

## **Планарные линии передачи на основе нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок**

*Обоснована возможность создания щелевой линии передачи с температурной стабилизацией фазовой скорости на основе нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок и применения ее в качестве базового элемента СВЧ техники. Выполнен электродинамический анализ щелевой многослойной структуры в полноволновом представлении. Представлены численные результаты расчета.*

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрические пленки, нанокompозитные сегнетоэлектрические пленки, щелевая линия, перестраиваемые элементы СВЧ

Сегнетоэлектрические пленки, осажденные на диэлектрическую подложку находят применение в устройствах сверх и крайне-высоких частот с электрически перестраиваемыми амплитудно и фазочастотными характеристиками. [1].

Одним из возможных типов устройств является щелевая линия, образованная тонкими металлическими электродами, напыленными на поверхность сегнетоэлектрической пленки (СЭП), разделенными узкой щелью [2,3].

Сдерживающим фактором широкого применения в устройствах СВЧ сегнетоэлектрических пленок является температурная зависимость их диэлектрической проницаемости и, как следствие, температурная зависимость характеристик устройств, построенных на их основе. В настоящее время известно более трехсот составов сегнетоэлектриков, однако, экспериментальные исследования показывают, что оптимальным является состав  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO) при  $x=(0.4-0.5)$ .

Основной электродинамической характеристикой щелевой линии является зависимость постоянной распространения электромагнитной волны (фазовой скорости) от диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, которая изменяется под действием управляющего напряжения [4]. Однако температурная зависимость диэлектрической проницаемости СЭП неизбежно должна вести к поиску способов температурной стабилизации фазовой скорости при сохранении зависимости от управляющего электрического поля. Одним из возможных способов решения этой задачи является применение нанокompозитных пленок в щелевой линии.

Сегнетоэлектрические пленки, применяемые в щелевых линиях в диапазоне сверх- и крайне высоких частот ограничены по толщине размером  $(2\div 0.25)\mu\text{м}$  [3]. Сегнетоэлектрическая пленка такой толщины при диэлектрической проницаемости  $10^3$  дает оптимальное замедление электромагнитной волны в щелевой линии при сохранении электрического управления. Таким образом, сегнетоэлектрическая пленка в структуре щелевой линии не является нанообъектом. Термином “нанокompозитная” сегнетоэлектрическая пленка, мы определяем пленку, образованную последовательностью сегнетоэлектрических слоев, отличающихся химическим составом. В таком химическом составе при ограничении на толщину пленки размером  $(2\div 0.25)\mu\text{м}$ , каждый слой может иметь толщину  $\geq 50$  нм, что дает основание к

определению “нанокompозитная пленка”. Каждый нанослой имеет температурную и полевую зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon(T,E)$ , определяемую его химическим составом. Например, в случае использования твердого раствора BSTO нанослои могут отличаться соотношением бария и стронция, что определяет различные зависимости  $\epsilon(T,E)$  в нанослоях. Так как каждый нанослой вносит свой вклад в электродинамические характеристики щелевой линии за счет распределения электромагнитного поля по толщине нанокompозитной пленки, то, может быть достигнут и результирующий эффект в виде температурной стабилизации фазовой скорости в заданном температурном интервале.

Нанокompозитную пленку нельзя характеризовать таким параметром как диэлектрическая проницаемость, потому, что каждый нанослой сохраняет свойства сегнетоэлектрика с присущей ему температурной и полевой зависимостью диэлектрической проницаемости.

В настоящей работе выполнен теоретический анализ многослойной диэлектрической структуры в составе щелевой линии.

Температурная и полевая зависимости диэлектрической проницаемости в каждом нанослое BSTO была принята на основе модели Ландау-Гинзбурга [4]

На рис.1 представлено поперечное сечение щелевой линии образованной слоистой диэлектрической структурой.

На рисунке обозначено:

$d_1$  – толщина многослойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры,

$d_2$  – толщина подложки диэлектрической подложки,

$\Delta_{i1}$  – толщина нанослоя, где,  $i=1,2,..N$ ,  $N$  – количество нанослоев,

$\epsilon_{i1}$  – диэлектрическая проницаемость нанослоя состава  $x_{i1}$ .

В этих обозначениях первый индекс указывает на номер области поперечного сечения многослойной наноразмерной сегнетоэлектрической структуры.

Расчет постоянной распространения электромагнитной волны выполнен в полноволновом электродинамическом описании, основные идеи изложены в [1].

