

05

Анализ фундаментальных мод многосвязной щелевой линии с сегнетоэлектрическим слоем

© И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, М.С. Гашинова, А.Н. Деленив

С.-Петербургский электротехнический университет „ЛЭТИ“

E-mail: MWLab@eltech.ru

E-mail: OGVendik@mail.eltech.ru

Chalmers University of Technology, Göteborg, SE-41296, Sweden

E-mail: anatoli.deleniv@mc2.chalmers.se

Поступило в Редакцию 28 июля 2004 г.

Для анализа многосвязной щелевой линии (МЩЛ) передачи с управляемым слоем сегнетоэлектрика использована расчетная электродинамическая модель на основе метода моментов в спектральной области. Определены добротность каждой моды, ее вклад в потери линии. Показано, что добротности основных мод в МЩЛ сильно различаются по величине. Предложенный метод применен для анализа СВЧ сегнетоэлектрического фазовращателя на МЩЛ. Рассчитан параметр качества фазовращателя, относящийся к каждой из фундаментальных мод. Выполненный анализ позволил сделать вывод, что возбуждение фиксированной моды, характеризующейся наибольшей добротностью, позволит реализовать фазовращатель на МЩЛ с оптимальным параметром качества и минимальной величиной управляющего напряжения.

Сегнетоэлектрические фазовращатели выполняются, как правило, на копланарной линии. Управляемым элементом является тонкий слой сегнетоэлектрика, диэлектрическая проницаемость которого определяется внешним приложенным напряжением [1]. Величина приложенного напряжения тем меньше, чем уже зазор копланарной линии. В свою очередь, уменьшение ширины зазора приводит к увеличению омических потерь в электродах, характеризующихся конечной проводимостью. Многосвязную щелевую линию (МЩЛ) также можно использовать в качестве СВЧ-фазовращателя. Эквивалентная схема МЩЛ по отношению к СВЧ-полю представляет собой последовательное соединение щелей, а по отношению к постоянному полю — их параллельное соединение [2,3]. В таком случае может быть реализована оптимальная

комбинация малого уровня вносимых потерь, вызванных конечной проводимостью материала электродов, и малых значений постоянного управляющего напряжения. В МЩЛ могут быть подавлены нелинейные эффекты при повышенной мощности СВЧ-сигнала [4].

Постановка задачи и анализ модели. Предметом анализа является исследование свойств N ортогональных фундаментальных мод, которые могут существовать в N -связной щелевой линии. Представляет интерес выяснить, какая из фундаментальных мод характеризуется наибольшей величиной параметра качества, т.е. отношения фазового сдвига к величине потерь. Для анализа используем метод моментов в спектральной Фурье-области [5,6]. Названный метод позволяет определить дисперсионные характеристики МЩЛ в многослойной среде, т.е. определить частотно-зависимые комплексные постоянные распространения фундаментальных мод.

Метод расчета. В качестве моделируемой структуры рассмотрим МЩЛ в трехслойной среде (рис. 1). Введем обозначение комплексной постоянной распространения $k_z^{(n)}(\omega) = \beta^{(n)}(\omega) - i \cdot \alpha^{(n)}(\omega)$ (ω — угловая частота, β , α — фазовая постоянная и постоянная затухания соответственно) n -й моды, распространяющейся в направлении z . Каждый диэлектрический слой структуры характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r (1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta), \quad (1)$$

где ε_r , ε_0 — относительная диэлектрическая проницаемость слоя и диэлектрическая проницаемость вакуума соответственно, $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь материала слоя.

Верхняя и нижняя стенки металлического корпуса представляются слоями, характеризующимися мнимой диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon = -\frac{j\sigma_c}{\omega}, \quad (2)$$

где σ_c — проводимость металла.

Определив параметры слоев структуры, мы учитываем потери на диссипацию энергии в них в процессе конструирования функции Грина, процедура определения спектрального образа которой основана на так называемом иммитансном подходе [7].

