

УДК 621.372.851.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

АХМЕД АЛИ АБДУЛЛАХ АЛЬ-ДИЛАМИ, И.А. ВРУБЛЕВСКИЙ,
Е.В. ЧЕРНЯКОВА, В.Х. ВИДЕКОВ*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

**Технический университет –София
бул. К. Охридски, 8, г. София, 1000, Болгария*

Поступила в редакцию 24 июня 2014

Приведены результаты компьютерного моделирования и изучения спектров отражения в диапазоне частот 7...13 ГГц для резонансных диэлектрических структур, состоящих из ниобата лития и анодного оксида алюминия с напыленной пленкой нихрома.

Ключевые слова: резонансная структура, электромагнитный экран, коэффициент отражения, анодный оксид алюминия.

Введение

Эффективным способом для снижения уровня электромагнитного излучения (ЭМИ) является использование радиопоглощающих материалов [1]. Как показано в [2], создание поглотителя ЭМИ с минимальной толщиной может быть реализовано только с использованием многослойной структуры. Поэтому разработка слоистых поглотителей ЭМИ, имеющих минимальный уровень отражения в заданном диапазоне частот является актуальной технической задачей.

В работе рассчитывались и экспериментально изучались характеристики отражения резонансной структуры, состоящей из ниобата лития (LiNbO_3) и анодного оксида алюминия (Al_2O_3) с напыленной пленкой нихрома. Выбор ниобата лития (верхний слой) обусловлен его высокой диэлектрической проницаемостью, $\epsilon \approx 38$ [3], что необходимо для создания резонансной диэлектрической структуры. В качестве нижнего слоя с низкой диэлектрической проницаемостью использовался анодный оксид алюминия, ϵ которого составляет 8 [4, 5].

Методика эксперимента

Для получения пленок нанопористого оксида алюминия использовали алюминиевую фольгу (99,99 % чистоты) толщиной 100 мкм (AlfaAesar). Анодирование алюминия проводили в 0,3 М водном растворе щавелевой кислоты в гальваностатическом режиме (напряжение на участке стационарного роста 60 В). После формирования анодного оксида алюминия заданной толщины остаточный слой алюминия удаляли в селективном травителе на основе CuCl_2 и HCl .

На одну из сторон пористого оксида алюминия методом ионно-лучевого испарения наносили слои нихрома с удельным поверхностным сопротивлением 12,4 Ом/□. Пластины ниобата лития имели толщину 1,2 мм, пластины нанопористого оксида алюминия – 70,0 мкм. Характеристики исследуемых резонансных структур в диапазоне частот

7...13 ГГц определяли с помощью панорамного измерителя ослабления и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) Я2Р-67. При измерениях образцы зажимали между фланцами волноводов прибора. Такой способ регистрации спектров при малой толщине образцов считали эквивалентным использованию измерительной ячейки.

Моделирование характеристик отражения резонансных диэлектрических структур

Для компьютерного моделирования характеристик отражения ЭМИ многослойной структурой в области полуволнового резонанса использовалась специальная программа для расчета отражающей способности пленочных структур, содержащих до 5 слоев в среде Excel. Данная программа, построенная на основе рекуррентного метода, разработана на кафедре электронной техники и технологии БГУИР. Методика такого моделирования описана в работах [6, 7]. Таблицы с данными, вводимыми в программу, и расчетными коэффициентами представлены на рис. 1.

