УДК 533.951

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ВОЛНОВОГО БАРЬЕРА ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ В НЕМ ЭЛЕКТРОНАМИ

Д.Б. Палец, Л.И. Романюк

Экспериментально обнаружен ранее теоретически предсказанный эффект просветления плазменного барьера для электромагнитных и электронных плазменных волн электронами плазмы, захваченными и осциллирующими в потенциальной яме барьера.

В теоретической работе [1] предсказана возможность просветления плазменного барьера для электромагнитных и электронных плазменных волн за счет переноса информации о волне, падающей на барьер, осциллирующими в нем электронами плазмы и регенерации ими исходной волны за барьером. Целью проведенных исследований было экспериментальное обнаружение такого просветления.

В экспериментах использовалась установка с симметричным истечением плазмы в вакуум из несамостоятельного пеннинговского разряда, схематически показанная на рис. 1, *а*, в которой можно было получить неоднородную плазму с аксиальными профилями плотности и потенциала, показанными на рис. 1, *б*.

Ранее [2] при изучении пучково-плазменного взаимодействия в такой системе, простреливаемой пучком быстрых электронов, было установлено, что в области, где $\omega_{pe} \geq \omega_{ce}$ (ω_{pe}, ω_{ce} - ленгмюровская и циклотронная электронная частота плазмы соответственно), пучок возбуждает посредством черенковского резонанса волны с частотами $\omega \geq \omega_{pe}\sqrt{2}$, принадлежащие к верхнегибридной ветви слабозамагниченной плазмы.

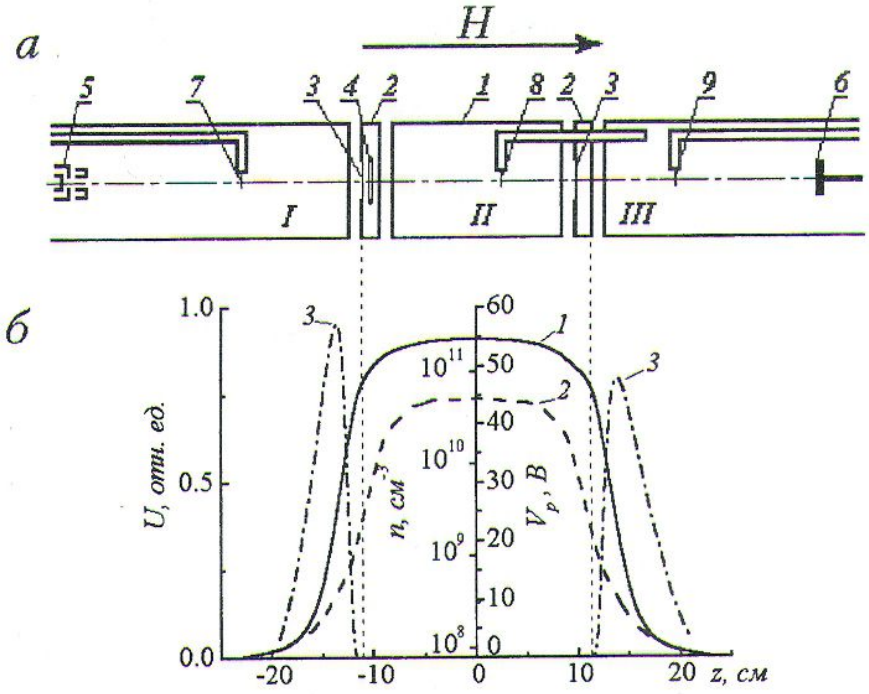

Рис. 1: *а* - экспериментальная установка: *I, III* - вакуумные камеры, *II* - разрядная камера, *1* - анод, *2* - катодные блоки, *3* - диафрагмы, *4* - катод, *5* - электронная пушка, *6* - коллектор, *7, 8, 9* - ВЧ-зонды; *б* - распределение в системе плотности (*1*) и потенциала (*2*) плазмы, а также интенсивности верхнегибридных колебаний (*3*).

Возбуждаемые волны локализованы в узких зонах (см. рис. 1, *б*), а более плотная плазма между ними является для этих волн закритической, т. е. барьером.

Аксиальное распределение потенциала плазмы в системе свидетельствует о наличии в ней потенциальной ямы для электронов с глубиной, близкой к падению потенциала на разряде V_a, что обеспечивает осцилляцию в ней электронов с широким энергетическим спектром, характерным для систем пеннинговского типа [3].

