

04

© 1991 г.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ВОЛНОВОГО БАРЬЕРА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

И. А. Анисимов, С. М. Левитский, А. В. Опанасенко, Л. И. Романюк

В плазменной системе со слоем плотной закритической для электромагнитной волны плазмы экспериментально обнаружен перенос сквозь него СВЧ сигнала посредством трансформации волны пространственного заряда электронного пучка, простреливающего волновой барьер в электромагнитную волну.

### Введение

Одной из наиболее характерных особенностей неоднородной плазмы в отношении распространения в ней волновых движений является существование областей непрозрачности — волновых барьеров, сквозь которые волна определенного типа и с определенными параметрами не может проникнуть, не разрушая барьера [1, 2]. В то же время теория предсказывает ряд механизмов, которые могут обеспечить эффективное прохождение волн сквозь барьеры, т. е. их просветление, посредством регенерации исходной волны за барьером без изменения его свойств [3-7].

В настоящей работе экспериментально показана возможность реализации предсказанного в [7] просветления плазменного волнового барьера для электромагнитной волны за счет усиления волны пространственного заряда (ВПЗ) в электронном пучке внутри барьера и ее последующей трансформации в электромагнитную волну на выходе из барьера.

### Техника и условия эксперимента

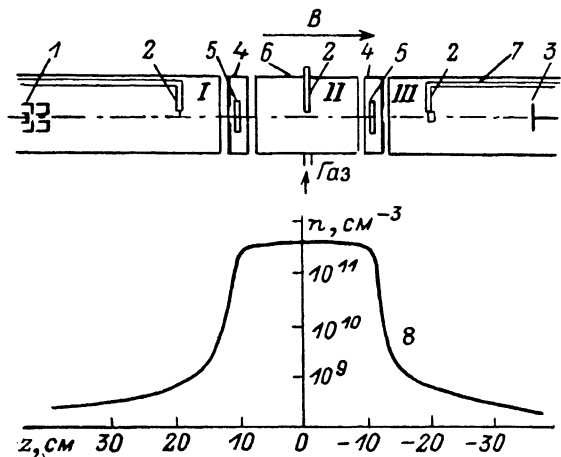
Исследования, предпринятые с целью обнаружения указанного явления, были проведены в системе, подобной той, что использовалась ранее в исследованиях просветления плазменных волновых барьеров вследствие линейных кинетических эффектов [8]. Для моделирования волнового барьера использовалось симметричное истечение в вакуум вдоль магнитного поля плазмы несамостоятельного разряда Пеннинга. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Плазма создавалась несамостоятельным разрядом Пеннинга в камере II, представляющей собой цилиндрический полый анод 6 (внутренний диаметр 100 мм, длина 180 мм), два кольцевых накаливаемых катода 5 (диаметр кольца 40 мм, диаметр провода 1 мм) и два отражателя 4 с центральными отверстиями диаметром 20 мм для выхода плазмы в вакуум. Вакуумные камеры I и III представляли собой трубы с внутренним диаметром 100 мм и длиной 700 мм, которые могли служить волноводами для электромагнитных волн типа  $E_{01}$  с частотами  $f > 2.3$  ГГц в вакуумном случае.

Исследования велись в диапазоне следующих разрядных условий: разрядный ток  $I_a = 0.4 - 1.5$  А, напряжение на разряде  $V_a = 70 - 150$  В, однородное магнитное поле  $B = 0.01 - 0.02$  Тл, давление аргона в разрядной камере  $p = 3 - 5 \cdot 10^{-2}$  Па, а в вакуумных камерах примерно в 5 раз меньше. Типичный аксиальный профиль плотности плазмы в системе приведен на рис. 1 (8). В указан-

ном диапазоне разрядных условий плотность плазмы в разрядной камере изменялась в пределах  $n=8-20 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, а в вакуумных камерах примерно на два порядка меньше.

Электронный пучок создавался трехэлектродной электронной пушкой I, расположенной на оси вакуумной камеры I в 290 мм от ближайшего отражателя разрядной камеры. После прохождения через систему электронный пучок попадал на коллектор 3, подвижный вдоль оси z вакуумной камеры III. В исследованиях применялись электронные пучки следующих параметров: средняя энергия электронов в пучке  $eV_b=0.5-2.5$  кэВ, разброс по продольной компоненте скорости  $v_z$  до 5%, ток пучка  $I_b=0-15$  мА, радиус пучка на выходе из пушки 5 мм.

