

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ В ВИДИМОМ СВЕТЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭКРАНИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Г.В. Марков, А.П. Ралько, Е.О. Нарушко, Ж.Е. Макарова

Физико-технический институт НАН Беларуси

г. Минск, Республика Беларусь

*Представлены принципы построения прозрачных в видимом свете многослойных экранирующих покрытий на примере многослойной системы Cu-Ni-ZrO<sub>2</sub> показано как выглядит архитектуру многослойного покрытия, обладающего максимальным пропусканием света в диапазоне 500–600 нм.*

**Ключевые слова:** прозрачные в видимом диапазоне света, экранирующие покрытия, пропускание света

## THE CONSTRUCTION PRINCIPLES OF TRANSPARENT IN THE VISIBLE LIGHT MULTILAYER SHIELDING COATINGS

G.V.Markov, A.P.Ralko, E.O. Narushko, Zh.E.Makarova

The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

*The construction principles of transparent in the visible light multilayer shielding coatings are presented by the example of multilayer system Cu-Ni-ZrO<sub>2</sub>. It is shown how the architecture of multilayer coating looks, that has the maximum light transmission in the range of 500-600 nm.*

**Keywords:** transparent in the visible light range, shielding coatings, light transmission

**E-mail:** volochkoat@mail.ru, mzhe\_miam@tut.by

### 1. Введение

Все электронные системы, приборы, устройства, в том числе компьютеры, излучают электромагнитные волны в самом широком радиочастотном диапазоне. Это позволяет средствами современной высокочувствительной аппаратуры принимать и анализировать информацию, содержащуюся в этом излучении. Существенным недостатком практически всех компьютеризированных электронных систем является возможность с помощью внешнего направленного мощного электромагнитного излучения исказить, уничтожить информацию, хранящуюся в их памяти. В связи с этим

имеется приходится применять различные меры по защите самых разнообразных электронных систем от несанкционированного съема информации, хранящейся в них, или возможного внешнего воздействия (рис. 1). Одной из основополагающих мер такой защиты является экранирование электронных объектов [1].

□ **Защита компьютеров, средств записи и считывания информации, устройств хранения информации и её переработки от воздействия на них ЭМИ**



□ **Обеспечение электромагнитной совместимости**



Рис. 1. Мероприятия по электромагнитному экранированию электронных объектов

В настоящее время, практически все компьютеризированные электронные системы имеют в своем составе мониторы, на экраны которых выводятся данные, необходимые пользователю. Светящаяся матрица экранов монитора также является активным излучателем электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне. Поэтому её необходимо экранировать прозрачным в видимом диапазоне света электромагнитным экраном, который бы перекрывал излучающее окно монитора. Такой экран должен иметь высокую эффективность экранирования в радиочастотном диапазоне и быть прозрачным в видимом диапазоне света, с тем, чтобы позволять оператору видеть всю информацию, отображаемую на экране монитора, причём во всей цветовой гамме.

Как известно [1], высокая эффективность экранирования в радиочастотном диапазоне достигается применением материалов с высокой магнитной проницаемостью и электропроводностью. Поэтому для экранирования жидкокристаллической матрицы мониторов существуют следующие виды электромагнитных экранов:

- мелкаячеистая металлическая сетка с диаметром проволоки не более 0,01 мм;
- стеклопакет, наполненный прозрачной электропроводящей жидкостью;
- стекла с нанесённым на его поверхность прозрачным электропроводящим покрытием.

Все эти решения имеют свои достоинства и недостатки (рис. 2).

## 2. Принципы построения

Принципы построения прозрачных в видимом свете экранирующих в радиочастотном диапазоне покрытий обуславливаются эксплуатационными требованиями к таким покрытиям. В настоящее время такие покрытия должны обладать поверхностным электросопротивлением не более 5 Ом/квadrat, пропусканием света не менее 50 %, а отражением света не больше 1–2 % в интервале 500–600 нм. Кроме этого, покрытия должны обладать высокой коррозионной стойкостью и достаточной адгезией к стеклу, на поверхность которого они наносятся. Технология нанесения таких покрытий должна быть одностадийной и только термообработка нанесенного покрытия может быть отдельной операцией.

