

УДК 621.372.826

ПЛЕНОЧНЫЙ ГАЗОВО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД

Ю. Н. Казанцев, О. А. Харлашкин

Рассматривается газово-диэлектрический волновод круглого сечения, толщина стенки которого много меньше длины волны. Получены аналитические выражения для компонент поля, затухания рабочей моды, определены величины допусков на точность изготовления волновода. Показано, что в рассматриваемом волноводе малые затухания могут быть достигнуты на низшей моде HE_{11} в одномодовом режиме, причем допуски на точность изготовления оказываются менее жесткими, чем в случае многомодовых металлических волноводов.

Известен ряд важных научных и технических проблем, для решения которых необходимы линии передачи СВЧ с малыми потерями [1, 2]. Наиболее известные способы создания таких линий связаны с применением полых металлических волноводов с большими (по сравнению с длиной волны λ) размерами поперечного сечения. В металлическом волноводе большого сечения, помимо рабочей моды, могут распространяться также нежелательные, наличие которых ухудшает характеристики линии передачи (увеличение потерь, искажение структуры поля, искажение передаваемых сигналов и т. п.). В [3-5] были описаны полые диэлектрические волноводы большого сечения, характеризующиеся малым затуханием рабочей моды и повышенным затуханием нежелательных. В настоящей работе рассматривается пленочный газово-диэлектрический волновод (ПГДВ), который представляет собой столб газа с повышенной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , отделенный от внешней среды с ϵ_3 ($\epsilon_1 > \epsilon_3$) газонепроницаемой пленкой с ϵ_2 (рис. 1). В таком волноводе малые потери могут быть достигнуты в одномодовом режиме работы на низшей моде HE_{11} .

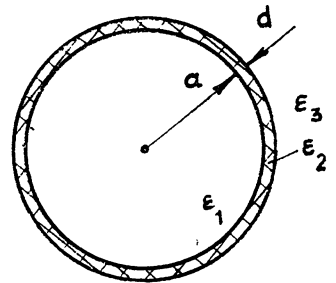


Рис. 1. Поперечное сечение пленочного газово-диэлектрического волновода.

1. Собственные моды пленочного газово-диэлектрического волновода. Газово-диэлектрический волновод, толщина стенки которого сравнима с длиной волны, подробно исследован в работах [3, 4]. В рассматриваемом здесь ПГДВ толщина стенки d мала по сравнению с длиной волны, точнее

$$kd \sqrt{\epsilon_2} \ll 1, \tag{1}$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Кроме (1), для ПГДВ всегда выполняется условие

$$\left| \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} - 1 \right| \ll 1. \tag{2}$$

Поля собственных мод такого волновода выражаются через электрический $\Pi^{(e)}$ и магнитный $\Pi^{(m)}$ векторы Герца [6]:

$$\Pi^{(e)} = z \chi(r, \varphi) e^{-jhz}, \quad \Pi^{(m)} = z \psi(r, \varphi) e^{-jhz}, \quad (3)$$

где h — постоянная распространения, χ и ψ — скалярные потенциальные функции, удовлетворяющие волновому уравнению с полярной системе координат (r, φ, z) , z — единичный вектор в положительном направлении оси z .

Для рабочей моды HE_{11} компоненты поля имеют вид: во внутренней полости ($r \leq a$)

$$\begin{aligned} E_r = H_\varphi &= j \frac{k\alpha}{a} AJ_0 \left(\alpha \frac{r}{a} \right) \sin(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ E_\varphi = -H_r &= j \frac{k\alpha}{a} AJ_0 \left(\alpha \frac{r}{a} \right) \cos(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ E_z &= - \left(\frac{\alpha}{a} \right)^2 AJ_1 \left(\alpha \frac{r}{a} \right) \sin(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ H_z &= \left(\frac{\alpha}{a} \right)^2 AJ_1 \left(\alpha \frac{r}{a} \right) \cos(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}; \end{aligned}$$

в диэлектрической пленке ($a \leq r \leq a + d$)

$$\begin{aligned} E_r = \frac{H_\varphi}{\varepsilon_2} &= j \frac{k\alpha}{a \varepsilon_2} AJ_0(\alpha) \sin(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ E_\varphi = -H_r &= j \frac{k\alpha}{a} AJ_0(\alpha) \cos(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ E_z &= - \left(\frac{\alpha}{a} \right)^2 AJ_1(\alpha) \sin(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ H_z &= \left(\frac{\alpha}{a} \right)^2 AJ_1(\alpha) \cos(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}; \end{aligned} \quad (4)$$

