

УДК 621.372.853

## ПОГЛОЩАЮЩИЕ СИСТЕМЫ С ТВЕРДЫМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

А. А. Быков, А. С. Ильинский

Проводится точный электродинамический расчет поглощающих систем в волноводе, основанных на использовании твердых диэлектриков с большим тангенсом угла потерь: диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 25$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 0,1$ . Сравняются нерезонансные системы, в которых малое отражение получается за счет использования протяженных неоднородностей с плавным введением поглощающего диэлектрика, и резонансная система, в которой для согласования применяется четвертьволновая наклонная плоскопараллельная пластинка. Показано, что в первом случае малое отражение можно получить только при большой длине неоднородности, причем система работает в широком диапазоне частот, а во втором случае можно построить узкополосную поглощающую систему, длина которой порядка высоты волновода. Расчет проводится с помощью неполного метода Галеркина.

1. В [1] проведено исследование поглощающей системы, в которой для поглощения СВЧ энергии используется вода ( $\epsilon = 74,0$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 0,11$ ), а для согласования — четвертьволновая диэлектрическая пластинка ( $\epsilon = 6,8$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 0,001$ ). Такие системы при использовании проточной воды позволяют работать при особо больших мощностях и уровнях поля. Поглощение достигается в определенной, относительно узкой полосе частот, т. е. такие системы можно назвать резонансными. Эффект поглощения с малым отражением в широкой полосе частот достигается использованием нерезонансных систем. При этом можно построить системы простой формы. Это особенно важно при использовании твердых диэлектриков. В последнее время получены твердые керамические материалы, обладающие большим тангенсом угла потерь, например,  $\operatorname{tg} \delta = 0,1$  при  $\epsilon = 25,0$ . Сложность обработки таких материалов заставляет выбирать системы простейшей формы. С целью отвода тепла диэлектрик должен плотно прилегать к металлической стенке волновода, поэтому традиционная «морковка» не всегда дает приемлемое решение.

2. В настоящей работе рассматриваются поглощающие системы в плоском волноводе. Рассмотрим плоский волновод  $0 \leq x \leq a$ ,  $-\infty < y$ ,  $z < \infty$ , причем зависимость всех полей и диэлектрической проницаемости от  $y$  отсутствует (двумерная задача). Рассматриваем только волны  $H_{m0}$ -типов, которые в данном случае, очевидно, не трансформируются в волны других типов:

$$E(x, y, z) = (0, E_y(x, z), 0), \quad H(x, y, z) = (H_x(x, z), 0, H_z(x, z)).$$

Пусть при  $z < 0$  среда однородна и имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_1 = 1$ , а при  $z > z_{\max}$   $\epsilon \equiv \epsilon_2 = 25,0(1,0 + 0,1i)$ . В области  $0 \leq x \leq a$ ,  $0 \leq z \leq z_{\max}$  диэлектрическая проницаемость среды зависит от  $x, z$ . Система возбуждается падающей слева нормальной волной  $H_{10}$ :

$$E_y^{(0)}(x, z) = (2/a)^{1/2} \sin(\pi x/a) \exp(i\gamma_1 z),$$

где  $\gamma_1 = (k_0^2 \epsilon_1 - (\pi/a)^2)^{1/2}$ ,  $\gamma_1$  лежит в первой четверти комплексной плоскости. Постановка задачи такова. Необходимо решить уравнения

Максвелла в области  $0 \leq x \leq a$ ,  $-\infty < z < \infty$ , удовлетворяющие условиям  $E_y(x, z) = 0$  при  $x = 0$  или  $x = a$ , условиям непрерывности  $E_y$ ,  $\partial E_y / \partial x$ ,  $\partial E_y / \partial z$  и условиям излучения.