На текущий момент для экранирования жидкокристаллических матриц мониторов, чаще всего, применяют стёкла с нанесённым на его поверхность прозрачным в видимом свете электропроводящим покрытием. Практически все производители

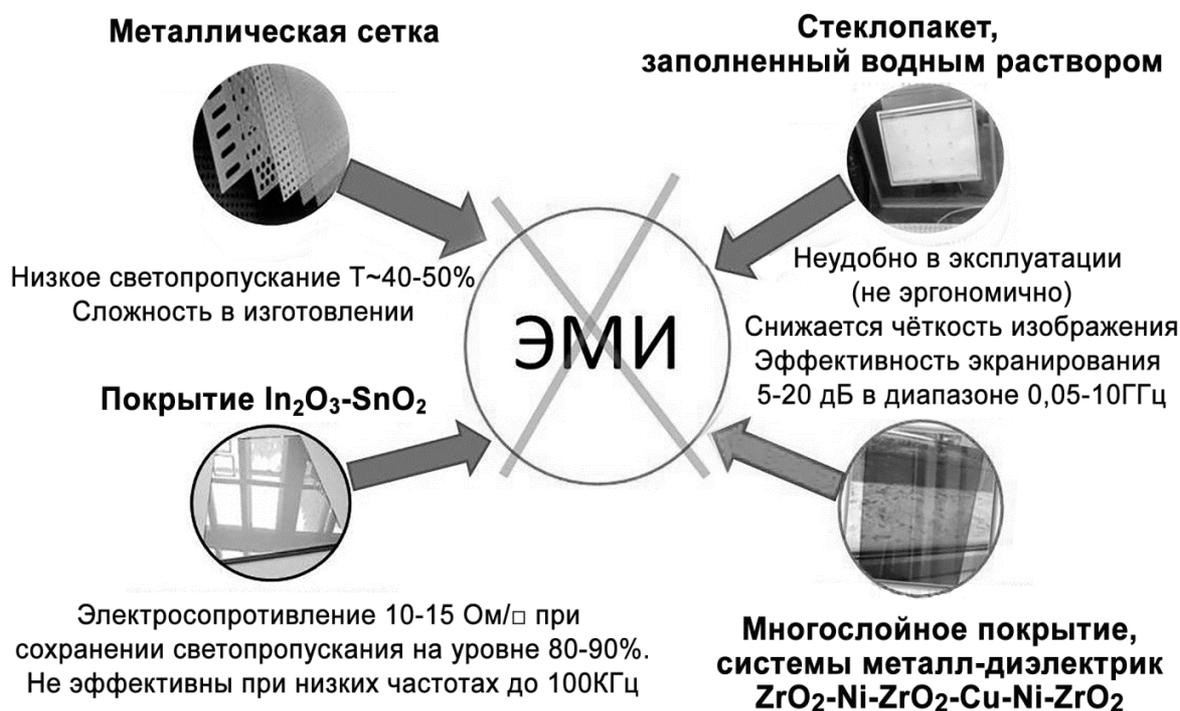


Рис. 2. Применяемые прозрачные в видимом свете электромагнитные экраны

в мире в качестве прозрачных в видимом свете электропроводящих покрытий используют покрытия системы оксид индия – оксид олова, так называемый сплав ИТО [2–3]. ИТО – покрытия обладают высоким светопропусканием на уровне 70–80 %, хорошими адгезионными и удовлетворительными коррозионными свойствами. Вместе с тем их поверхностное электросопротивление обычно составляет величину не менее 15–20 Ом/квадрат и их эффективность экранирования значима только на частотах 100 кГц и выше. Это обусловлено тем, что оксид индия и оксид олова полупроводники и их электропроводность имеет примесный характер.

