

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Д. т. н. М. К. Можар

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д. т. н. В. П. Малахов  
Е. А. Тихонова  
К. т. н. В. М. Чмиль  
В. А. Юсиченко

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д. т. н. П. Е. Баранов (г. Одесса)  
Д. ф.-м. н. Е. Д. Белявский (г. Киев)  
Д. т. н. А. Е. Беляев (г. Киев)  
К. ф.-м. н. Н. С. Болтовец (г. Киев)  
Д. т. н. А. Н. Братчиков (г. Москва)  
Д. ф.-м. н. Д. М. Ваврив (г. Харьков)  
К. ф.-м. н. С. Д. Воторопин (г. Томск)  
Д. т. н. Ю. Б. Гимпилович (г. Севастополь)  
К. т. н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев)  
К. т. н. Б. А. Демьянчук (г. Одесса)  
К. ф.-м. н. В. Д. Еремка (г. Харьков)  
К. т. н. П. П. Ермолов (г. Харьков)  
К. т. н. Н. Ф. Карушкин (г. Киев)  
К. т. н. А. А. Кищинский (г. Москва)  
Д. ф.-м. н. А. А. Кураев (г. Минск)  
Д. ф.-м. н. И. И. Магда (г. Харьков)  
К. ф.-м. н. С. Б. Мальцев (г. Киев)  
Д. ф.-м. н. Э. Д. Прохоров (г. Харьков)  
Д. т. н. Ю. Н. Седышев (г. Киев)  
Д. ф.-м. н. В. В. Старостенко  
(г. Симферополь)  
Д. ф.-м. н. Г. И. Хлопов (г. Харьков)  
К. т. н. Ю. А. Цвирко (г. Киев)  
Д. ф.-м. н. Г. И. Чурюмов (г. Харьков)

Ответственный секретарь редколлегии

В. П. Рукин

E-mail: ndiorion@tsua.net,  
тел. +38 (044) 456-60-71

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной политики  
Украины

Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»

Научно-исследовательский институт  
«Орион»

Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство "Политехперіодика"

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные технологии СВЧ в Украине. Немилостивый В. А., Можар М. К., Сиренко В. Е., Чмиль В. М.	3
<b>Развитие отрасли: исторический аспект</b> НПП «Сатурн» — 40 лет в СВЧ-электронике. Чмиль В. М., Глушеченко Э. Н.	5
Развитие полупроводниковой электроники сверхвысоких частот в НИИ «Орион». Болтовец Н. С., Касаткин Л. В., Мальцев С. Б., Рукин В. П.	7
<b>Электровакуумные приборы</b> Расчет параметров диэлектрической диафрагмы круглого волновода, не отражающей $H_{01}$ -волну. Кураев А. А., Наранович О. И., Синицын А. К.	10
Пути повышения долговечности клистронов с оксидным катодом. Предмирский В. С., Твердохлеб Н. Г.	15
<b>Твердотельные модули, приборы и устоява</b> Приемопередающий модуль 5-мм диапазона длин волн с частотной модуляцией для систем ближней радиолокации. Егунов М. С., Воторопин С. Д.	18
Приемник миллиметрового диапазона для коммуникационных сетей. Кузьмин С. Е., Радзиховский В. Н., Пилипенко А. М.	23
Модуль двойного преобразования частот в миллиметровом диапазоне. Ильченко М. Е., Чмиль В. М., Сундучков К. С., Шелковников Б. Н., Сундучков И. К., Санкин В. А., Волков С. Э.	25
Усилитель мощности наземной станции спутниковой связи Ka-диапазона с выходной мощностью 44 дБм. Сундучков И. К., Яковлев И. В., Рябчук А. Ф., Демьяненко Ю. А., Санкин В. А.	28
Полупроводниковые генераторы электромагнитных колебаний с переключением дискретных стабильных частот. Касаткин Л. В., Швачка А. В.	30
Устройства для управления амплитудой и фазой СВЧ-сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн. Карушкин Н. Ф., Симончук В. И., Мальшко В. В., Ореховский В. А.	36
<b>Измерительная аппаратура</b> Измерение разности разностей фаз в системах с пространственной обработкой сигналов СВЧ-диапазона. Авдеенко Г. Л., Мазуренко А. В., Якорнов Е. А.	42
Устройства для измерения СВЧ-параметров GaAs-транзисторов в миллиметровом диапазоне длин волн. Ковальчук В. Н.	45
Арсенид-галлиевые диоды на кристаллодержателе для детекторов 5- и 8-мм диапазонов длин волн. Ткаченко В. В., Ижко Н. С., Угерин М. И.	50
<b>Надежность, долговечность</b> Исследования кремниевых высоковольтных СВЧ $p-i-n$ -диодов при повышенной температуре. Болтовец Н. С., Голынная Т. И., Кривуца В. А., Суворова Л. М., Лычман К. А.	52
<b>Материалы и технология изготовления приборов СВЧ</b> Особенности конструкции и технологии изготовления диодов Ганна из арсенида галлия, работающих на частотах выше 60 ГГц. Ковтонюк В. М., Иванов В. Н., Николаенко Ю. Е.	55
<b>Видные ученые отрасли</b> Григорий Наумович Рапопорт (к 90-летию со дня рождения)	58
<b>Рекомендации авторам</b>	60