во внешней области ($r \geq a + d$)

$$\begin{aligned} E_r = H_\varphi &= j \frac{k\alpha}{a} AJ_0(\alpha) \frac{K_0(xr/a)}{K_0(x)} \sin(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ E_\varphi = -H_r &= j \frac{k\alpha}{a} J_0(\alpha) \frac{K_0(xr/a)}{K_0(x)} \cos(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ E_z &= - \left(\frac{\alpha}{a} \right)^2 AJ_1(\alpha) \frac{K_1(xr/a)}{K_1(x)} \sin(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \\ H_z &= \left(\frac{\alpha}{a} \right)^2 AJ_1(\alpha) \frac{K_1(xr/a)}{K_1(x)} \cos(\varphi + \varphi_0) e^{-jhz}, \end{aligned}$$

где a — радиус внутреннего канала, $J_n(x)$ и $K_n(x)$ — функции Бесселя и Макдональда, α и x — относительные поперечные волновые числа внутри и вне волновода соответственно, связанные соотношениями

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= (ka)^2 \varepsilon_1 - (ha)^2, \\ \alpha^2 + x^2 &= (ka)^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \end{aligned} \quad (5)$$

и удовлетворяющие дисперсионному уравнению, которое при выполнении условий (1) и (2) сводится к дисперсионному уравнению для диэлектрического цилиндра с малой диэлектрической проницаемостью [8].

Поскольку поле рабочей моды HE_{11} вне диэлектрической трубы экспоненциально убывает, удобно также, как и в работе [7], ввести понятие эффективного радиуса $a_{эфф}$ ПГДВ как радиуса окружности с центром в начале координат, за пределами которого переносится некоторая достаточно малая доля Δ общей мощности P_1 моды HE_{11} . Знание $a_{эфф}$ позволяет, например, оценить расстояние, на котором можно размещать защитный экран.

Уравнение, определяющее $a_{эфф}$, записывается как

$$P_2/P_1 = \Delta, \quad (6)$$

где P_2 — мощность, переносимая вне окружности радиуса $a_{эфф}$, причем

$$P_i = \frac{c}{8\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{a_i}^{\infty} \operatorname{Re} [EH^*]_z r dr \quad (i = 1, 2), \quad (7)$$

c — скорость света, $a_1 = 0$, $a_2 = a_{эфф}$.

После подстановки в (7) выражений для компонент поля моды HE_{11} (4) получим из (6) уравнение для нахождения $a_{эфф}$:

$$\zeta^2 [K_1^2(\zeta) - K_0^2(\zeta)] = \Delta \left[\frac{\kappa}{\alpha} K_1(\kappa) ka \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right]^2, \quad (8)$$

где $\zeta = \kappa a_{эфф}/a$.

Зависимости $a_{эфф}/a$ от параметра $ka \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_3}$, полученные при численном решении уравнения (8) для трех значений величины Δ , приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что при малых значениях пара-

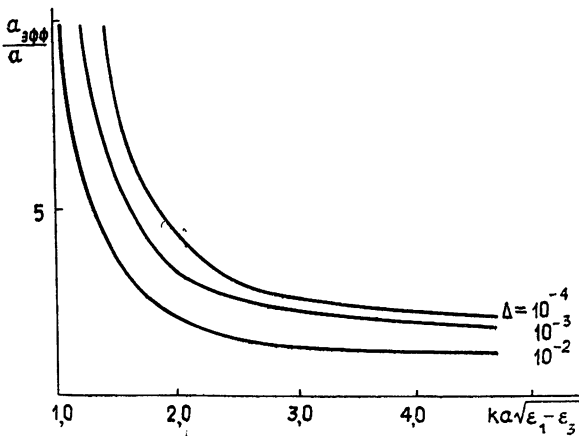


Рис. 2.

метра $ka \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_3}$ отношение $a_{эфф}/a$ велико, но с ростом этого параметра оно стремится к единице.

На рис. 2а приведены зависимости $a_{эфф}$ от a , построенные для нескольких значений λ и $|\epsilon_1 - \epsilon_3|$ при $\Delta = 10^{-2}$. На приведенных кривых наблюдаются минимумы, существование которых отмечалось в [7].

2. *Затухание рабочей моды и максимальная передаваемая мощность.* Затухание h'' рабочей моды HE_{11} , вычисленное по известной фор-

муле $h'' = P_T/2P_1$ (P_T — мощность тепловых потерь в заполняющем газе и материале стенки) с использованием выражений (4) для компонент поля, равно

$$h'' = h''_{\varepsilon_1} + h''_{\varepsilon_2} \frac{d}{a} \left[\frac{J_0(\alpha)}{J_1(\alpha)} \right]^2 \frac{\alpha^2 (\varepsilon_2 + 1)}{(ka)^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (9)$$

где h''_{ε_1} и h''_{ε_2} — затухание плоских волн в заполняющем газе и материале стенки соответственно, причем

$$h''_{\varepsilon_i} = \frac{k \sqrt{\varepsilon_i}}{2} \operatorname{tg} \delta_i, \quad i = 1, 2. \quad (10)$$

