

ПРОЗРАЧНОСТЬ ПЛАЗМЕННОГО БАРЬЕРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ПРОСВЕТЛЯЕМОГО С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Д.Б. Палец, Л.И. Романюк

Экспериментально определены зависимости прозрачности плазменного барьера для электромагнитных волн, просветляемого с помощью пучка быстрых электронов, от параметров пучково-плазменной системы. Показано существование оптимальных в этом отношении параметров системы. Установлено, что несоответствие полученных зависимостей с предсказаниями линейной теории обусловлено не учитываемыми ею нелинейными процессами пучково-плазменного взаимодействия, неизбежно имеющими место при таком просветлении. Установлено, что прозрачность барьера в лабораторных экспериментах существенно зависит от волноводных свойств экспериментальной системы.

Просветление плазменного барьера для электромагнитных волн с помощью пучка быстрых электронов, проходящего сквозь барьер, было теоретически предсказано в [1], экспериментально обнаружено в [2, 3] и детально изучалось теоретически и экспериментально в [2 – 6]. В этих работах главное внимание уделялось второй стадии трехстадийного механизма просветления – эволюции в барьере волны пространственного заряда (ВПЗ), осуществляющей его просветление. Целью настоящих исследований являлось экспериментальное определение зависимостей коэффициента прозрачности барьера от параметров пучково-плазменной системы (тока I_b и энергии eV_b электронов пучка, надкритичности плазмы в барьере, определяющейся разрядным током I_a), сравнение их с теоретическими предсказаниями, выяснение влияния на прозрачность барьера волновых особенностей системы и установленного ранее характера эволюции ВПЗ в барьере [4 – 6].

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [2, 3], в том же, что и в [2 – 6], диапазоне параметров системы и с применением тех же, что и в [2 – 6], средств диагностики. В связи с тем, что использованная методика исследований принципиально и технически не позволяла определять абсолютные величины коэффициента прозрачности барьера, определялись величины, прямо пропорциональные ему, а именно амплитуда электромагнитных колебаний за барьером при постоянной величине ВЧ-сигнала, модулирующего электронный пучок в предбарьерной области [3].

На рис. 1 показаны полученные зависимости прозрачности барьера от основных параметров пучково-плазменной системы. Выполненный расчет указанных зависимостей для параметров пучково-плазменной системы, реализуемых в эксперименте, с использованием выражения для коэффициента прозрачности барьера по мощности K_p , полученного в [3], показал, что качественное соответствие с результатами эксперимента имеет место лишь для зависимости прозрачности барьера от его надкритичности. Что касается зависимостей K_p от тока пучка, то расчет дает монотонное возрастание прозрачности с I_b , в то время как в эксперименте наблюдается немонотонная зависимость: при определенной величине I_b достигается максимум K_p , а затем он начинает уменьшаться. Не согласуются также результаты расчета и эксперимента, касающиеся зависимости K_p от eV_b . Расчет дает монотонное уменьшение прозрачности при увеличении энергии электронов, тогда как в эксперименте наблюдается сначала, наоборот, ее возрастание и лишь затем, после достижения максимума, спад.

Детальный анализ показал, что наблюдаемое несоответствие результатов расчета и эксперимента связано с неучтенными в линейной теории нелинейными процессами пучково-плазменного взаимодействия в барьере с участием собственных ВПЗ с частотами, соответствующими электронным плазменным частотам неоднородной плазмы в нем. Как

