



УДК621.319.1:621.385.6.62-488

И. Г. Мироненко, А. А. Иванов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Температурная стабилизация фазовой скорости электромагнитной волны в прямоугольном волноводе с многослойной нанокompозитной сегнетоэлектрической пленкой

Определена постоянная распространения основной моды электромагнитной волны в прямоугольном волноводе, поперечное сечение которого частично заполнено многослойной нанокompозитной сегнетоэлектрической пленкой (МНСЭП) на диэлектрической подложке. Численная модель построена на основе скалярной формы метода конечных элементов, приведенного к однородной системе линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений волнового скаляра при одномерной аппроксимации. Диэлектрические свойства нанослоев определены концентрационной зависимостью бария в составе твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$. Приведены результаты проведенного по специально разработанной программе расчета для нескольких десятков элементов разбиения вдоль широкой стенки прямоугольного волновода компьютерного моделирования МНСЭП с разным числом слоев и концентрационных зависимостей бария, позволяющих стабилизировать постоянную распространения в широком температурном интервале.

Многослойная нанокompозитная сегнетоэлектрическая пленка, сегнетоэлектрические структуры на сверхвысоких частотах, технология формирования пленок титаната бария-стронция

Сегнетоэлектрические пленки (СЭП) находят применение в устройствах СВЧ с электрическим управлением благодаря высокому быстродействию и разнообразию конструкторских решений. Из большого количества публикаций, посвященных исследованию диэлектрических свойств и возможностей практического применения СЭП, выделим работы [1], [2].

Сегнетоэлектрическим материалам присуща взаимосвязь между нелинейностью и температурной зависимостью диэлектрической проницаемости, что ограничивает возможности их использования. Несмотря на разнообразие сегнетоэлектрических материалов, разработанных в последние годы [2], для использования в диапазоне СВЧ, с точки зрения авторов настоящей статьи, остаются твердые растворы $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO). В последнее время исследуются различные технологические приемы температурной стабилизации диэлектрической проницаемости СЭП.

Специализированные технологические процессы на основе ионно-плазменного магнетронного распыления позволяют получать многослойные нанокompозитные сегнетоэлектрические пленки (МНСЭП) с определенной концентрацией бария в наноразмерных слоях BSTO. Каждый нанослой обладает своими нелинейностью и температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости, а совокупный эффект проявляется в температурной стабилизации и сохранении нелинейности эффективной диэлектрической проницаемости [3].

СЭП, нанесенные на диэлектрическую подложку, являются неотъемлемым конструктивным элементом щелевых, копланарных линий, прямоугольных волноводов [1] и, следовательно, должны быть исследованы в этом качестве. Эффект температурной стабилизации эффективной диэлектрической проницаемости МНСЭП проявляется в температурной стабилизации постоянной распространения электромагнитной волны в линии. Именно этот эффект определяет термоста-

бильность параметров устройств, построенных на основе МНСЭП.

В настоящее время технология МНСЭП на основе BSTO позволяет получать пленки для диапазона СВЧ суммарной толщиной 0.5...1 мкм с несколькими десятками слоев различной толщины. Температурная стабильность постоянной распространения электромагнитных волн в линиях зависит от конструкции линии, включающей в себя диэлектрическую подложку с МНСЭП, нанесенную на ее поверхность. В [4] представлены результаты исследования щелевой линии с МНСЭП, в которой электрическое поле электромагнитной волны имеет касательные и нормальную составляющие к поверхности пленки. В прямоугольном волноводе структуру "диэлектрическая подложка – МНСЭП" можно расположить на полной высоте прямоугольного волновода. В этом случае электрическое поле основной волны будет касательно к поверхности пленки, что позволяет получить максимальный эффект управления фазовой скоростью электромагнитной волны на высоком уровне СВЧ-мощности. В настоящей статье приведен электродинамический анализ прямоугольного волновода с частичным диэлектрическим заполнением на его полной высоте.

Постановка и решение задачи На рис. 1 представлено поперечное сечение прямоугольного волновода, в трех областях которого расположены диэлектрический слой (диэлектрическая подложка) 1, МНСЭП 2 и свободная область 3. Основная мода волны в таком волноводе не зависит от координаты y ($\partial/\partial y = 0$) и имеет одну составляющую электрического поля E_y и две составляющие напряженности магнитного поля H_x, H_z . Уравнения Максвелла для этой моды преобразуются к дифференциальному уравнению:

$$\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \chi^2 \varphi = 0, \quad (1)$$

