

А. Т. Волочко, Г. В. Марков, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТЕКЛЯННЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

В данной статье представлены покрытия $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ (ITO) и $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$, нанесенные на стеклянные и полимерные подложки. Изучены их экранирующие свойства в оптическом и радиочастотном диапазонах длин волн.

Образцы с покрытиями $120(\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2)$ и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ имеют хорошие экранирующие свойства (98 % падающего электромагнитного излучения отражается в радиочастотном диапазоне длин волн 0,7...17 ГГц). ITO-покрытие имеет низкое поверхностное электросопротивление 8...9 Ом/кв в сочетании с высоким светопропусканием ($T \sim 90\%$). Однако для достижения таких свойств необходим нагрев ITO-подложки до температур 300...400 °С. Покрытие $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ имеет поверхностное электросопротивление порядка 2...3 Ом/кв и светопропускание около 60 %. Такие значения были достигнуты без нагрева подложки и, как следствие, это покрытие может быть нанесено на нетермостойкий материал, например поликарбонат. Кроме того, так как покрытие $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ многослойное, содержащее слои чистых металлов, с высокими электропроводностью и магнитной проницаемостью и слои ZrO_2 с высокой диэлектрической проницаемостью, то его эффективность экранирования выше, чем у покрытия из сплава ITO. Показано, что покрытия системы $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$ можно использовать для защиты экрана монитора, так как оно соответствует требованиям к экранам устройств отображения информации.

Ключевые слова: покрытия, экран, электромагнитные излучения, пропускание света, эффективность экранирования.

A.T. Volochko, G.V. Markov, V.A. Zelenin, E.O. Narushko*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***SHIELDING PROPERTIES OF OPTICAL COATINGS OBTAINED ON GLASS AND POLYMER MATERIALS**

Coatings $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ (ITO) and $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$ deposited on glass and polymer substrates, are presented. Their shielding properties in the optical and radio frequency wavelength ranges have been studied.

Samples with coatings $120(\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2)$ and $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ have good shielding properties (98 % of electromagnetic emission is reflected in the range of 0.7...17 GHz). ITO-coating has low surface resistance of 8...9 ohms/square per square in combination with high light transmittance ($T \sim 90\%$). However, in order to achieve these properties one needs to heat the substrate up to 300...400 °C. The coating $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ has surface resistance of 2...3 ohms/square per square and light transmittance of about 60 %. These values have been obtained without heating of the substrate and, as a consequence, this coating may be deposited on temperature-sensitive materials such as polycarbonate. Moreover, since $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ coating is a multilayer coating containing layers of pure metals that have high electric conductivity and magnetic permeability and ZrO_2 layers with high dielectric permeability it has higher shielding effectiveness than ITO alloy coating. It has been demonstrated that $\text{ZrO}_2-\text{Ni}-\text{ZrO}_2-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{ZrO}_2$ coatings may be used for protection of display screens since they comply with the requirements of screens of information displays devices.

Keywords: coatings, screen, electromagnetic emission, light transmittance, shielding effectiveness.

Введение. Среди разнообразных изделий электронной техники особое место занимают устройства отображения информации: мониторы, дисплеи, жидкокристаллические индикаторы наручных часов, мобильных телефонов и др. Особенностью этих устройств является то, что, с одной стороны, эксплуатирующий их персонал находится в непосредственной близости (порядка 1 м) от информационных экранов, подвергаясь воздействию электромагнитного излучения (ЭМИ), а с другой – сами эти устройства нуждаются в защите, поскольку посредством направленного ЭМИ можно внести изменения в корректную работу компьютера, а также дистанционно считывать информацию с монитора и детектировать ее. Для защиты от излучений применяют специальные экраны и поглотители. Однако защитить лицевую часть монитора достаточно сложно,

так как оператор должен видеть изображение на экране без искажения цвета и размеров. Одним из вариантов защиты экранов является использование металлической сетки, но при этом появляются волны муара, которые снижают контрастность изображения и утомляют глаза оператора. Ослабить воздействие внешних ЭМИ можно также нанесением на стеклянные экраны оптически прозрачных электропроводящих покрытий. В качестве таких покрытий могут быть использованы пленки $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ (indium tin oxide, ИТО). Кроме того, возможно использование многослойные покрытия, состоящие из чередующихся тонких (десятки нм) металлических (Ni, Cu, Ag) и оксидных слоев (TiO_2 , SiO_2 , HfO_2 , ZrO_2).