1	Лямбда min, mm	20				
	Лямбда max, mm	50				
	Шаг	0,375				
	Угол падения, град	0				
	Air 1	sloy 2	sloy 3	sloy 4	Subst 5	
2	n	1,00	9,00	2,82	450,00	1
	Коеф поглощения	0,0000	0,0500	0,0500	0,5000	0,0000
	h, mm		1,0	0,070	0,0005	
	n-k	1,00	9,00	2,82	450,00	1,00
	k-n	0,0000	0,0500	0,0500	0,5000	0,0000
		State 12	State 23	State 34	State 45	
	delta	3,1416	0	3,1416	0	
	COS delta					
	delta	-1	1	-1	1	
	SIN delta	-7,3E-06	0	-7,35E-06	0	
	delta'	0	0	0	0	
R	действ	-0,8	0,522805219	-0,987544	0,995565	
	мнимая	-0,001	-0,00442306	0,000206	4,92E-06	
R^2		0,640009	0,273344861	0,975244	0,99115	
Модуль R		0,800006	0,522823929	0,987544	0,995565	
Sigma	действ	0,199995	1,522805219	0,012456	1,995565	
	мнимая	-0,001	-0,00442306	0,000206	4,92E-06	
Sigma^2		0,039999	2,3189553	0,000155	3,982281	
Модуль Sigma		0,199998	1,522811643	0,012457	1,995565	

Рис. 1. Таблица с двумя группами данных (1 и 2), вводимыми в программу, и расчетными коэффициентами

Как видно из рис. 1, данные, объединенные в группу 1, задают исследуемый диапазон длин волн. Это такие значения, как минимальная и максимальная длина волны, шаг дискретности. Следующие данные, объединенные в группу 2, характеризуют оптические параметры каждого отдельного слоя. Это значения коэффициента преломления n , коэффициента поглощения k и значение толщины слоя h .

Пример расчета коэффициентов отражения и прозрачности для резонансной структуры с 3-мя слоями в диапазоне длин волн 2,0–3,0 см с параметрами первого слоя $n = 9,0$; $k = 0,05$; $h = 1,0$ мм, второго слоя $n = 2,82$; $k = 0,05$; $h = 0,07$ мм, и третьего слоя $n = 450,0$; $k = 0,5$; $h = 0,0005$ мм показан на рис. 2. Выбранным значениям оптических параметров трехслойной структуры отвечает структура со следующими материалами отдельных слоев: ниобат лития, оксид алюминия и пленка нихрома. На рис. 3 показана модельная конструкция предложенной трехслойной резонансной структуры. Как видно из рис. 2, на длине волны $\lambda = 3,2$ см (9,4 ГГц) частотная зависимость спектра отражения (R) для трехслойной структуры имеет отчетливый резонансный минимум.

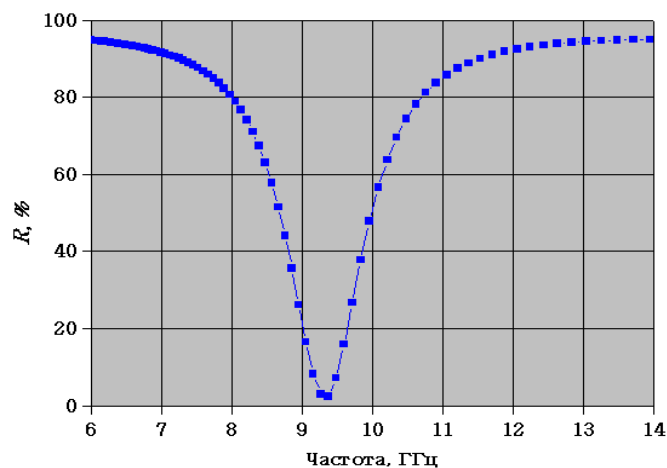


Рис. 2. Графическое представление результатов расчета коэффициентов отражения (R) для выбранной резонансной структуры в компьютерной программе

В работе моделировали спектры отражения трехслойной резонансной структуры, содержащей слои ниобата лития, анодного оксида алюминия и тонкой пленки нихрома в зависимости от толщины ниобата лития в частотном диапазоне 7...13 ГГц. Толщину ниобата лития выбирали равной 0,7; 0,9; 1,2; 1,5 или 1,7 мм, для оптических постоянных задавали следующие значения: $n = 9,0$ и $k = 0,05$.