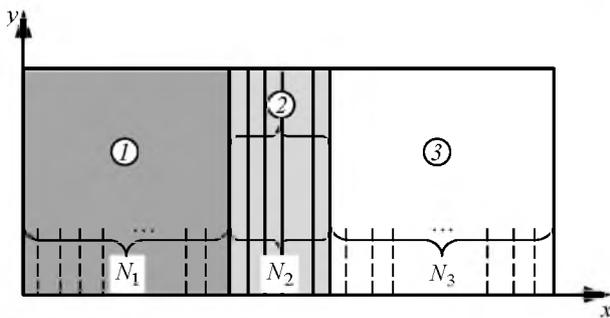


Рис. 1

где $\varphi = \varphi(x) e^{-j(\omega t - \gamma z)}$ – волновой скаляр, равный $\varphi = E_y$ либо $\varphi = H_z$; $\chi^2 = k^2 - \gamma^2$, причем $k = \omega/c$ (ω – круговая частота; c – скорость света); γ – постоянная распространения электромагнитной волны в волноводе.

Решение (1) найдем методом конечных элементов, основные идеи которого изложены в [5]. Каждую диэлектрическую область поперечного сечения разобьем на отдельные элементы. Область сечения, занятую диэлектрической подложкой с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , разобьем на N_1 элементов, область МНСЭП представим совокупностью N_2 нанослоев и свободную область N_3 слоями. Общее число элементов разбиения составляет $N = N_1 + N_2 + N_3$.

Волновой вектор отдельного элемента разбиения аппроксимируем линейной функцией

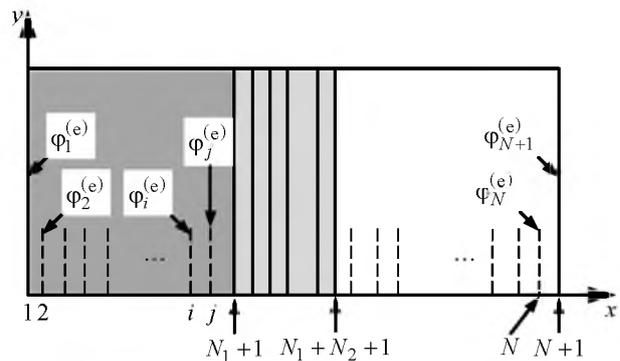
$$\varphi^{(e)}(x) = \varphi_i^{(e)} \frac{x_j - x}{l_{i,j}} + \varphi_j^{(e)} \frac{x - x_i}{l_{i,j}}, \quad (2)$$

где, $\varphi_i^{(e)}, \varphi_j^{(e)}$ – значения $\varphi^{(e)}(x)$ на концах элемента разбиения (в узлах); $l_{i,j} = x_j - x_i$ (рис. 2).

Количество элементарных волновых векторов $\varphi^{(e)}(x)$ равно N , а количество граничных узловых значений $\varphi_p^{(e)}$ составляет $N+1$ (рис. 2). Уравнение (1) справедливо для каждой области разбиения с учетом значений диэлектрической проницаемости в этой области $\epsilon^{(e)}$. В соответствии с вариационным исчислением функционал

$$\Phi^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{x_i}^{x_j} \left\{ \left[\frac{d\varphi_x^{(e)}}{dx} \right]^2 - [\chi^{(e)} \varphi_x^{(e)}]^2 \right\} dx \quad (3)$$

стационарен на решениях $\varphi_x^{(e)}$ уравнения (1).



При определении составляющих электромагнитного поля используются присваивания $\varphi = E_y$ либо $\varphi = H_z$. В соотношении (3) $\varphi_x^{(e)}$ удовлетворяет граничным условиям на контуре поперечного сечения $\varphi_x^{(e)} = 0$; $d\varphi_x^{(e)}/dn = 0$, где \mathbf{n} – нормаль к контуру.

Подставив (2) в (3) и выполнив преобразования, получим:

$$\Phi^{(e)} = \frac{1}{2l_{i,j}} [\varphi_j^{(e)} - \varphi_i^{(e)}]^2 - \frac{[\chi^{(e)}]^2 l_{i,j}}{6} [\varphi_i^{(e)} + \varphi_j^{(e)}]^2. \quad (4)$$

Функционал

$$\Phi(\varphi) = \sum_{n=1}^{N+1} \Phi^{(e)}$$

равен сумме функционалов (4) отдельных элементов разбиения всей области поперечного сечения. Он стационарен на решениях (1) и является функцией узловых значений φ_p как переменных. В соответствии с прямым методом вариационного исчисления (метод Ритца) $\Phi(\varphi)$ достигает стационарного значения на совокупности φ_p , являющихся решениями системы однородных линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\frac{\partial \Phi(\varphi)}{\partial \varphi_p} = \sum_{n=1}^{N+1} \frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \varphi_p} = 0. \quad (5)$$

Ненулевые вклады в сумму (5) дают производные от функционалов элементов разбиения, содержащих узлы с номерами $p=1, 2, \dots, N+1$. Ненулевые элементы матрицы СЛАУ (5) расположены на главной диагонали непосредственно справа и слева от нее, т. е. в p -й строке матрицы имеются три ненулевых элемента: a_{p-1} , a_{p-p} и $a_{p+1,p}$. Значения этих элементов находятся диф-

ференцированием соотношения (4) по φ_{p-1} , φ_p и φ_{p+1} для каждого p -го элемента разбиения.