**ЗМІСТ**

Електронні технології НВЧ в Україні. *Немілостивий В. О., Можар М. К., Сіренко В. С., Чміль В. М.* (3)

**Розвиток галузі: історичний аспект**  
НВП «Сатурн» — 40 років в НВЧ-електроніці. *Чміль В. М., Глушеченко Е. М.* (5)

Розвиток напівпровідникової електроніки надвисоких частот в НДІ «Оріон». *Болтовець М. С., Касаткін Л. В., Мальцев С. Б., Рукін В. П.* (7)

**Електровакуумні прилади**  
Розрахунок параметрів діелектричної діафрагми круглого хвилеводу, що не відбиває  $H_{01}$ -хвилю. *Куряев О. О., Наранович О. І., Ситицин А. К.* (10)

Шляхи підвищення довговічності клістронів з оксидним катодом. *Предмирський В. С., Твердохліб Н. Г.* (15)

**Твердотільні модулі, прилади та пристрої**  
Приймально-передавальний модуль 5-мм діапазону довжин хвиль з частотною модуляцією для систем ближньої радіолокації. *Єзунов М. С., Вотопорін С. Д.* (18)

Приймач міліметрового діапазону для комунікаційних мереж. *Кузьмін С. С., Радзіховський В. Н., Пилипенко А. М.* (23)

Модуль подвійного перетворення частот у міліметровому діапазоні. *Ільченко М. С., Чміль В. М., Сундучков К. С., Шелковников Б. М., Сундучков І. К., Санкін В. О., Волков С. Е.* (25)

Підсилювач потужності наземної станції супутникового зв'язку Ка-діапазону з вихідною потужністю 44 дБм. *Сундучков І. К., Яковлев І. В., Рябчук А. Ф., Дем'яненко Ю. О., Санкін В. О.* (28)

Напівпровідникові генератори електромагнітних коливань з перемиканням дискретних стабільних частот. *Касаткін Л. В., Швачка А. В.* (30)

Пристрої для керування амплітудою та фазою НВЧ-сигналів у міліметровому діапазоні довжин хвиль. *Карушкін М. Ф., Симончук В. І., Малишко В. В., Ореховський В. А.* (36)

**Вимірювальна апаратура**  
Вимірювання різниці різниць фаз в системах з просторовою обробкою сигналів НВЧ-діапазону. *Авдеско Г. Л., Мазуренко О. В., Якорнов С. А.* (42)

Пристрої для вимірювання НВЧ-параметрів GaAs-транзисторів у міліметровому діапазоні довжини хвиль. *Ковальчук В. М.* (45)

Арсенід-галієві діоди на кристалотримачі для детекторів 5- і 8-мм діапазонів довжин хвиль. *Ткаченко В. В., Іжко Н. С., Угрін М. І.* (50)

**Надійність, довговічність**  
Дослідження кремнієвих високовольтних НВЧ  $p$ - $i$ - $n$ -діодів при підвищеній температурі. *Болтовець М. С., Голинка Т. І., Кривуца В. А., Суворова Л. М., Личман К. А.* (52)

**Матеріали і технологія виготовлення приладів НВЧ**

Особливості конструкції та технології виготовлення діодів Ганна з арсеніду галія, що працюють на частотах понад 60 ГГц. *Ковтонюк В. М., Іванов В. М., Ніколасенко Ю. Є.* (55)

**Визначні вчені галузі**  
Григорій Наумович Рапопорт (до 90-річчя з дня народження) (60)

**CONTENT**

Microwave electronic technologies in Ukraine. *Nemilostiviy V. A., Mozhar M. K., Sirenko V. E., Chmil V. M.* (3)

**Branch development: historical aspect**  
SPI «Saturn» — 40 years in microwaves electronics. *Chmil V. M., Glushechenko E. N.* (5)

Development of microwave semiconductor electronics in research institute «Orion». *Boltovets N. S., Kasatkin L. V., Maltsev S. B., Rukin V. P.* (7)

**Tubes**  
Calculation of a round waveguide dielectric window not reflecting the  $H_{01}$ -wave parameters. *Kuryayev A. A., Naranovich O. I., Sinityn A. K.* (10)

Life enhancement means of klystrons with oxide-coated cathode. *V. S. Predmirski, N. G. Tverdohleb* (15)

**Solid-state modules, devices and components**  
Transceiver module of 5-mm wavelength range with frequency modulation for short-range radar systems. *Egunov M. S., Votopirin S. D.* (18)

Millimeter wave receiver for communication networks. *Kuzmin S. E., Radzikhovskiy V. N., Pylypenko A. M.* (23)

Double frequency conversion module in millimeter range. *Ichenko M. E., Chmil V. M., Sunduchkov K. S., Shelkovnikov B. N., Sunduchkov I. K., Sankin V. A., Volkov S. E.* (25)

Power amplifier of the Ka-band satellite communications terrestrial station with 44 dBm output. *Sunduchkov I. K., Yakovlev I. V., Ryabchuk A. F., Dem'yanenko Yu. A., Sankin V. A.* (28)

Solid state generators of electromagnetic oscillations with a switch of discrete stable frequencies. *Kasatkin L. V., Shvachka A. V.* (30)

Millimeter-wave components for control of microwave signals amplitude and phase. *Karushkin N. F., Simonchuk V. I., Malysheko V. V., Orekhovskiy V. A.* (36)

