

УДК 621.372.851.3

## ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С НАНОПОРИСТЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

Ахмед Али Абдуллах Аль-Дилами, И.А. Врублевский,  
К.В. Чернякова, Г.А. Пухир

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*

## ABSORPTION OF ENERGY OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN INTERFERENCE INSULATED STRUCTURES WITH NANOPOROUS ALUMINA

Ahmed A. Al-Dilami, I.A. Vrublevsky, K.V. Chernyakova, G.A. Pykhir

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

Представлены спектры отражения и пропускания электромагнитного излучения двухслойными интерференционными структурами, состоящими из пластины ниобата лития и мембраны нанопористого оксида алюминия с напыленной пленкой нихрома. Исследовано влияние толщины металлического слоя нихрома в области четвертьволнового резонанса на коэффициент отражения предложенной двухслойной интерференционной структуры в частотном диапазоне 8–12 ГГц.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, резонансное поглощение, коэффициент отражения, многослойная интерференционная структура, нанопористый оксид алюминия.

Transmittance and reflectance spectra of electromagnetic radiation by double-layer interference structures made of lithium niobate plate and nanoporous alumina membrane with evaporated thin nichrome film were studied. In the quarter-wave range the effect of nichrome film thickness on reflective characteristics of the proposed double-layer interference structures was also established in the frequency range of 8–12 GHz.

**Keywords:** electromagnetic radiation, resonant absorption, reflection coefficient, multi-layer interference structure, nanoporous alumina.

### Введение

Работа бытовых радиоэлектронных устройств, окружающих современного человека, сопровождается электромагнитным излучением, высокий уровень которого может негативно влиять не только на работу самих радиоэлектронных устройств, но и на организм человека. Эффективным способом снижения уровня электромагнитного излучения (ЭМИ) является использование радиопоглощающих покрытий с низким коэффициентом отражения [1]. Такие покрытия позволяют обеспечить электромагнитную совместимость радиоэлектронного оборудования и защиту организма человека от неблагоприятного воздействия ЭМИ [2].

Одними из эффективных поглотителей ЭМИ являются многослойные структуры резонансного типа, использующие частичное или полное гашение отраженного от поверхности поглотителя излучения [3], [4]. Многослойные интерференционные структуры (МИС) состоят из набора слоев различных диэлектрических материалов с толщинами меньше, чем длина волны излучения. Поэтому применение такой конструкции позволяет значительно уменьшить толщину и, как результат, уменьшить вес и размеры поглотителя излучения. Принцип действия МИС

основан на интерференционных эффектах, возникающих внутри такой структуры при многократном отражении волны от границ раздела слоев с различными волновыми параметрами. Материалы отдельных слоев и их толщины определяют спектральную характеристику структуры. Для усиления поглощения ЭМИ в конструкции МИС могут быть использованы диэлектрические слои с напыленными тонкими пленками металла [5]. Надо отметить, что теоретическое описание работы МИС достаточно полно описано в литературе [6], тогда как, экспериментальные характеристики МИС практически отсутствуют и до настоящего времени предложено ограниченное число материалов для их создания [3], [4]. По-видимому, это связано с техническими сложностями получения тонких диэлектрических слоев толщиной порядка 50–100 мкм.

В качестве тонкого диэлектрического слоя МИС в работе предложено использовать мембраны нанопористого оксида алюминия, современные процессы получения которого, такие как электрохимическое окисление алюминия, позволяют формировать слои  $Al_2O_3$  толщиной 10–200 мкм. Пористый оксид алюминия имеет регулярную упорядоченную ячеисто-пористую структуру, т. е. является локально неоднородным

материалом, в котором диэлектрическая постоянная в направлении вдоль поверхности периодически скачкообразно изменяется от 8 (стенки пор) до 1 (каналы пор) и от 1 до 8 [7]. Поэтому нанопористый оксид алюминия представляет большой интерес для СВЧ-техники и может быть использован в конструкциях градиентных радиопоглощающих экранов.

В работе изучали спектры отражения и ослабления ЭМИ двухслойной интерференционной структурой, состоящей из пластины ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и мембраны нанопористого оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с напыленной пленкой никрома. Исследовали также влияние толщины (удельного поверхностного сопротивления,  $\rho_s$ ) металлического слоя никрома в области четвертьволнового резонанса на коэффициент отражения предложенной структуры. Выбор ниобата лития обусловлен его высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon \approx 38$  [8]), что необходимо для создания градиентной структуры с изменяющейся  $\epsilon$ . Диэлектрическая проницаемость мембраны нанопористого оксида алюминия составляет 8 [9].