Чтобы повысить эффективность экранирования прозрачных в видимом свете покрытий была выдвинута идея использовать многослойные покрытия в системе металл-диэлектрик. Это обусловлено тем, что здесь слои металлов за счет высокой электропроводности обладают высокой экранирующей эффективностью, а слои оксидов, выполняя просветляющую функцию, значительно увеличивают пропускание покрытием в целом видимого света. Как следует из результатов расчета эффективности экранирования таких покрытий, слои меди, никеля, золота, серебра, обладая наименьшим удельным электросопротивлением и наибольшей плотностью свободных электронов, чем у сплава ИТО, будут в 1,3–1,7 раз эффективнее экранировать электромагнитное поле в радиочастотном диапазоне. Кроме того, эффективность экранирования покрытием, содержащим 2–3 слоя металла каждый толщиной 5–10 нм, которые разделены слоями диэлектрика, например  $ZrO_2$ , значительно (более чем в 1,5–2 раза) выше, чем покрытия с одним толстым (примерно 10–15 нм) слоем металла.

Вместе с тем, если покрытия из сплавов ИТО обладают большим пропусканием света (не менее 70 %) в видимом диапазоне, то слои чистых металлов, обладая большим отражением и поглощением света, наоборот, пропускают мало света. Так, для примера, на рис. 3 представлены результаты исследования пропускания  $T$  и отражения  $R$  слоя никеля, нанесенного на стекло, в зависимости от его толщины. Из них следует, что при толщинах слоя никеля больше 20 нм  $T \approx 40\%$ , а  $R \approx 20\%$ .

Экран с такими оптическими характеристиками не позволит видеть отображаемую на экране монитора цветовую картинку. Вместе с тем, поверхностное электросопротивление такого покрытия будет составлять 12–15 Ом/квадрат, что ниже, чем у покрытия из сплава ИТО.

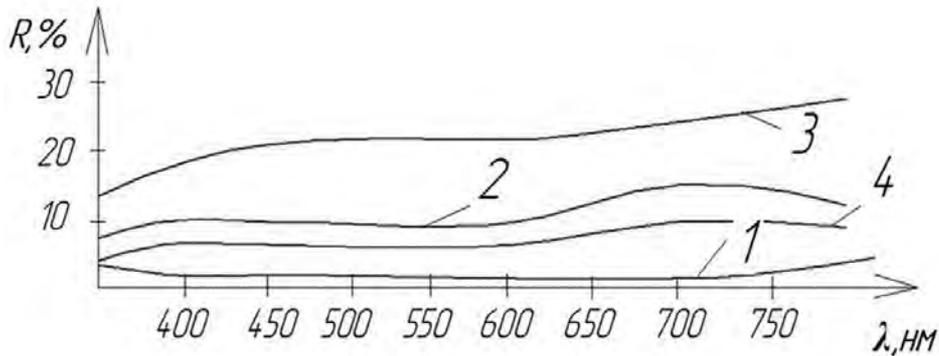


Рис. 3. Зависимость отражения света от длины волны для покрытий системы Ni-ZrO<sub>2</sub>:  
1 – 5 нм Ni, 2 – 10 нм Ni, 3 – 20 нм Ni, 4 – 20 нм Ni + 70 нм ZrO<sub>2</sub>

Если же вместо слоя никеля нанести такой же толщины слой серебра, то его характеристики будут следующие:  $T \approx 35\%$ ,  $R \approx 30\%$ , а поверхностное электросопротивление 2–2,5 Ом/квадрат. Расчёт эффективности экранирования такого слоя показывает, что для частот 100 кГц и больше она будет составлять 22–23 дБ. Это уже достаточная величина, чтобы постараться достигнуть её на практике, при одновременном увеличении пропускания до 50–55 % и уменьшении отражения до 2–5 %.