**Measurement systems**  
Measure of double phase difference parameter in spatial signal processing systems of the super high frequency range. *Avdeenko G. L., Mazurenko A. V., Yakornov E. A.* (42)

The device for measurements of the microwave parameters of GaAs transistors in the millimetric range of wave lengths. *Kovalchuk V. N.* (45)

GaAs-diodes on the chip holder for 5- and 8-mm wavelength detectors. *Tkachenko V. V., Izhko N. S., Ugrin M. I.* (50)

**Reliability, longevity**  
Investigations of microwave silicon high-voltage pin diodes at high temperature. *Boltovets M. S., Golynka T. I., Kryvutsa V. A., Suvorova L. M., Lychman K. O.* (52)

**Materials and technology of microwave components**

Design and technology features of GaAs Gunn diodes operating at the frequencies above 60 GHz. *Kovtoniuk V. M., Ivanov V. N., Nikolayenko Yu. E.* (55)

**Famous scientists**  
Grigiry Naumovich Rapoport (to the 90 year from the day of birth) (60)

Регистрационный номер  
КВ 13417-2301Р от 03.12 2007 г.

Выходит один раз в полгода

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ  
Отделения связи. «Каталог изданий  
Украины». Индекс 99584  
В редакции журнала «ТП СВЧ».

Адрес редакции: Украина, 65044,  
г. Одесса, а/я 17  
E-mail: tkea@optima.com.ua,  
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,  
тел./факс 728-49-46.  
Редакция: Е. А. Тихонова,  
Н. М. Колганова, М. Г. Миклулинская,  
М. С. Назарова, Л. Н. Щегленко.  
Техническая редакция:  
Е. И. Корецкая.  
Дизайн обложки: И. Н. Эпова.  
Компьютерное обеспечение:  
П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8.  
Печать офсетная.  
Печ. л. 7,5+1,0. Уч.-изд. л. 10,5.  
Тираж 600 экз. Заказ № 94.  
Издательство  
«Политехпериодика»  
(г. Одесса-44, а/я 17).  
Отпечатано в типографии  
издательства «ART-V»  
(65091, г. Одесса,  
ул. Комитетская, 24а).

Одобрено к печати  
Научно-техническим советом  
ГП НИИ «Орион»  
(протокол № 27 от 05.06 2008 г.)

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДИАФРАГМЫ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА, НЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ $H_{01}$ -ВОЛНУ

Д. ф.-м. н. А. А. Кураев, О. И. Наранович, д. ф.-м. н. А. К. Симицын

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск  
E-mail: kurayev@bsuir.by

*Предложена процедура расчета нерегулярных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением, совмещающая метод преобразования координат, последующее сведение задачи к системе обыкновенных дифференциальных уравнений на основе метода прямых, парциальные условия излучения на входном и выходном сечениях и метод блочной матричной прогонки для случая продольно нерегулярного волновода с диэлектрическими вставками. Приведены результаты решения задачи подбора рефлектора, компенсирующего отражение  $H_{01}$ -волны круглого волновода от диэлектрического окна.*

Диэлектрические вставки специальной формы используются в таких элементах волноводной СВЧ-техники как замедляющие системы, диэлектрические окна. Ввиду этого актуальным является разработка эффективных методов расчета нерегулярных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением. В [1] такие задачи решаются на основе метода преобразования координат и неполного метода Галеркина, который, однако, для нерегулярного волновода во многих случаях оказывается неустойчивым. Решение этих задач прямым методом сеток требует значительных вычислительных затрат [2].

В [3, 4] для решения краевых задач в случае продольно нерегулярных волноводов с вакуумным заполнением предложена эффективная процедура решения, удачно совмещающая метод преобразования координат, последующее сведение задачи к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) на основе метода прямых, парциальные условия излучения на входном и выходном сечениях [2] и метод блочной матричной прогонки [5, 6]. В настоящей статье описанная в [3, 4] методика развита для случая продольно нерегулярного волновода с диэлектрическими вставками.

### Уравнения Максвелла в преобразованной системе координат

Возбуждение волн в рассматриваемом нерегулярном отрезке волновода на рабочей частоте  $\omega$  описывается однородными уравнениями Максвелла и соответствующими граничными условиями на внутренней идеально проводящей поверхности волновода. Для решения задачи воспользуемся известной методикой отображения внутренней области

нерегулярного волновода заданного профиля  $b(z)$  на цилиндр единичного радиуса [3]. Введем наряду с полярной системой координат  $(r, \varphi, z)$ , в которой записываются исходные уравнения Максвелла, новую систему  $(\psi, \rho, \zeta)$ , связанную с исходной преобразованием

$$r = \rho b(\zeta); \quad \varphi = \psi; \quad z = \zeta. \quad (1)$$

Безразмерные уравнения Максвелла и граничное условие на стенке волновода для векторов поля в преобразованной системе запишем в виде [3]

$$\text{rot } \dot{\vec{B}}^p = jW \hat{g} \cdot \dot{\varepsilon}(\rho, r) \dot{\vec{E}}^p;$$

$$\hat{g}^{-1} \text{rot } \dot{\vec{E}}^p = -jW \dot{\vec{B}}^p;$$

$$[\vec{r}_0, \dot{\vec{E}}^p] \Big|_{\rho=1} = 0; \quad (2)$$

$$\hat{g} = \begin{bmatrix} 1 + \rho^2 b' & 0 & -\rho b b' \\ 0 & 1 & 0 \\ -\rho b b' & 0 & b^2 \end{bmatrix},$$

