

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-ZrO₂ 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-ZrO₂. 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

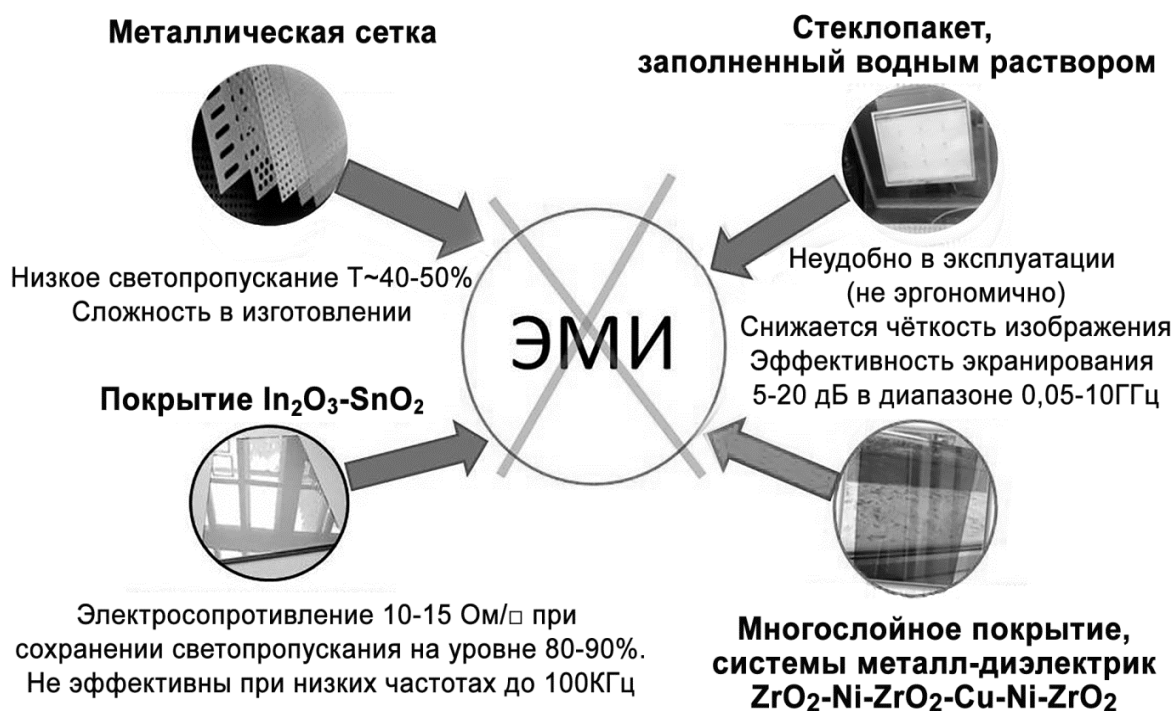


Рис. 2. Применяемые прозрачные в видимом свете электромагнитные экраны

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.

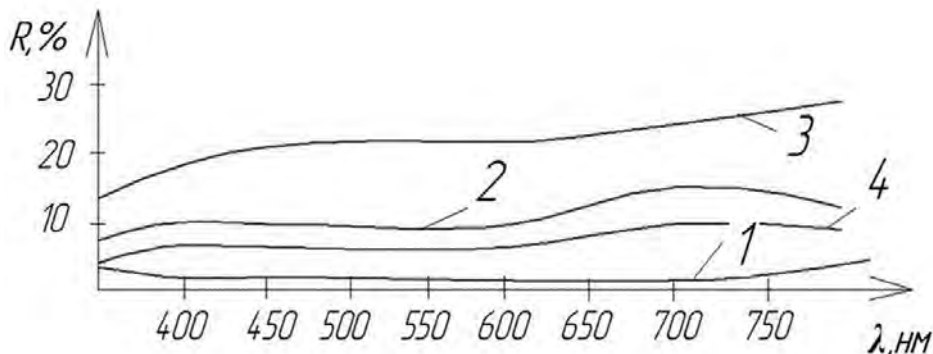


Рис. 3. Зависимость отражения света от длины волны для покрытий системы Ni-ZrO₂:
1 – 5 нм Ni, 2 – 10 нм Ni, 3 – 20 нм Ni, 4 – 20 нм Ni + 70 нм ZrO₂

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 $(1-2) \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ 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.

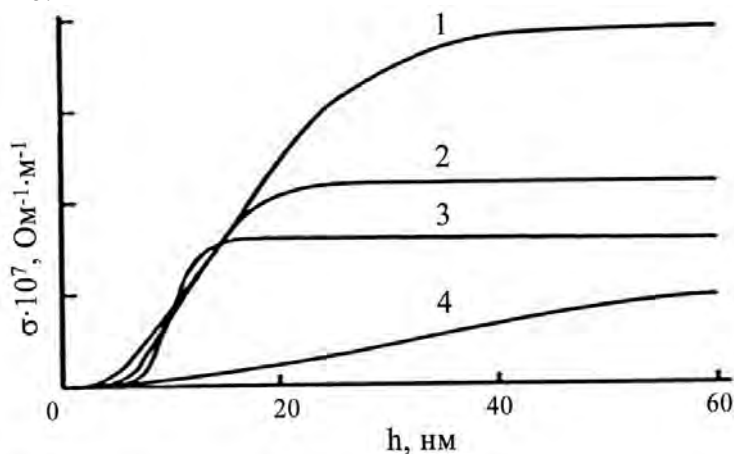


Рис. 4. Зависимость электропроводности от толщины слоя металла:
1 – серебро, 2 – медь, 3 – золото, 4 – железо

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.