Покрытие системы $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$, формируемое на стекле марки К8 [1], является наиболее востребованным в настоящее время. Оксид индия относится к вырожденным полупроводникам *n*-типа [2] с широкой запрещенной зоной, концентрация электронов в нем доходит до $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При легировании оксида индия четырехвалентным оловом концентрация свободных носителей заряда возрастает до $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. ИТО-покрытие имеет высокое светопропускание (около 90 %) и вместе с тем благодаря высокой электропроводности хорошо защищает объект от ЭМИ.

Для обеспечения высоких экранирующих характеристик в радиочастотном диапазоне в сочетании с высокой прозрачностью – в оптическом была выбрана конструкция, которая представляет собой стеклянное основание с нанесенным на него многослойным покрытием. В результате проведения предварительных расчетов и экспериментов было выяснено, что архитектура покрытия с заданными свойствами должна соответствовать формуле $(\text{Me}-\text{Me}_x\text{O}_y)_n$, то есть представлять собой чередование металлических слоев с диэлектрическими. Металл, его структура и толщина в слое должны быть такими, чтобы обеспечивать максимальное пропускание электромагнитных волн при частотах 385...750 ТГц (видимый свет) и минимальное – для частот 0,7...17 ГГц (УВЧ и СВЧ диапазоны). В соответствии с [3] пропускание *T* металлической пленкой ЭМИ рассчитывается по следующим формулам:

$$T(\omega, \Omega, \omega_\tau) = \frac{1}{\left(1 + \frac{(\Omega + \omega_\tau)^2 - \omega_\tau^2}{\omega^2 + \omega_\tau^2}\right)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$\Omega = \pi \omega_p^2 L \sim \frac{N}{m^*}, \quad (2)$$

где ω_τ – частота релаксации заряженной частицы; ω_p – плазменная частота; ω – частота ЭМИ; *L* – толщина металлической пленки; *N* – концентрация носителей заряда; *m** – эффективная масса носителей заряда.

Формула (1) позволяет оптимизировать по критерию пропускания ЭМИ заданной частоты толщину металлического слоя, тип кристаллической решетки выбираемых металлов и их структуру. Так, из (1) следует, что чем больше частота ω ЭМИ, падающего на стеклянный образец с покрытием, тем больше его пропускание (прозрачность), то есть функция *T*(ω) является монотонно возрастающей. Функция *T*(Ω) – монотонно убывающая, то есть при увеличении числа носителей заряда (толщины пленки) составляющая пропускания ЭМИ уменьшается, а увеличивается процент отраженного от металлической пленки излучения [4]. Для повышения пропускания волн оптического диапазона и снижения пропускания волн радиочастотного диапазона, а также для уменьшения доли отражения световых волн поверх металлического слоя целесообразно наносить слой диэлектрика с высоким коэффициентом преломления ($n \geq 2$). Причем оптическая толщина такого просветляющего слоя должна быть кратной $\lambda/4$ для достижения минимального отражения. На основании всего изложенного следует, что толщина металлических слоев (Ni, Cu, Ag, Au) в многослойном покрытии должна быть в пределах 20...40 нм, а толщина диэлектрических (ZrO_2 , SiO_2 , HfO_2 и др.) – 35...100 нм. Учитывая теоретические расчеты и эксплуатационные свойства, такие как адгезия, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, окончательный состав покрытия соответствовал формуле $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$, где цифры соответствуют толщинам слоев в нанометрах. Слои из металлов в покрытии обеспечивают вы-



Рис.1. Прозрачность экранов в видимом диапазоне длин волн:
 $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{K8}$ (a) и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2/\text{K8}$ (b)

Fig.1. Screen transmittance in the visible range of wavelengths:
 $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{K8}$ (a) and $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2/\text{K8}$ (b)

сокую электропроводность последних ($\rho = 2 \dots 3$ Ом/кв) и отражение электромагнитного излучения, слои же диэлектриков поглощают ЭМИ и служат просветляющими для нижележащих слоев металлов в видимом диапазоне длин волн.

Прозрачность экранов из стекла К8 с покрытиями систем $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{K8}$ и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2/\text{K8}$ достаточно высока и соответствует требованиям к экранам устройств отображения информации (рис. 1).

