

**ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 621.372.8+519.6

**КОМПЕНСАЦИЯ ОТРАЖЕНИЯ  $H_{01}$ -ВОЛНЫ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА  
ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОКНА**

А.А. КУРАЕВ, О.И. НАРАНОВИЧ, А.К. СИНИЦЫН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 14 апреля 2009*

Предложен способ компенсации отражения симметричной  $H$ -волны от диэлектрического окна с помощью канавки или выступа, совмещенных с диэлектрическим окном и образующих резонансную систему типа полуволнового резонатора. Проведены расчеты по выбору высоты и крутизны выступа и канавки, обеспечивающих минимальное отражение волны для диэлектрической диафрагмы разной толщины и заданных значениях диэлектрической проницаемости.

*Ключевые слова:* продольно-нерегулярный волновод, диэлектрическая диафрагма, вычислительный эксперимент.

**Введение**

Диэлектрические окна в СВЧ-устройствах используются для изоляции вакуума от воздушной среды. Например, в мощных генераторах СВЧ-гиротронах, карсинотронах через такое окно выводится СВЧ-энергия большой мощности. Поэтому очень важно сделать это окно таким, чтобы оно отражало как можно меньше энергии. Как показывают расчеты [1, 2], коэффициент отражения по мощности  $H_{01}$ -волны круглого волновода от диэлектрической диафрагмы с типичными значениями диэлектрической проницаемости  $\varepsilon=2\div 5$  и толщине не кратной половине длины волны волновода, заполненного диэлектриком (в этом случае диафрагма не отражает волну, однако ее толщина недопустимо велика) достигает неприемлемо больших значений 20–70%. В этих же работах на основе предложенной эффективной процедуры расчета нерегулярных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением приведены результаты решения задачи подбора рефлектора в виде канавки волновода, расположенной на определенном расстоянии от диэлектрического окна, компенсирующего отражение  $H_{01}$ -волны. Такой способ позволяет уменьшить коэффициент отражения от диафрагмы на заданной частоте практически до нуля за счет подбора параметров таким образом, чтобы система "рефлектор-диафрагма" образовала полуволновой трансформатор. Однако дополнительный рефлектор нежелателен из-за увеличения размеров компенсационной системы.

В настоящей работе предлагается совместить диэлектрическое окно с выступом, либо с канавкой волновода. В этом случае диэлектрик находится внутри самого рефлектора и подбором его параметров удастся достичь того же эффекта компенсации. Более того, за счет уменьшения радиуса диэлектрического окна и выравнивания волнового сопротивления в диэлектрике и вакууме удастся уменьшить высоту рефлектора, при которой происходит эффективная компенсация отражения.

## Постановка задачи

Рассмотрим прохождение  $H$ -волны в круглом волноводе, частично заполненном диэлектриком в виде диафрагмы. Для компенсации отражения волны от диэлектрика используем утопленную или выступающую канавку, совмещенную с диэлектрическим окном. Геометрия задачи представлена на рис. 1. Диэлектрическая вставка опирается на плоскую часть канавки. Падающая  $H_{01}$ -волна частично отражается от диэлектрика, частично проходит. Ставилась задача о подборе геометрии канавки для заданных толщине и диэлектрической проницаемости окна, обеспечивающей минимальное отражение мощности волны.

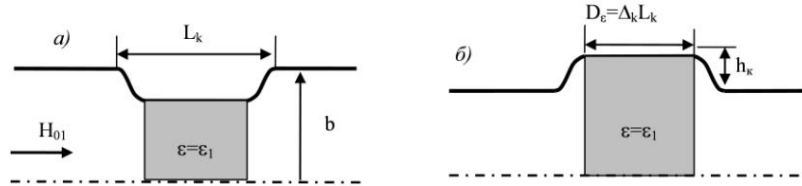


Рис. 1. Конфигурация выступа (а), канавки и расположение диэлектрика (б)

Математическая постановка задачи детально описана в работах [1, 2], где представлены лишь безразмерные величины, принятые в математической модели. Используются следующие параметры (геометрические размеры выражены в единицах  $\lambda_0 / 2\pi$ ):  $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$  — опорная длина волны,  $\omega_0$  — соответствующая ей опорная частота,  $c$  — скорость света в вакууме,  $W = \omega / \omega_0$ ,  $\omega$  — рабочая частота,  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость,  $b$  — радиус волновода,  $K$  — коэффициент отражения волны от диэлектрика ( $K = 1 - P_s(L) / P_1^+(0)$ ,  $P_1^+$  и  $P_s$  мощности падающей и проходящих волн).