где  $\hat{g}$  — метрический тензор;

$$b' = db/dz;$$

$\lambda_0, \omega_0$  — опорная длина волны и соответствующая ей частота,

$$\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0;$$

$c$  — скорость света в вакууме;

$$W = \omega/\omega_0;$$

$\omega$  — рабочая частота;

$\dot{\varepsilon}$  — комплексная диэлектрическая проницаемость,

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' + j\varepsilon'';$$

$\dot{\vec{E}}^p, \dot{\vec{B}}^p$  — безразмерные векторы электромагнитного поля в преобразованной системе координат,

$$\dot{\vec{E}}^p = (E_\rho, E_\psi, E_\zeta),$$

$$\dot{\vec{B}}^p = (B_\rho, B_\psi, B_\zeta).$$

Здесь и далее все геометрические параметры выражены в единицах  $\lambda_0/2\pi$ .

Оппонент  
к. ф.-м. н. В. Д. ЕРЁМКА  
(ИРЭ им. А. Я. Усикова, г. Харьков)

В случае симметричных  $H$ -волн имеются только три ненулевые компоненты  $E_\psi, B_\rho, B_z$  электромагнитного поля и задача (2) приводится к скалярному уравнению относительно функции двух переменных  $u(\rho, z)$ :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\varepsilon(\rho, z) W^2}{\rho} u - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{b' \partial u}{b \partial \rho} \right) - \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{b' \partial u}{b \partial z} \right) + \frac{1}{b^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{1 + (b' \rho)^2}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) = 0. \quad (3)$$

Граничное условие на стенке волновода —  $u(1, z) = 0$ , на оси —  $u(0, z) = 0$ .

Компоненты симметричной  $H$ -волны выражаются через  $u$  следующим образом:

$$\vec{B}^p = \frac{j}{W} \left\{ \left( -\frac{\partial u}{\rho \partial z} + \frac{b' \partial u}{b \partial \rho} \right) \vec{\rho}_0 + \left( -\frac{b' \partial u}{b \partial z} + \frac{1 + \rho^2 b'^2}{b^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) \vec{z}_0 \right\};$$

$$\vec{E}^p = \vec{\Psi}_0 u(\rho, z) / \rho. \quad (4)$$

Связь компонент в исходной  $(r, \varphi, z)$  и преобразованной  $(\rho, \psi, \zeta)$  системах:

$$B_r = B_\rho / b(z);$$

$$E_\varphi = E_\psi / b(z);$$

$$B_z = B_\zeta - B_\rho \cdot b'(z) / b(z).$$

Размерные компоненты поля (помечаются штрихом) выражаются через безразмерные следующим образом:

$$E'_\varphi = E_\varphi / E_m, \quad B'_r = B_r c / E_m, \quad B'_z = B_z c / E_m,$$

где  $E_m$  — заданная амплитуда.

**Парциальные условия излучения на концах отрезка нерегулярного волновода**

Рассмотрим отрезок волновода  $0 \leq z \leq L$  с нерегулярными включениями; вне этого отрезка волновод регулярен, причем на границах сопряжения гладкие.

В соответствии с методикой [1, 2, 4] представим искомое волновое поле в виде разложения по поперечным сечениям собственных  $H_{0i}$ -волн регулярного волновода единичного радиуса. Для компоненты  $E_\psi$  имеем:

$$E_\psi(\rho, z) = \sum_i A_i(z) J_1(\mu_{0i} \rho);$$

$$A_i(z) = \frac{1}{h_{0i}} \int_0^1 u(z, \rho) J_1(\mu_{0i} \rho) d\rho;$$

$$h_{0i} = \int_0^1 J_1^2(\mu_{0i} \rho) \rho d\rho, \quad (5)$$

где  $\mu_{0i}$  — корни функции Бесселя  $J_1(x)$ ;  $A_i(z)$  — амплитуды разложения.

На регулярных полубесконечных участках волновое поле представляется в виде разложения по системе собственных  $H_{0i}$ -волн, и амплитуды  $A_i$  имеют вид:

$$A_i(z) = \begin{cases} a_i^+ e^{-jk_i z} + a_i^- e^{+jk_i z}; & W > \mu_{0i} / b, \quad i = 1, 2, \dots, p; \\ a_i^+ e^{-k_i z} + a_i^- e^{+k_i z}; & W < \mu_{0i} / b, \quad i > p, \end{cases}$$

$$k_i = \sqrt{W^2 - (\mu_{0i} / b)^2},$$

где  $a_i^\pm, k_i$  — амплитуды прямой и встречной собственных волн регулярного волновода и их волновые числа, соответственно;

$p$  — максимальное количество распространяющихся волн.