Рассмотренная в работе [7] модуляция электронного пучка падающей на него под углом электромагнитной волной моделировалась подачей на управляющий электрод электронной пушки высокочастотного сигнала  $f=2.35-3.60$  ГГц с амплитудой  $\tilde{U} \approx 1$  В. Частота модулирующего сигнала выбиралась такой, чтобы, во-первых, она была значительно выше плазменной электронной частоты в камерах I и III, но меньше соответствующей



электрод электронной пушки высокочастотного сигнала  $f=2.35-3.60$  ГГц с амплитудой  $\tilde{U} \approx 1$  В. Частота модулирующего сигнала выбиралась такой, чтобы, во-первых, она была значительно выше плазменной электронной частоты в камерах I и III, но меньше соответствующей

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — электронная пушка, 2 — ВЧ зонд, 3 — коллектор электронного пучка, 4 — отражатели, 5 — катоды, 6 — анод, 7 — коаксиальная линия, 8 — аксиальный профиль плотности плазмы.

частоты в разрядной камере II и, во-вторых, чтобы на этой частоте в вакуумной камере III могла распространяться электромагнитная волна типа  $E_{01}$ .

Для измерения магнитной компоненты электромагнитных волн за плазменным барьером в вакуумную камеру III вводился подвижный по длине и радиусу камеры высокочастотный зонд 2, представляющий собой петлеугольную петлю размером  $1 \times 1$  см. Обычно петля ориентировалась так, чтобы улавливать азимутальную компоненту  $H_\varphi$  высокочастотного магнитного поля. Сигнал, уловленный зондом, выводился через коаксиальную линию 7 и регистрировался высокочувствительным измерительным приемником.

### Экспериментальные результаты

На рис. 2 показаны типичные радиальные распределения сигнала на частоте модуляции в цепи петлевого зонда при наличии и отсутствии в системе электронного пучка и плазмы. Можно видеть, что при подаче на электронную пушку модулирующего напряжения и введении одной только плазмы (кривая 1) или одного только электронного пучка (кривая 2) величины сигналов в цепи зонда и их радиальный профиль мало отличаются от тех, что имеют место в отсутствие плазмы и пучка, т. е. из-за паразитного сигнала наводки (кривая 3). Изменение радиального профиля сигнала и существенное возрастание его величины наступают только тогда, когда в системе создана плазма с профилем плотности, показанным на рис. 1, и она простреливается модулированным пучком электронов (кривые 4, 5). Характерными особенностями радиального профиля интенсивности колебаний в этом случае являются центрированный на оси электронного пучка и примерно его же радиальных размеров пик большой интенсивности и поднимающиеся к стенкам камеры-волновода «крылья» меньшей интенсивности.

На рис. 3 представлены типичные распределения интенсивности колебаний вдоль камеры III на оси системы (кривая 1) и за пределами электронного пучка

в области «крыльев» (кривая 2). На первой кривой наблюдаются осцилляции сигнала с периодом около 1 см. Эта величина хорошо совпадает с длиной ВПЗ электронного пучка  $(1/f) \sqrt{(2eV_b)/m}$ . По-видимому, наблюдаемые колебания могут быть результатом интерференции ВПЗ и сигнала наводки.

За пределами электронного пучка вблизи стенки камеры пространственный период наблюдаемого сигнала составляет около 12 см. Это близко к половине длины волны типа  $E_{01}$ , которая в условиях описываемых экспериментов должна быть равна  $\sim 20$  см. Имеющееся небольшое различие могло быть вызвано возмущающим действием самого ВЧ зонда и его вывода, представляющего собой металлическую трубку с внешним диаметром около 1 см.

Наблюдаемое с помощью петлевого зонда радиальное распределение высокочастотного магнитного поля имеет тенденцию возрастать к периферии, что со-

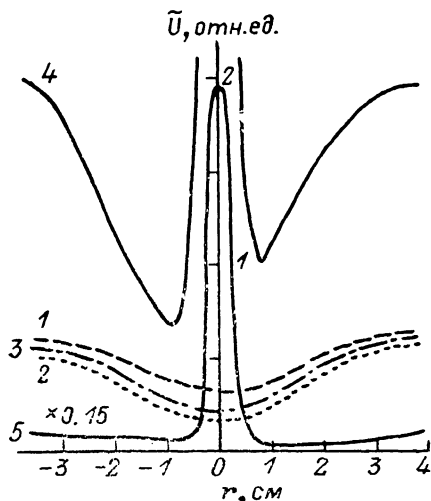


Рис. 2. Радиальное распределение сигнала на частоте модуляции.

$f=2.76$  ГГц,  $z_s=-16.5$  см,  $V_b=1.8$  кВ;  $I_a$ , А: 1, 4, 5 — 1.2; 2, 3 — 0;  $I_b$ , мА: 1, 3 — 0; 2, 4, 5 — 4.