На рис. 1 указаны:  $L_k$  — длина канавки,  $\Delta_k$  — крутизна канавки,  $h_k$  — высота канавки,  $D_\epsilon$  — толщина диэлектрической вставки. Боковые стенки канавок аппроксимируются полиномом пятой степени, чем обеспечивается гладкость первой и второй производных профиля  $b(z)$ .

Для решения поставленной задачи используется эффективная процедура, совмещающая метод преобразования координат, последующее сведение задачи к системе ОДУ на основе метода прямых, парциальные условия излучения на входном и выходном сечениях [1, 2] и метод блочной матричной прогонки [3].

### Согласование волновых сопротивлений пустого и заполненного диэлектриком волноводов за счет подбора их радиусов

Как известно, волновое сопротивление волновода заданного радиуса, заполненного диэлектриком меньше, чем у пустого волновода. В то же время с увеличением радиуса волновое сопротивление возрастает. Поэтому для заданного радиуса пустого волновода всегда можно подобрать такой радиус волновода, заполненного диэлектриком, при котором волновые сопротивления совпадают. Действительно, волновое сопротивление  $H_{01}$ -волны в круглом волноводе, заполненном диэлектриком, в принятых обозначениях выражается формулой

$$W_{01}^H = \frac{W_0^0}{\sqrt{W^2 \epsilon - (\mu_{01} / b)^2}}, \quad (1)$$

$W_0^0$  — волновое сопротивление вакуума,  $\mu_{01}$  — корень производной функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка ( $J_0'(x)$ ).

На рис. 2 представлены рассчитанные по этой формуле кривые, характеризующие изменение волнового сопротивления от радиуса волновода  $b$  и величины относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

Как видно из этих зависимостей, для заданного радиуса полого волновода  $b_0$  и заданного  $\varepsilon > 1$  существует радиус  $b_\varepsilon < b_0$  волновода, заполненного диэлектриком, при котором волновое сопротивление оказывается таким же, как у полого волновода. Например (см. пунктирные линии на рис. 2), для  $b_0=5$  и  $\varepsilon=2$  волновые сопротивления совпадают, если выбрать  $b_\varepsilon \approx 3$ .

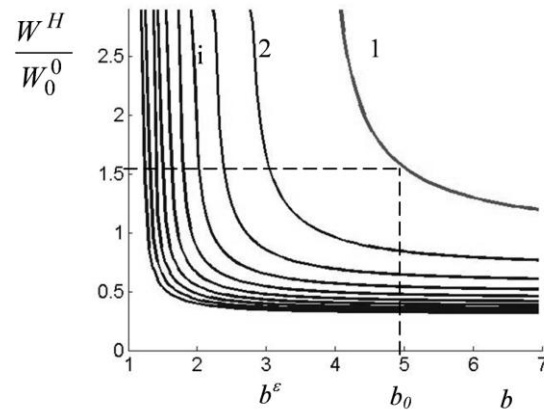


Рис. 2. Кривые зависимости волнового сопротивления  $H_{01}$ -волны от радиуса волновода, заполненного диэлектриком 1 —  $\varepsilon=1$ ,  $i=2 \dots 10$  —  $\varepsilon=2 \dots 10$

Можно предположить, что если подобрать высоту выступа на рис. 1,а равной  $h=b_0-b^\varepsilon$ , то за счет равенства волновых сопротивлений, отражение волны от диэлектрической вставки будет отсутствовать. Как показали расчеты, на самом деле полная компенсация при этом условии не достигается. Однако, как показано ниже при некоторой коррекции высоты выступа для заданной его крутизны удастся достичь практически полной компенсации на заданной частоте.

### Результаты расчета параметров компенсирующего выступа и канавки

На рис. 3 представлен случай прохождения волны через диэлектрическую вставку, расположенную на выступе (рис. 1,а).

