

09

Расчет затухания в щелевой и копланарной линиях, образованных в структуре "сегнетоэлектрическая пленка–диэлектрическая подложка"

© И.Г. Мироненко, А.А. Иванов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

E-mail: mit@eltech.ru, MironencoIG@rambler.ru, iva@solaris.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2001 г.

Приведены результаты расчета затухания, обусловленного конечной проводимостью металлических электродов и потерями в сегнетоэлектрической пленке в щелевой и копланарной линиях на основе структуры "сегнетоэлектрическая пленка–диэлектрическая подложка".

Дисперсионные характеристики щелевой и копланарной линий передачи рассмотрены в [1]. Полный электродинамический анализ должен включать в себя расчет затухания, вызванного конечной проводимостью металлических электродов и потерями в сегнетоэлектрической пленке. При малых значениях ширины щели в щелевой и копланарной линиях затухание может быть значительным. Поэтому при проектировании устройств необходимо учитывать влияние этих потерь. Известно, что затухание в линиях передачи, обусловленное различными причинами, находится во взаимной связи. Однако при малых потерях возмущение электромагнитного поля мало, и поэтому расчет может быть выполнен независимо для потерь в пленке и потерь в электродах.

1. Затухание, обусловленное потерями в сегнетоэлектрической пленке. На рис. 1 представлено поперечное сечение щелевой и копланарной линий передачи. Затухание в линии определяется комплексной постоянной распространения $\hat{\gamma} = \gamma' - j \cdot \gamma''$, мнимая часть которой является численной оценкой затухания, приходящегося на единицу длины. Тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрической пленки $\text{tg } \delta$ и γ'' в случае $\text{tg } \delta \ll 1$ связаны между собой соотношением $\gamma'' \cong (\partial \gamma / \partial \epsilon) \cdot \epsilon \cdot \text{tg } \delta$. Для расчета γ'' можно использовать результаты

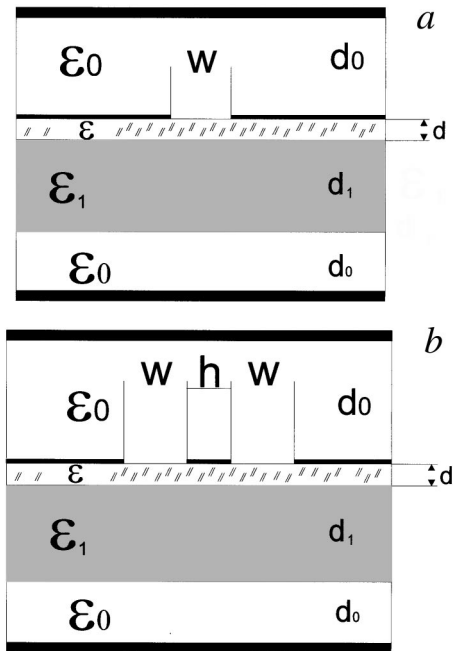


Рис. 1. Поперечные сечения щелевой (а) и копланарной (б) линий передачи.

анализа дисперсионных характеристик рассматриваемых линий передачи, полученные в [1]. Оценки показывают, что в щелевой линии $\gamma''(\text{dB/mm}) \cong (5-17) \cdot \text{tg}(\delta)$ на частоте 30 GHz при $\epsilon = 500-2500$, $w = 0.05 \text{ mm}$, $d_1 = 0.34 \text{ mm}$ и $\epsilon_1 = 9.5$.

2. Затухание, обусловленное конечной проводимостью электродов линий. Процедура расчета затухания в этом случае достаточно сложна, поэтому здесь мы приводим обоснование граничных условий в плоскости электродов ($y = 0$) при конечной проводимости электродов (σ) и представляем результаты расчетов.

Приближенные граничные условия на электродах линии можно записать в разных соотношениях, но все они будут отражать факт наличия тока на электродах в связи с их конечной проводимостью. Будем считать электроды непрозрачными для поля и бесконечно тон-