Тогда условия на границах сопряжения рассматриваемого нерегулярного отрезка волновода с регулярными участками запишутся следующим образом:

Условие полного согласования при  $z=L$ . При  $z>L$  отсутствуют обратные волны, т. е.  $a_i^- = 0$ .

$$\frac{\partial u(\rho, L)}{\partial z} = -\sum_{i \leq p} \frac{jk_i}{h_{0i}} \rho J_1(\mu_{0i} \rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, L) J_1(\mu_{0i} \bar{\rho}) d\bar{\rho} - \sum_{i > p} \frac{k_i}{h_{0i}} \rho J_1(\mu_{0i} \rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, L) J_1(\mu_{0i} \bar{\rho}) d\bar{\rho}. \quad (6)$$

Условие набегания слева  $H_{0r}$ -волн при  $z=0$ . При  $z < 0$   $a_r^+ \neq 0, a_{i(i \neq r)}^+ = 0$ .

$$\frac{\partial u(\rho, 0)}{\partial z} = \sum_{i \leq p} \frac{jk_i}{h_{0i}} \rho J_1(\mu_{0i} \rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, 0) J_1(\mu_{0i} \bar{\rho}) d\bar{\rho} + \sum_{i > p} \frac{k_i}{h_{0i}} \rho J_1(\mu_{0i} \rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, 0) J_1(\mu_{0i} \bar{\rho}) d\bar{\rho} - 2j \sum_r k_r a_r^+ \rho J_1(\mu_{0r} \rho). \quad (7)$$

Заметим, что условия (6), (7) можно ставить непосредственно на концах нерегулярного отрезка, что позволяет значительно уменьшить расчетную область, особенно вблизи границы полосы прозрачности.

Мощность, переносимая симметричной  $H$ -волной через поперечное сечение:

$$P_z = \text{real} \int_0^b \left[ \vec{E} \times \vec{B}^* \right]_z r dr = \text{imag} \left\{ \frac{1}{W} \int_0^1 \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial u^*}{\partial z} u - \frac{b'}{b} \frac{\partial u^*}{\partial \rho} u \right) d\rho \right\}. \quad (8)$$

Мощность прямой и обратной распространяющихся парциальных волн на регулярных участках ( $b'=0$ ):

$$P_i^\pm = \text{imag} \left\{ \frac{1}{W} \int_0^1 \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial u_i^\pm}{\partial z} u_i^\pm \right) d\rho \right\};$$

$$u_i^\pm = \frac{1}{2} \left( u \pm \frac{j}{k_i} \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (9)$$

**Метод блочной матричной прогонки**

В соответствии с методикой [5] выберем на интервале  $\{0 \leq \rho \leq 1\}$  равномерную сетку  $\omega_{hr} = \{\rho_j = jh_r, h_r = 1/m, j=0, \dots, m\}$  (можно неравномерную) и обозначим

$$\vec{u} = \{u(\rho_1, z), \dots, u(\rho_{m-1}, z)\} = \{u_1(z), \dots, u_{m-1}(z)\},$$

$$u_0 = u_m = 0.$$

Аппроксимируем уравнение (3) конечно-разностной схемой второго порядка точности. После приведения к векторно-матричной форме получаем систему ОДУ следующего вида:

$$\frac{d}{dz} \left( E(z) \frac{d\vec{u}}{dz} \right) + \frac{d}{dz} (Q(z)\vec{u}) + Q(z) \frac{d\vec{u}}{dz} + G(z)\vec{u} = 0. \quad (10)$$

Матрицы  $G$  и  $Q$  имеют следующие ненулевые коэффициенты:

$$g_{1,1} = -\frac{\dot{\epsilon}(z, \rho_1)W^2}{\rho_1} - \frac{c_{1/2} + c_{1+1/2}}{b^2 h_r^2};$$

$$g_{1,2} = -\left(\frac{b'}{b}\right)' \frac{1}{2h_r} + \frac{c_{1+1/2}}{b^2 h_r^2};$$

$$c_{j\pm 1/2} = \frac{1 + (b'\rho_{j\pm 1/2})^2}{\rho_{j\pm 1/2}};$$

$$g_{j,j-1} = \left(\frac{b'}{b}\right)' \frac{1}{2h_r} + \frac{c_{j-1/2}}{b^2 h_r^2};$$

$$g_{j,j} = \frac{\dot{\epsilon}(z, \rho_j)W^2}{\rho_j} - \frac{c_{j-1/2} + c_{j+1/2}}{b^2 h_r^2};$$

$$g_{j,j+1} = -\left(\frac{b'}{b}\right)' \frac{1}{2h_r} + \frac{c_{j+1/2}}{b^2 h_r^2};$$

$$q_{1,2} = -\frac{b'}{b^2 h_r}; \quad q_{j,j\pm 1} = \mp \frac{b'}{b^2 h_r}; \quad j=2, \dots, m-1.$$

Матрица  $E$  содержит только ненулевые диагональные элементы, равные  $1/\rho_j, j=1, \dots, m-1$ .