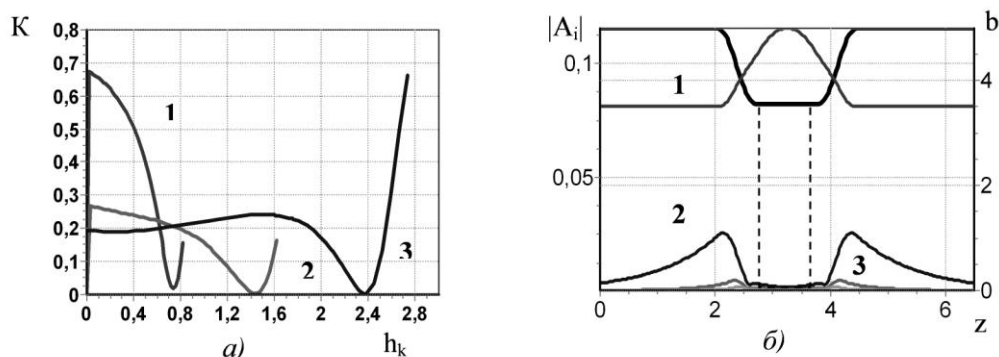


Рис. 3. Характеристики прохождения волны через диафрагму  $\Delta_k=0,4$ ,  $D_\varepsilon=1$ ,  $\varepsilon=2$ : а) 1 —  $b=4$ ; 2 —  $b=5$ ; 3 —  $b=6$ ; б)  $b=5$ ; 1 —  $A_1$ ; 2 —  $A_2$ ; 3 —  $A_3$

На кривых зависимости коэффициента отражения  $K$  от  $h_k$  (рис. 3,а) наблюдается минимум, в котором  $K \approx 0$ . Минимумы коэффициента отражения на рис. 3,а достигаются для различных радиусов волновода  $b=4; 5; 6$  при высотах  $h_k=0,7; 1,5; 2,4$  соответственно.

Возбуждение парциальных волн  $H_{0i}$  с амплитудами  $A_i(z)$  [1, 2], при прохождении  $H_{01}$ -волны без затухания через диэлектрическую диафрагму, расположенную на выступе высотой  $h_k=1,5$  для радиуса волновода  $b=5$ , демонстрирует рис. 3,б. Пунктиром отмечено положение диэлектрического окна. Появление закритических  $H_{02}$ ,  $H_{03}$ -волн, затухающих при удалении от выступа указывает на резонансный характер процесса в области нерегулярности стенки волновода.

Следует отметить, что определяемая из зависимостей рис. 2 высота выступа, при которой происходит согласование волновых сопротивлений заполненного диэлектриком и пустого волновода, оказывается большей, чем полученная в расчете конструкции диэлектрического окна с выступом (рис. 1,а). Так для варианта, представленного на рис.3,б, ожидалась  $h_k=2$ , а реальная  $h_k=1,5$ . Это дополнительное подтверждение того, что компенсация отражения в основном происходит не за счет согласования волновых сопротивлений, а за счет резонансного эффекта на выступе.

Расчеты показали, что и для канавки с диэлектрическим окном (рис. 1,б) закономерности компенсации отражения аналогичны: для заданных  $b_0$ ,  $D_\varepsilon$  и  $\Delta_k$  можно подобрать высоту канавки, при которой компенсируется отражение.

На рис. 4 представлены зависимости от крутизны  $\Delta_k$  высоты выступа и канавки, при которых коэффициент отражения  $K$  не превосходит  $10^{-3}$  для двух значений толщины "тонкой" диафрагмы с типичной для таких окон диэлектрической проницаемостью 2 и 3.

