

**Е.Л. Тихова, В.И. Кондратенко, А.А. Кондратенко**

**УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь**

### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

В работе рассмотрено прохождение и отражение электромагнитной волны при наличии в волноводе слоисто-неоднородной структуры. Получены выражения для матрицы передачи структурного элемента, а также итерационные формулы, описывающие эффективные коэффициенты передачи и отражения при произвольном числе элементов.

Интенсивное развитие технологий, связанных с формированием тонкопленочных слоистых структур, в том числе – наноразмерных, ставит задачу определения их интегральных характеристик еще на стадии проектирования. При этом существенный интерес представляет задача определения параметров образующихся структур – диэлектрической проницаемости, проводимости и удельного ослабления. Конечность числа дискретных элементов структуры предполагает также определение ее интегрального пропускания и отражения. В СВЧ – диапазоне длин волн решение данных задач сводится к определению комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи четырехполюсника, который представляет собой тестируемый образец, помещенный в волновод измерительной системы. При большом затухании, что отвечает достаточно толстому образцу (модуль коэффициента передачи  $\theta \sim 0,9 \div 0,95$ ), характер ослабления в целом соответствует закону Бугера, и процессами переотражений внутри образца можно пренебречь. При достаточно малом ослаблении в отдельном дискрете характер взаимодействия слоистой структуры с электромагнитной волной существенно зависит не только от суммарной толщины образца, но и от числа используемых элементов. Это не позволяет определить удельное поглощение материала путем линеаризации получаемой кривой в

логарифмическом масштабе. На рисунке 1 представлена экспериментально зарегистрированная зависимость затухания полистирола (образец в виде пластинки толщиной 0,7 мм) от количества пластинок на частотах 8000 МГц, 8800 МГц и 9500 МГц. Из графиков видно, что характер зависимости ослабления от суммарной толщины образца в логарифмическом масштабе имеет выраженный нелинейный характер, причем удельное ослабление тонкого образца существенно ниже, чем удельное ослабление толстого образца.

В оптическом диапазоне длин волн широкое распространение получили устройства, работа которых базируется на применении интерференционных явлений в тонкослойных структурах – так называемые полу- и четвертьволновые пластинки, просветляющие покрытия, толщина которых сопоставима с длиной волны света. Особенностью радиодиапазона является то обстоятельство, что в нем реализуется возможность создания элементов, толщина которых может быть значительно менее длины волны в волноводе. Обеспечение данного условия может быть обеспечено как выбором толщины элемента, исходя из частоты зондирующего излучения, так и выбором параметра сечения волновода близким к критическому.