Для того чтобы разработать покрытие с такими параметрами проанализируем сначала зависимости удельных электропроводностей меди, серебра, золота от толщины покрытия, которые были получены в результате экспериментальных нанесений данных металлов на поверхность стекла и представлены на рисунке 4. Из них следует, что при увеличении толщин покрытий до 10 нм их удельные электропроводности и вид зависимостей практически одинаков. С увеличением толщины покрытий до 15–22 нм наблюдается резкое увеличение их удельной электропроводности до значений  $(1-2) \cdot 10^7$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> и при дальнейшем увеличении толщины удельная электропроводность достигает насыщения. Следовательно, при толщине покрытия, например для меди, в 20 нм оно уже обладает достаточно большой электропроводностью.

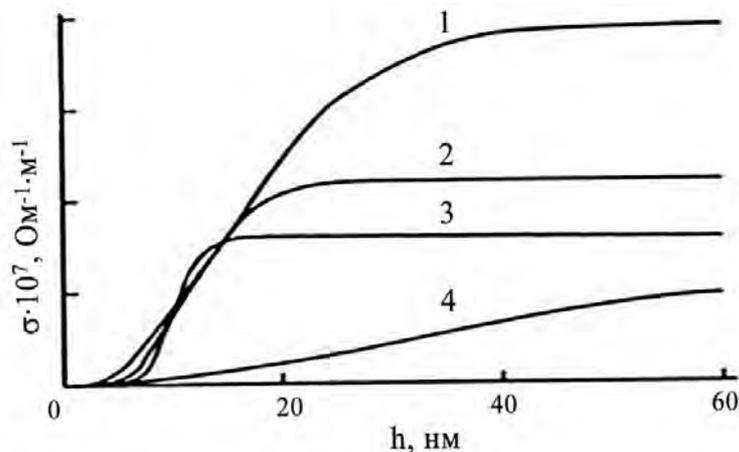


Рис. 4. Зависимость электропроводности от толщины слоя металла:  
1 – серебро, 2 – медь, 3 – золото, 4 – железо

Сейчас рассмотрим результаты исследования пропускания покрытий, содержащих слои меди и никеля разной толщины и слои оксида циркония. Слои из оксида циркония наносились с целью уменьшить отражение от слоев меди и никеля. Результаты исследований представлены на рис. 3 и 5.

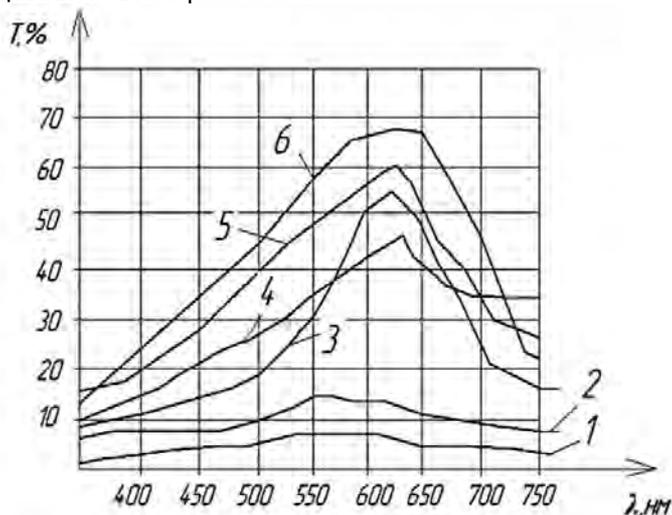


Рис. 5. Зависимости пропускания света  $T$  от длины волны для экранов с покрытиями системы  $\text{Cu-ZrO}_2$ :

1 –  $40\text{Cu}$ ; 2 –  $40\text{Cu}+75\text{ZrO}_2$ ; 3 –  $20\text{Cu}+75\text{ZrO}_2+20\text{Cu}+75\text{ZrO}_2$ ;  
 4 –  $10\text{Cu}+75\text{ZrO}_2+10\text{Cu}+75\text{ZrO}_2+10\text{Cu}+75\text{ZrO}_2+10\text{Cu}+75\text{ZrO}_2$ ; 5 –  $20\text{Cu}+75\text{ZrO}_2$ ; 6 –  $10\text{Cu}+75\text{ZrO}_2$

Из данных, представленных на рис. 3, следует, что у однослойного покрытия из никеля толщиной 20 нм пропускание не превышает 42–45 %, а отражение составляет не менее 20 %. При нанесении на такой слой никеля слоя оксида циркония пропускание увеличивается до 57–60 %, а отражение уменьшается до 7–8 %. Несмотря на достаточно большое пропускание, экран с таким покрытием из-за большого отражения не позволит оператору комфортно работать с монитором компьютера.