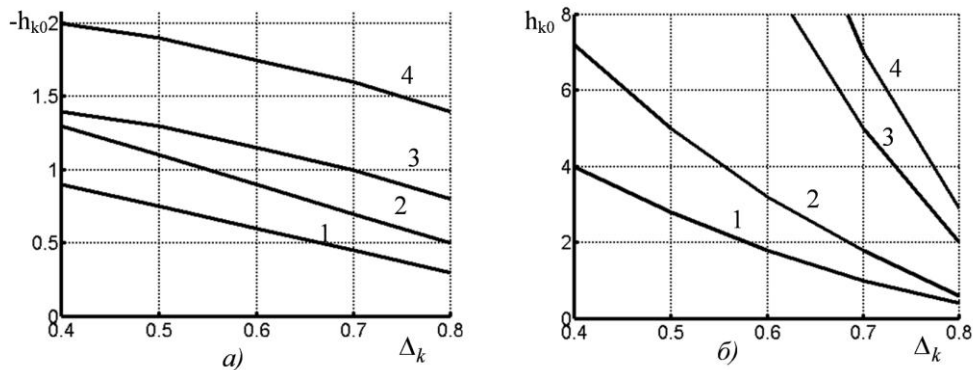


Рис. 4. Зависимость высоты выступа а) и канавки б) от их крутизны  $\Delta_k$  для  $b_0=5$  при  $K \approx 0$ :  
 $D_\varepsilon=0,4$ : 1 —  $\varepsilon=2$ , 2 —  $\varepsilon=3$ ;  $D_\varepsilon=0,8$ : 3 —  $\varepsilon=2$ , 4 —  $\varepsilon=3$

Как для выступа, так и для канавки резонансная высота заметно уменьшается с увеличением крутизны боковых стенок и толщины диафрагмы. При этом резонансная высота выступа значительно меньше, чем соответствующая высота резонансной канавки, что объясняется дополнительным компенсирующим действием согласования волновых сопротивлений. Однако с ростом крутизны и уменьшением высоты выступа роль согласования волновых сопротивлений становится менее значительной и высоты канавки становятся сравнимыми с соответствующими высотами выступа.

Заметим, что при малой крутизне  $\Delta_k=0,4$ , даже для тонкой диафрагмы  $D_\varepsilon=0,4$  с  $\varepsilon=2$ , коэффициент отражения, близкий к нулю, получается при высоте канавки равной размерам волновода. Поэтому для компенсации отражения целесообразно использовать канавку и выступ с большой крутизной боковых стенок.

Процесс прохождения волны через диафрагму с резонансным выступом и канавкой с большой крутизной стенок иллюстрирует рис. 5. Если на выступе внутри диэлектрика максимальна основная волна, а закритические практически отсутствуют, то на канавке внутри диэлектрика значительной амплитуды достигают закритические волны.

На рис. 6 представлена зависимость оптимальной глубины канавки, соответствующей минимальному  $K < 10^{-3}$  от  $b_0$  для выступа и канавки с большой крутизной.

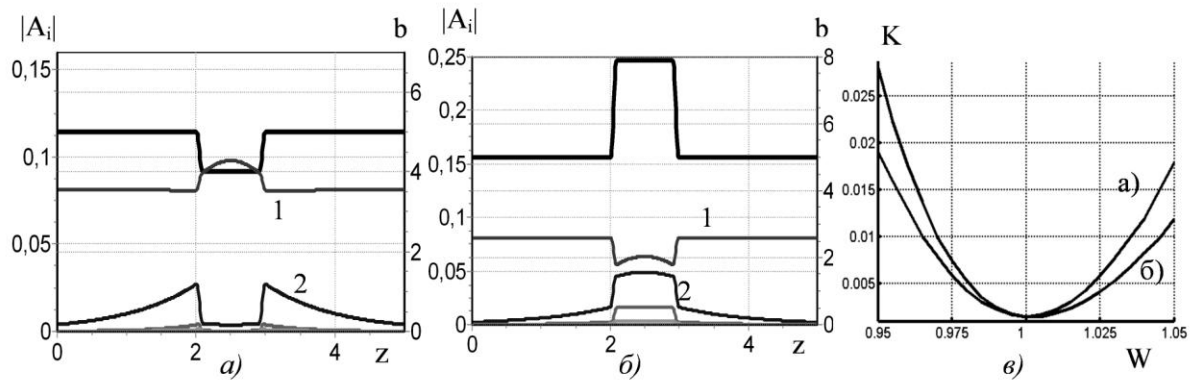


Рис. 5. Прохождение волны через не отражающую диафрагму с параметрами  $D_\varepsilon=0,8$ ,  $\Delta_k=0,8$ ,  $\varepsilon=2$ ,  $b_0=5$ ,  $K \neq 0$ : 1 —  $A_1$ ; 2 —  $A_2$ ; 3 —  $A_3$ , а)  $h_k=1$ , б)  $h_k=2,9$ , в) полоса частот