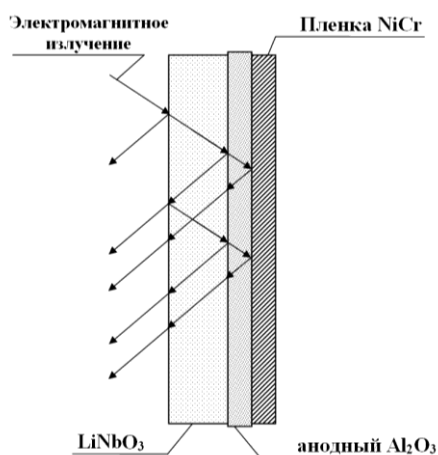


Рис. 3. Модельная конструкция резонансного диэлектрического экрана ЭМИ с тонким слоем нихрома

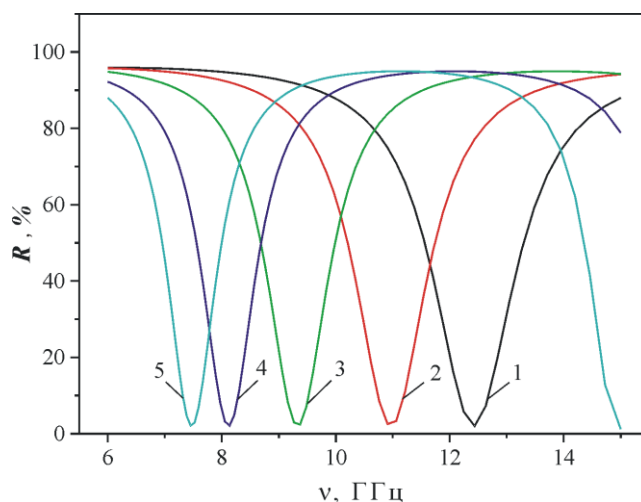


Рис. 4. Результаты расчета спектров отражения заданной многослойной структуры для различной толщины слоя с высоким ϵ . 1 – толщина 0,7 мм; 2 – толщины 0,9 мм; 3 – толщина 1,2 мм; 4 – толщина 1,5 мм; 5 – толщина 1,7 мм

Толщина анодного оксида алюминия была равной 0,07 мм, для оптических постоянных использовали следующие значения $n = 2,82$ и $k = 0,05$. Для пленок нихрома толщина – 0,0005 мм, оптические постоянные $n = 450,0$ и $k = 0,5$.

Как следует из результатов компьютерного моделирования, представленных на рис. 4, все спектры отражения имеют минимум коэффициента отражения на длине волны равной полуволновому резонансу. С увеличением толщины ниобата лития в составе резонансной структуры значение положения минимума коэффициента отражения смещается в низкочастотную область. Так для толщины ниобата лития 0,7 мм резонансный минимум коэффициента отражения наблюдается на частоте 12,4 ГГц, для 0,9 мм – на частоте 11,0 ГГц, для 1,2 мм – на частоте 9,2 ГГц, для 1,5 мм – на частоте 8,1 ГГц и для 1,7 мм – на частоте 7,5 ГГц.

Результаты компьютерного моделирования (рис. 4) хорошо согласуются с экспериментальными результатами для спектров отражения резонансной структуры с ниобатом лития толщиной 1,2 мм и пленкой нихрома с удельным поверхностным сопротивлением 10 Ом/□, напыленной на анодный оксид алюминия [8].

Необходимо отметить, что помимо влияния толщины ниобата лития, для конструкции многослойного электромагнитного экрана важно также знать, как влияет толщина внутреннего слоя анодного Al_2O_3 на положение резонансного минимума на спектре отражения. Поэтому изучили влияние толщины внутреннего слоя Al_2O_3 на спектр отражения резонансной структуры на примере двух толщин: 70 и 140 мкм. На рис. 5 приведены результаты расчета частотных зависимостей коэффициента отражения для электромагнитного экрана с двумя толщинами анодного Al_2O_3 : 70 и 140 мкм. Как видно из рис. 05, увеличение толщины внутреннего слоя Al_2O_3 сдвигало положение резонансного минимума незначительно, от 9,2 ГГц до 9,1 ГГц, без изменения его амплитуды в точке резонанса.

