

Используя формулы (2), (5) и (6) получены следующие формулы для определения перемещений  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{P}{3mGJ\rho} (R_2^3 - R_1^3) \quad (P < P_{\text{фТ}}) \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{P}{3mGJ\rho} (R_{\text{фТ}}^3 - R_1^3) + \frac{\theta_{\text{фТ}}}{m} \left[ \frac{a_0}{2} (R_2^2 - R_{\text{фТ}}^2) + \frac{a_1 P}{3M_{\text{фТ}}} (R_2^3 - R_{\text{фТ}}^3) + \frac{a_2 P^2}{4M_{\text{фТ}}^2} (R_2^4 - R_{\text{фТ}}^4) \right] \quad (P_{\text{фТ}} \leq P \leq P^*) \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{P}{3mGJ\rho} (R_{\text{фТ}}^3 - R_1^3) + \frac{\theta_{\text{фТ}}}{m} \left[ \frac{a_0}{2} (R_*^2 - R_{\text{фТ}}^2) + \frac{a_1 P}{3M_{\text{фТ}}} (R_*^3 - R_{\text{фТ}}^3) + \frac{a_2 P^2}{4M_{\text{фТ}}^2} (R_*^4 - R_{\text{фТ}}^4) + \frac{b_0}{2} (R_2^2 - R_*^2) + \frac{b_1 P}{3M_{\text{фТ}}} (R_2^3 - R_*^3) \right] \quad (P^* \leq P \leq P^{**}) \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\theta_{\text{фТ}}}{m} \left[ \frac{a_0}{2} (R_*^2 - R_1^2) + \frac{a_1 P}{3M_{\text{фТ}}} (R_*^3 - R_1^3) + \frac{a_2 P^2}{4M_{\text{фТ}}^2} (R_*^4 - R_1^4) + \frac{b_0}{2} (R_2^2 - R_*^2) + \frac{b_1 P}{3M_{\text{фТ}}} (R_2^3 - R_*^3) \right] \quad (P^{**} \leq P \leq P^{***}) \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{\theta_{\text{фТ}}}{m} \left[ \frac{b_0}{2} (R_2^2 - R_1^2) + \frac{b_1 P}{3M_{\text{фТ}}} (R_2^3 - R_1^3) \right] \quad (P > P^{***}) \quad (11)$$

#### Список литературы

1. Лихачев В.А. и др. Эффект памяти формы. Изд-во ЛГУ, 1987, 216 с.
2. С. Абдрахманов. Деформация материалов с памятью формы при термосиловом воздействии. Бишкек, «Илим», 1991.
3. Пономарёв С.Д., Андреева Л.Е. Расчёт упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. – 326 с
4. Абдрахманов С.А., Асылбек Абдыжапар. Кручение вала в неупругой области деформирования. Известия КГТУ им. И.Раззакова, №30.Бишкек, 2013 – С. 86-88.

## ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЕ ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 0,7...17 ГГц

Волочко А.Т., Зеленин В.А., Марков Г.В., Нарушко Е.О.

ГНУ "Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси", Минск  
[lena-narushko@mail.ru](mailto:lena-narushko@mail.ru)

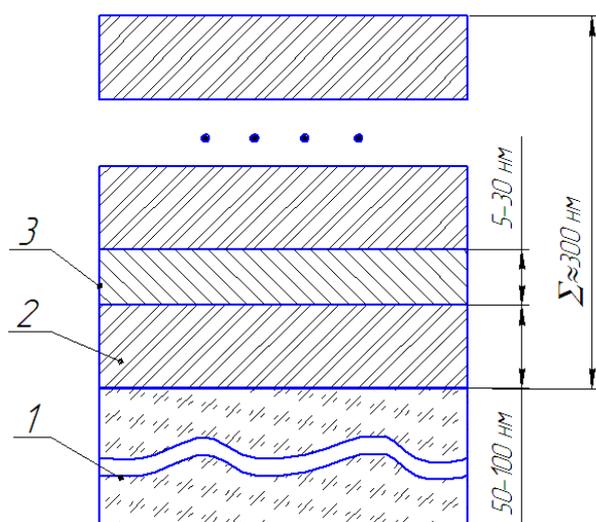
В настоящее время окружающий нас мир буквально пронизан электромагнитными волнами. Немало устройств излучают электромагнитные волны, которые оказывают воздействие на живые организмы, вносят изменения в работу особо чувствительных измерительных приборов, сильно усложняя получение достоверных данных. Электромагнитные излучения элементов компьютера могут послужить одним из каналов утечки информации. Принимая и декодируя электромагнитные излучения компьютера, можно получить информацию о базе данных компьютера, внести изменения и нарушить его работу. Для защиты от такого несанкционированного доступа все электронные системы и компьютеры должны иметь эффективные экранирующие покрытия, наносимые на поверхность пластмассового корпуса, а дисплей, обладая способностью экранирования электромагнитных