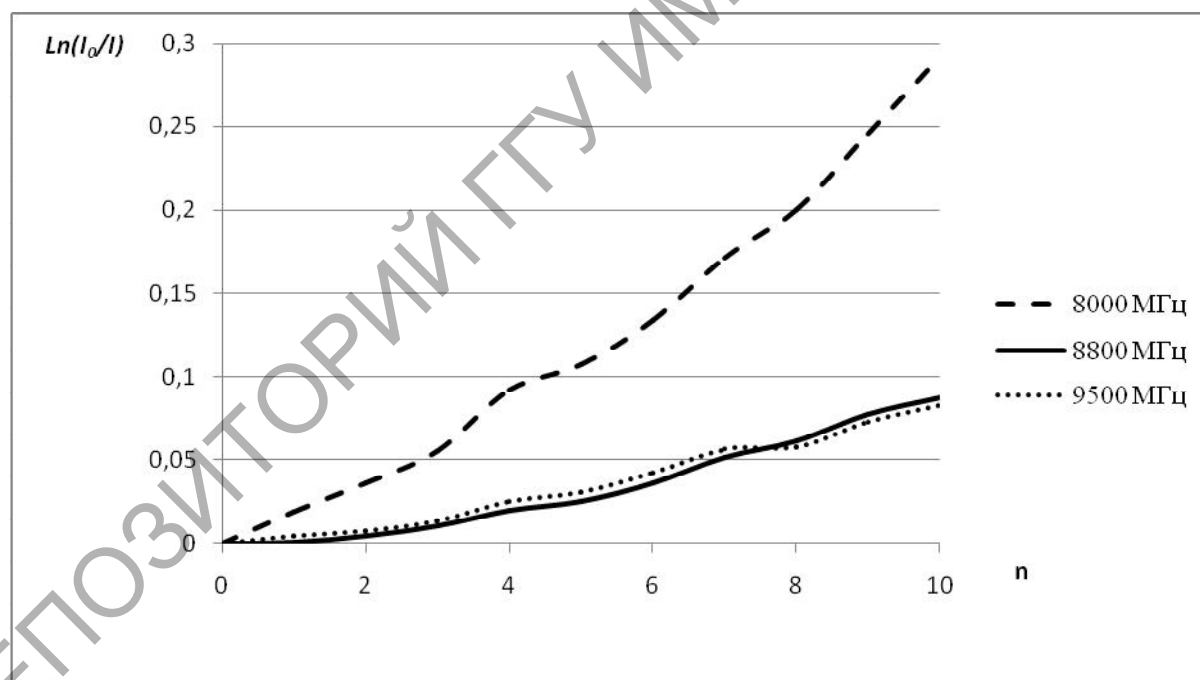


Рисунок 1 – Зависимость поглощения излучения от числа поглощающих элементов

При квазинормальном падении электромагнитной волны на границу раздела изотропных сред происходит сдвиг фазы отраженной от оптически более плотной среды волны (потеря полуволны). В этом случае волна, отраженная от внутренней границы плоского элемента

оказывается в целом в противофазе с волной, отраженной от внешней границы. Сдвиг фазы определяется соотношением между диэлектрической проницаемостью среды, длиной волны и толщиной образца. При малой толщине для отдельного элемента он практически несущественен, что приводит к заметному снижению эффективного коэффициента отражения и, как следствие, к увеличению коэффициента передачи. При увеличении числа слоев картина миграции энергии за счет множественных переотражений усложняется. Рассмотрим процесс миграции энергии в отдельном элементе с учетом отражения электромагнитной волны от границ раздела материал-воздух и воздух-материал. Обозначим коэффициент отражения от внешней границы  $\Gamma_1$ , а коэффициент отражения от внутренней границы раздела  $\Gamma_2$ . Поскольку элемент заведомо считается тонкопленочным, то фазовый набег при переотражении пренебрежимо мал, и коэффициент передачи можно считать действительным. На рисунке 2 представлена схема прохождения волны через плоско-параллельный элемент с учетом переотражения от обеих границ раздела.

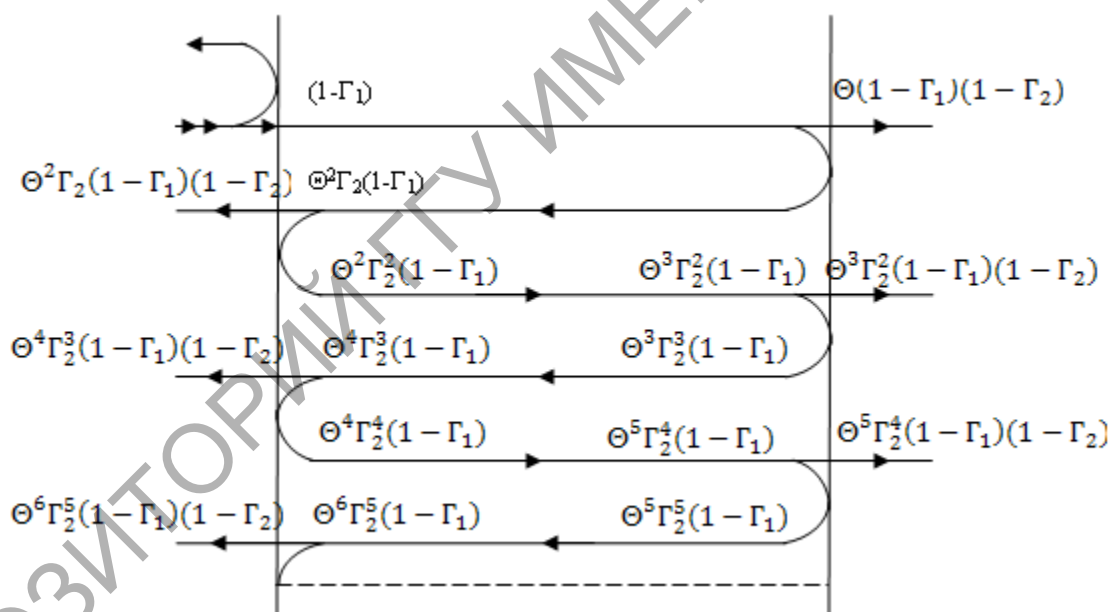


Рисунок 2 – Схема передачи электромагнитной волны через плоско-параллельную структуру