Таким образом, используемая в проведенных экспериментах система (без электронного пучка, создаваемого пушкой *5*) близка к модели, рассмотренной в теории [1], и можно было ожидать просветления содержащегося в ней барьера для указанных верхнегибридных волн, независимо от способа их возбуждения в предбарьерной плазме.

Примененная методика исследований заключалась в том, что при наличии пучка быстрых электронов с помощью высокочастотного штыревого зонда *7* в предбарьерной плазме отыскивалась зона, где возбуждались верхнегибридные волны с частотами $\omega \sim \omega_{pe}\sqrt{2}$, определяли их амплитудно-частотный спектр и аксиальные распределения наиболее интенсивной составляющей спектра перед барьером и за ним. Затем зонд в предбарьерной плазме устанавливали в точку максимума аксиального распределения интенсивности спектральной составляющей, электронный пучок выключался, а на зонд подавался монохроматический ВЧ-сигнал на частоте этой составляющей с генератора стандартных сигналов. Таким образом моделировалось возбуждение падающей на барьер электромагнитной волной колебаний в области локального плазменного резонанса на входе в него.

При наличии просветления барьера по механизму, рассмотренному в [1], сигнал на указанной частоте не должен существовать внутри барьера, но должен регистрироваться за ним в окрестности зоны локального плазменного резонанса, сопряженной с предбарьерной. Регистрация колебаний в этой области, как и в работе [2], осуществлялась с помощью подвижного штыревого ВЧ-зонда *9*, селективного приемника и двухкоординатного самопишущего потенциометра.

Эксперименты проводились в следующем диапазоне параметров системы: напряженность магнитного поля H = 50 - 150 Э; рабочий газ Ar; давление Ar в разрядной камере p = (1 – 2)·10^{-4} мм рт. ст.; напряжение на разряде V_a = 50 - 150 В; ток разряда I_a = 2 - 4 А; ток электронного пучка I_b = 1 - 6 мА; энергия электронов пучка eV_b = 1 - 2 кэВ.

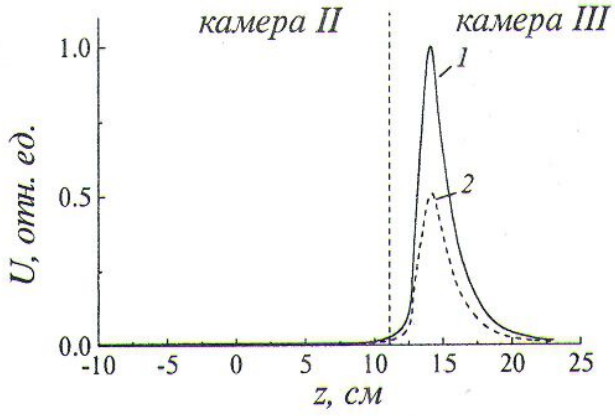

Рис. 2. Интенсивность сигнала на частоте модуляции f_m = 575 МГц, U_{m2} = 0,5U_{m2}.

Рис. 2 иллюстрирует результаты проведенных исследований. Сигнал регистрируется за барьером и отсутствует внутри него. Волны за барьером генерируются в той же зоне и примерно с таким же аксиальным распределением, как и в случае их генерации электронным пучком. Интенсивность волн за барьером пропорциональна амплитуде ВЧ-сигнала, подаваемого на зонд-вибратор *7*, и при отсутствии указанного сигнала равна нулю.

Как оказалось, интенсивность волн за барьером весьма чувствительна к условиям в предбарьерной плазме, определяющим интенсивность возбуждаемых в ней волн. Это касается также положения зонда-вибратора в зоне их генерации. Так, при фиксации

приемного ВЧ-зонда за барьером в максимуме аксиального распределения интенсивности волны и перемещении зонда-вибратора в предбарьерной плазме регистрировалась зависимость, показанная на рис. 3, которая отражает распределение интенсивности колебаний в предбарьерной плазме при возбуждении их электронным пучком (см. рис. 1, *б*).