волн, одновременно должен давать возможность оператору видеть отображаемую на нем информацию, чем обусловлена необходимость получения прозрачных покрытий.

Применяемые в настоящее время экранирующие покрытия, наносимые на стекло, в подавляющем большинстве своём имеют пропускание в видимой области спектра 70-90 %, но их поверхностное электросопротивление более 10 Ом/кв, что приводит к низкой эффективности экранирования [1]. Так, например, ИТО-покрытие, применяемые в странах Евросоюза, СНГ, США, Японии, Китае, имеют низкие значения по экранирующим характеристикам от ЭМИ. Кроме того, при нанесении покрытия  $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$  необходима дополнительная операция отжига, а это неизбежно накладывает ограничения на выбор материала основы.

Исходя из этого, была поставлена задача путём уменьшения в 5–10 раз поверхностного электрического сопротивления наносимого покрытия повысить эффективность экранирования ЭМИ в широком диапазоне частот при одновременном обеспечении достаточно высокого коэффициента светопропускания (>50 %). Как следует из работ [2,4] для этих целей лучше всего подходят многослойные, состоящие из чередующихся слоёв металла и диэлектрика, покрытия. В качестве металлов для получения слоёв с высокой проводимостью можно использовать медь, алюминий, золото, серебро, молибден ( $\text{Ag } 6,25 \cdot 10^7$  См/м,  $\text{Cu } 5,81 \cdot 10^7$ ,  $\text{Au } 4,55 \cdot 10^7$ ,  $\text{Al } 3,7 \cdot 10^7$ ,  $\text{Mo } 1,85 \cdot 10^7$  См/м), а с высокой магнитной проницаемостью – никель, кобальт, железо ( $\text{Ni } 100-600$ ,  $\text{Co } 150$ ,  $\text{Fe } 500$ ). В качестве диэлектрических слоёв перспективны оксиды циркония, титана, алюминия, кремния, гафния, ниобия, тантала. Коэффициенты преломления этих оксидов не превышают 2,0 и они прозрачны в видимом диапазоне длин волн.

Результаты расчётов спектров пропускания и отражения многослойных покрытий металл (Cu, Ni) - диэлектрик ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , полученные с использованием специальных компьютерных программ (ML, Syntes и т.д.), позволили построить архитектуру многослойного, прозрачного в видимом диапазоне света экранирующего покрытия. Поверхностное сопротивление такого покрытия – не более 30 Ом/кв, пропускание света в диапазоне 500–600 нм – не менее 50 % и отражение – не более 5-7 %. Структура покрытия такая: стекло- $\text{ZrO}_2+\text{Ni}+\text{ZrO}_2+\text{Cu}+\text{Ni}+\text{ZrO}_2$ . Толщины слоёв Cu и Ni не превышает 20 нм, а толщина слоёв  $\text{ZrO}_2$  составляет примерно 70 нм, общая толщина покрытия – примерно 200–300 нм (рис. 1)