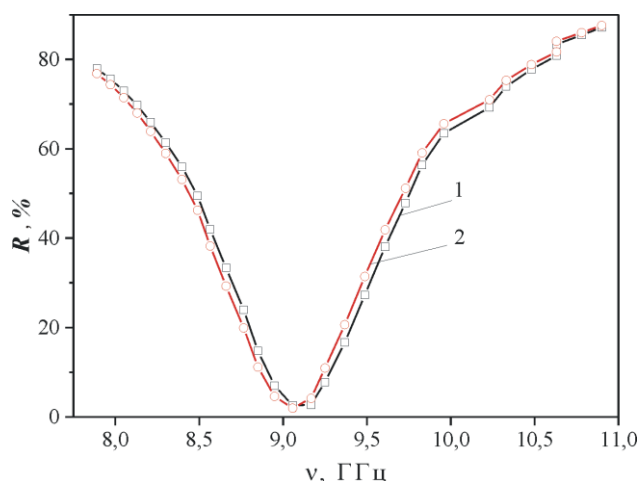


Рис. 5. Расчетные частотные зависимости коэффициентов отражения (R) для заданной многослойной структуры с различной толщиной анодного Al_2O_3 . 1 – Al_2O_3 , толщина 70 мкм, 2 – Al_2O_3 , толщина 140 мкм

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Частотный спектр отражения образца имеет две симметричные области уменьшения $K_{отр}$ с минимумом посередине при 9,2 ГГц ($K_{отр} = -9,7$ дБ). Структура поглотителя: $LiNbO_3$, толщина 1,2 мм, анодный Al_2O_3 , толщина 70 мкм, слой $NiCr$ 12,4 Ом/□, рис. 6.

Известно, что если коэффициент преломления верхнего диэлектрического слоя больше коэффициента преломления нижнего слоя (исследуемая структура), то в такой системе наблюдается высокий коэффициент отражения. В то же время, в спектрах отражения таких диэлектрических многослойных структур на определенных частотах (кратным целому числу длин полуволн) возникают резонансные минимумы коэффициента отражения из-за эффекта многократного отражения от различных слоев. Поэтому можно сделать вывод, что минимум на спектре отражения образца является резонансным. Изучение частотного минимума отражения ($K_{отр}$) показало, что резонансный минимум при 9,2 ГГц на спектре отражения относится к полуволновому резонансу.

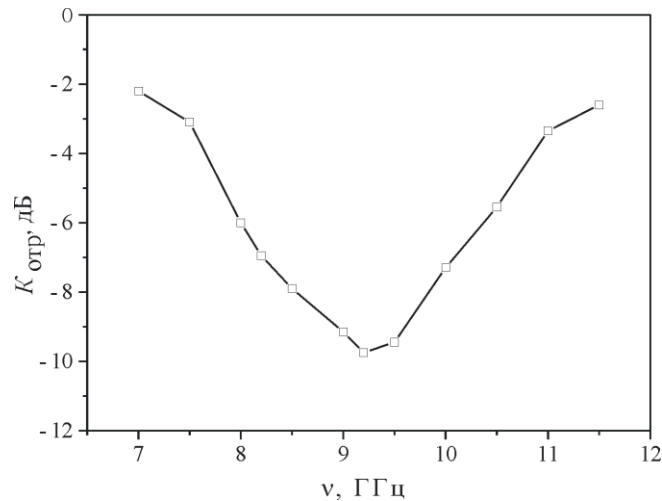


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения ($K_{отр}$) для резонансной структуры $\text{LiNbO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ с тонким слоем никрома