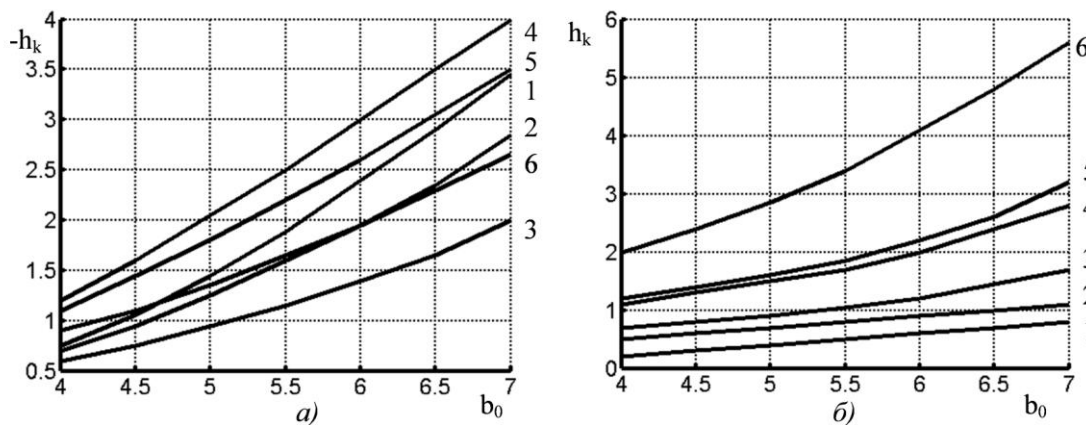


Рис. 6. Зависимость резонансной высоты от радиуса волновода для выступа а) и канавки б) с крутизной  $\Delta_k=0,8$ : 1 —  $D_\varepsilon=0,4$ ; 2 —  $D_\varepsilon=0,6$ ; 3 —  $D_\varepsilon=0,8$ ,  $\varepsilon=2$ ; 4 —  $D_\varepsilon=0,4$ ; 5 —  $D_\varepsilon=0,6$ ; 6 —  $D_\varepsilon=0,8$ ,  $\varepsilon=3$

Резонансная высота как выступа так и канавки растет при увеличении радиуса волновода, толщины диэлектрической вставки  $D_\varepsilon$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ .

### Заключение

Решена задача о подборе компенсатора отражения симметричной  $H$ -волны круглого волновода от "тонкого" диэлектрического окна в виде резонансной канавки или выступа совмещенных с диэлектрической пластиной.

Найдены параметры такого компенсатора, при которых реализуется резонансный эффект, приводящий к практически полному прохождению рабочей  $H_{01}$ -волны через диэлектрическое окно разной толщины и заданных значениях диэлектрической проницаемости.

Предложенный ранее метод блочной матричной прогонки и эффективный алгоритм решения задачи о прохождении симметричных  $H$ -волн в продольно-нерегулярном волноводе [1, 2] позволяет успешно производить синтез рассмотренных устройств.

# COMPENSATION OF REFLECTION $H_{01}$ -WAVE OF THE ROUND WAVE GUIDE FROM THE DIELECTRIC WINDOW

A.A. KURAEV, O.I. NARANOVICH, A.K. SINITSYN

## Abstract

The way of compensation of reflection of a symmetric H-wave from a dielectric window by means of a groove or a hanging indent, combined with a dielectric window, and derivating resonance system of type of the half-wave resonator is offered. Calculations for choice heights and steepness of a hanging indent and a groove, providing the minimum reflection of a wave for a dielectric diaphragm of a different thickness and preset values of dielectric permeability are carried out.

## Литература

1. *Кураев А.А., Наранович О.И., Синицын А.К.* // Техника и приборы СВЧ. 2008. № 1. С. 10–15.
2. *Кураев А.А., Наранович О.И., Синицын А.К.* // Докл. БГУИР. 2008. № 3. С. 59–65
3. *Наранович О.И., Синицын А.К.* // Докл. БГУИР. 2007. № 3. С. 18–23.