Для решения задачи применяется неполный метод Галеркина [2], который приводит задачу для уравнений Максвелла к краевой задаче для системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Граничные условия получаются из условий излучения. Чтобы получить численно решение, достаточно близкое к точному, нужно решать с помощью ЭВМ задачи для большого числа комплексных уравнений на интервале, длина которого равна длине неоднородности  $z_{\max}$ . Собственные значения матрицы системы обладают большими по абсолютной величине положительными и отрицательными действительными частями. Стандартные методы типа стрельбы с ортогонализацией или дифференциальной ортогональной прогонки не всегда дают возможность получить точное решение задачи. Был разработан [3] специальный метод направленной ортогонализации для решения краевых задач с указанными свойствами, который позволяет получить точное решение независимого от величины действительной части собственных значений и длины неоднородности. В процессе направленной ортогонализации используются собственные значения и векторы матрицы системы, что позволяет избежать потери точности, связанной с быстрым экспоненциальным ростом частных решений однородной системы.

3. Форма нерезонансных поглощающих систем, для которых имеются численные результаты, представлена на рис. 1а, б, в. Во всех трех случаях поглощения система представляет собой диэлектрический волноводный трансформатор со сложной формой границы раздела двух однородных сред. На рис. 1а граница раздела — плоская, на рис. 1б

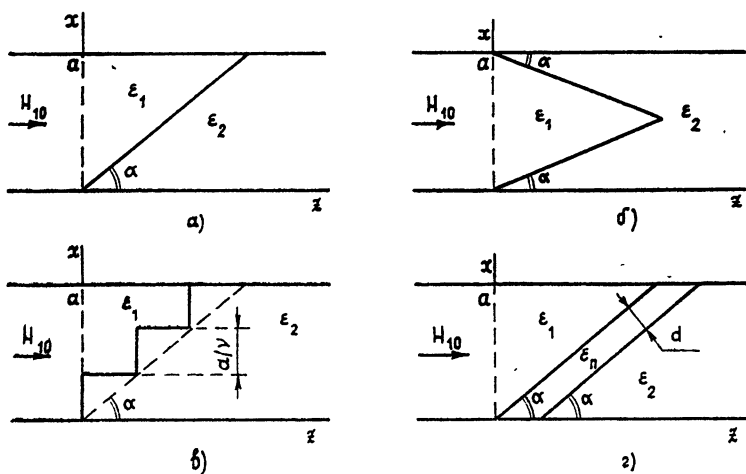


Рис. 1.

она имеет клинообразную форму, на рис. 1в — ступенчатая граница, число ступенек обозначено  $\nu$ . Графики зависимости коэффициента отражения по амплитуде основной волны  $H_{10}$  от безразмерного параметра  $x$ , определяющего длину волны,  $x = k_0 a / 2\pi = a / \lambda$ , приведены на рис. 2. Для систем «а» и «б» (сплошные линии) угол наклона границы раздела к оси  $z$  — угол  $\alpha$  — принимает значения  $60$  (кривая 1),  $45$  (2),  $30$  (3),  $20$  (4),  $15$  (5),  $10^\circ$  (6), а для системы «в»  $\alpha = 45^\circ$ , число ступенек  $\nu = 2,3$  или  $8$  (пунктирные линии). Был получен численно весьма неожиданный результат, который состоит в том, что для систем «а» и «б» при одинаковых углах  $\alpha$  в диапазоне  $0,5 < x < 1,0$  коэффициенты  $R$

отличаются не более чем на 0,01. Исследуя распределение поля  $|E_y(x, z)|$  в неоднородной области, можно убедиться в том, что для системы «а» поле практически не проникает (при малых  $\alpha$ ) в область  $0,5z_{\max} < z < z_{\max}$ , а сосредоточивается вблизи передней части диэлектрического клина. Разложим поле  $E_y^{(0)}$  в сумму двух плоских волн. Для одной из них, облучающей нижний конец диэлектрических клиньев,