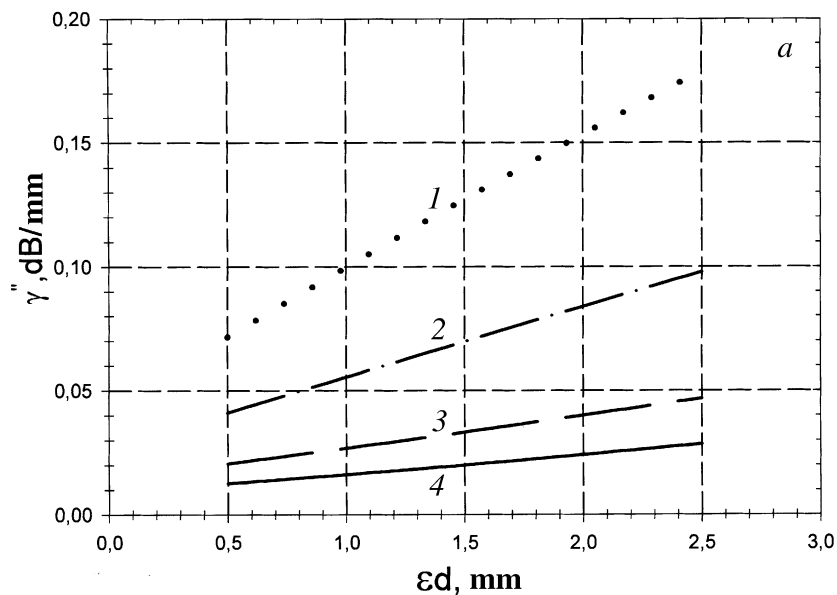


Рис. 2. Зависимость затухания при $\sigma = 5 \cdot 10^4 (\Omega \cdot \text{mm})^{-1}$: *a* — в щелевой линии: 1 — $w = 0.05 \text{ mm}$, 2 — $w = 0.1 \text{ mm}$, 3 — $w = 0.25 \text{ mm}$, 4 — $w = 0.5 \text{ mm}$; *b* — в копланарной линии: 1 — $w = 0.05 \text{ mm}$, $h = 0.1 \text{ mm}$; 2 — $w = h = 0.05 \text{ mm}$.

кими. В этом случае поверхностный ток (плотностью \mathbf{j}_s) приводит к разрыву касательных составляющих напряженности магнитного поля в плоскости $y = 0$

$$[\mathbf{n} \cdot (\dot{\mathbf{H}}(x, +0) - \dot{\mathbf{H}}(x, -0))] = \mathbf{j}_s, \quad (1)$$

где $\mathbf{n} = \mathbf{e}_y$ — орт нормали к поверхности электродов.

Введем поверхностное сопротивление металла электродов $Z_s = (1 + j) \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu_0 / 2 \cdot \sigma}$ и перепишем (1) в эквивалентной форме

$$\dot{\mathbf{E}}(x, 0) = Z_s \cdot [\mathbf{e}_y (\dot{\mathbf{H}}(x, +0) - \dot{\mathbf{H}}(x, -0))]. \quad (2)$$

Соотношение (2) справедливо на электродах линии. Очевидно, что оно справедливо и для Фурье-образа (ФО) $\bar{E}(0, s)$. На щелях копланарной и щелевой линий $\bar{E}_x(0, s)$ и $\bar{E}_z(0, s)$ аппроксимируются разложением

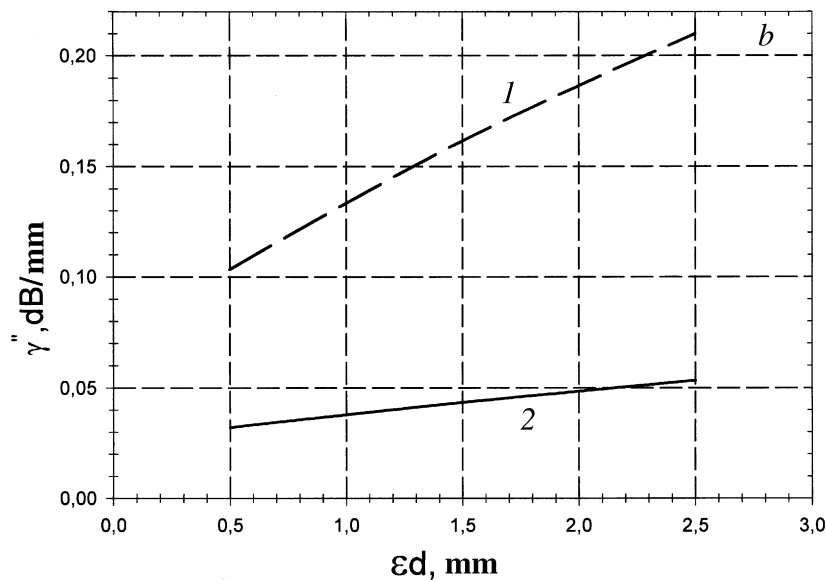


Рис. 2 (продолжение).

Галеркина [1]. Граничные условия для $\bar{E}_x(0, s)$ и $\bar{E}_z(0, s)$ в плоскости $y = 0$ могут быть представлены в виде

$$\bar{E}_x(0, s) - Z_s \cdot (\bar{H}_z(+0, s) - \bar{H}_z(-0, s)) = \begin{cases} f(s) & \text{— на щели,} \\ 0 & \text{— на электродах,} \end{cases} \quad (3)$$

$$\bar{E}_z(0, s) - Z_s \cdot (\bar{H}_x(+0, s) - \bar{H}_x(-0, s)) = \begin{cases} g(s) & \text{— на щели,} \\ 0 & \text{— на электродах.} \end{cases}$$

Применение граничных условий в форме (3) к ФО полей, процедура нахождения которых изложена в [1], приводит к расчетной модели Галеркина относительно комплексной постоянной распространения $\dot{\gamma}$. Результаты расчетов затухания в щелевой и копланарной линиях передачи, содержащих сегнетоэлектрическую пленку, представлены на рис. 2, *a* и *b*. По оси абсцисс графиков отложено произведение $(\epsilon \cdot d)$, дающее возможность определять $\dot{\gamma}''$ для различной толщины сегнетоэлектриче-

ской пленки ($0 \leq d \leq 5 \cdot 10^{-3}$ mm) и ее диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 10^2 - 2.5 \cdot 10^3$). Расчеты выполнены для диэлектрической подложки с параметрами $d_1 = 0.34$ mm, $\epsilon_1 = 9.5$ на частоте 30 GHz. Погрешность результатов расчетов не превышает долей процента.

Список литературы

- [1] Мироненко И.Г., Иванов А.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 13. С. 16–21.