

БАЙТЕРЕКОВ А. Т.,
ОСМОНАЛИЕВА А. А.,
ТОЛБАЕВА Г. К.

КНУ им. Ж. Баласагына, Бишкек
Baiterekov A. T., Osmonaliev A. A., Tolbaeva G. K.
J. Balasagyn KNU, Bishkek
Alymbek baiterekov @ gmail. Com

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ ЭМ ВОЛНЫ СВЧ ДИАПАЗОНА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

**Өтө жогорку жыштыктагы электромагниттик толкундардын
тик бурчтуу толкун өткөргүчүндөгү электр жана магнит
талаасын аныктоо**

Calculation of electric and magnetic fields EM wave in microwave diapasons in a rectangular wave guide

Аннотация: в статье производится численный расчет электрического и магнитного полей ЭМ волны в СВЧ диапазоне методом конечных разностных объемов. Результаты находят применение в практических приложениях в области радиотехники и плазмохимии.

Аннотация: статья вЖЖ электромагниттик толкундардын электр жана магнит талаасын сандык метод менен эсептөөгө арналган. Эсептөө методу катары квлмдврдун айрышасы колдонулат.

Аннотация: the article made a numerical calculation of electric and magnetic field of electro - magnetic waves in a range in excess of the high-frequency method of finite difference volume. The results are used in practical applications in the field of radio and plasma chemistry.

Ключевые слова: метод разностных объемов; диапазон сверхвысоких частот; электромагнитные волны; численный расчет.

Негизги сөздөр: квлмдврдун айрышасы методу; өтө жогорку жыштыктагы диапазон; электромагниттик толкундарды; сандык эсептөө.

Keywords: method of finite difference volume; in a range in excess of the high-frequency; electro-magnetic waves; a numerical calculation.

Целью исследования является:

- построение двумерной математической модели для расчета характеристик электрического и магнитного полей в сложных волноводных конструкциях с ромбической камерой;
- компьютерная реализация построенной математической модели;
- проведение численного анализа характеристик электрического и магнитного полей в зависимости от конфигураций и размеров волноводных конструкций.

В последнее время на практике широкое распространение получили электрические разряды в волновых полях, которые в основном могут быть получены путем накачки энергии

электромагнитных волн на плазмообразующий газ. Для осуществления данной задачи необходимо направить электромагнитную волну, исходящую от источника, на определенную точку пространства, где наиболее эффективна накачка энергии электромагнитной волны. Такая задача выполнима только при направленном распространении электромагнитной волны при помощи волноводов. На практике широко используется прямоугольные и круглые волноводы. Волновод - это средство сосредоточения электромагнитной энергии в определенном пространстве и передачи ее в заданном направлении. По волноводам электромагнитная энергия передается принципиально по тем же законам, что и в атмосфере, но только в волноводах эта передача имеет строго заданное направление и, кроме того, ограничена по частоте. Такие волноводы более широкополосные, дешевле и проще в изготовлении, имеют высокую электрическую прочность, необходимую для передачи большой мощности, высокую механическую прочность, обеспечивающую высокую надежность, длительный срок службы и устойчивость к механическим воздействиям, минимальные потери энергии.

Преимущественное применение прямоугольных волноводов определяется положительными свойствами волны H_{10} , среди которых:

- устойчивость плоскости поляризации;
- отсутствие высших типов волн в широком диапазоне частот;
- независимость критической частоты от одного из размеров, (высоты волновода);
- малое затухание из-за потерь в стенках волновода;
- высокая электрическая прочность.

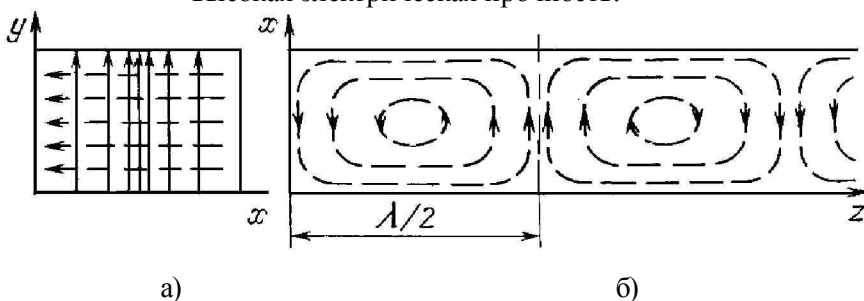


Рис. 1. Волна H_{10} в прямоугольном волноводе.