Для решения краевой задачи для системы (10) введем сетку по  $z$  —  $\omega_{hz} = \{z_k = (k-1)h_z, h_z = L/n, k=1, \dots, n+1\}$ , обозначим  $\vec{u}^k = \vec{u}(z_k)$  и построим конечно-разностную схему второго порядка точности:

$$\begin{aligned} & \left[ E^{k-1/2} - 0,5h_z(Q^{k-1} + Q^k) \right] \vec{u}^{k-1} + \\ & + \left[ -E^{k-1/2} - E^{k+1/2} + h_z^2 G^k \right] \vec{u}^k + \\ & + \left[ E^{k+1/2} + 0,5h_z(Q^{k+1} + Q^k) \right] \vec{u}^{k+1} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Парциальные граничные условия излучения (6), (7) при замене интеграла по методу трапеций приводятся к матричному виду:

$$\frac{d\vec{u}^1}{dz} + \beta^0 \vec{u}^1 = \vec{\gamma}^0; \quad \frac{d\vec{u}^{n+1}}{dz} + \beta^L \vec{u}^{n+1} = 0. \quad (12)$$

Компоненты матриц  $\beta^0, \beta^L$  и вектора  $\vec{\gamma}^0$  имеют вид:

$$\beta_{kl}^0 = -h_r \left[ \sum_{i=1}^p \frac{jk_i^0}{h_{0i}} J_1(\mu_{0i}\rho_k) \rho_k J_1(\mu_{0i}\rho_l) + \sum_{i=p+1}^{N_v} \frac{k_i^0}{h_{0i}} J_1(\mu_{0i}\rho_k) \rho_k J_1(\mu_{0i}\rho_l) \right];$$

$$\beta_{kl}^L = h_r \left[ \sum_{i=1}^p \frac{jk_i^L}{h_{0i}} J_1(\mu_{0i}\rho_k) \rho_k J_1(\mu_{0i}\rho_l) + \sum_{i=p+1}^{N_v} \frac{k_i^L}{h_{0i}} J_1(\mu_{0i}\rho_k) \rho_k J_1(\mu_{0i}\rho_l) \right];$$

$$\gamma_k^0 = -2j \sum_r k_r^0 a_r^+ \rho_k J_1(\mu_{0r}\rho_k),$$

где  $N_v$  — количество учитываемых собственных волн.

Для (12) используем аппроксимацию второго порядка точности [6]:

$$\begin{aligned} & (-3\vec{u}^1 + 4\vec{u}^2 - \vec{u}^3) + 2h_z \beta^0 \vec{u}^1 = 2h_z \vec{\gamma}^0; \\ & (3\vec{u}^{n+1} - 4\vec{u}^n + \vec{u}^{n-1}) + 2h_z \beta^L \vec{u}^{n+1} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Введем вектор неизвестных  $\vec{x} = \{\vec{u}^1, \vec{u}^2, \dots, \vec{u}^{n+1}\}$  и запишем систему конечно-разностных уравнений (11) и (13) в виде  $A\vec{x} = \vec{d}$ . Вследствие приведенной техники построения конечно-разностной схемы сильно разреженная матрица  $A$  имеет удобную для последующей обработки блочно-ленточную структуру. Для решения таких систем линейных уравнений с блочно-ленточной матрицей была разработана экономичная реализация прямого метода Гаусса с выбором главного элемента — метод блочной матричной прогонки [5]. Идея алгоритма заключается в реализации метода на упакованном массиве из односвязных динамических стеков, в который помещаются только ненулевые элементы. Следует заметить, что данная методика может быть обобщена на случай трехмерных скалярных и векторных систем. Алгоритм метода Гаусса с выбором главного элемента обеспечивает устойчивость конечно-разностной схемы (11), (13) даже если не выполняется условие преобладания диагонального элемента, необходимое для реализации классического метода прогонки и итерационных процедур. Также во многих случаях отпадает необходимость использования методов регуляризации.

На основании вышеизложенного была разработана программа, позволяющая рассчитывать электродинамику симметричных  $H$ -волн в нерегулярном волноводе с диэлектрическим заполнением. Иллюстрацию возможностей программы проведем на примере решения задачи о выборе толщины диэлектрического окна круглого волновода.

**Расчет параметров компенсирующего рефлектора**

Диэлектрические окна в вакуумных СВЧ-устройствах (например, в генераторе на эффекте Черенкова) используются для изоляции вакуума от воздушной среды. Очень важно сделать это окно таким, чтобы СВЧ-волна проходила через него без затухания.

Схематически диэлектрическое окно с компенсирующим рефлектором изображено на рис. 1.

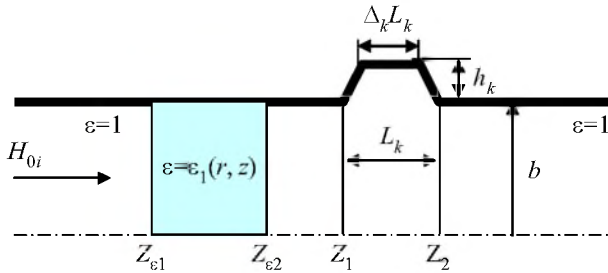


Рис. 1. Геометрия диэлектрического окна с компенсирующим рефлектором

На вход устройства падает симметричная  $H$ -волна. Она частично отражается от диэлектрической вставки, частично ею поглощается, частично через нее проходит. Компенсирующий рефлектор выполнен в виде канавки, имеющей гладкие сопряжения регулярных участков с параметрами  $h_k, \Delta_k, L_k = Z_2 - Z_1$  [3, 4].

С помощью разработанной программы, реализующей вышеописанную модель (2)–(13), рассчитывался коэффициент отражения диэлектрического окна с рефлектором  $K = 1 - P_s(L) / P_1^+(0)$  ( $P_s$  и  $P_1^+$  — см. (8), (9)).