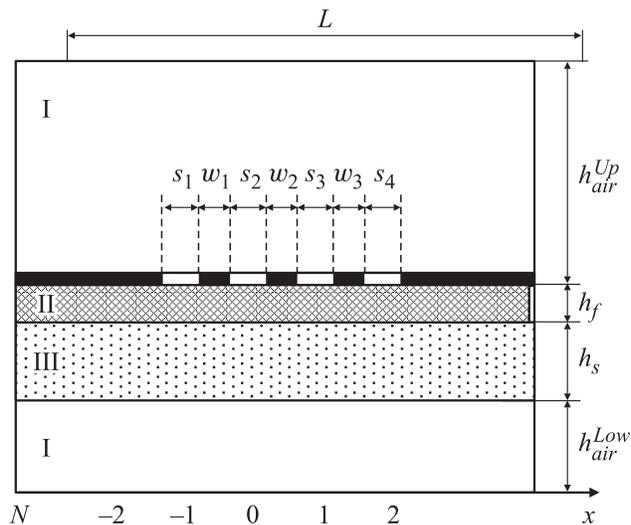


Рис. 1. Поперечное сечение моделируемой симметричной 4-щелевой линии. Параметры подложки $\epsilon_f = 750$ и 1500 , $\epsilon_s = 9.8$. Характерные размеры структуры: $h_{air}^{Up} = 7$ mm, $h_f = 1$ μ m, $h_s = 0.5$ mm, $h_{air}^{Low} = 5$ mm, $L = 5$ mm. Ширина электродов: $w_k = 30$ μ m, ширина зазоров $s_p = 20$ μ m. Здесь: I — воздух, II — сегнетоэлектрик, III — поликор; N — номер электрода.

Учет потерь в проводящих электродах выполняется при введении поверхностного импеданса в виде

$$Z_{sur} = (1 + j) \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}.$$

Моделирование проводится на основе метода моментов для двумерной постановки интегрального соотношения между электрическим полем и электрическим током в предположении нулевой толщины сигнальных электродов. Учет конечной толщины электродов возможен при использовании концепции эквивалентного поверхностного импеданса, используемой в нашем расчете и описанной в работе [6].

Следуя расчетной модели, развитой в [5], мы определяем постоянные распространения $k_z^{(n)}$ ($n = 1, \dots, N$) всех N фундаментальных мод,

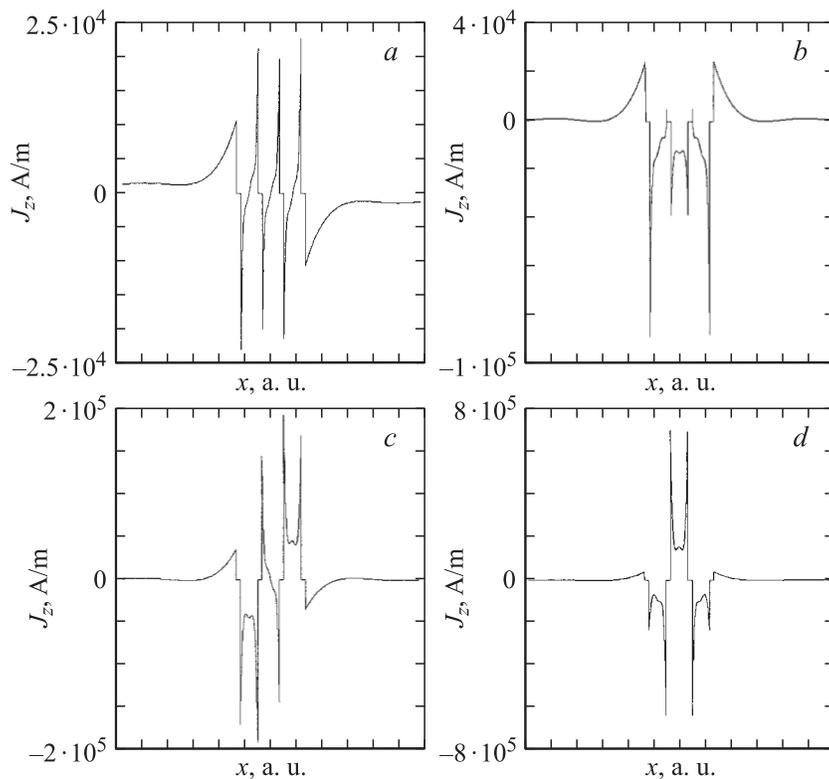


Рис. 2. Распределение плотности поверхностного тока фундаментальных мод в поперечном сечении 4-щелевой линии, нормированное на 1 А полного тока в линии. Параметры структуры соответствуют рис. 1. Масштаб отображения ширины электродов и зазоров изменен для наглядности изображения распределения поверхностного тока на внутренних электродах. *a* — 1-я мода, *b* — 2-я мода, *c* — 3-я мода, *d* — 4-я мода.