Вектор напряженности электрического поля волны H_{10} направлен по оси y , причем наибольшая густота силовых линий достигается при $x = a/2$. Магнитные силовые линии лежат в горизонтальных

плоскостях, их проекции на плоскости поперечного сечения являются горизонтальными прямыми, изображенными на рис.1,а штриховыми линиями. Если изображать силовые линии магнитного поля распространяющейся волны H_{10} в плоскости продольного сечения x, z , то это будут замкнутые кривые (рис.1,б).

Численное исследование распределения характеристик электрического и магнитного полей в таких устройствах и выявление нужных параметров, необходимых для модификации или разработки новых конструкций.

Рассматривается прямоугольная волноводная конструкция, заданной формы и размеров и расширяющаяся в ромбовидную камеру. Четыре одинаковых прямоугольных волновода с поперечным сечением $a \times b$ симметрично соединены. Электромагнитная волна подводится через один или два из этих прямоугольных волноводов. Часть подводимой электромагнитной волны отражается от входа камеры назад, а другая часть, образуя в ней сложную конфигурацию электрического и магнитного полей, распределяется по остальным волноводам и уносится через них с камеры. Узкие стенки волноводов расположены перпендикулярно к плоскости рисунка и их ширина равна b , как и размер камеры по данному направлению.

Задача рассматривается в прямоугольной декартовой системе координат. Ось Oy направлена перпендикулярно к плоскости рисунка «к нам».

Предполагается, что размеры прямоугольных волноводов подобраны таким образом, что по ним может распространяться только волна основного типа H_{10} с компонентами:

$$E = p; E = E; \Psi - e^{i\omega t} \quad H = \{H_x; 0; H_z\} - e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где i - мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота электромагнитного поля.

Напряженность электрического поля в этой волне направлена перпендикулярно к широким стенкам волноводов и постоянна по данному направлению, т.е. вдоль оси Oy . Поэтому пренебрегаем изменениями характеристик электрического и магнитного полей по данному направлению:

$$\frac{\partial}{\partial x} E = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} H = 0, \quad \frac{\partial}{\partial y} H = 0. \quad (2)$$

Считается, в волноводной камере, как и в прямоугольных волноводах, отсутствуют какие-либо проводящие среды (плазма или металлические стержни, отражатели и т.п.):

$$\epsilon = 1, \quad p = 0, \quad \gamma = 0, \quad (3)$$

P - объемный заряд, γ - электропроводность среды.

Считаются заданными поперечные размеры прямоугольных волноводов a и b , форма и размеры рабочей камеры, а также частота и мощность подводимой электромагнитной волны.

Требуется определить пространственное распределение характеристик электрического и магнитного полей в волноводной камере, коэффициент отражения подводимой электромагнитной волны от входа камеры, распределение мощностей по различным волноводам в зависимости от конфигурации и размеров волноводной камеры.

Используется система уравнений Максвелла:

$$\operatorname{div} D = p, \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} H = j - \dot{D} \quad (5)$$

,

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (6)$$

$$\operatorname{rot} E = -\dot{B} \quad (7)$$

$$\text{совместно с материальными уравнениями:} \quad (8)$$

$$D = \epsilon \epsilon_0 \dot{E}, \quad B = \mu \mu_0 H, \quad j = \sigma \dot{E}.$$

Подставляя (3.5) в (3.1-3.4) и учитывая (2.3), получим

$$\operatorname{div} E = 0, \quad (9)$$

$$\operatorname{rot} E = -1/\mu_0 \sigma H, \quad (10)$$

$$\operatorname{div} H = 0, \quad (11)$$

$$\operatorname{rot} H = iJ_0 \sigma E \quad (12)$$

Применим оператор rot к обеим частям уравнения (10):

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} E = -ijU_0 \sigma \operatorname{rot} H$$

и с учетом (12), получим

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} E = \epsilon_n \mu_n \sigma \operatorname{rot} E = \frac{\epsilon_n \mu_n \sigma}{c^2} E, \quad (13)$$

где $C = \frac{1}{V} \text{Оп}$ - скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Используем известную в векторном анализе формулу $\text{rot rot } E = \text{grad div } E - \Delta E$. (14)

Тогда, с учетом (9) из (13), получим волновое уравнение для вектора E - $\Delta E - \epsilon \mu \omega^2 E = 0$

$\Delta E - \epsilon \mu \omega^2 E = 0$, (15)

С Аналогичным способом можно получить волновое уравнение и для вектора напряженности магнитного поля:

$\Delta H - \epsilon \mu \omega^2 H = 0$, (16)

С Таким образом, для расчета характеристик электрического и магнитного полей численно решается волновое уравнение (15)

$$\Delta E - \epsilon \mu \omega^2 E = 0$$

в прямоугольной расчетной области

$-L_z < z < L_z, \quad 0 < x < L_x$.