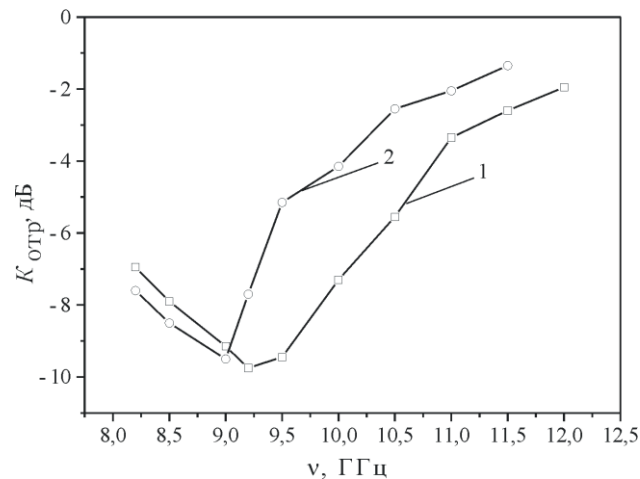


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициентов отражения ($K_{отр}$) для резонансной структуры $\text{LiNbO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ с тонким слоем никрома с различной толщиной анодного Al_2O_3 . Структура поглотителя: LiNbO_3 , толщина 1,2 мм, анодный Al_2O_3 , толщина 70 мкм (1) или 140 мкм (2), слой NiCr 12,4 Ом/□

Для разработки конструкций электромагнитных экранов важно знать, как влияет толщина внутренней пластины анодного Al_2O_3 на положение резонансного минимума на спектре отражения. Увеличение толщины внутреннего слоя Al_2O_3 незначительно сдвигает положение резонансного минимума, от 9,2 ГГц до 9,0 ГГц, без изменения его амплитуды (рис. 7). Этот также хорошо согласуется с данными компьютерного моделирования (рис. 5). Полученный результат можно объяснить тем, что оптическая (волновая) толщина слоя LiNbO_3 (произведение nD) значительно больше оптической толщины слоя анодного Al_2O_3 , и поэтому толщина слоя LiNbO_3 в первую очередь влияет на фазовые условия для возникновения резонанса.

Заключение

Компьютерное моделирование электромагнитных характеристик многослойной резонансной структуры на основе оптических параметров и толщин слоев позволяет достаточно точно определить положение резонансного минимума коэффициента отражения на длине волны равной полуволновому резонансу.

Выбором толщины ниобата лития в резонансной структуре ниобат лития–анодный оксид алюминия–пленка никрома можно изменять положение резонансного минимума коэффициента отражения и за счет этого управлять электромагнитными характеристиками.

Положение резонансного минимума коэффициента отражения в диапазоне частот

7,5–12,4 ГГц регулируется путем изменения толщины ниобата лития от 1,7 до 0,7 мм в составе многослойной резонансной структуры.

Электромагнитный экран с трехслойной структурой и резонансом при 9,2 ГГц на частотной зависимости спектра отражения ЭМИ имеет значение коэффициента отражения –9,7 дБ в точке резонанса.

COMPUTER SIMULATION AND INVESTIGATION OF REFLECTANCE CHARACTERISTICS OF RESONANCE INSULATOR STRUCTURES FOR SHIELDS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

AHMED ALI ABDULLAH AL-DILAMI, I.A. VRUBLEVSKY,
K.V. CHERNYAKOVA, V.H. VIDEKOV

Abstract

The results of computer simulation and investigation of reflectance spectra of resonance in the range of 7...13 GHz for insulator structures consisted of lithium niobate and anodic alumina with thin nichrome film are presented.

Список литературы

1. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В. и др.* // Докл. БГУИР. 2004. № 3. С. 152–167.
2. *Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А.* // ФІП ФІП PSE. 2003. Т. 1. № 2. С. 161–173.
3. *Кузьминов Ю.С.* Электрооптический и нелинейно оптический кристалл ниобата лития. М., 1987.
4. *Vrublevsky I., Jagtinas A., Schreckenbach J. et al.* / Electrochim. Acta. 2007. Vol. 53. P. 300–304.
5. *Видеков В., Цанева Б., Банкова А. и др.* // Научни известия на НТСМ, Болгария. 2014. Т. XXII. № 4 (153). С. 374–377.
6. *Крылова Т.Н.* Интерференционные покрытия. Л., Машиностроение, 1973.
7. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. Учеб. Пособие для ун-тов. Изд. 2-е, испр. и доп. М. Высш. школа, 1978.
8. *Врублеский И., Чернякова К., Видеков В. и др.* // Научни известия на НТСМ, Болгария. 2014. Т. XXII. № 4 (153). С. 168–173.