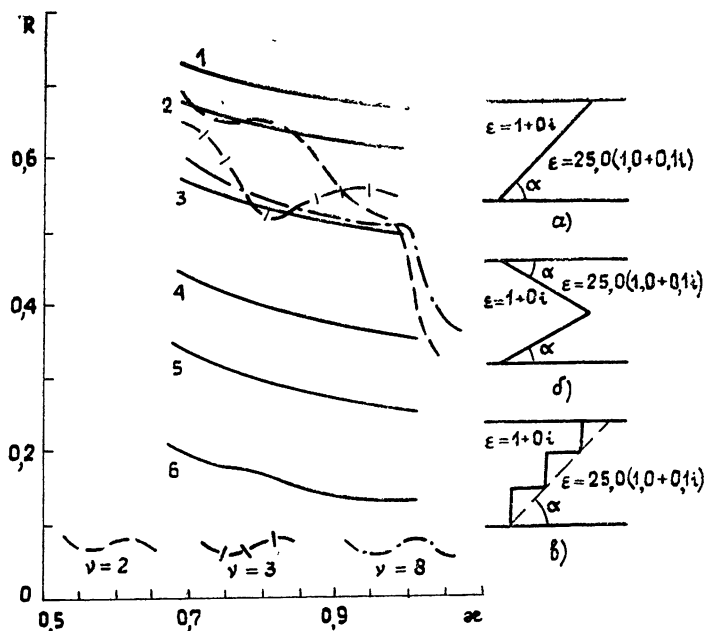


Рис. 2.

системы «а» и «б» не различаются. Другая волна в системе «а», отразившись от границы  $x = a$ , облучает следующий участок клина, а в системе «б» она облучает верхний диэлектрический клин. Поскольку коэффициент отражения от плоской границы с  $\epsilon = 25,0$  велик, можно предположить, что и для этой второй плоской волны разница систем «а» и «б» невелика. Такое объяснение приблизительного равенства отражения от систем «а» и «б», разумеется, пригодно только для одномодового режима работы подводящего волновода. При  $x > 1$  в многомодовом режиме коэффициенты уже заметно отличаются. Таким образом, более предпочтительна система «б» как имеющая в два раза меньшую длину по сравнению с системой «а». Приведем линии равного уровня  $|E_y(x, z)|$  в области  $0 \leq x \leq a$ ,  $0 \leq z \leq z_{\max}$  для системы «б» с параметрами  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\epsilon_1 = 1 + 0i$ ,  $\epsilon_2 = 25,0(1,0 + 0,1i)$ ,  $x = 0,95$  (рис. 3). На этом рисунке привлекают внимание «языки», находящиеся внутри диэлектрических клиньев и параллельные оси  $z$ . Они обусловлены интерференцией волны, преломленной через границу раздела внутри диэлектрика, и той же волны, отразившейся от границ  $x = 0$  или  $x = a$ .

При уменьшении угла  $\alpha$ , как и следовало ожидать, коэффициент отражения уменьшается. Рис. 2 показывает, что системы «а» и «б» могут служить для поглощения мощности только при малых углах  $\alpha \leq 10^\circ$ . При малых углах  $\alpha$  сужающаяся часть незаполненного волновода образует сужающийся рупор с импедансными условиями на стенках.

Система «в» исследовалась с целью проверки того, будет ли ступенчатая форма границы раздела улучшать согласование. Предполагалось, что ступенчатая граница будет эквивалентна наклонному слою с плавно изменяющейся диэлектрической проницаемостью. Рис. 2 показывает, что этот эффект практически незаметен: коэффициент отражения мало зависит от небольших вариаций формы границы, подобной замене плоской границы ступенчатой.

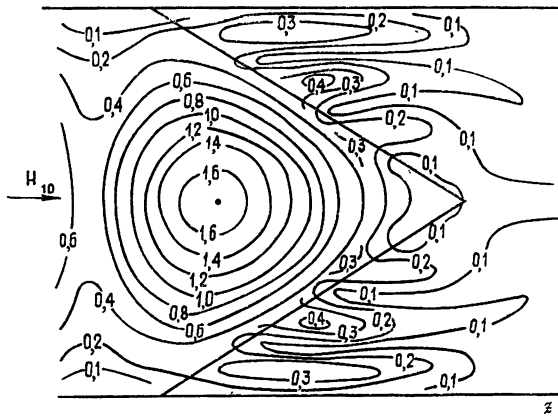


Рис. 3.