### 1 Экспериментальная часть

Для получения пленок нанопористого оксида алюминия на поверхности алюминия в экспериментах использовали алюминиевую фольгу (99,99 % чистоты) толщиной 100 мкм (Alfa-Aesar), из которой вырезали флажки, поверхность которых обезжировали: травили в 1,5 М растворе NaOH при 353 К в течение 15 с, потом в течение 120 с обрабатывали в 1,5 М растворе  $\text{HNO}_3$  (для нейтрализации щелочи). Затем образцы высушивали на воздухе, погружали в 0,3 М водный раствор щавелевой кислоты и анодировали в гальваностатическом режиме (напряжение на участке стационарного роста составляло 60 В). Процесс проводили в двухэлектродной ячейке объемом 0,25 л при постоянной температуре  $(291,0 \pm 0,1)$  К (термостат F 12 (Julabo)) с использованием источника постоянного тока Б5–49 (РИАП). В качестве катода использовали платину. Растворы интенсивно перемешивали с помощью магнитной мешалки, скорость вращения магнита была приблизительно 2 об / с. Образцы после анодирования промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе. Для получения мембран нанопористого оксида алюминия остаточный слой алюминия удаляли в селективном травителе на основе  $\text{CuCl}_2$  и  $\text{HCl}$ . Поверхность полученных мембран нанопористого оксида алюминия исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 840A (JEOL).

На одну из сторон мембран пористого оксида алюминия методом ионно-лучевого испарения наносили слои никрома разной толщины, имеющие поверхностное сопротивление 295; 55,4; 27,4 и 12,4 Ом/кв. Поверхностное сопротивление пленок никрома измеряли на установке ИУС–2М.

Толщину образцов измеряли с помощью механического микрометра МК–50. Пластины ниобата лития имели толщину 1,0 мм, мембраны нанопористого оксида алюминия –  $70 \pm 5$  мкм.

Экранирующие характеристики в диапазоне частот 8–12 ГГц определяли с помощью панорамного измерителя ослабления и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) Р2-61 с индикатором Я2Р-67; образцы зажимали между фланцами волноводов прибора. Такой способ регистрации спектров при малой толщине образцов считали эквивалентным использованию измерительной ячейки. В случае измерения КСВН с отражающей поверхностью непосредственно за исследуемым образцом устанавливали металлическую пластину. Полученные значения коэффициента передачи по абсолютной величине совпадали с ослаблением ЭМИ. Коэффициент отражения ЭМИ ( $K_{\text{отр}}$ ) рассчитывали по формуле:

$$K_{\text{отр}} = 20 \lg \frac{\text{КСВН} - 1}{\text{КСВН} + 1},$$

где

$$\text{КСВН} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma},$$

$\Gamma$  – модуль коэффициента отражения по напряжению:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}}},$$

где  $U_{\text{отр}}$ ,  $U_{\text{пад}}$  – соответственно амплитуды напряжений отраженной и падающей волн, зафиксированные детектором.

### 2 Морфология поверхности мембран нанопористого оксида алюминия

Нанопористый оксид алюминия, сформированный в 0,3 М растворе щавелевой кислоты при 60 В, имеет достаточно регулярную ячеистопористую структуру с порами диаметром приблизительно 42 нм (рисунок 2.1).

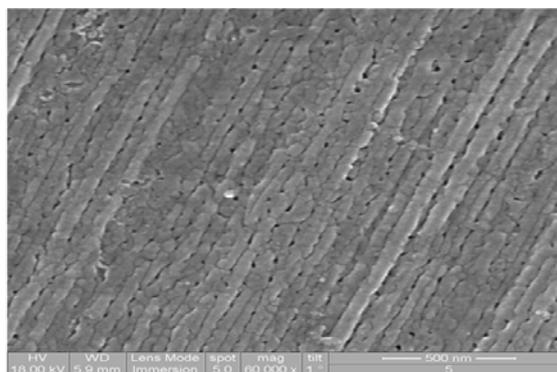


Рисунок 2.1 – Электронный снимок поверхности мембраны нанопористого оксида алюминия, сформированной в 0,3 М растворе щавелевой кислоты при 60 В

### 3 Спектры отражения ЭМИ двухслойной структурой $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый $\text{Al}_2\text{O}_3$

В серии экспериментов без использования металлического отражателя, пластина ниобата лития имела достаточно высокое значение коэффициента отражения ЭМИ,  $K_{\text{отр}} \approx -0,5$  дБ (рисунок 3.1, кривая 1) и, следовательно, плохо согласованное волновое сопротивление. Двухслойная структура,  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , также характеризовалась высоким коэффициентом отражения ЭМИ, приблизительно равным  $-0,5$  дБ (кривая 2). Нанесение тонких пленок никрома на поверхность мембраны нанопористого оксида алюминия позволило снизить  $K_{\text{отр}}$ , что улучшило характеристики двухслойной структуры (кривые 3–6). Наиболее значительное влияние на отражающие характеристики структур оказали нанесенные пленки никрома с поверхностным сопротивлением 27,4 и 12,4 Ом/□, в этих случаях (кривые 5–6)  $K_{\text{отр}}$  снизился соответственно до  $-3,5$  и  $-7$  дБ.