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения диэлектрического окна без рефлектора  $K_\epsilon$  от толщины диэлектрического окна  $D_\epsilon = Z_{\epsilon 2} - Z_{\epsilon 1}$  для различных действительных значений  $\epsilon$  (поглощение не учитывалось). Видно, что коэффициент отражения при реальных значениях  $D_\epsilon$ , равных 0,5–1, достигает значительной величины, при определенных значениях  $D_\epsilon$  становится ничтожно малым, а зависимость имеет периодический характер. Как показывает анализ, период соответствует половине длины волны в диэлектрике  $\Lambda_\epsilon^{H_{01}} = 2\pi / \sqrt{W^2 \epsilon - (\mu_{01} / b)^2}$ , что полно-

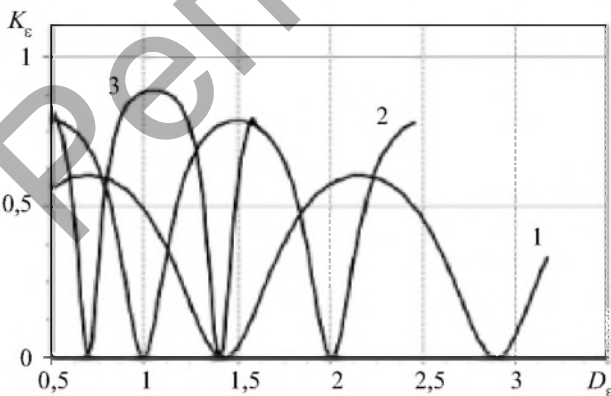


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от толщины диэлектрического окна без рефлектора при  $b=5$ :  
1 —  $\epsilon=5$ , 2 —  $\epsilon=10$ , 3 —  $\epsilon=20$

стью согласуется с теорией длинных линий, согласно которой диэлектрическое окно толщиной в полдлины волны представляет резонансный полуволновой трансформатор и, как следствие, обладает свойством полного прохождения волны (без ее отражения).

На рис. 3 представлена зависимость толщины диэлектрика, соответствующая первому минимуму  $K_\epsilon$ . Как видно, при небольших значениях  $\epsilon < 3$  толщина диэлектрика, соответствующая первому минимуму, достигает больших значений, которые неприемлемы при практической реализации.

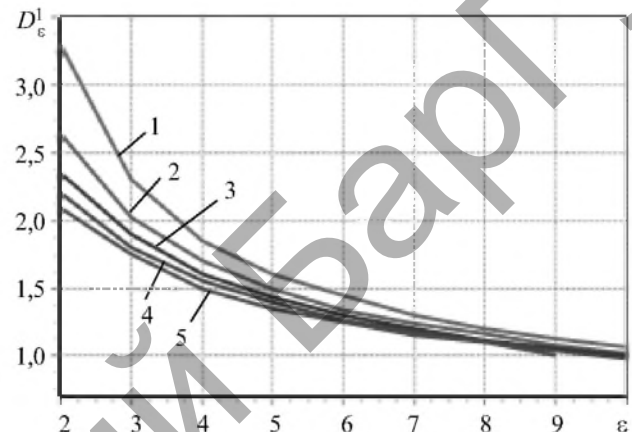


Рис. 3. Зависимость толщины окна от диэлектрической проницаемости:  
1 —  $b=4$ ; 2 —  $b=5$ ; 3 —  $b=6$ ; 4 —  $b=7$ ; 5 —  $b=8$

Реализация тонкого диэлектрического окна в этом случае может быть осуществлена с помощью рефлектора в виде компенсирующей канавки, положение и форма которой представлены на рис. 1. При определенных размерах, положении канавки и толщине диэлектрика возможен резонансный эффект, приводящий к резкому уменьшению коэффициента отражения. Как видно из рис. 4, в этой ситуации между диэлектриком и канавкой устанавливается полволны, т. е. система «диэлектрик—канавка» эквивалентна полуволновому трансформатору.

В таблице приведены варианты параметров окон, найденные в процессе минимизации коэффициента отражения с компенсирующим рефлектором  $K_{\epsilon+k}$  для

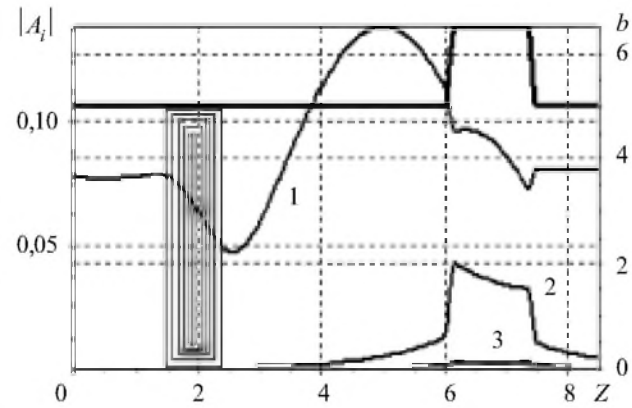


Рис. 4. Положение диэлектрика и канавки при минимальном отражении, а также амплитуды возбуждаемых волн (1, 2, 3) в разложении (5)