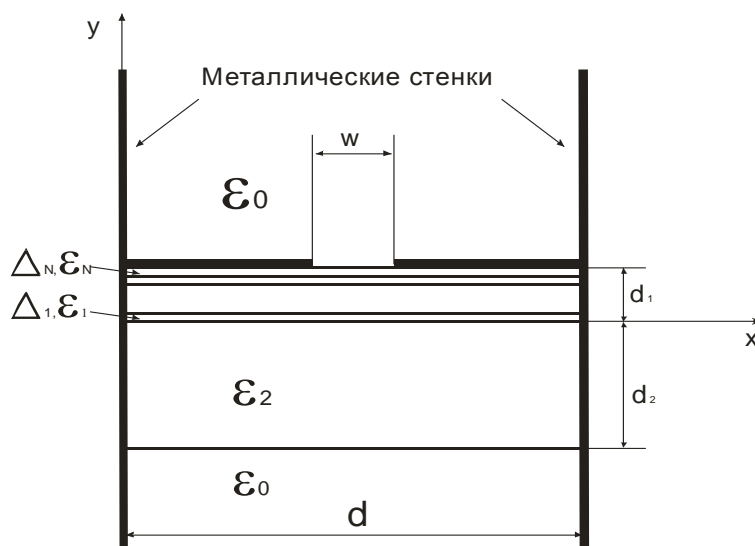


Рис. 1.

В этих обозначениях первый индекс указывает на номер области поперечного сечения нанокomпозитной пленки.

Поле в структуре представлено композицией LSE и LSM полей, которые порождаются векторными электродинамическими потенциалами  $\vec{A}(x, y, z, t) = \vec{e}_y A(x, y) \cdot e^{-j\gamma z}$ ,  $\vec{F}(x, y, z, t) = \vec{e}_y F(x, y) \cdot e^{-j\gamma z}$ , где  $\gamma$  – постоянная распространения электромагнитного поля в линии. Соотношения для векторных потенциалов в областях поперечного сечения линии с учетом граничных условий на металлических стенках могут быть получены в виде [3]

В области над щелью  $y > d_1$

$$A_0(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{0n} \cdot e^{k_{0n}(y-d_1)} \cdot \cos(a_n x) \quad F_0(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} F_{0n} \cdot e^{k_{0n}(y-d_1)} \cdot \cos(a_n x) \quad (1)$$

в области подложки  $d_1 < |y| < d_2$

$$A_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{2n} \sin(k_{2n} y) + B_{2n} \cos(k_{2n} y)) \sin(a_n x) \quad (2)$$

$$F_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (F_{2n} \sin(k_{2n} y) + D_{2n} \cos(k_{2n} y)) \cos(a_n x)$$

В области  $i$ -го нанослоя

$$A_{1i}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{1in} \sin(k_{1in} y) + B_{1in} \cos(k_{1in} y)) \sin(a_n x) \quad (3)$$

$$F_{1i}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (F_{1in} \sin(k_{1in} y) + D_{1in} \cos(k_{1in} y)) \cos(a_n x)$$

в областях свободного пространства при  $|y| > d_{12} = d_1 + d_2$

$$A_3(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{3n} \cdot e^{k_{0n}(y+d_{12})} \cdot \sin(a_n x) \quad F_3(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} F_{3n} \cdot e^{k_{0n}(y+d_{12})} \cdot \cos(a_n x) \quad (4)$$

В этих выражениях использованы обозначения

$$k_{0n}^2 = \gamma^2 - k_0^2 + a_n^2, \quad k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0, \quad a_n = \frac{n\pi}{d}, \quad k_{2n}^2 = k_0^2 \varepsilon_2 - \gamma^2 - a_n^2, \quad k_{1in}^2 = k_0^2 \varepsilon_{1i} - \gamma^2 - a_n^2, \quad \gamma > k_0.$$

Условия непрерывности векторных потенциалов и их нормальных производных на границах диэлектрических слоев имеют вид:

- на границе при  $y = -d_{12}$

$$A_2(x, -d_{12}) = A_3(x, -d_{12}), \quad \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{\partial A_2(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial A_3(x, y)}{\partial y}, \quad (5)$$

$$F_2(x, -d_{12}) = F_3(x, -d_{12}), \quad \frac{\partial F_2(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F_3(x, y)}{\partial y}.$$

На границе между первым нанослоем и подложкой при  $y = -d_2$

$$A_2(x, -d_2) = A_{11}(x, -d_2), \quad \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{\partial A_2(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon_{11}} \frac{\partial A_{11}(x, y)}{\partial y}, \quad (6)$$

$$F_2(x, -d_2) = F_{11}(x, -d_2), \quad \frac{\partial F_2(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F_{11}(x, y)}{\partial y}.$$