4. При использовании специальных согласующих элементов возможно построение резонансных поглощающих систем с использованием твердых диэлектриков. Пример такой системы, аналогичный рассмот-

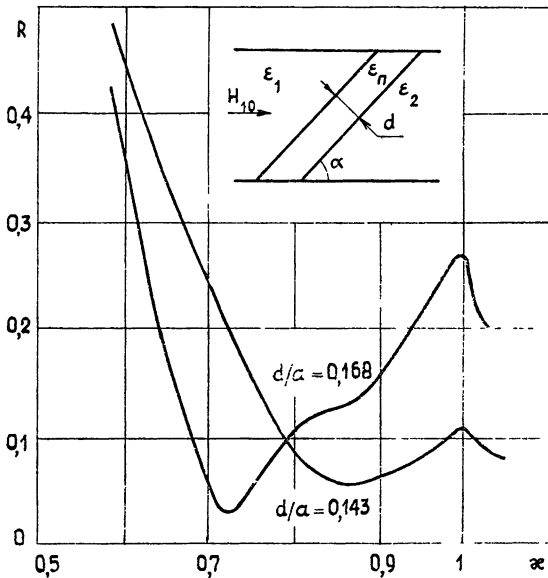


Рис. 4.

ренным в [1], приведен на рис. 1г. Диэлектрическая пластинка с проницаемостью  $\epsilon_n = 4,0$  разделяет незаполненный волновод ( $\epsilon_1 = 1,0$ ) и волновод, заполненный диэлектриком с  $\epsilon_2 = 25,0$ ,  $\text{tg } \delta_2 = 0,1$ . Как и в [1], минимальный коэффициент отражения достигается, когда толщина пластинки  $d$  близка к четверти длины волны в среде с  $\epsilon = 4,0$ .

Резонансные системы более компактны, обеспечивают меньший уровень отражения, но обладают узкой полосой поглощения. Для примера приведем зависимость  $R(x)$  для системы, показанной на рис. 1г, с параметрами  $\alpha = 45^\circ$ ,  $d/a = 0,143$  или  $0,168$ ,  $\epsilon_1 = 1 + 0i$ ,  $\epsilon_n = 4,0$ ,  $\epsilon_2 = 25,0 (1,0 + 0,1i)$  (см. рис. 4).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский А. С., Быков А. А — Изв вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 7, с. 821.
2. Свешников А. Г. — ДАН СССР, 1970, 236, № 5, с. 1076
3. Быков А. А., Ильинский А. С — ЖВММФ, 1979, 19, № 3, с. 631.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
10 апреля 1980 г.

#### ABSORBING SYSTEMS WITH SOLID DIELECTRICS

*A. A. Bykov, A. S. Il'inskij*

An accurate electrodynamic calculation is given for waveguide absorbing systems which are based on the use of solid dielectrics with a large tangent of the loss angle: the dielectric permittivity is  $\epsilon = 25$ ,  $\text{tg } \delta = 0.1$ . A comparison is made between nonresonant systems where a small reflection is due to the use of extent inhomogeneities with a smooth introduction of an absorbing dielectric and a resonance system where a quarter-wave slope plane-parallel plate is used for correlation. It is shown that in the first case a small reflection may be obtained only with a large length of the inhomogeneity, the system being operating in a wide wave range, in the second case one may build a narrow-band absorbing system the length of which is of the order of the waveguide height. Calculation is made by the incomplete Galerkin's method.

---

#### ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

Ахманов С. А., Корстеев Н. И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. Активная спектроскопия рассеянного света — М.: Наука, 1981. — 20 л — В пер: 3 р 30 к

В книге содержится последовательное изложение принципов нового и интенсивного развивающегося в последние годы направления нелинейной лазерной спектроскопии — метода активной спектроскопии рассеяния света (АС). Метод базируется на изучении частотной дисперсии нелинейной оптической восприимчивости 3-го порядка вблизи одно- и многоквантовых резонансов и тесно связан с традиционной спектроскопией неупругого (комбинационного) и упругого (рэлеевского) рассеяния света. Подробно излагаются особенности метода АС, приводятся реальные экспериментальные схемы АС, рассматриваются обширные приложения АС.

Книга предназначена для физиков, работающих в области оптики, спектроскопии, лазерной физики, химиков и биологов, использующих в своих исследованиях оптические методы, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.