Как следует из данных, представленных на рис. 5, экран с однослойным покрытием из меди толщиной 40 нм пропускает свет не более 8 %. При нанесении поверх такого слоя меди просветляющего слоя оксида циркония толщиной 75 нм пропускание увеличивается в среднем до 11–12%. Если разделить слой меди толщиной 40 нм на два слоя по 20 нм и между ними расположить слой оксида циркония, то средняя величина пропускания света в интервале длин волн 500–700 нм достигнет значений 37–40 %. При этом эффективность экранирования двух слоёв меди, каждый толщиной по 20 нм и разделенных слоем оксида циркония, будет выше, чем у одного слоя толщиной 40 нм. Этот вывод подтверждают и данные, представленные на рис. 6 и 7.

Исходя из вышеприведенных данных, была построена базовая архитектура прозрачного в видимом диапазоне света электропроводящего экранирующего покрытия. При этом учитывали следующий физический принцип, непосредственно вытекающий из формул для расчета эффективности экранирования электромагнитного поля, согласно ГОСТ 12.4.306-2016. Суть этого принципа в том, что эффективность экранирования многослойного покрытия с высоким поверхностным электросопротивлением, состоящего из металлических слоев, разделенных диэлектрическими слоями, значительно больше, чем однослойного покрытия, с значительно более низким поверхностным электросопротивлением. В результате остановились на следующей базовой архитектуре многослойного покрытия, которое имеет вид:

Стекло+( $\text{ZrO}_2, \text{HfO}_2, \text{TiO}_2$ )+Ni+( $\text{ZrO}_2, \text{HfO}_2, \text{TiO}_2$ )+Au+Ni+( $\text{ZrO}_2, \text{HfO}_2, \text{TiO}_2$ ).

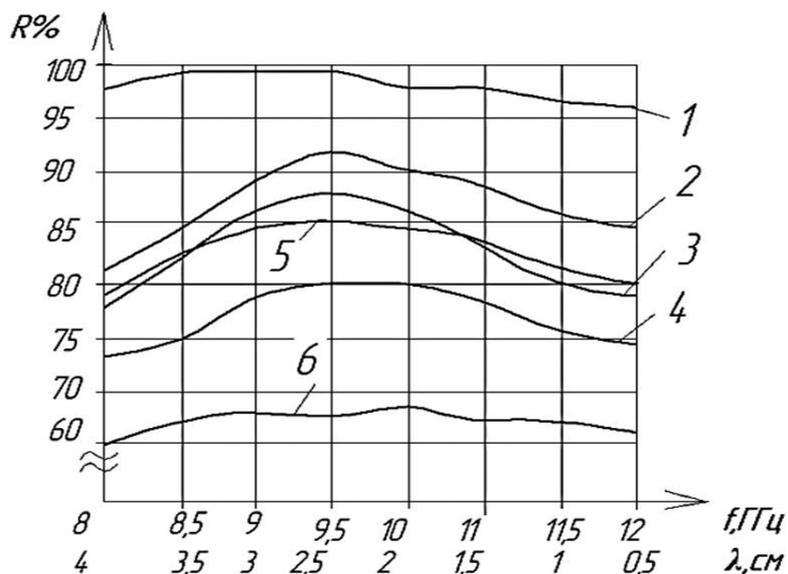


Рис.6. Зависимости отражения  $R$  электромагнитного излучения радиочастотного диапазона от длины волны (частоты) для экранов с покрытиями системы  $\text{Cu-ZrO}_2$ :  
 1 –  $40\text{Cu}$ ; 2 –  $40\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ; 3 –  $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ;  
 4 –  $10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ;  
 5 –  $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ; 6 –  $10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$

Результаты расчёта, с использованием программы «Multyspektrum», показывают, что можно подобрать такие толщины слоёв, когда пропускание света экраном для  $\lambda = 580\text{ нм}$  будет не меньше 62–63 %, а отражение – не больше 12 %. При этом, поверхностное электросопротивление экрана будет составлять 2,5–3 Ом/квадрат, а эффективность экранирования (100 кГц–10 ГГц) с учетом электрических и магнитных свойств металлических слоёв составит 22–23 дБ.

