

С.А. БОРТНИК, В.М. ВОЛКОВ

ПОЛЯ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ТОНКОСТЕННОЙ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ

При разработке и создании коаксиальных измерительных преобразователей проходящей мощности большого уровня на основе поглощающей стенки (ПС) возникает задача уменьшения частотной зависимости их коэффициента преобразования в рабочем диапазоне частот коаксиальной линии. Использование двухслойной поглощающей стенки, предложенной в [1] в качестве широкополосного частотонезависимого датчика проходящей мощности, представляется затруднительным из-за незначительного различия электродинамических характеристик металлов, составляющих ПС, и сильного теплового влияния первого слоя ПС на второй.

Вместо этого предлагается использовать ПС толщиной меньше глубины скин-слоя; тогда мощность, проникающая через тонкую стенку, будет незначительной по сравнению с мощностью, распространяющейся в линии. Причина такого явления – большой коэффициент отражения энергии СВЧ на границе раздела металл–воздух. Согласно формуле Хагена-Рубенса [2] от границы раздела константан – воздух на частоте 1000 МГц отражается 0,9995 энергии нормально падающей плоской волны, а на частоте 100 МГц доля отраженной энергии увеличивается до 0,9999.

Геометрия задачи сходна с той, что использовалась при рассмотрении электромагнитных полей в обычной коаксиальной линии [1], однако отличается тем, что толщину внешней стенки коаксиальной линии нельзя считать бесконечной, поскольку она меньше глубины скин-слоя. Кроме того, в рассмотрение входит воздушная среда, окружающая внешнюю стенку линии. При этом в решении волнового уравнения для полей в стенке коаксиальной линии ни одна из модифицированных функций Бесселя не стремится к бесконечности в силу указанных выше причин. Решение волнового уравнения для воздушной среды, окружающей линию, удобно представить в виде комбинации функций Ханкеля первого и второго рода. При этом считаем, что воздушная среда распространяется до бесконечности. Выражения для магнитной ($E_{z_{cm}}$) и электрической ($H_{\varphi_{cm}}$) составляющих поля в тонком внешнем проводнике коаксиальной линии и аналогичных составляющих (E_{z_e}, H_{z_e}) в окружающей его воздушной среде имеют вид

$$\begin{aligned}
 E_{z_{cm}} &= -\frac{I\sqrt{i} \cdot q}{2\pi\sigma\sqrt{br}} \cdot \frac{F_e(r) + F_r(r)}{F}; \\
 H_{\varphi_{cm}} &= \frac{I}{2\pi\sqrt{br}} \cdot \frac{F_e(r) - F_r(r)}{F}; \\
 E_{z_e} &= -\frac{I\sqrt{i} \cdot q}{\pi\sigma\sqrt{bc}} \cdot \frac{H_0^{(2)}(\beta r)}{F}; \\
 H_{\varphi_e} &= \frac{I}{\pi\sqrt{bc}} \cdot \frac{\beta}{\sqrt{i} \cdot q} \cdot \frac{H_1^{(2)}(\beta r)}{F}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь I – сила тока, протекающего по внутреннему проводнику коаксиальной линии; σ – удельная проводимость проводника; r – радиус; b , c – внутренний и внешний радиусы внешнего проводника; $H_0^{(2)}$, $H_1^{(2)}$ – функции Ханкеля второго рода нулевого и первого порядков; $q = \sqrt{\omega\mu_0\sigma}$, где ω – циклическая частота; μ_0 – магнитная проницаемость свободного пространства; β – волновое число;

$$\begin{aligned}
 F_e(r) &= \left[H_0^{(2)}(\beta c) + \frac{\beta}{\sqrt{i}q} H_1^{(2)}(\beta c) \right] e^{\sqrt{i}q(c-r)}; \\
 F_r(r) &= \left[H_0^{(2)}(\beta c) - \frac{\beta}{\sqrt{i}q} H_1^{(2)}(\beta c) \right] e^{-\sqrt{i}q(c-r)}; \\
 F &= F_e(b) - F_r(b).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Из выражений (1) и (2) видно, что в стенке линии существуют падающая и отраженная от внешней границы волны, убывающие по экспоненциальному закону. Во внешнем пространстве существует только падающая переизлученная волна, убывающая по закону, близкому к $1/r$.

