Letters A. 2007, v. 361, p.277.
- [4]. Н.С.Ерохин, В.Е.Захаров. Доклады Академии наук. 2007, т. 416, № 3, с.1.
- [5]. М.В.Давидович. Радиотехника и электроника. 2010, т.55, № 4, с.496.
- [6]. S.V.Nazarenko, A.C.Newell, V.E.Zakharov. Physics of Plasmas. 1994, v.1, № 9. p.2827.
- [7]. Б.А.Лаговский. Радиотехника и электроника. 2006, т.51, № 1, с.74.