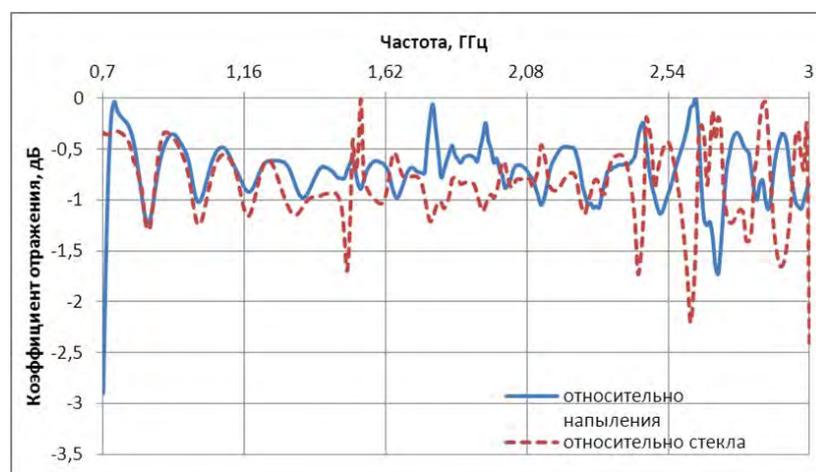
**Рис. 1.** Схема экрана ЭМИ прозрачного в видимой части спектра. 1 – стеклянная пластина; 2 – оксидный слой; 3 – металлический слой

Для измерения экранирующих характеристик данных покрытий использовался панорамный измеритель ослабления КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, который обеспечивает выделение и детектирование уровней падающей и отражённой волн электромагнитного излучения, прошедших и отражённых от образца. Для исследуемых образцов экспериментально были получены значения коэффициента передачи, который по абсолютной величине равен ослаблению ЭМИ, и коэффициента стоячей волны по напряжению, переведённого в коэффициент отражения в диапазоне частот 0,7–17 ГГц [4].

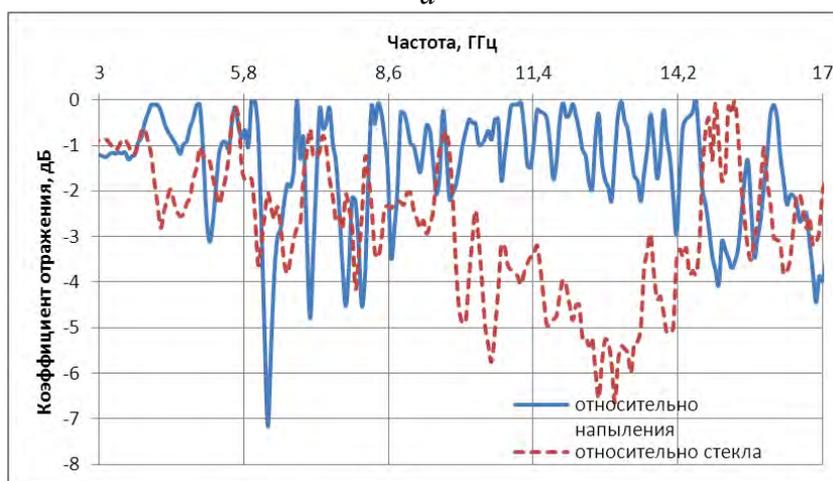
Зависимости коэффициента отражения и коэффициента передачи ЭМИ прозрачных экранов с разработанным многослойным покрытием от частоты в диапазоне 0,7..17 ГГц представлены на рисунках 2 и 3.

Как видно из рис. 2, коэффициент отражения для диапазона частот 0,7...3 ГГц находится в окрестности -1 дБ, для 3...17 ГГц – -3 дБ, опускаясь до -7 дБ для 6 ГГц, что в процентном выражении: 90 %, 70% и 44% соответственно. При этом отражение ЭМИ при облучении со стороны покрытия было больше, нежели со стороны стекла. Видимо, это связано с тем, что при взаимодействии электромагнитного поля с поверхностью металла, в последнем возникают индуцированные токи, которые в свою очередь создают вокруг себя наведенное электромагнитное поле, которое препятствует проникновению внешнего ЭМИ в толщу металла. В случае, когда ЭМИ исходит со стороны стекла, которое является диэлектриком с  $\epsilon = 7$ , что является приоритетным для поглощения электромагнитных волн.

Что касается коэффициента поглощения, то он, в соответствии с рисунком 3, находится в пределах -13 дБ...- 30 дБ. При этом данные  $K_{отр}$  при облучении электромагнитными волнами с обеих сторон экрана совпадают.