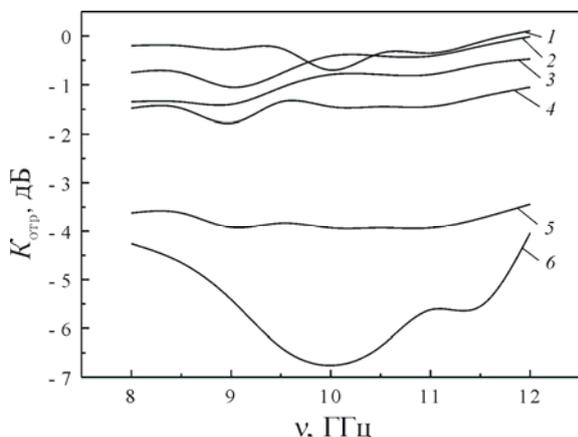


Рисунок 3.1 – Спектры отражения ЭМИ двухслойной структурой  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с напыленными пленками никрома с различным  $\rho_s$  (без использования металлического отражателя);  
 1 –  $\text{LiNbO}_3$ ; 2 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  
 3 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 295 Ом/□; 4 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 55,4 Ом/□;  
 5 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 27,4 Ом/□; 6 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 12,4 Ом/□

Для структуры с напыленной пленкой никрома с  $\rho_s = 12,4$  Ом/□ в спектре отражения появилась полоса поглощения, обусловленная четвертьволновым резонансом. Резонансный минимум коэффициента отражения на частоте 10 ГГц достигал  $-7$  дБ (см. рисунок 3.1, кривая 6).

В серии экспериментов с использованием металлического отражателя отражающие характеристики исследуемых двухслойных структур существенно меняются (рисунок 3.2). Как видно из рисунка 3.1, на всех спектрах присутствует

четкий резонансный пик поглощения на частоте 9,5 ГГц. Причем, как и для серии экспериментов без металлического отражателя (рисунок 3.1) минимальное значение  $K_{\text{отр}}$  имели двухслойные структуры с никромовой пленкой на поверхности мембраны нанопористого оксида алюминия. Использование пленок никрома с удельным поверхностным сопротивлением 27,4 и 12,4 Ом/□ позволило снизить коэффициенты отражения структур до соответственно  $-7,5$  и  $-8,5$  дБ (рисунок 3.2, кривые 5–6).

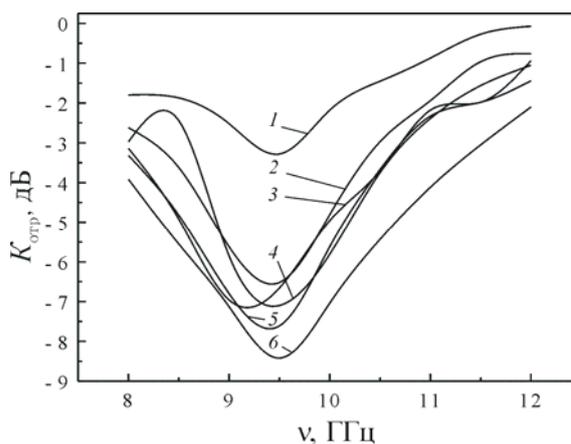


Рисунок 3.2 – Спектры отражения ЭМИ двухслойной структурой  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с напыленными пленками никрома с различным  $\rho_s$  (с использованием металлического отражателя);  
 1 –  $\text{LiNbO}_3$ ; 2 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  
 3 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 295 Ом/□; 4 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 55,4 Ом/□;  
 5 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 27,4 Ом/□; 6 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой никрома 12,4 Ом/□

### 4 Спектры ослабления ЭМИ двухслойной структурой $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый $\text{Al}_2\text{O}_3$

Как видно из рисунка 4.1 (кривые 3–4), уменьшение удельного поверхностного сопротивления напыленной пленки никрома до 27,4 Ом/□ не оказало заметного влияния на величину ослабления ЭМИ. Двухслойная структура с пленкой никрома и без нее, так же как и пластина ниобата лития ослабляли ЭМИ до 13–14 дБ.