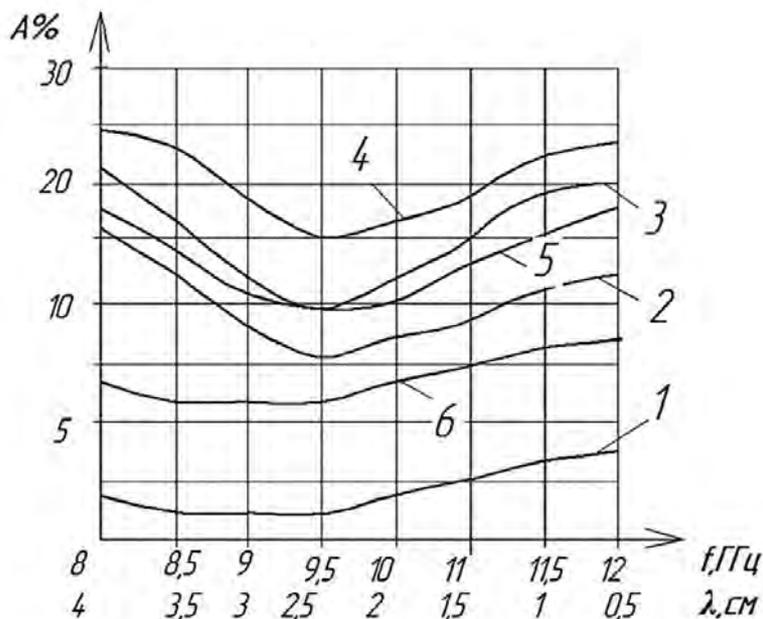


Рис.7. Зависимости поглощения электромагнитного излучения радиочастотного диапазона от длины волны (частоты) для экранов с покрытиями системы  $\text{Cu-ZrO}_2$ : 1– $40\text{Cu}$ ; 2– $40\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ; 3– $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ; 4– $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ; 5– $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$ ; 6– $10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$

При длительной эксплуатации подобных экранов немаловажную роль играет коррозионная стойкость покрытия. Поэтому, для изготовления таких экранов с высокой коррозионной стойкостью, необходимо применять такие коррозионностойкие материалы, как никель и золото.

На базе Физико-технического института НАН Беларуси организовано инновационное производство прозрачных в видимом свете электромагнитных экранов для мониторов компьютеров и других электронных устройств. Эффективность экранирования таких экранов не менее 23–25 дБ в интервале 100 кГц и выше. Пропускание света на длине волны 580 нм не менее 55–60 %. Этих параметров достаточно для защиты от несанкционированного доступа к информации, хранящейся в компьютере, и для комфортной работы оператора.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Под ред. Л.М. Лынькова. Мн.: Бестпринт, 2003. – 406 с.
2. Н. Kostlin, R. Jost, W. Lems // Phys. Stat. Solidi, 1975.–vol.29(a), N° 1.–p. 87–93.
3. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА.– М.: Советское радио, 1979. –237 с.

#### **REFERENCES**

1. V.A. Bogush. T.V. Borbotko. A.V. Gusinskiy. Elektromagnitnyyeizlucheniya. Metodyisredstvazashchity. Pod red. L.M. Lynkova. Mn.:Bestprint. 2003. – 406 s.
2. Н. Kostlin, R. Jost, W. Lems // Phys. Stat. Solidi, 1975.–vol. 29 (a), N° 1.–p. 87–93.
3. Polonsky N. B. Design of electromagnetic shields for electronic equipment. – М.: Soviet radio, 1979.-237 с.