Материалы и методы исследования. Тонкие пленки оксида индия, легированного оловом, наносили на стеклянные подложки методом реактивного магнетронного распыления мишени из сплава индия (95 мас.%) и олова (5 мас.%) в атмосфере смеси кислорода и аргона. Предельное остаточное давление в камере после откачки составляло $P = (3 \dots 5) \cdot 10^{-3}$ Па, а рабочее – $P = 6 \cdot 10^{-1}$ Па. Мощность, поддерживаемая на магнетроне, была равна 1 кВт. Толщина ИТО-покрытия составляла 120 нм, время непосредственного распыления мишени $\tau = 4$ мин.

Покрытие многослойной системы $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ наносили электронно-лучевым методом на установке ВУ-1А с одновременным контролем толщины слоев спектрофотометром СФКТ 751 В. Давление остаточных газов было не более $7 \cdot 10^{-3}$ Па, ток пучка электронов – 80...120 мА, энергия электронов в пучке – более 6 кэВ. Суммарная толщина данного 6-слойного покрытия достигала величины 250 нм, время непосредственного нанесения $\tau = 4$ мин.

Перед нанесением тонкопленочных структур все подложки проходили отмывку в чистящем растворе, проточной воде, сушку и протирание техническим спиртом.

Измерение поверхностного электросопротивления осуществлялось четырехзондовым методом. При проведении измерения данным методом многослойных покрытий с диэлектрическим верхним слоем из оксида циркония перед его нанесением контактные площадки закрывали маской. Для определения экранирующих характеристик покрытий был использован панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01-18, работающий по принципу раздельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн.

Результаты и их обсуждение. Свойства покрытий систем $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ и $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ представлены в таблице.

Сравнительная характеристика оптически прозрачных покрытий экранирующих ЭМИ
Comparative characteristics of optically transparent coatings EMI shielding

Показатель	$120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$	$90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$
ρ , Ом/кв	10	3
R_1 , %	3...5	3...5
T_1 , %	85	60
\mathcal{E} , дБ	29...37	26...33
Коррозионная стойкость (на воздухе)	3000 ч без изменений	3000 ч без изменений
Адгезия	Хорошая	Хорошая

Примечание: R_1 , T_1 – коэффициенты отражения и пропускания для оптического диапазона длин волн (400...700 нм), \mathcal{E} – эффективность экранирования (0,01...10 м).

Из таблицы видно, что покрытие, состоящее из 95 % оксида индия и 5 % оксида олова, обладает высоким светопропусканием в видимом диапазоне длин волн (85 %). Однако для достижения электросопротивления покрытия порядка 10 Ом/кв и высокого светопропускания необходимо его отжиг при $\tau \sim 350 \dots 400$ °С в вакууме после напыления, а затем выдержка на воздухе в течение нескольких суток. Процесс высокотемпературной обработки оксидной пленки позволяет атомам кислорода, внедренным между узлами кристаллической решетки или расположенным на границах зерен, диффундировать в узлы кристаллической решетки. Образующиеся кислородные вакансии действуют как доноры для электронов, увеличивая их концентрацию [5]. Следовательно, в результате отжига удельное поверхностное сопротивление оксидной пленки уменьшается как за счет увеличения концентрации электронов, так и за счет увеличения их подвижности. Данная операция накладывает ограничения по выбору основания для ИТО-покрытия.

Многослойное покрытие системы $ZrO_2 - Ni - ZrO_2 - Cu - Ni - ZrO_2$ может наноситься на относительно холодные поверхности с температурой около 30...40 °С. В качестве таковых могут использоваться пластины из поликарбоната, ПВХ и других нетермостойких прозрачных материалов.

Об эффективности экранирования электронного объекта от ЭМИ в радиочастотном диапазоне длин волн можно судить по величине коэффициентов отражения $K_{отр}$ и передачи $K_{перед}$. Данные параметры характеризуют долю отраженных и прошедших через экран электромагнитных волн соответственно:

$$K_{отр} = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (3)$$

$$K_{перед} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_0}, \quad (4)$$

где P_0 – падающая мощность; P_1 – мощность отраженного от экрана ЭМИ; P_2 – мощность прошедшего ЭМИ через экран.