Рассмотрим рассчитанные по формулам (1) и (2) распределения электрического (рис. 1, а) и магнитного (рис. 1, б) полей в константной поглощающей стенке, являющейся внешним проводником коаксиальной линии сечением 16/4,6 мм, при ее различных толщинах δ . Для расчета брались $I = 1$ А, $f = 500$ МГц. Амплитуды составляющих электромагнитного поля при $r = b$ приняты за единицу, и от этой точки отсчитывается координата x .

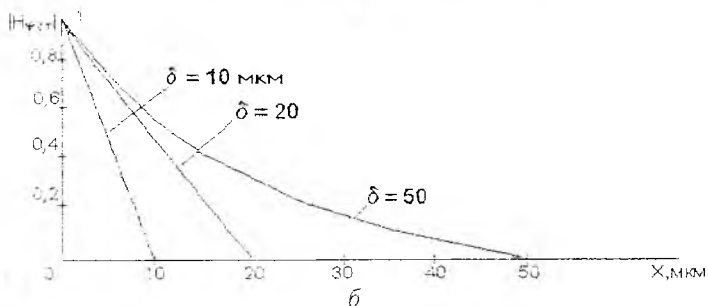
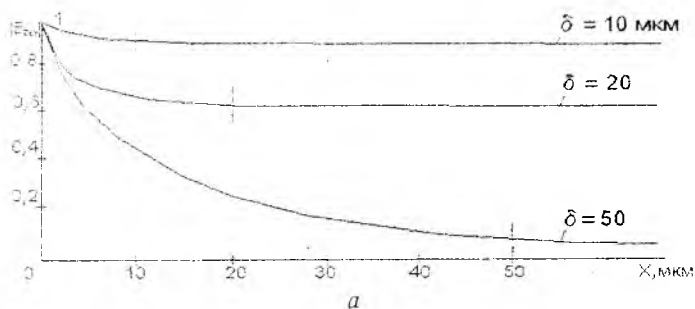


Рис. 1

Из рис. 1, б понятно, что вектор Умова–Пойнтинга, пропорциональный произведению электрической и магнитной составляющих поля, на границе раздела сред скачком уменьшается практически до нуля, что объясняется большим коэффициентом отражения волны от границы раздела металл–воздух. Таким образом, через внешнюю стенку коаксиальной линии, даже если ее толщина меньше глубины скин-слоя, проходит незначительная часть энергии.

На рис. 2 показана зависимость интенсивности (вектора Умова–Пойнтинга) S_e волны, прошедшей через металлическую стенку, от толщины последней на трех частотах диапазона. По оси ординат отложено отношение этой величины к мощности P , передаваемой по линии, что позволяет оценить интенсивность электромагнитного излучения (коэффициент пропускания) в непосредственной близости от тонкой стенки коаксиальной линии. Например, при мощности в линии 10 кВт на частоте 500 МГц через стенку толщиной 10 мкм и площадью 10 см² проникнет 800 мкВт, или плотность потока мощности в непосредственной близости от стенки составит 80 мкВт/см².