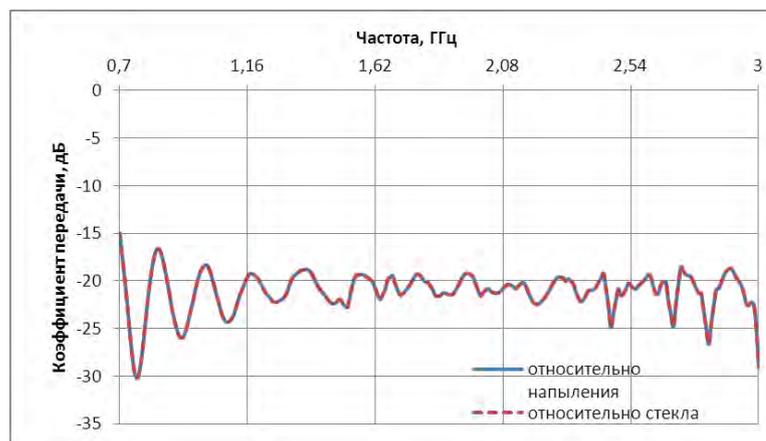


*а*

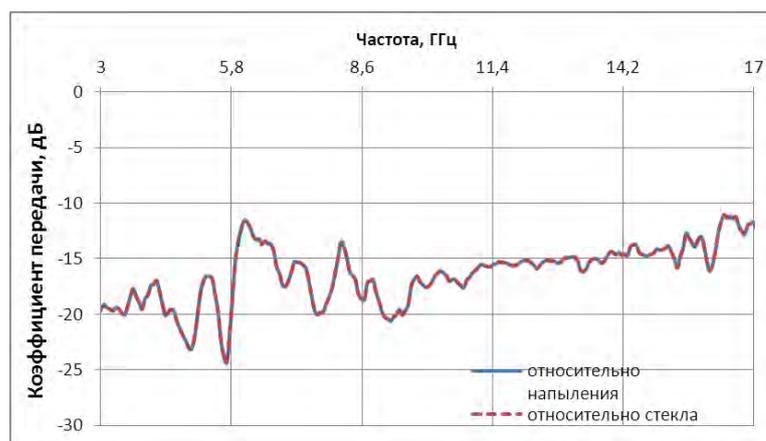


*б*

**Рис. 2.** Частотная зависимость коэффициента отражения прозрачных экранов ЭМИ с многослойным покрытием в диапазоне 0,7...3 ГГц (*а*); в диапазоне 3...17 ГГц (*б*)



а



б

**Рис. 3.** Частотная зависимость коэффициента передачи прозрачных экранов ЭМИ с многослойным покрытием в диапазоне 0,7...3 ГГц (а); в диапазоне 3...17 ГГц (б)

Измерение поверхностного электросопротивления предложенного многослойного покрытия составило 3 Ом/кв, тогда как покрытия  $\text{In}_2\text{O}_3\text{95SnO}_2\text{5}$   $\rho \approx 150$  Ом/кв, что делает его более перспективным.

Прозрачность  $R$  разработанной конструкции стеклянного экрана с многослойным покрытием системы металл-оксид металла составила 55 %, а отражение  $T$  – не более 5 %.

Таким образом, экран, состоящий из стеклянной пластины с нанесенным на него многослойным прозрачным покрытием в системе металл-оксид металла, позволяет практически полностью задерживать ЭМИ, и использоваться в качестве мониторов, дисплеев гаджетов и других устройств, где требуется высокая прозрачность и электропроводность.

### Список литературы

1. А.Т. Волочко, В.А. Зеленин, Г.В. Марков, Е.О.Нарушко / Оптически прозрачные экраны электромагнитного излучения // Доклады БГУИР.2015. №3.
2. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА – М.: Советское радио, 1979.
3. Лагарьков А.Н. и др. // Радиотехника и электроника. Журнал Российской Академии Наук. 2009. Т.54. № 5. С. 625–633.
4. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Криштопова Е.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, № 9. С. 44-48.
5. Крылов В.А., Юрченкова Т.В. Защита от электромагнитных излучений. М., 1972.
6. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л., 1975.
7. Фастовский И.А. Измерители радиопомех. М., 1973.