На границе между  $i$ -тым и  $(i+1)$ - нанослоем при  $y = \Delta_{li}$

$$A_{li}(x, \Delta_{li}) = A_{1(i+1)}(x, \Delta_{li}), \quad \frac{1}{\varepsilon_{li}} \frac{\partial A_{li}(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon_{1(i+1)}} \frac{\partial A_{1(i+1)}(x, y)}{\partial y}, \quad (7)$$

$$F_{li}(x, \Delta_{li}) = F_{1(i+1)}(x, \Delta_{li}), \quad \frac{\partial F_{li}(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial F_{1(i+1)}(x, y)}{\partial y}.$$

Последовательное применение соотношений непрерывности на границах областей приведет к связи произвольных коэффициентов в разложениях потенциалов в соответствующих областях. При большом числе нанослоев эта процедура становится громоздкой. Ее можно упростить, если представить соотношения между коэффициентами в матричной форме, приспособленной к численным процедурам Fortran. В качестве примера приведем матричные соотношения между коэффициентами разложения векторного потенциала  $A(x, y)$ .

Из соотношений (5), (2) и (4) найдем, что:

$$\begin{bmatrix} A_{2n} \\ B_{2n} \end{bmatrix} = \widehat{M}_{23}^{-1} A_{3n}, \quad \text{где матрица } \widehat{M}_{23} = \begin{bmatrix} -\sin(k_{2n} d_{12}) & \cos(k_{2n} d_{12}) \\ \frac{k_{0n} \varepsilon_2}{k_{2n}} \cos(k_{2n} d_{12}) & \frac{k_{0n} \varepsilon_2}{k_{2n}} \sin(k_{2n} d_{12}) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Очевидно, что  $\widehat{M}_{23}$  имеет обратную матрицу, т.к., ее определитель равен  $(-\frac{k_{0n} \varepsilon_2}{k_{2n}})$ .

Первая пара из соотношения (6) приводит к связи коэффициентов разложения во второй области и в первом нанослое:

$$A_{2n} = \frac{k_{1ln} \varepsilon_2}{\varepsilon_{11} k_{2n}} A_{1n}, \quad B_{2n} = B_{1ln}.$$

Подставим полученное соотношение в (8) и найдем связь между коэффициентами в первом нанослое и третьей области в виде:

$$\begin{bmatrix} A_{11n} \\ B_{11n} \end{bmatrix} = \widehat{M}_{113}^{-1} A_{3n}, \quad (9)$$

$$\text{где } \widehat{M}_{113} = \begin{bmatrix} -\frac{k_{11n}\varepsilon_2}{\varepsilon_{11}k_{2n}} \sin(k_{2n}d_{12}) & \frac{k_{11n}\varepsilon_2}{\varepsilon_{11}k_{2n}} \cos(k_{2n}d_{12}) \\ \frac{k_{0n}\varepsilon_2}{k_{2n}} \cos(k_{2n}d_{12}) & \frac{k_{0n}\varepsilon_2}{k_{2n}} \sin(k_{2n}d_{12}) \end{bmatrix}.$$

На основании первой пары из соотношений (7) и соотношений (3) найдем

$$\begin{bmatrix} A_{12n} \\ B_{12n} \end{bmatrix} = \widehat{M}_{1112} \begin{bmatrix} A_{11n} \\ B_{11n} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{где } \widehat{M}_{1112} = \begin{bmatrix} \sin(k_{11n}\Delta_1) & \cos(k_{11n}\Delta_1) \\ \frac{k_{11n}}{\varepsilon_{11}} \cos(k_{11}\Delta_1) & -\frac{k_{11n}}{\varepsilon_{11}} \sin(k_{11}\Delta_1) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin(k_{12n}\Delta_1) & \cos(k_{12}\Delta_1) \\ \frac{k_{12n}}{\varepsilon_{12}} \cos(k_{12n}\Delta_1) & -\frac{k_{12n}}{\varepsilon_{12}} \sin(k_{12n}\Delta_1) \end{bmatrix}.$$

Используя соотношения (9) и (10), находим

$$\begin{bmatrix} A_{12n} \\ B_{12n} \end{bmatrix} = \widehat{M}_{1112} \widehat{M}_{113}^{-1} A_{3n}.$$

На основании соотношения (10) и вида переходных матриц в (11) был разработан алгоритм построения матриц для произвольного числа нанослоев и диэлектрических слоев. Очевидно, что из условий непрерывности на границе N – ого и (N-1)-ого нанослоя можно построить матрицу связывающую коэффициенты  $A_{1Nn}$ ,  $B_{1Nn}$  с  $A_{3n}$ ,  $F_{1Nn}$ ,  $D_{1Nn}$  с  $F_{3n}$ , так как на предшествующем этапе условия непрерывности (на границе N-1 и N-2 нанослоем) связывали коэффициенты  $A_{1N-1n}$ ,  $B_{1N-1n}$  с  $A_{3n}$ ,  $F_{1N-1n}$ ,  $D_{1N-1n}$  с  $F_{3n}$ . Таким образом, были построены последовательно переходные матрицы между коэффициентами разложения векторных потенциалов в каждом слое поперечного сечения линии. Процедура построения численной модели Галеркина в рассматриваемой задаче принципиально не отличается от приведенной в [1], за тем исключением, что мы использовали аппроксимации касательных электрических полей