Однородная система уравнений (5) имеет ненулевое решение только в том случае, если определитель матрицы равен нулю. Обнулив определитель матрицы СЛАУ, найдем искомое значение постоянной распространения γ .

Решение задачи было построено таким образом, что каждому нанослою в составе МНСЭП соотносилось одна область разбиения. Зависимость диэлектрической проницаемости от концентрации бария в BSTO принята по модели [4]. При толщине слоя в несколько десятков нанометров это гарантирует высокую точность решения методом конечных элементов. Область подложки и свободная область были аппроксимированы неравномерным разбиением таким образом, чтобы по возможности точнее учесть эффект нарастания электрического поля на границах МНСЭП. Опустив вычислительные проблемы, можно сказать, что погрешность метода конечных элементов снижается при увеличении числа элементов разбиения. Поэтому разумная аппроксимация электрического и магнитного полей, подчиняющихся уравнению (1), позволила построить численную модель с размерностью СЛАУ 50×50 , на основе которой получены результаты с высокой точностью, оцениваемой по схождению численных результатов.

Результаты решения. Далее приведены результаты расчетов постоянной распространения на частоте 30 ГГц в прямоугольном волноводе с поперечным сечением 7.2×3.4 мм для трех-, девяти- и одиннадцатислойных МНСЭП толщиной 1 мкм на подложке толщиной 0.5 мм с $\epsilon = 10$. Параметры слоев МНСЭП приведены в таблице, где p – номер слоя; d_p – его толщина; x_p – координата его левой границы.

На рис. 3 приведены зависимости постоянной распространения от температуры при двух значениях напряженности управляющего поля E для указанных МНСЭП, образованных наноразмерными слоями с

p																E , В/мкм	Номер кривой на рис. 3							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	мкм													
d_1	x_1	d_2	x_2	d_3	x_3	d_4	x_4	d_5	x_5	d_6	x_6	d_7	x_7	d_8	x_8	d_9	x_9	d_{10}	x_{10}	d_{11}	x_{11}			
0.6	0.4	0.2	0.7	0.2	1.0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	1
0.6	0.4	0.2	0.7	0.2	1.0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100	2
0.05	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.15	0.5	0.1	0.6	0.05	0.7	0.1	0.8	0.15	0.9	0.01	1.0	–	–	–	–	0	3	
0.05	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.15	0.5	0.1	0.6	0.05	0.7	0.1	0.8	0.15	0.9	0.01	1.0	–	–	–	–	100	4	
0.05	0.0	0.05	0.1	0.05	0.2	0.1	0.3	0.4	0.4	0.05	0.5	0.1	0.6	0.05	0.7	0.05	0.8	0.05	0.9	0.05	1.0	0	5	
0.05	0.0	0.05	0.1	0.05	0.2	0.1	0.3	0.4	0.4	0.05	0.5	0.1	0.6	0.05	0.7	0.05	0.8	0.05	0.9	0.05	1.0	100	6	

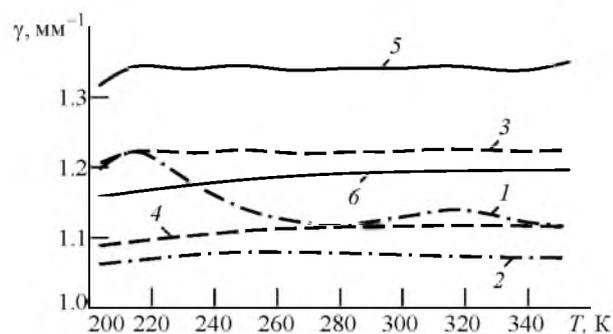


Рис. 3

концентрационной зависимостью бария. Из рисунка очевидна температурная стабильность постоянной распространения. Численные результаты, отображенные на рис. 3, близки к экспериментальным результатам, полученным в ходе исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / И. Г. Мироненко, А. А. Иванов, А. А. Семенов, С. Ф. Карманенко, И. А. Назаров. СПб: Элмор, 2007. 161 с.

2. Ahmed A., Goldhorpe I. A., Khandani A. K. Electrically tunable materials for microwave applications // Applied Physics Reviews 2. 2015. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4906255> (дата обращения: 25.12.2017).