Использование в конструкции МИС пленок никрома с удельным поверхностным сопротивлением 27,4 и 12,4 Ом/□ позволило повысить ослабление ЭМИ соответственно до 20 и 22 дБ (рисунок 4.1, кривые 5–6). Следует отметить, что уменьшение  $K_{\text{отр}}$  в структуре с напыленными пленками никрома с удельным поверхностным сопротивлением меньшим, чем 27,6 Ом/□ (рисунок 3.1, кривые 5–6) с одновременным увеличением ослабления (рисунок 4.1, кривые 5–6) свидетельствует о появлении процессов волновой интерференции и, как следствие, перераспределения

волновой энергии. В результате возникновения резонансного эффекта интерференционного поглощения волновой энергии, ослабление ЭМИ в двухслойной структуре при сохранении тех же геометрических размеров увеличивается от 13–14 до 20–22 дБ. Полученные характеристики позволяют применять двухслойные структуры  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с напыленными пленками нихрома вместо металлических экранов, что может существенно уменьшить коэффициент отражения ЭМИ без существенного ухудшения характеристики ослабления.

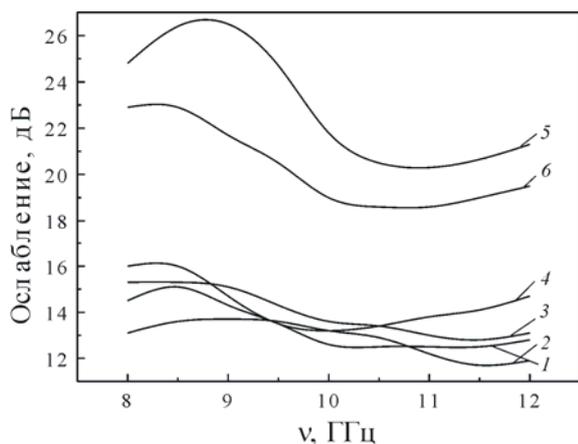


Рисунок 4.1 – Спектры ослабления ЭМИ двухслойной структурой  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с напыленными пленками нихрома с различным  $\rho_s$ ;  
 1 –  $\text{LiNbO}_3$ ; 2 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  
 3 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой нихрома 295 Ом/□; 4 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой нихрома 55,4 Ом/□;  
 5 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой нихрома 27,4 Ом/□; 6 –  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с пленкой нихрома 12,4 Ом/□

#### Заключение

Двухслойная структура, состоящая из пластины ниобата лития и мембраны нанопористого оксида алюминия с напыленной пленкой нихрома, может быть использована для создания интерференционных структур с резонансным поглощением энергии ЭМИ.

Напыление на поверхность нанопористого оксида алюминия пленок нихрома с удельным поверхностным сопротивлением менее 27,4 Ом/□ в двухслойной структуре  $\text{LiNbO}_3$ –нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводит к волновой интерференции и перераспределению волновой энергии. В результате в такой структуре коэффициент отражения ЭМИ заметно уменьшается с одновременным увеличением ослабления ЭМИ.

По сравнению с металлическими экранами использование МИС позволяет существенно уменьшить коэффициент отражения ЭМИ без существенного ухудшения характеристик ослабления, что является важным для обеспечения электромагнитной совместимости электронного оборудования. Результаты исследований могут быть полезны при создании компактных поглощающих структур, снижающих общий уровень ЭМИ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 2. – С. 196–209.

2. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2004. – № 3. – С. 152–167.

3. Резонансные эффекты полного интерференционного поглощения волновой энергии в тонких слабопоглощающих слоях / А.Н. Баскаков [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1976. – Т. 2, № 19. – С. 891–893.

4. Козарь, А.В. Распределение напряженности электрического поля в многослойных системах резонансного типа / А.В. Козарь, В.С. Колесников, Ю.А. Пирогов // Вестник московского университета, Физика, астрономия. – 1978. – Т. 9, № 1. – С. 78–86.

5. Резонансное отражение электромагнитного излучения от структур с нанометровыми металлическими слоями / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2006, – Т. 9, № 3, – С. 59–63.

6. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

7. Структура пленок пористого оксида алюминия, формируемых в электролитах на основе органических кислот / И.А. Врублевский [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – Т. 12, № 3. – С. 101–105.

8. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейно оптический кристалл ниобата лития / Ю.С. Кузьминов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 264 с.

9. Embedded space charge in porous alumina films formed in phosphoric acid / I. Vrublevsky [et al.] // Electrochimica Acta. – 2007. – Vol. 53. – P. 300–304.

Поступила в редакцию 27.02.14.