Компоненты индукции магнитного поля вычисляются через E по формулам (2.15):

„ $H_x = -\partial E_z / \partial y$, $H_y = \partial E_z / \partial x$

Граничные условия ставятся по всему контуру расчетной области:

$z = -L_z, 0 < x < L_x$:

$E = [E_j \exp(-ik_{\pm}z) - E_R \exp(ik_{\pm}z)] \cos(\pi x / a)$;

(волна представляет собой суперпозицию падающей и отраженной Нью-волн)

$z = +L_z, 0 < x < L_x/2: E = E_{m3} \exp(-ik_{\pm}z) \cos(\pi x / a)$; $-L_z < z$

$< L_z, x = L_x: E = E_{T2} \exp(-ik_{\pm}z) \cos(\pi x / a)$;

$-L_z < z < L_z, x = 0: E = 0$ (условие симметрии);

На стенках волноводов и камеры ставятся условия идеальных проводящих стенок: $E = 0$.

Здесь E_j, E_R - амплитуды падающей и отраженной волн, распространяющихся по волноводу 1; E_{T2}, E_{T4} - амплитуды волн, уносящихся с рабочей камеры волноводами 2 и 4;

$\kappa^{\wedge}_{-} = OC = \kappa \cdot d / l^{-1}$ (Я / Л) - поперечное волновое число.

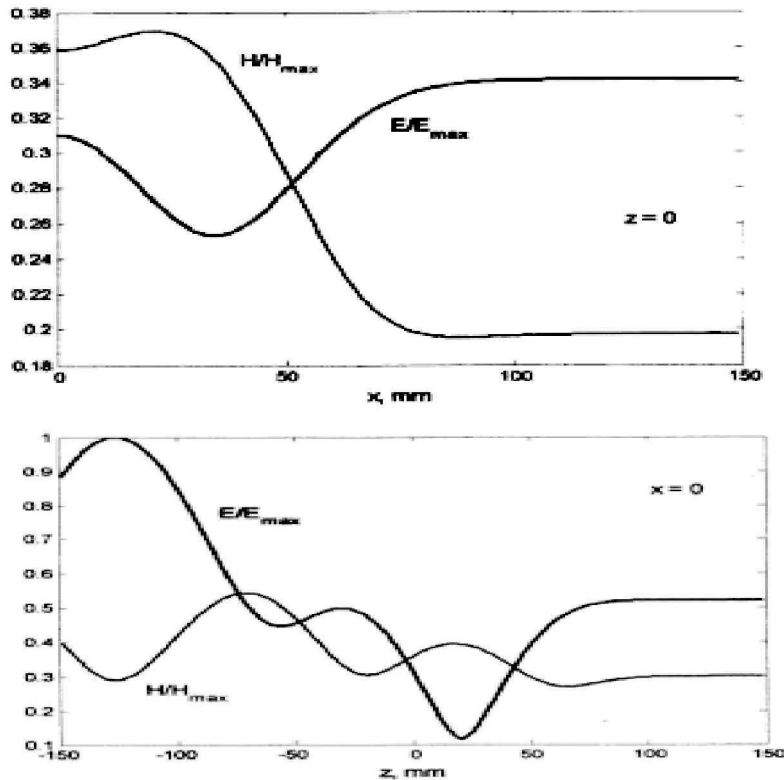


Рис.2. Распределение напряженностей электрического и магнитного полей вдоль осей x и z при ромбической камере: $L_{camera} = 154$ мм, $E_{таx} = 15$ кВ/м, $H_{таx} = 34.44$ А/м. *Литература*

- 1 Балтин Л. М, Батенин В. М, Гольдберг В.Р. Спектроскопические исследования СВЧ разряда в аргоне // ТВТ . 1971. т. 6 - с438.
- 2 Блинов Л. М, Володько В. В., Гонтарев Г. Г. СВЧ - плазматроны, их характеристика и область применения // Генераторы низкотемпературной плазмы. - М: Энергия, 1969, -с. 345 -356.
- 3 Beust W., Ford W. L. // Microwave J. - 1961, Vol. 4, № 10 p. 91 - 95.
- 4 Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. т. 2, М: - Госэнергоиздат. 1961. -512с.
- 5 Райзер Ю. П. Физика газового разряда - М: Наука, 1987 - 592с.