3. Пат. RU 2443042 С1. МПК H01P 3/08 (2006.01). Щелевая линия / И. Г. Мироненко, А. А. Иванов, С. Ф. Карманенко. Статья поступила в редакцию 14 декабря 2017 г.

На основании результатов численного анализа электродинамической модели основной моды прямоугольного волновода с МНСЭП $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, полученных в работе, сделан вывод о возможности температурной стабилизации фазовой скорости электромагнитной волны в широком температурном диапазоне 200...360 К (-60...+60 °С). Выбор количества нанослоев, их толщины и концентрационной зависимости определяется требуемой температурной зависимостью постоянной распространения. Тем самым доказана перспективность использования МНСЭП в устройствах СВЧ с электрическим управлением в широком диапазоне температур.

маненко, А. А. Семенов, П. Ю. Белявский. Оpubл. 20.02.2012. Бюл. № 5.

4. Щелевая линия на основе нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок / И. Г. Мироненко, А. А. Иванов, А. А. Семенов, Д. В. Велькин // Радиотехника. 2012. № 7. С. 117–122.

5. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / пер. с англ. С. Н. Хотяинцева. М.: Мир, 1986. 229 с.

Для цитирования: Мироненко И. Г., Иванов А. А. Температурная стабилизация фазовой скорости электромагнитной волны в прямоугольном волноводе с многослойной нанокompозитной сегнетоэлектрической пленкой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6. С. 36–40.

Мироненко Игорь Германович – доктор технических наук (1981), профессор (1982) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки и техники РФ (1998). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – антенны, устройства СВЧ и их технологии. E-mail: eltech-mit-mig@yandex.ru

Иванов Аркадий Анатольевич – кандидат технических наук (2003), доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – антенны, устройства СВЧ и их технологии. E-mail: aai2@yandex.ru

I. G. Mironenko, A. A. Ivanov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Temperature Stabilization of Electromagnetic Wave Phase Velocity in Rectangular Waveguide with Layered Nanocomposite Ferroelectric Film

Abstract: A solution is obtained for propagation constant of electromagnetic wave fundamental mode in straight-angle waveguide with the cross section partially filled with multilayer nanocomposite ferroelectric film (MNESEP) on a dielectric substrate. The numerical model is based on the scalar form of the finite element method reduced to a homogeneous system of linear algebraic equations with respect to nodal values of the wave scalar for one-dimensional approximation. The nanolayer dielectric properties are determined by barium concentration dependence in composition of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ solid solution. A calculation program for several dozens of elements of partition along the wide wall of a rectangular waveguide is developed. The results of computer modeling for MNESEP with different number of layers and concentration dependences of barium are given, which allow to stabilize the propagation constant over a wide temperature range.

Keywords: Multilayer Nanocomposite Ferroelectric Film, Ferroelectric Structures at Ultra-High Frequencies, Technology of Films Formation of Barium–Strontium Titanate

REFERENCES

1. Mironenko I. G., Ivanov A. A., Semenov A. A., Karmanenko S. F., Nazarov I. A. *Segnetoelektricheskie plenki i ustroystva na sverkh- i kraine vysokikh chastotakh* [Ferroelectric Films and Devices at Super- and Extremely High Frequencies]. SPb, *Elmor*, 2007, 161 p. (In Russian)
2. Ahmed A., Goldhorpe I. A., Khandani A. K. Electrically Tunable Materials for Microwave Applications. *Applied Physics Reviews* 2. 2015. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.4906255> (accessed: 25 December 2017).
3. Mironenko I. G., Ivanov A. A., Karmanenko S. F., Semenov A. A., Belyavskii P. Yu. *Shchelevaya liniya* [Slit line]. Patent RF, no. 2443042, 2012. (In Russian)
4. Mironenko I. G., Ivanov A. A., Semenov A. A., Velkin D. V. Slit Line Based on Nanocomposite Ferroelectric Films. *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering]. 2012, no. 7, pp. 117–122. (In Russian)
5. Silvester P. P., Ferrari R. L. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983, 494 p.

Received December, 14, 2017

For citation: Mironenko I. G., Ivanov A. A. Temperature Stabilization of Electromagnetic Wave Phase Velocity in Rectangular Waveguide with Layered Nanocomposite Ferroelectric Film. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 6, pp. 36–40. (In Russian)

Igor G. Mironenko – D.Sc. in Engineering (1981), Professor (1982) of the Department of Micro Radioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation (1998). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: antennas, microwave devices and their technologies.
E-mail: eltech-mit-mig@yandex.ru

Arkadiy A. Ivanov – Ph.D. in Engineering (2003), Associate Professor of the Department of Micro Radioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: antennas, microwave devices and their technologies.
E-mail: aai2@yandex.ru