на щели в виде разложений по тригонометрическим функциям  $E_z(x) = \sum_{m=1}^{M_1} a_m \sin\left(\frac{2\pi mx}{w}\right)$ ,

$E_x(x) = \sum_{m=1}^{M_2} b_m \cos\left(\frac{2\pi mx}{w}\right)$ . При выбранной аппроксимации несколько упрощаются

вычислительные процедуры метода Галеркина и уменьшается время вычислений.

Постановка задачи расчета постоянной распространения электромагнитной волны в щелевой линии передачи на основе нанокompозитной сегнетоэлектрической пленки и разработанный метод решения адекватны реальной модели щелевой линии. Поэтому численные результаты весьма близки к экспериментальным.

Расчеты были выполнены для широкого диапазона частот и размеров поперечного сечения щелевой линии. Значения диэлектрической проницаемости в

нанослоях были заданы из ряда значений соответствующих температур. Таким образом, результаты расчета позволяют судить о температурной стабилизации постоянной распространения. Результаты расчета представлены в таблицах.

Табл. №1

| f=30ГГц, w=0.25мм, d <sub>2</sub> =0.5мм, ε <sub>2</sub> =9.8 |      |      |      |      | f=30ГГц, w=0.1мм, d <sub>2</sub> =0.5мм, ε <sub>2</sub> =9.8 |      |      |      |
|---|------|------|------|------|--|------|------|------|
| d <sub>1</sub> , мкм  | 1.2  |      |      |      | 1.2  |      |      |      |
| ε <sub>1i</sub>   | 2934 | 2139 | 1819 | 1571 | 2934   | 2139 | 1819 | 1571 |
| ε <sub>2i</sub>   | 2218 | 3167 | 3135 | 2781 | 2218   | 3167 | 3135 | 2781 |
| ε <sub>3i</sub>   | 883  | 1177 | 1415 | 1699 | 883  | 1177 | 1415 | 1699 |
| γ, мм <sup>-1</sup>   | 2.05 | 2.07 | 2.08 | 2.05 | 2.3  | 2.32 | 2.31 | 2.32 |

Табл. №2

| f=100ГГц, w=0.02мм, d <sub>2</sub> =0.5мм, ε <sub>2</sub> =9.8 |      |      |      |      | f=100ГГц, w=0.01мм, d <sub>2</sub> =0.5мм, ε <sub>2</sub> =9.8 |      |      |      |
|--|------|------|------|------|--|------|------|------|
| d <sub>1</sub> , мкм   | 0.08 |      |      |      | 0.08   |      |      |      |
| ε <sub>1i</sub>  | 2934 | 2139 | 1819 | 1571 | 2934   | 2139 | 1819 | 1571 |
| ε <sub>2i</sub>  | 2218 | 3167 | 3135 | 2781 | 2218   | 3167 | 3135 | 2781 |
| ε <sub>3i</sub>  | 883  | 1177 | 1415 | 1699 | 883  | 1177 | 1415 | 1699 |
| ε <sub>4i</sub>  | 2934 | 2139 | 1819 | 1571 | 2934   | 2139 | 1819 | 1571 |
| ε <sub>5i</sub>  | 951  | 788  | 726  | 672  | 951  | 788  | 726  | 672  |
| ε <sub>6i</sub>  | 1593 | 1216 | 1084 | 978  | 1593   | 1216 | 1084 | 978  |
| γ, мм <sup>-1</sup>  | 5.62 | 5.62 | 5.62 | 5.61 | 6.21   | 6.22 | 6.21 | 6.21 |

#### Библиографический список

1. Иванов А.А., Мироненко И.Г., Семёнов А.А., Карманенко С.Ф., Назаров И.А. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах, Санкт-Петербург, изд. "Элмор", 2007г., 161 с.
2. Балашов В.М., Мироненко И.Г., Иванов А.А., Линии передачи СВЧ на основе сегнетоэлектрических пленок // Вопросы радиоэлектроники . - 2007г. сер. РЛТ, вып. 3. с. 112-118.
3. Мироненко И.Г., Карманенко С.Ф., Иванов А.А., Семенов А.А. "Планарная приемо-передающая антенна с электрическим сканированием луча" // Вопросы радиоэлектроники . - 2008г. сер. РЛТ, вып. 1.
4. Под ред. Вендика О.Г. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ. -М.: Сов. Радио, 1979. -272 с.