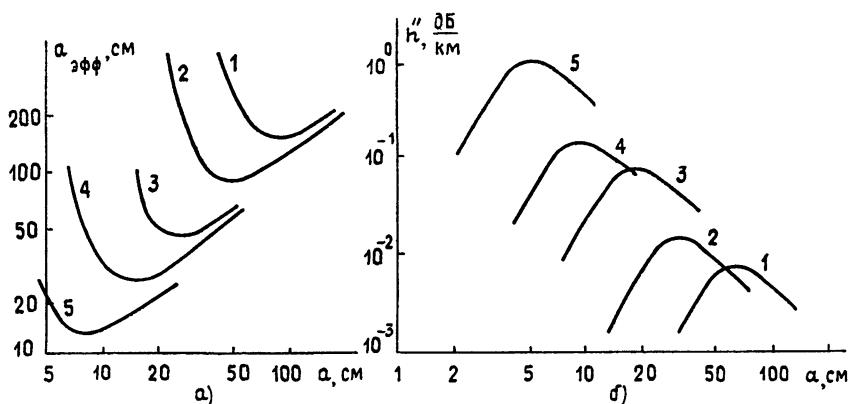


Рис. 3. Зависимость эффективных радиусов (а) и затуханий (б) от радиуса волновода (кривые 1 — $\lambda = 10$ см, $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0015$, кривые 2 — $\lambda = 10$ см, $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0058$, кривые 3 — $\lambda = 3$ см, $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0015$, кривые 4 — $\lambda = 3$ см, $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0058$, кривые 5 — $\lambda = 0,8$ см, $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0015$).

В табл. 1 указаны некоторые газы с повышенной диэлектрической проницаемостью, которые можно рекомендовать для заполнения внутренней полости в тех или иных диапазонах волн. Проведенные оценки показывают, что для всех этих газов потери (первое слагаемое в формуле (9)) не превышают $5 \cdot 10^{-4}$ дБ/км при $\lambda \geq 3$ см (при нормальном давлении).

Таблица 1

№	Газ	Диэлектрическая проницаемость
1	Азот, N_2	1,00058
2	Углекислый газ, CO_2	1,00095
3	Ксенон, Xe_2	1,00124
4	Элегаз, SF_6	1,00205
5	Оксид углерода, CO	1,00634

На рис. 3б построены графики затухания рабочей моды HE_{11} , обусловленного потерями в диэлектрической пленке (второе слагаемое в формуле (9)), для случаев заполнения внутренней полости элегазом ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0015$) и окисью углерода ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0,0058$) при $\varepsilon_2 \doteq 2,3$, $\operatorname{tg} \delta_2 = 2 \cdot 10^{-4}$. Эти кривые имеют характерный вид. С ростом a потери растут, достигая максимума при a_{\max} , затем начинают убывать. Подобный ход кривой объясняется следующим. При малых a мощность, в основном, переносится вне волновода ($a_{\text{эфф}} \gg a$), и, несмотря на то, что величина поля в диэлектрической стенке близка к максимальной,

оно (при нормированной переносимой мощности) мало по абсолютной величине (в выражениях для компонент полей (4) $\alpha \rightarrow 0$ при $a \rightarrow 0$). При увеличении a поле начинает концентрироваться вблизи волновода, что приводит к увеличению его в стенке. При дальнейшем увеличении a поле локализуется во внутренней полости и убывает в стенке.

Кривые, приведенные на рис. 3а и б, позволяют выбрать радиус волновода, исходя из требований к величине затухания и размерам области, занимаемой полем. Заметим, что радиус области, занимаемой полем, минимален, когда затухание рабочей моды близко к максимальному. Однако даже это максимальное затухание достаточно мало. Так, на длине волны $\lambda = 3$ см при использовании элегаза радиус волновода, при котором $a_{эфф}$ минимально, составляет около 25 см, а соответствующее затухание 0,1 дБ/км.

Максимальная передаваемая мощность ограничивается опасностью электрического пробоя, т. е. возникновением разряда в области с максимальной напряженностью электрического поля $|E|_{max}$ и опасностью теплового пробоя. Первое явление ограничивает уровень импульсной, второе — средней мощностей.

Оценки, аналогичные приведенным в [7], показывают, что для ПГДВ оба этих уровня достаточно велики. Так в ПГДВ радиуса 25 см, заполненного элегазом ($E_{проб} = 90$ кВ/см), на длине волны $\lambda = 3$ см электрический пробой происходит при передаваемой мощности около 20 ГВт.