Варианты расчета оптимизированных параметров

$b$	$\varepsilon$	$D_\varepsilon$	$K_\varepsilon$	$K_{\varepsilon+k}$	$L_{12}$	$L_k$	$h_k$
4	2	0,5	0,42	0,017	9,553	2,258	1,340
6			0,09	0,001	3,279	1,259	1,253
8			0,07	0,007	3,648	2,974	4,199
10			0,06	0,004	3,457	2,891	5,929
4	3	0,5	0,72	0,01	9,723	2,062	1,475
6			0,25	0,001	3,377	1,195	1,678
8			0,2	0,02	3,116	0,896	2,269
10			0,18	0,07	3,102	0,803	2,381
4	2	1	0,67	0,017	9,377	2,154	1,514
6			0,19	0,001	3,064	1,097	1,303
8			0,15	0,005	3,326	3,067	6,087
10			0,13	0,01	3,112	2,992	6,938
4	3	1	0,85	0,017	9,58	1,928	1,484
6			0,39	0,001	3,096	0,917	1,486
8			0,32	0,01	3,224	3,193	9,495
10			0,29	0,02	3,023	3,068	12,719

используемых на практике значений их толщины. Здесь  $L_{12}=Z_1-Z_{\varepsilon 2}$ , крутизна канавки  $\Delta_k=0,8$ .

Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что компенсирующий рефлектор позволяет уменьшить отражение в сотни раз, благодаря чему можно выбрать необходимую толщину диэлектрика. При увеличении  $b$  до 8—10 сохранение минимального отражения волны достигается при значительном увеличении высоты канавки  $h_k$ . При больших  $b$  расстояние между канавкой и диэлектриком практически не изменяется.

Была исследована зависимость коэффициента отражения диэлектрической вставки с канавкой от частоты при толщине диэлектрического окна 0,8. График полосы частот представлен на рис. 5, где видно, что она расширяется с увеличением радиуса волновода  $b$ .

\*\*\*

Таким образом, разработан эффективный метод, позволяющий рассчитывать электродинамику симметричных  $H$ -волн в нерегулярном волноводе с диэлектрическим заполнением. Получена зависимость от диэлектрической проницаемости изменения толщины

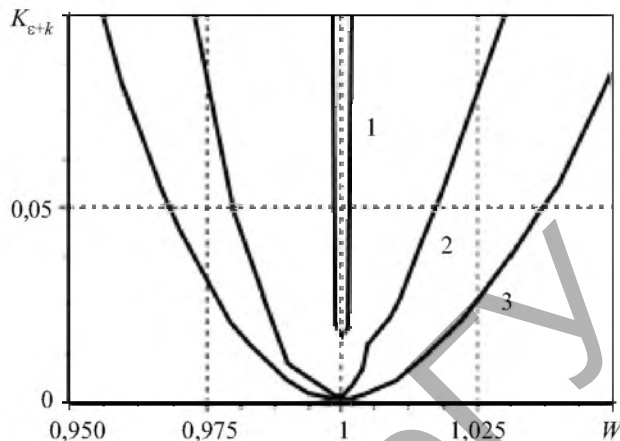


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от частоты: 1 —  $b=4$ ; 2 —  $b=5$ ; 3 —  $b=6$

диэлектрического окна круглого волновода, при которой возможно полное прохождение  $H_{01}$ -волны вследствие резонансного эффекта для различных значений радиуса волновода. Показано, что при небольших значениях  $\varepsilon$  резонансная толщина диэлектрического окна неприемлемо велика.

Найдены параметры рефлектора в виде канавки, расположенной вблизи диэлектрического окна произвольной толщины, при которых реализуется резонансный эффект, приводящий к резкому уменьшению коэффициента отражения рабочей  $H_{01}$ -волны.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Ильинский А. С., Слепян Г. Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями.— М: МГУ, 1983.
- Боголюбов А. Н., Делицын А. Л., Лавренова А. В. Численное моделирование дифракции в волноводе методом конечных элементов // Радиотехника.— 2004.— № 12.— С. 20—31.
- Батура М. П., Кураев А. А., Сеницын А. К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ.— Минск: БГУИР, 2007.
- Наранович О. И., Сеницын А. К. Численное моделирование фильтров симметричных  $H_{01}$ -волн методом блочной матричной прогонки // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.— 2007.— № 10.— С. 57—63.
- Наранович О. И., Сеницын А. К. Решение двумерного уравнения эллиптического типа методом блочной матричной прогонки // Докл. БГУИР.— 2007.— № 3.— С. 18—23.
- Сеницын А. К. Метод блочной матричной прогонки для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Докл. БГУИР.— 2007.— № 1.— С. 57.

#### НОВЫЕ КНИГИ

Яценков В. С. Микроконтроллеры Microchip® с аппаратной поддержкой USB.— М.: Горячая линия—Телеком, 2008.

В настоящее время использование шины USB является наиболее популярным методом для подключения периферийных устройств к компьютеру. Микроконтроллеры Microchip серии PIC18F2455/2550/4455/4550 включают в себя не только аппаратную поддержку шины USB, но и других популярных протоколов обмена данными, а также функциональные модули таймеров, АЦП, ЦАП и ШИМ, что позволяет создавать на основе этих микроконтроллеров самые разнообразные оконечные устройства, взаимодействующие с персональным компьютером. В книге приведено полное техническое описание микроконтроллеров Microchip PIC18F2455/2550/4455/4550, рассмотрены примеры практического применения.