Для описания процесса прохождения волны через элемент в целом можно ввести понятия эффективного коэффициента передачи и эффективного коэффициента отражения, произведя суммирование всех волн, испытавших переотражения. Тогда для коэффициента отражения можно записать бесконечную сумму

$$\Gamma_{эф} = -\Gamma_1 + \Theta^2 \Gamma_2 (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) + \Theta^4 \Gamma_2^2 (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) + \Theta^6 \Gamma_2^3 (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) + \dots$$

которая после элементарных преобразований представима в виде

$$\Gamma_{эф} = -\Gamma_1 + \frac{\Theta^2 \Gamma_2 (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)}{1 - (\Theta \Gamma_2)^2} \quad (1)$$

Аналогичным образом может быть представлен и эффективный коэффициент передачи:

$$\Theta_{эф} = \Theta(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) + \Theta^3 \Gamma_2^2 (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) + \Theta^5 \Gamma_2^4 (1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2) + \dots$$

или

$$\Theta_{эф} = \frac{\Theta(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)}{1 - \Theta^2 \Gamma_2^2}$$

(2)

В технике СВЧ целесообразно любое устройство СВЧ представлять в виде многополюсника, каждый из входов которого представляет собой определённый тип волны, распространяющейся в линии передачи сигнала. Многополюсник описывается матрицей рассеяния, диагональные элементы которой являются комплексными коэффициентами отражения, а недиагональные – комплексными коэффициентами передачи. С учетом (1) и (2) матрица рассеяния рассматриваемого четырехполюсника принимает вид:

$$\tilde{S} = \begin{pmatrix} \Gamma_1 + \Gamma_2 \dot{Q} \dot{Q}_{эф} & \dot{Q}_{эф} \\ \dot{Q}_{эф} & -\Gamma_1 + \Gamma_2 \dot{Q} \dot{Q}_{эф} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $\dot{Q}$  – комплексный коэффициент передачи образца.

При наличии нескольких четырехполюсников в тракте удобно использовать матрицу передачи  $\tilde{T}$ , т. к. матрица передачи совокупности элементов может быть определена, как произведение соответствующих матриц передачи каждого элемента. Для слабопоглощающей среды матрица передачи представляется в виде:

$$\tilde{T} = \frac{1}{1 - \Gamma_1} \begin{pmatrix} 1 + \dot{\Gamma}_2 & -(\dot{\Gamma}_1 + \dot{\Gamma}_2) \\ \dot{\Gamma}_1 + \dot{\Gamma}_2 & 2\dot{\Gamma}_1 + \dot{\Gamma}_2 + 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Рассмотрение прохождения электромагнитной волны через совокупность двух элементов можно провести совершенно аналогичным образом, заменяя коэффициенты отражения и передачи на их эффективные значения.

Вычисления, аналогичные проведенным выше, для системы из двух элементов дают следующие значения:

$$\Gamma_{эф(2)} = \Gamma_{эф} + \Gamma_{эф} \Theta_{эф}^2 + \Gamma_{эф}^2 \Theta_{эф}^2 + \Gamma_{эф}^3 \Theta_{эф}^2 = \Gamma_{эф} \left( 1 + \frac{\Theta_{эф}^2}{1 - \Gamma_{эф}^2} \right) \quad (5)$$

и, соответственно

$$\Theta_{эф(2)} = \Theta_{эф}^2 (1 + \Gamma_{эф}^2 + \Gamma_{эф}^4 + \Gamma_{эф}^6) = \frac{\Theta_{эф}^2}{1 - \Gamma_{эф}^2}$$

(6)

Прохождение волны через три и более элементов можно рассмотреть аналогично проведенному выше для двух элементов, если для каждого последующего элемента использовать выражения для эффективных коэффициентов отражения и передачи предыдущей системы и добавлять к ней еще один элемент с соответствующими параметрами. Таким образом,

$$\Gamma_{эф(n)} = \Gamma_{эф(n-1)} + \frac{\Gamma_1 \Theta_{эф(n-1)}^2}{1 - \Gamma_1 \Gamma_{эф(n-1)}}, \quad (7)$$

$$\Theta_{эф(n)} = \frac{\Theta_{эф(n-1)} \Theta_1}{1 - \Gamma_1 \Gamma_{эф(n-1)}}. \quad (8)$$

Полученные выражения для эффективных коэффициентов отражения и передачи слоистой структуры конечного числа элементов позволяют получить численные значения параметров пропускания и ослабления дискретной структуры в волноводе, а также учесть переотражение сигнала в структуре при исследовании ее собственных параметров, в частности – при определении удельного затухания материала тонкопленочной структуры и ее диэлектрических параметров.