3. Влияние случайных нерегулярностей ПГДВ на затухание рабочей моды HE_{11} . Деформация пленочного газово-диэлектрического волновода и искривление его оси приводит к дополнительным потерям мощности рабочей моды. Эти потери обусловлены излучением во внешнее пространство и преобразованием рабочей моды в паразитные (если режим не одномодовый). Такое влияние различных нерегулярностей круглого ПГДВ можно оценить, изучая модельную задачу — нерегулярный плоский газово-диэлектрический волновод. В работе [8] показано, что увеличение затухания $\Delta h''$ рабочей моды, обусловленное ее преобразованием в паразитную моду (или моду излучения) с постоянной распространения h_u на малой случайной деформации стенки плоского волновода, зависит от величины $\langle |F|^2 \rangle$ — усредненного по ансамблю коэффициента Фурье нерегулярности

$$\langle |F|^2 \rangle = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{\infty} R(u) \exp[-j(h - h_u)u] du, \quad (11)$$

где $R(u)$ — корреляционная функция стационарного процесса, и $R(u) = \langle f(z)f(z-u) \rangle$, $f(z)$ — малое отклонение положения стенки от регулярного.

Для оценки $\Delta h''$ можно выбрать $R(u)$ простейшего вида:

$$R(u) = D^2 \exp\{-|u|/B\}, \quad (12)$$

где D — среднеквадратичное отклонение $f(z)$, B — интервал корреляции, определяющий скорость уменьшения $R(u)$.

Заметим, что зависимость нормированных потерь $\left(\Delta h'' \frac{a^3}{D^2}\right)$ от интервала корреляции, безусловно, определяется видом функции корреляции. Однако, как показано в работе [8], величина максимума нормированных потерь и его положение для реальных функций корреляции практически не зависят от их вида, что и позволяет оценить величину максимальных дополнительных потерь.

Для одномодового плоского ПГДВ эта величина максимальна при

$$\frac{B_1}{a} = \frac{B_2}{a} = \frac{2ka [1 + (1/3)(x/ka)^2]}{\sqrt{3}x^2} \quad (13)$$

и равна

$$\Delta h'' = \frac{(aka \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_3})^2 [1 + (1/8)(x/ka)^2]}{16 \sqrt{2} ka (x + 1) a} \times \left[\left(\frac{D_1}{a} \right)^2 + \left(\frac{D_2}{a} \right)^2 \left(\frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где B_1 и D_1 — интервал корреляции и среднеквадратичное отклонение положения стенки от регулярного, а B_2 и D_2 — интервал корреляции и среднеквадратичное отклонение толщины стенки от регулярной.

Формулы (14) позволяют получить величины допусков на точность изготовления ПГДВ, причем эти допуски не оказываются чрезмерно жесткими.

При перенесении результатов расчета плоской модели на случай круглого волновода рассматривают волноводы с одинаковыми замедлениями [7, 8], считая при этом, что поперечные размеры a и частоты совпадают.

Заметим, величины допусков на точность изготовления круглого металлического волновода с волной H_{01} , используемого в настоящее время в качестве линии передачи с малыми потерями [2], при равной величине затухания рабочей моды на порядок меньше, чем в ПГДВ.

Таким образом, в рассмотренном волноводе малые затухания могут быть достигнуты на низшей моде HE_{11} в одномодовом режиме. Расчеты показывают, что допуски на точность выполнения внутреннего канала ПГДВ оказываются менее жесткими, чем в случае многомодовых металлических волноводов.

Авторы выражают признательность М. Г. Семенову и Л. И. Пангону за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ энергетика. /Под ред. Э. Окреса — М.: Мир, 1971. Т. 1.
2. Волноводы дальней связи. /Под ред Н. П. Керженцевой. — М.: Связь, 1972.
3. Казанцев Ю. Н. — Радиотехника и электроника, 1968, 13, № 7, с. 1227.
4. Казанцев Ю. Н. — Радиотехника и электроника, 1969, 144, № 7, с. 1165.
5. Мелехин В. Н., Маненков А. Б. — В сб: Электроника больших мощностей. — М.: Наука, 1969, с. 161.
6. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. — М.: Наука, 1966.
7. Взятыйшев В. Ф. Диэлектрические волноводы. — М.: Сов. радио, 1970
8. Маркузе Д. Оптические волноводы. — М.: Мир, 1974

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
25 марта 1980 г..

A FILM GAS-DIELECTRIC WAVEGUIDE

Yu. N. Kazantsev, O. A. Kharlashkin

A gas-dielectric waveguide of a circular section is considered the wall depth of which is much smaller than the wavelength. Analytical expression for the field components and damping of the operating mode have been derived, tolerance values for the accuracy of the waveguide manufacturing are defined. It is shown that in the waveguide considered small dampings may be achieved at the lowest mode HE_{11} in one-mode regime, tolerances for the manufacturing accuracy being less strict than in the case of multi-mode metallic waveguides.