было установлено в [4, 5], вследствие указанных нелинейных процессов, которые реализуются в определенной точке на траектории электронного пучка, последний теряет моноэнергетичность и включается мощный механизм затухания всех ВПЗ (в том числе и используемой для просветления волнового барьера), причем декремент возрастает с удалением от этой точки в направлении выхода из барьера. В результате характер эволюции ВПЗ в барьере оказывается совершенно отличен от предсказываемого линейной теорией. При изменении параметров пучково-плазменной системы, одновременно с изменением инкремента ВПЗ осуществляющей просветление барьера, изменяется инкремент собственных ВПЗ, координата перехода пучково-плазменного взаимодействия на нелинейную стадию и, соответственно, протяженность области барьера, где имеет место затухание ВПЗ, используемой для его просветления. В итоге интенсивность этой волны на выходе из барьера, определяющая его прозрачность, оказывается значительно меньше, чем предсказывает линейная теория, и к тому же немонотонно зависящей от энергии и тока электронов пучка. Изложенное выше объясняет полученные в эксперименте результаты (см. рис. 1) и приводит к выводу о существовании оптимальных параметров пучково-плазменной системы, обеспечивающих наибольшую прозрачность барьера.

Трансформация ВПЗ в электромагнитные волны на выходе из барьера, в принципе, возможна во всей области неоднородной плазмы за ним. Однако, как показали проведенные исследования, преимущественный вклад в интенсивность электромагнитной волны за барьером дает трансформация, осуществляющаяся непосредственно за ним, в окрестности точки локального плазменного резонанса. В этой связи следует отметить, что в лабораторных системах на прозрачность барьера существенное влияние оказывают их волновые свойства, зависящие от конфигурации и размеров системы, а также характеристик заполняющей ее плазмы. Так, например, в эксперименте было установлено, что собственные ВПЗ также трансформируются в электромагнитные волны за областями локального плазменного резонанса для компонент их частотного спектра [5]. Однако реализуются в системе лишь те из них, частота которых выше критической для участка волноводной системы, где локализируются указанные области трансформации. Иллюстрацией этого могут служить данные, показанные на рис. 2. Можно видеть, что в электромагнитные волны трансформируется лишь высокочастотная часть спектра ВПЗ.

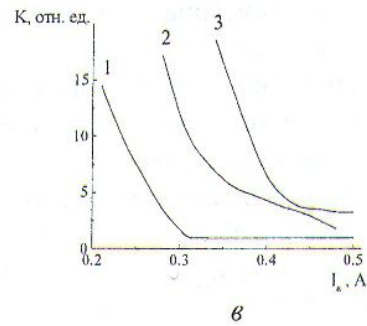
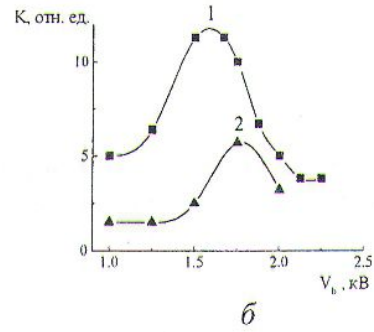
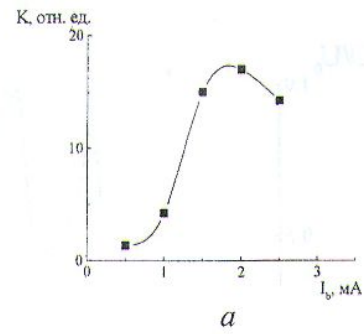


Рис. 1. Зависимость коэффициента прозрачности барьера от тока электронов пучка (а), их энергии (б) и разрядного тока (в).

а: $V_a = 88$ В, $I_a = 0,35$ А, $V_b = 2$ кВ, $H = 60$ Э, $f_m = 2,9$ ГГц; б: $V_a = 55$ В, $I_a = 0,35$ А, $I_b = 2,6$ мА, $f_m = 3,11$ ГГц, $H: 1 - 70$ Э, $2 - 50$ Э; в: $V_a = 86$ В, $I_a = 0,35$ А, $V_b = 1,5$ кВ, $H = 60$ Э, $f_m: 1 - 2,78$ ГГц, $2 - 3,21$ ГГц, $3 - 3,32$ ГГц.