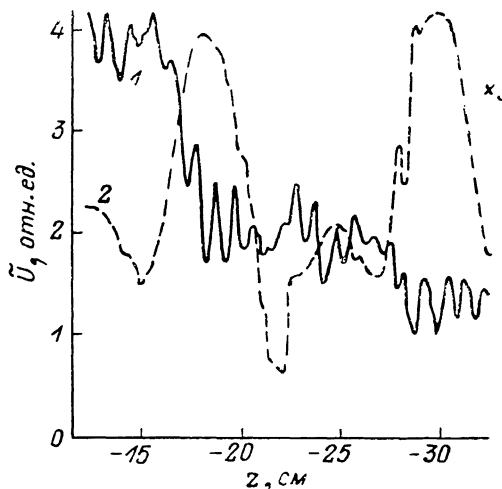


Рис. 3. Аксиальное распределение интенсивности сигнала.

$f=2.4$  ГГц,  $V_b=1.9$  кВ; 1 —  $r_s=0$ , 2 — 3.5 см.

ответствует распределению  $H_\varphi$  — компоненты для волны типа  $E_{01}$ . Вращение высокочастотного зонда показало, что в области «крыльев» сигнал максимален при ориентации нормали к плоскости рамки в азимутальном направлении и минимален, если нормаль рамки ориентирована в аксиальном направлении, что указывает на преобладание азимутальной компоненты высокочастотного поля.

Вращение петлевого зонда, помещенного в присосевую область, не приводит к существенным изменениям сигнала. Это показывает, что здесь регистрируемый сигнал не связан с магнитной компонентой высокочастотного поля, а обусловлен скорее всего тем, что используемый петлевой зонд в области исследуемых частот не является идеальным магнитным зондом, но может, хотя и с малой эффективностью, регистрировать и электрическую компоненту волн пространственного заряда электронного пучка.

Все это дает основание полагать, что в присосевой области, пронизываемой потоком быстрых электронов, существует бегущая в направлении движения пучка сильная волна пространственного заряда на частоте модуляции. А за пределами пучка наблюдается стоячая электромагнитная волна типа  $E_{01}$ , которая и должна возбуждаться в условиях нашего эксперимента, ввиду аксиальной симметрии системы и наличия у указанной волны продольной компоненты электрического поля. Дополнительным аргументом в пользу последнего является исчезновение сигнала за пределами электронного пучка при переходе к частотам модуляции ниже частоты отсечки волны  $E_{01}$  в волноводе.

Предложенный в [7] механизм просветления волнового барьера основан на эффекте трансформации волны пространственного заряда в электромагнитную.

на заднем фронте волнового барьера в области резкого спада плотности плазмы. В условиях настоящего эксперимента, отличающихся от теоретической модели тем, что электромагнитная волна реализуется не в свободном пространстве, а в волноводе, нельзя было априори исключить возможность раскачки в области III колебаний посредством иных механизмов. Для уточнения природы механизма генерации электромагнитных волн в исследуемой системе в камере III на расстоянии 300 мм от отражателя (при расстоянии отражатель—коллектор электронов пучка 250 мм) была установлена сетка с ячейкой  $1 \times 1$  мм (прозрачность 70%), которая отделила область резкого спада плотности плазмы от остального объема камеры III и являлась экраном для электромагнитных волн, используемых в эксперименте частот. На рис. 4 показано радиальное распределение сигнала в цепи зонда для этого случая. Видно, что сохранилась только

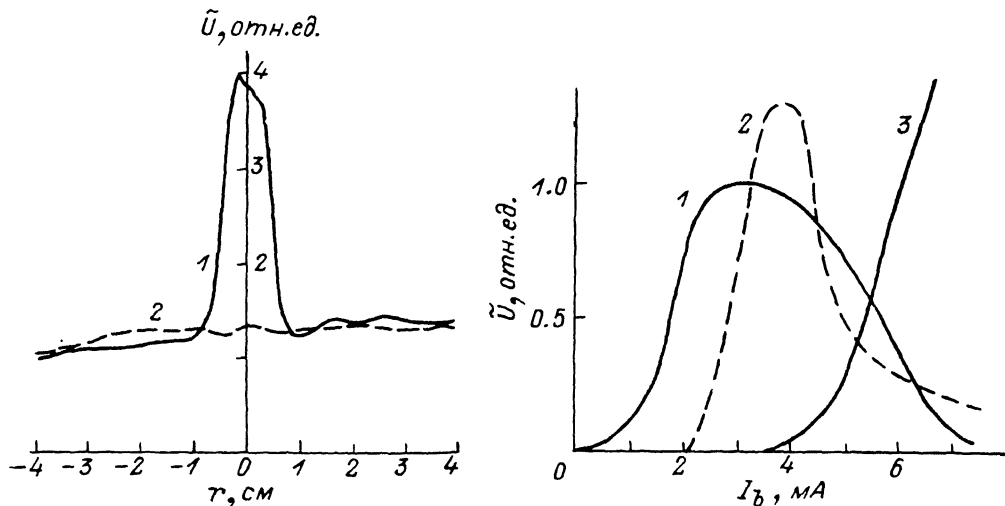


Рис. 4. Радиальное распределение сигнала при наличии экранирующей сетки.  
 $f=2.55$  ГГц,  $z_a=-16.5$  см,  $V_b=1$  кВ; 1 —  $I_b=6$  мА, 2 — 0.