распространяющихся в МЦЛ. Расчет проводится для $N = 4$ на частоте $f = 10$ GHz.

Распределение плотности поверхностного продольного тока каждой из четырех мод в поперечном сечении структуры, представленное на рис. 2, позволяет качественно оценить вносимые потери, связанные с

Таблица 1. Распределение тока в поперечном сечении МЦЛ при $N = 4$

Номер моды	Номер электрода				
	-2	-1	0	1	2
1	+1	0	0	0	-1
2	+1/2	-1/3	-1/3	-1/3	+1/2
3	0	-1	0	+1	0
4	0	-1/2	+1	-1/2	0

переносом энергии каждой из мод. Соответствующее распределение полного тока на электродах приведено в табл. 1. Приведенные в таблице данные демонстрируют ортогональность фундаментальных мод.

Наиболее интересной является первая мода, в которой полный ток на внутренних электродах щелевой линии равен нулю. Равенство нулю полного тока на внутренних электродах обеспечивает наименьший вклад конечной проводимости электродов в постоянную затухания для этой моды, что и определяет ее наибольшую по сравнению с другими модами добротность.

Параметр качества сегнетоэлектрического фазовращателя на МЦЛ. В качестве дискретного фазовращателя рассмотрим отрезок линии длиной l на двуслойной подложке с двумя различными значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon_f^{(1)} = 750$ и $\epsilon_f^{(2)} = 1500$ управляемого сегнетоэлектрического слоя. Сдвиг фазы вдоль линии длиной l равен

$$\Delta\varphi^\circ = (\beta_2 - \beta_1) \cdot l \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (3)$$

Усредненные потери могут быть выражены в дБ по формуле

$$a_{\text{дБ}} = 8.68 \cdot \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot l. \quad (4)$$

Параметр качества фазовращателя определим следующей формулой:

$$F = \frac{\Delta\varphi^\circ}{a_{\text{дБ}}} = 13.2 \cdot \frac{\beta_2 - \beta_1}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (5)$$

Индексы 1, 2 относятся к одному из двух состояний сегнетоэлектрика, определяемых значениями $\epsilon_f^{(1)}$ и $\epsilon_f^{(2)}$.

Таблица 2. Постоянные распространения и параметр качества

Номер моды	$\varepsilon_f = 750$		$\varepsilon_f = 1500$		$F_c, \text{grad/dB}$	
	β_1	α_1	β_2	α_2		
А) {	1	571.42	2.01	715.38	2.69	403.563
	2	979.06	14.56	1291.38	19.287	121.795
	3	1171.24	26.35	1576.99	35.543	86.529
	4	1281.75	34.53	1738.7	46.862	74.105
Номер моды	$\varepsilon_f = 750$		$\varepsilon_f = 1500$		$F_d, \text{grad/dB}$	
	β_1	α_1	β_2	α_2		
Б) {	1	568.803	1.556	711.883	2.655	448.523
	2	960.62	3.544	1266.96	5.398	452.220
	3	1138.13	4.621	1532.56	6.878	452.944
	4	1238.72	5.204	1680.52	7.673	452.584
Номер моды	$\varepsilon_f = 750$		$\varepsilon_f = 1500$		$F_{tot}, \text{grad/dB}$	
	β_1	α_1	β_2	α_2		
В) {	1	571.41	3.579	715.37	5.367	212.418
	2	979.01	18.176	1291.31	24.791	95.943
	3	1171.14	31.108	1576.84	42.622	72.632
	4	1281.61	39.919	1738.51	54.803	63.672

Вычислим постоянные распространения каждой моды с учетом:

А) только омических потерь в металле электродов ($\sigma_c = 6.0 \cdot 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$),

Б) только диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике ($\text{tg } \delta_f = 0.01$),

В) общих потерь ($\sigma_c = 6.0 \cdot 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, $\text{tg } \delta_f = 0.01$).