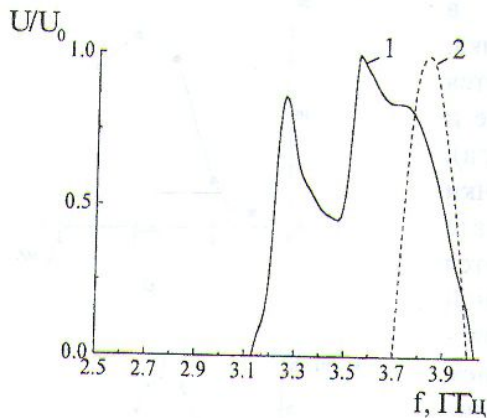


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры собственных волн пространственного заряда в центральном резонаторе (1) и электромагнитного сигнала в забарьерном резонаторе (2). $V_a = 80$ В, $I_b = 1,4$ мА, $V_b = 2$ кВ, $I_a = 0,5$ А.

Оценки абсолютной величины K_p показали, что в оптимальных экспериментальных условиях она составляла порядка 0,1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов И.А., Левитский С.М. Перенос электромагнитных волн сквозь слой плотной плазмы с помощью электронного пучка // ЖТФ. - 1989. - Т. 59, вып. 7. - С. 50 - 54.
2. Анисимов И.А., Левитский С.М., Опанасенко А.В., Романюк Л.И. Экспериментальное обнаружение просветления плазменного волнового барьера с помощью электронного пучка // ЖТФ. - 1991. - Т. 61, вып. 3. - С. 59 - 63.
3. Анисимов І.О., Зубарев О.А., Левитський С.М. та ін. Дослідження просвітлення плазмових бар'єрів для електромагнітних хвиль за допомогою електронних пучків. 1. Існування ефекту просвітлення // УФЖ. - 1995. - Т. 40, № 3. - С. 198 - 203.
4. Анисимов І.О., Котляров І.Ю., Левитський С.М. та ін. Дослідження просвітлення плазмових бар'єрів для електромагнітних хвиль за допомогою електронних пучків. 2. Еволюція хвиль просторового заряду в бар'єрі // УФЖ. - 1996. - Т. 41, № 2. - С. 164 - 170.
5. Опанасенко О.В., Палець Д.Б., Романюк Л.І. Дослідження просвітлення плазмових бар'єрів для електромагнітних хвиль за допомогою електронних пучків. 3. Вплив власних коливань пучково-плазмової системи в бар'єрі на збуджену в пучку хвилю просторового заряду // УФЖ. - 1996. - Т. 41, № 9. - С. 802 - 807.
6. Бойко Н. О., Палець Д.Б., Романюк Л.І. До питання про власні коливання пучково-плазмової системи з неоднорідною слабкозамагніченою плазмою // УФЖ. - 2000. - Т. 45, № 6. - С. 666 - 670.

ПРОЗОРІСТЬ ПЛАЗМОВОГО БАР'ЄРА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ, ПРОСВІТЛЮВАНОВОГО ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Д.Б. Палець, Л. І. Романюк

Експериментально визначено залежності прозорості плазмового бар'єра для електромагнітних хвиль, просвітлюваного за допомогою пучка швидких електронів, від параметрів пучково-плазмової системи. Показано існування оптимальних у цьому відношенні параметрів системи. Встановлено, що невідповідність отриманих залежностей із передбаченнями лінійної теорії зумовлена не врахованими нею нелінійними процесами пучково-плазмової взаємодії, обов'язково наявними при такому просвітленні. Встановлено, що прозорість бар'єра в лабораторних експериментах істотно залежить від хвилеводних властивостей експериментальної системи.

**THE TRANSPARENCY OF A PLASMA BARRIER FOR ELECTROMAGNETIC WAVES
TRANSILLUMINATED WITH THE AID OF AN ELECTRON BEAM****D.B. Palets, L.I. Romanyuk**

The relations between the plasma barrier for electromagnetic waves transilluminated with the aid of a fast electron beam transparency and the parameters of beam-plasma system are determined experimentally. The existence of optimal in this regard system parameters is shown. Set aside by linear theory, the nonlinear beam-plasma interaction processes, inevitably accompanying such transillumination, are shown to be responsible for disagreement between experimentally and theoretically obtained relations. The barrier transparency in laboratory experiments is ascertained to be considerably dependent on the waveguide properties of the system used.