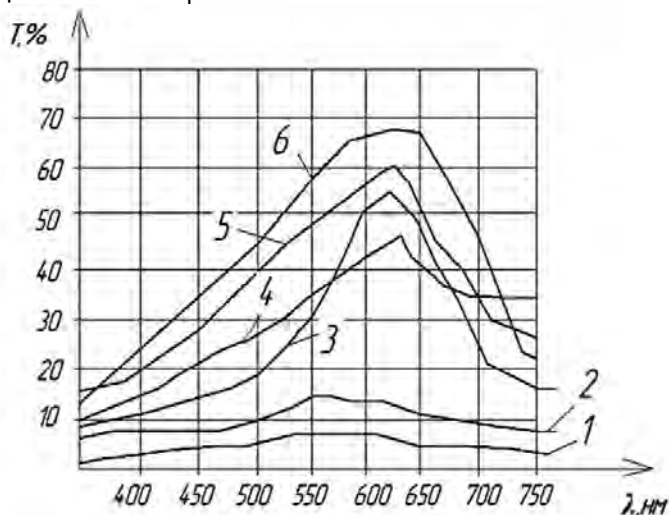


Рис. 5. Зависимости пропускания света T от длины волны для экранов с покрытиями системы Cu-ZrO_2 :

1 – 40Cu ; 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+($\text{ZrO}_2, \text{HfO}_2, \text{TiO}_2$).

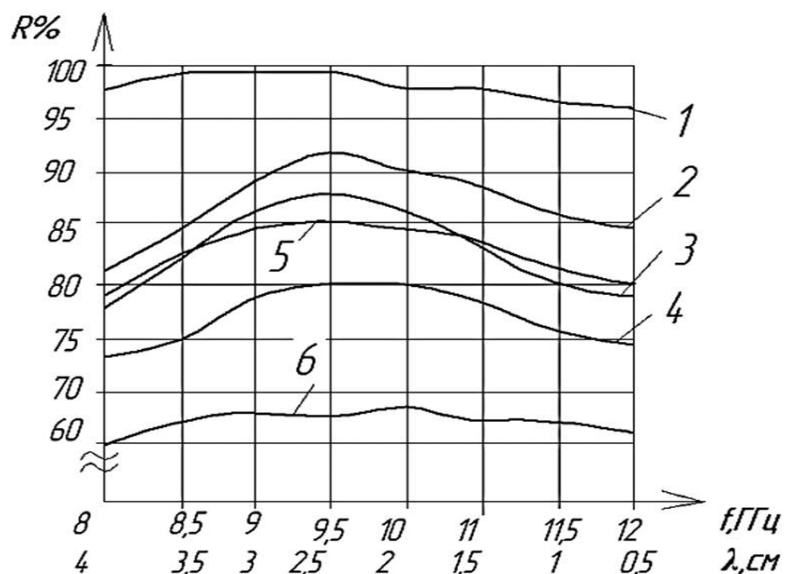


Рис.6. Зависимости отражения R электромагнитного излучения радиочастотного диапазона от длины волны (частоты) для экранов с покрытиями системы Cu-ZrO_2 :
 1 – 40Cu ; 2 – $40\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$; 3 – $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$;
 4 – $10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$;
 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.

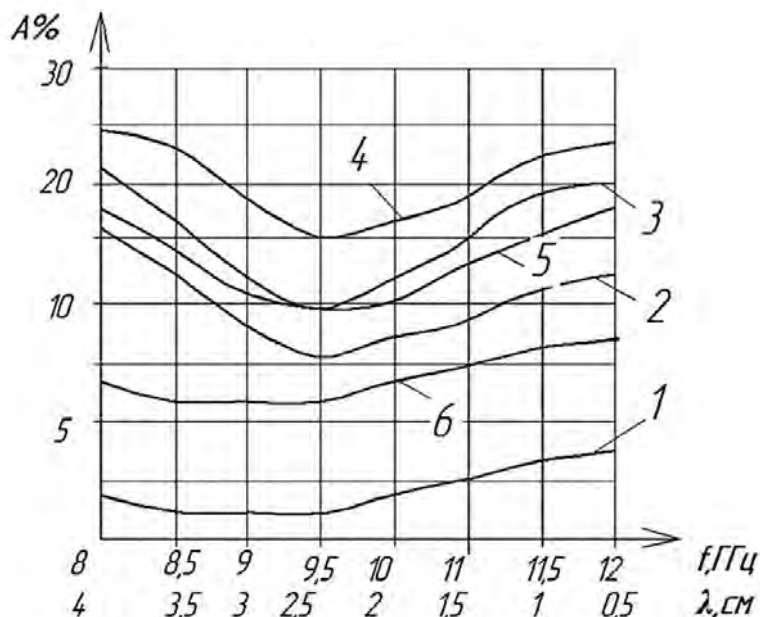


Рис.7. Зависимости поглощения электромагнитного излучения радиочастотного диапазона от длины волны (частоты) для экранов с покрытиями системы Cu-ZrO_2 : 1– 40Cu ; 2– $40\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$; 3– $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$; 4– $20\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2 + 10\text{Cu} + 75\text{ZrO}_2$; 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.