Это позволит оценить влияние потерь каждого типа на параметр качества отдельной моды. Результаты расчета параметра качества фундаментальных мод для каждого из названных случаев представлены в табл. 2.

Здесь F_c — параметр качества фазовращателя, рассчитанный для случая, когда учитывается диссипация энергии только в материале проводника, F_d — параметр качества фазовращателя с диссипативной диэлектрической средой и идеальным проводником, наконец, F_{tot} —

параметр качества с учетом потерь как в проводниках, так и в диэлектрике.

Результаты и обсуждение. Сравнение данных, представленных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Для первой моды вклад омических потерь сравним с вкладом диэлектрических потерь. Эта мода обладает наибольшей добротностью. Для мод с номерами 2, 3 и 4 характерным является доминирующий вклад омических потерь в общие потери по сравнению с вкладом диэлектрических потерь.

2. Первая мода обеспечивает максимальное значение параметра качества фазовращателя на МЩЛ, который может достигать величины порядка $200^\circ/\text{dB}$.

Приводимые в работах [8–10] экспериментальные значения параметра качества ряда сегнетоэлектрических фазовращателей находятся в пределах $30\text{--}90^\circ/\text{dB}$. Возбуждение только фиксированной, наиболее добротной моды, при одновременном подавлении всех остальных мод позволит получить более высокий параметр качества фазовращателя. Использование МЩЛ в качестве базового элемента фазовращателя позволит при малой величине управляющего напряжения существенно уменьшить вносимые потери по сравнению с традиционным фазовращателем на копланарной линии [10].

3. Представляет интерес экспериментальное исследование МЩЛ с сегнетоэлектрическим слоем и внутренними электродами, имеющими весьма большое поверхностное сопротивление [4]. В указанной работе использованы внешние электроды, изготовленные из достаточно толстых слоев меди и золота, а внутренние электроды образованы пленками оксида олова-индия толщиной порядка 10 nm . Поверхностное сопротивление такой пленки $(2\text{--}3) \cdot 10^4 \Omega$, т. е. на шесть порядков больше, чем поверхностное сопротивление меди. При этом такие электроды позволяют подвести к сегнетоэлектрической пленке низкочастотное управляющее напряжение и практически не вносят никакого затухания на СВЧ в первую моду. Этот результат совпадает с оценками, сделанными на основе изложенного выше расчетного метода. Для остальных мод, рассмотренных выше, при названном выше высоком поверхностном сопротивлении электродов их постоянная затухания сравнима с фазовой постоянной, т. е. моды 2, 3 и 4 при электродах со столь высоким поверхностным сопротивлением практически существовать в МЩЛ не могут.

Работа выполнена в рамках Госконтракта № 40.012.1.1.1355 по федеральной целевой научно-технической программе „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники“.

Список литературы

- [1] *Gevorgian S.S., Kaparkov D.I., Vendik O.G.* // IEE Proc.—Microw. Antenna Propag. 1994. V. 141. N 6. P. 501–503.
- [2] *Мироненко И.Г., Хижа Г.С.* // Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. С. 134–159. М.: Сов. радио, 1979. 272 с., ил.
- [3] *Мироненко И.Г., Иванов А.А.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 2. С. 68–73.
- [4] *Yoon Y.-K., Kim D., Allen H.G., Kenney J.S., Hunt A.T.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2003. V. 51. N 12. P. 2568–2576.
- [5] *Deleniv A.N., Gashinova M.S., Vendik I.B., Eriksson A.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2002. V. 50. N 9. P. 2153–2158.
- [6] *Deleniv A.N., Gashinova M.S., Vendik I.B.* // IEEE Trans. on Microwave Theory Tech. 2003. V. 51. N 1. P. 74–81.
- [7] *Itoh T. (Ed).* Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures. New York: John Wiley, 1989.
- [8] *Vendik O.G., Zubko S.P., Nikol'ski M.A.* // Integrated Ferroelectrics. 2003. V. 55. P. 991–999.
- [9] *Chen C.L., Shen J., Chen S.Y., Luo G.D., Chu C.W., Miranda F.A., Van Keuls F.W., Jiany J.C., Metetis E.I., Chung H.Y.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 5. P. 652–654.
- [10] *Krowne C.M., Daniel M., Kirchoefer S.W., Pond J.M.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique. 2002. V. 50. N 2. P. 537–548.