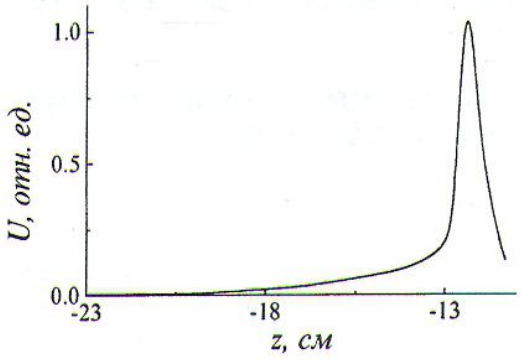

Рис. 3. Зависимость уровня сигнала на зонд *9* от положения зонда *7*.

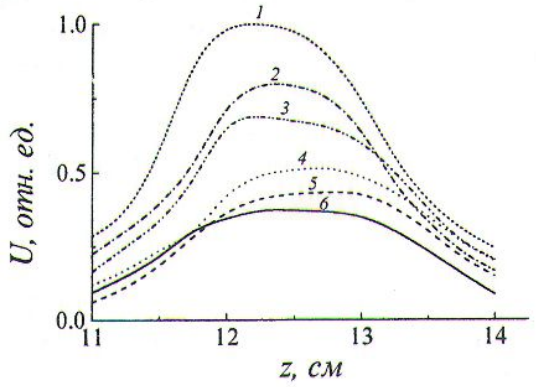

Рис. 4. Сигнал на зонд 9. V_a = 74 В, f_m = 504 МГц. $U_{кол}$: *1* - 0 В; *2* - 10 В; *3* - 20 В; *4* - 30 В; *5* - 40 В; *6* - 50 В.

Доказательство того, что просветление осуществляется именно осциллирующими в барьере электронами плазмы, можно было получить, изменяя аксиальный профиль потенциала плазмы за барьером таким образом, чтобы часть электронов плазмы перевести из осциллирующих в пролетные. При этом прозрачность барьера должна падать.

В проведенных экспериментах для изменения аксиального профиля потенциала плазмы за барьером был использован применявшийся ранее [4] метод: на металлический коллектор подавался положительный относительно плазмы потенциал, что позволяло части электронов уходить на коллектор и не отражаться обратно в барьер. Результат проведенных экспериментов демонстрирует рис. 4. Можно видеть, что, как и следует из теории [1], прозрачность барьера падает с ростом потенциала коллектора и, соответственно, с уменьшением количества осциллирующих в барьере электронов за счет ухода в пролетные наиболее быстрых в их энергетическом спектре.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что предсказанное теорией [1] просветление волновых барьеров в неоднородной плазме действительно существует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерохин Н.С., Моисеев С. С.* Об одной возможности линейного кинетического просветления неоднородной плазмы //ДАН СССР. Сер. физ. - 1983. - Т. 268, № 6. - С. 1113 - 1115.
2. *Дорохов И.В., Опанасенко А.В., Романюк Л.И.* Пучково-плазменное взаимодействие при инжекции электронного пучка в симметрично открытую плазменную систему. 1. Амплитудно-частотные спектры и локализация колебаний // УФЖ. - 1987. - Т. 32, № 8. - С. 1204 - 1210.
3. *Романюк Л.И., Свавильный Н.Е.* Экспериментальное исследование функции распределения электронов по скоростям в плазме разряда Пеннинга с накаленным катодом // УФЖ. - 1976. - Т. 21, № 6. - С. 981 - 988.
4. *Габович М.Д., Романюк Л.И., Лозовая Е.А.* Проникновение плазмы из источника с осцилляцией электронов в вакуумную область с магнитным полем // ЖТФ. - 1964. - Т. 34, № 3. - С. 488 - 495.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЯВЛЕННЯ ПРОСВІТЛЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ХВИЛЬОВОГО БАР'ЄРА ОСЦИЛЮЮЧИМИ В НЬОМУ ЕЛЕКТРОНАМИ

Д. Б. Палець, Л.І. Романюк

Експериментально виявлено раніше теоретично передбачений ефект просвітлення плазмового бар'єра для електромагнітних і електронних плазмових хвиль захопленими і осцилюючими в потенціальній ямі бар'єра електронами плазми.

THE EXPERIMENTAL OBSERVATION OF THE TRANSILLUMINATION OF A PLASMA WAVE BARRIER BY THE ELECTRONS OSCILLATING IN IT

D.B. Palets, L.I. Romanyuk

Previously theoretically predicted effect of transillumination of a plasma barrier for electromagnetic and electron plasma waves with plasma electrons trapped and oscillating within the barrier potential well is observed experimentally.