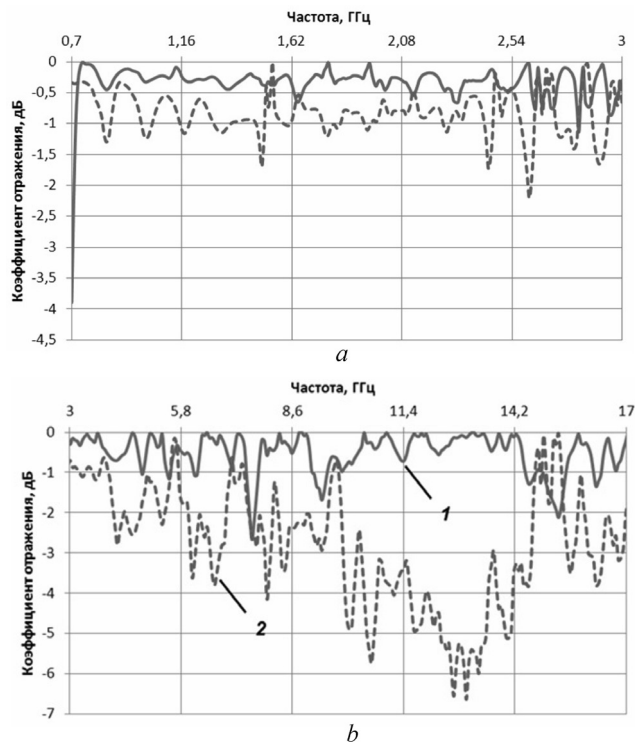


Рис.2. Зависимости коэффициента отражения от частоты ЭМИ в диапазонах 0,7...3,0 ГГц (а) и 3,0...17,0 ГГц (б) для покрытий: 1 – $120(In_2O_3 + SnO_2)$; 2 – $90ZrO_2/8Ni/90ZrO_2/22Cu/5Ni/35ZrO_2$

Fig. 2. Relationships between the reflection coefficient and the EMR frequency within the ranges of 0.7...3.0 GHz (a) and 3.0...17.0 GHz (b) for the coatings: 1 – $120(In_2O_3 + SnO_2)$; 2 – $90ZrO_2/8Ni/90ZrO_2/22Cu/5Ni/35ZrO_2$

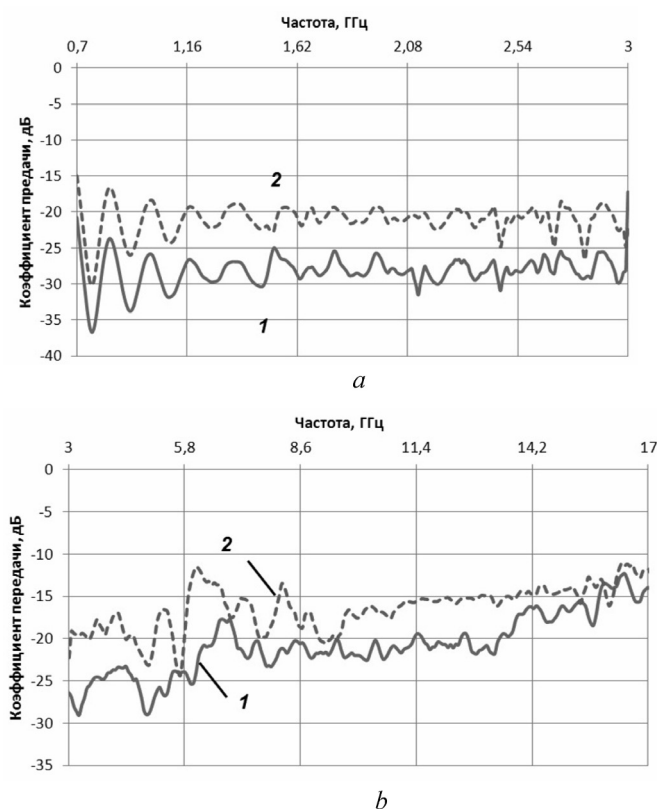


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи от частоты ЭМИ в диапазонах 0,7...3,0 ГГц (а) и 3,0...17,0 ГГц (б): 1 – $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$; 2 – $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$

Fig. 3. Relationships between the transmission coefficient and the EMR frequency within the ranges of 0.7...3.0 GHz (a) and 3.0...17.0 GHz (b): 1 – $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$; 2 – $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$

Из (3) видно, что при $K_{\text{отр}} = 0$ уровень отраженной мощности ЭМИ соответствует уровню падающей ($P_1 = P_2$), что соответствует полному отражению. По мере уменьшения $K_{\text{отр}}$, уменьшается и часть отраженного ЭМИ. Аналогично в (4): по мере приближения $K_{\text{перед}}$ к нулю растет доля прошедших электромагнитных волн через экран, то есть меньшее их количество будет задержано материалом экранирующего «щита».

Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи исследуемых покрытий представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2, 3 видно, что из рассмотренных в данной статье систем более эффективное экранирование ЭМИ присуще покрытию системы $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$. Так, коэффициент отражения составляет 0...–2,5 дБ, коэффициент передачи равен –26...–27 дБ в диапазоне 0,7...5,0 ГГц и –20...–15 дБ в диапазоне 6...17 ГГц. Однако многослойное покрытие $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ ненамного уступает первому: в диапазоне частот 0,7...6,0 ГГц значения коэффициента отражения для данных материалов находятся на уровне –0,7...–1,5 дБ, в диапазоне 6...17 ГГц опускаются до –6,5 дБ; а коэффициента передачи –22 дБ в диапазоне 0,7...5 ГГц, –20...–13 дБ в диапазоне 5...17 ГГц.

Закключение. Установлено, что эффективность экранирования ЭМИ радиочастотного диапазона покрытия многослойной системы $90\text{ZrO}_2/8\text{Ni}/90\text{ZrO}_2/22\text{Cu}/5\text{Ni}/35\text{ZrO}_2$ практически не уступает широко применяемым прозрачным покрытиям ИТО. Однако 6-слойное покрытие обладает более низким электросопротивлением ($\rho \sim 2$ Ом/кв), не требует нагрева подложки до температур порядка 300...400 °С, а только лишь не более 40 °С, что делает возможным осаждение его на прозрачные полимерные материалы. В качестве недостатка предложенной конструкции экрана можно назвать значение светопропускания, которое ниже покрытия $120(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ на 20 %, но вместе с тем является достаточным для защиты монитора компьютера, существенно не снижая качество формируемого на нем изображения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Оптически прозрачные электромагнитные экраны / А. Т. Волочко [и др.] // Доклады БГУИР. – 2015. – №3 (89). – С. 53–57.
2. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
3. Курбацкий, В. П. О размерной и частотной зависимости параметров модели Друде для ультратонких металлических пленок / В. П. Курбацкий // Журн. техн. физики. – 2015. – Т. 85, вып. 5. – С. 106–109.
4. Проводящие и отражающие тонких металлических пленок / И. В. Антоненц [и др.] // Журн. техн. физики. – 2004. – Т. 74, вып. 11. – С. 102–106.
5. Dawar, A. L. Semiconducting crystal display transparent thin films, their properties / A. L. Dawar, J. C. Joshi // J. Mater. Sci. – 1984. – Vol. 19, N 1. – P. 1–23.

References

1. Volochko A.T., Zelenin V.A., Markov G.V., Narushko E.O. Optically transparent electromagnetic screens. *Doklady BGUIR*, 2015, no. 3 (89), pp. 53–57. (In Russian).
2. Shapiro D.N. *Basics of electromagnetic shielding theory*. Leningrad, Energiya Publ., 1975, 112 p. (In Russian).
3. Kurbatsky V.P. On the size and frequency dependences of the parameters of the Drude model for ultrathin metal films. *Technical Physics*, 2015, vol. 66, no. 5, pp. 736–739. Doi: 10.1134/s1063784215050102
4. Antonets I.V., Kotov L.N., Nekipelov S.V., Karpushov E.N. Conducting and reflecting properties of thin metal films. *Technical Physics*, 2004, vol. 49, no. 11, pp. 1496–1500. Doi: 10.1134/1.1826197
5. Dawar A.L., Joshi J.C. Semiconducting crystal display transparent thin films, their properties. *Journal of Materials Science*, 1984, vol. 19, no. 1, pp. 1–23. Doi: 10.1007/bf00552989

Сведения об авторах

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochkoat@mail.ru

Марков Геннадий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь).

Зеленин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь).

Нарушко Елена Олеговна – младший научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lena-narushko@mail.ru

Для цитирования

Использование внешних электрических полей при доводке расплавов в плавильных агрегатах / А. Т. Волочко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 25–30.

Information about the authors

Volochko Alexander Tihonovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Department Head, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochkoat@mail.ru

Markov Gennady Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus).

ZeleninVictor Alexeyevich – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus).

Narushko Elena Olegovna – Junior Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lena-narushko@mail.ru

For citation

Volochko A.T., Markov G.V., Zelenin V.A., Narushko E.O. Shielding properties of optical coatings obtained on glass and polymer materials. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no.1, pp. 25–30. (In Russian)