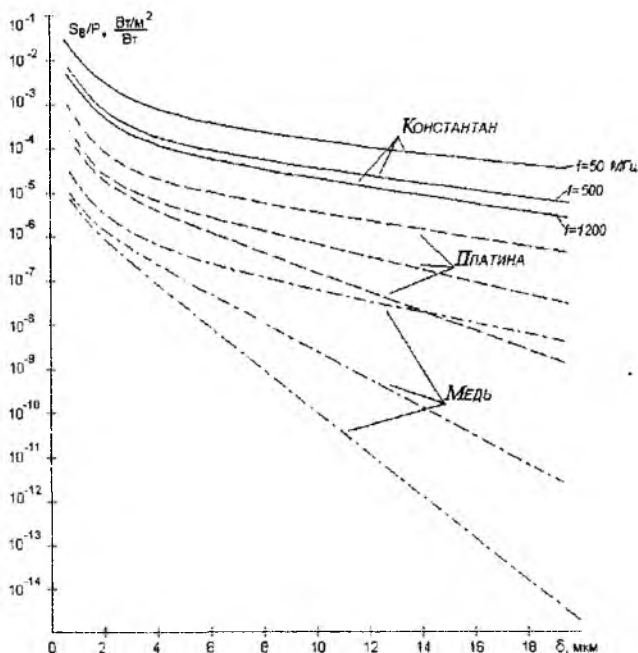
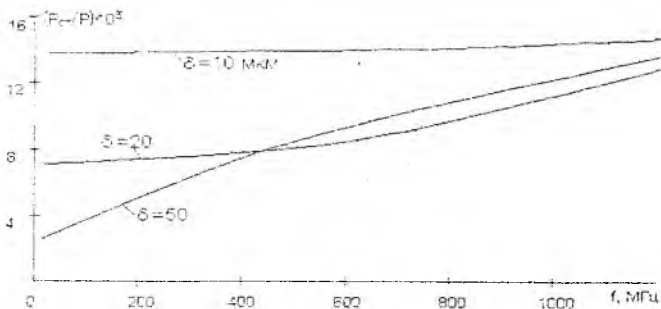


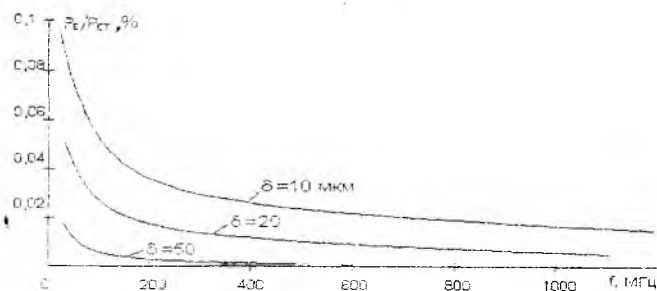
Рис. 2

На рис. 3, а показана частотная зависимость отношения мощности, поглощенной в константановой стенке, к мощности, передаваемой по линии (P_{cm}/P), при различных толщинах стенки δ ; размер линии тот же — 16/4,6 мм. Видно, что по мере уменьшения толщины стенки частотная зависимость ослабевает. Так, при $\delta = 10$ мкм изменение P_{cm}/P в диапазоне 50...1200 МГц не превышает 8 %.

На рис. 3, б показана частотная зависимость отношения мощности, прошедшей сквозь стенку, к поглотившейся в ней (P_b / P_{cm}). Видно, что эта величина составляет сотые доли процента. Такая мощность не может сильно исказить результаты измерения температуры стенки. При расчете теплового режима ПС мощностью, проникшей через стенку, можно пренебречь. Для большей защиты термопары от прошедшей через стенку мощности можно использовать дополнительный слой металла толщиной, не превышающей глубины скин-слоя, и термопару расположить на внешней стороне второго слоя. Необходимо только обеспечить достаточный тепловой контакт между слоями.



а



б

Рис. 3

Полученные результаты являются весьма важными для создания широкополосных, частотонезависимых коаксиальных измерительных преобразователей проходящей мощности большого уровня на основе поглощающей стенки. Доказана возможность использования очень тонких ПС без опасности прохождения значительной мощности в окружающую среду.

Список литературы: 1. Волков В.М., Бортник С.А. Затухание в коаксиальной двухслойной поглощающей стенке // Радиотехника. 1997. Вып. 104. С. 21–27. 2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с нем. М.: Наука, 1970. 855 с. 3. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 544 с.

Харьковский государственный технический
университет радиэлектроники

Поступила в редакцию 14.09.97