Рис. 5.

1 — зависимость от тока пучка интенсивности сигнала на частоте модуляции в области III ( $f=2.65$  ГГц,  $z_a=-18$  см,  $r_a=3.5$  см); 2 — верхнегибридных колебаний в области II ( $f=4.12$  ГГц,  $z_a=0$ ,  $r_a=0$ ); 3 — верхнегибридных колебаний в области I ( $f=0.6$  ГГц,  $z_a=14$  см,  $r_a=0$ ).

волна пространственного заряда, а за пределами пучка регистрируется только сигнал наводки. Таким образом, электромагнитная волна генерируется действительно на фронте волнового барьера.

Как показали исследования, интенсивность электромагнитной волны в камере III растет с увеличением модулирующего напряжения, а также с ростом разрядного тока, т. е. плотности плазмы в барьере. Последнее, по-видимому, связано с тем обстоятельством, что с увеличением разрядного тока точка трансформации волн пространственного заряда в электромагнитную волну смещается в область большего аксиального градиента плотности плазмы. Как известно [9], переходное излучение заряда при выходе из слабонеоднородной плазмы отсутствует, поэтому для появления излучения в этом случае требуется сильный градиент концентрации.

Зависимость интенсивности электромагнитных колебаний на частоте модуляции, уловленных петлевым зондом в области III, от величины тока пучка представлена на рис. 5 (кривая 1). Там же приведены подобные зависимости для колебаний на частоте 0.6 ГГц, уловленных специально введенным зондом в область I (кривая 3) и на частоте 4.12 ГГц в области II (кривая 2). Как показано в работах [10, 11], эти колебания обусловлены возбуждением верхнегибридных дисперсионных ветвей в магнитоактивной плазме. На рис. 5 видно, что появление колебаний в области II (для  $I_b > 3$  мА) приводит к подавлению эффекта генерации электромагнитных волн и спаду кривой 1. Возбуждение же

колебаний в области  $I$  подавляет в свою очередь колебания в области  $II$  и сводит на нет генерацию электромагнитных волн.

Этот эффект связан, по-видимому, с происходящим при возбуждении верхнегибридных колебаний уширением функции распределения электронов пучка по энергиям и потерей их монокинетичности, которая необходима для эффективного усиления волны пространственного заряда внутри плазменного барьера и их последующей трансформации в электромагнитные волны.

Таким образом, в результате проведенных модельных экспериментов показана возможность реализации предсказанного теоретически [7] просветления плазменных волновых барьеров для электромагнитных волн с помощью электронного пучка. Коллективные процессы, вызывающие энергетическую релаксацию электронного пучка в барьере, подавляют указанный эффект.

#### Список литературы

- [1] Литвак А. Г. // УФН. 1972. Т. 107. № 3. С. 515—516.
- [2] Аскаръян Г. А. // УФН. 1973. Т. 111. № 2. С. 249—260.
- [3] Лиситченко В. В., Ораевский В. Н. // ДАН СССР. 1971. Т. 201. № 6. С. 1319—1321.
- [4] Водяницкий А. А., Ерохин Н. С., Моисеев С. С. // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. № 2 (8). С. 629—641.
- [5] Дряхлушин В. Ф., Романов Ю. А. // Физика плазмы. 1979. Т. 5. № 1. С. 19—26.
- [6] Павленко В. Н., Ревенчук С. М. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. № 3. С. 686—691.
- [7] Анисимов И. А., Левитский С. М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 7. С. 50—54.
- [8] Романюк Л. И., Свистильный Н. Е., Усталов В. В. // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. Вып. 2 (8). С. 579—585.
- [9] Ерохин Н. С., Кузелев М. В., Моисеев С. С. и др. Неравновесные и резонансные процессы в плазменной радиофизике. М.: Наука, 1982. 272 с.
- [10] Дорохов И. В., Опанасенко А. В., Романюк Л. И. // УФЖ. 1987. Т. 32. № 8. С. 1204—1210.
- [11] Опанасенко А. В., Романюк Л. И. // УФЖ. 1989. Т. 34. № 10. С. 1510—1514.

Институт ядерных исследований АН УССР  
Киев

Поступило в Редакцию  
14 марта 1990 г.