



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-19-27>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 539.216:546.824.31

## ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАБИЛЬНОГО СОСТАВА ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. ЗЕЛЕНИН<sup>1</sup>, Е. О. НАРУШКО<sup>2</sup>, А. Д. ГЛАДИНОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ОАО «Пеленг» (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 17.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Рассмотрены процессы формирования покрытий систем Cu–Ni и Ag–Cu стабильного элементного состава методом электронно-лучевого испарения. Показано, что в зоне воздействия электронного луча на помещенный в тигель слиток при суммарном давлении паров элементов сплава  $\Sigma p$  больше давления под колпаком установки происходит кипение расплава, а в примыкающей к зоне расплава наружной зоне идет процесс сублимации твердого сплава. Исследованы микрорельеф и элементный состав поверхностного слоя слитка сплава Cu–Ni в зонах испарения и сублимации, а также элементный состав осаждаемых при этом покрытий. Показано, что наиболее приемлемым способом получения покрытий системы Cu–Ni стабильного элементного состава является одновременное электронно-лучевое испарение меди и никеля из двух тиглей. Рассчитан и экспериментально проверен азеотропный состав сплава системы Ag–Cu. Результаты исследований использованы при изготовлении многослойных экранов электромагнитного излучения.

**Ключевые слова:** покрытия систем Cu–Ni и Ag–Cu, электронно-лучевое испарение, сублимация, давление паров, стабильность элементного состава, экраны электромагнитного излучения.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Зеленин, В. А. Получение многокомпонентных покрытий стабильного состава для экранов электромагнитного излучения / В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, А. Д. Гладинов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 19–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-19-27>.

## OBTAINING MULTICOMPONENT COATINGS OF A STABLE COMPOSITION FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION SCREENS

VICTOR A. ZELENIN<sup>1</sup>, ELENA O. NARUSHKO<sup>2</sup>, ANTON D. GLADINOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Joint-Stock Company “Peleng” (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Joint-Stock Company “Instrument-Making Plant Optron” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17.02.2023

**Abstract.** The formation processes of coatings of Cu–Ni and Ag–Cu systems with a stable elemental composition by the method of electron-beam evaporation are considered. It is shown that in the zone of action of the electron beam on the ingot placed in the crucible at the total vapor pressure of the alloy elements  $\Sigma p$  above the pressure under the cap of the installation, the melt boils, and in the outer zone adjacent to the melt zone, the process of sубли-

mation of the hard alloy occurs. The microrelief and elemental composition of the surface layer of the Cu–Ni alloy ingot in the zones of evaporation and sublimation, as well as the elemental composition of the coatings deposited in this case, have been studied. It is shown that the most acceptable way to obtain coatings of the Cu–Ni system with a stable elemental composition is the simultaneous electron-beam evaporation of copper and nickel from two crucibles. The azeotropic composition of the alloy of the Ag–Cu system was calculated and experimentally verified. The research results are used in the manufacture of multilayered screens of electromagnetic radiation.

**Keywords:** coatings of Cu–Ni and Ag–Cu systems, electron-beam evaporation, sublimation, vapor pressure, elemental composition stability, electromagnetic radiation shields.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest.

**For citation.** Zelenin V. A., Narushko E. O., Gladinov A. D. (2023) Obtaining Multicomponent Coatings of a Stable Composition for Electromagnetic Radiation Screens. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 19–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-19-27> (in Russian).

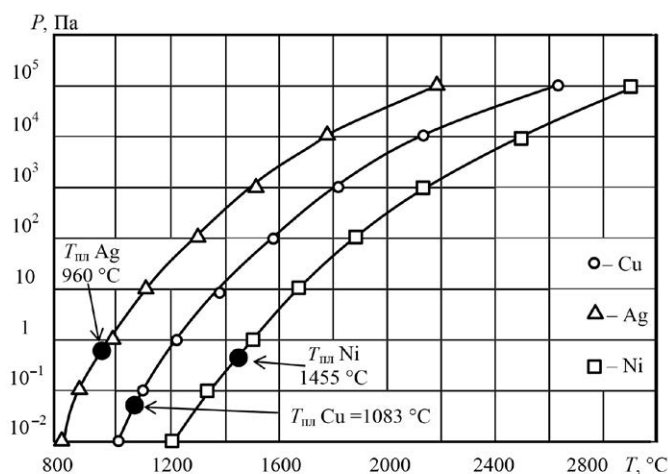
## Введение

Нестабильность свойств тонких пленок меди вследствие их окисления при изготовлении многослойных экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) поставила на повестку дня задачу использования покрытий из сплавов систем Cu–Ni и Ag–Cu. Однако вследствие различного давления паров элементов при испарении происходит фракционирование сплавов этих систем, в результате элементные составы осаждаемых покрытий отличаются от составов испаряемых сплавов. Вопросы влияния условий испарения на элементный состав покрытий остаются в настоящее время малоизученными.

Известно, что азеотропность, или свойство сохранения стехиометрии при испарении, обусловлена более высокой прочностью химической связи между разнородными атомами сплава. Взаимодействия между компонентами сплава при совместном расплавлении влекут за собой изменение давлений паров, а, следовательно, влияют на стехиометрию парообразной фазы и соотношение элементов в осаждающейся пленке. В связи с этим элементный состав испаряемых сплавов должен соответствовать требованиям конгруэнтного испарения с учетом взаимодействия между компонентами и давления их паров [1–3]. Авторами исследованы процессы нанесения покрытий стабильного элементного состава методом электронно-лучевого испарения сплавов систем Cu–Ni и Ag–Cu, используемых при изготовлении многослойных экранов ЭМИ.

## Процесс испарения сплавов системы Cu–Ni

Для получения покрытий с воспроизводимым соотношением элементов необходимо обеспечить соответствие состава паровой фазы при испарении составу сплава с учетом упругости паров компонентов. Зависимости давления (упругости) паров Cu, Ag и Ni от температуры, согласно [4], приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Влияние температуры на давление паров Cu, Ag и Ni  
**Fig. 1.** The effect of temperature on the vapor pressure of Cu, Ag and Ni

Как следует из рис. 1, давление паров Cu при температуре 1200 °С больше, чем у Ni, на два порядка. Поскольку покрытия формируют в вакууме, фазовые переходы жидкость→пар (ж→пар) и твердое тело→пар (тг→пар) имеют ряд особенностей. Для их рассмотрения представленная на рис. 2 диаграмма состояния системы Cu–Ni дополнена конодами и изобарами суммарного давления паров  $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni})$ . При температуре 1350 °С состояние сплавов характеризуется конодой AB. Сплав состава Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> находится в состоянии жидкого раствора, а состава Cu<sub>33</sub>Ni<sub>67</sub> – твердого раствора.

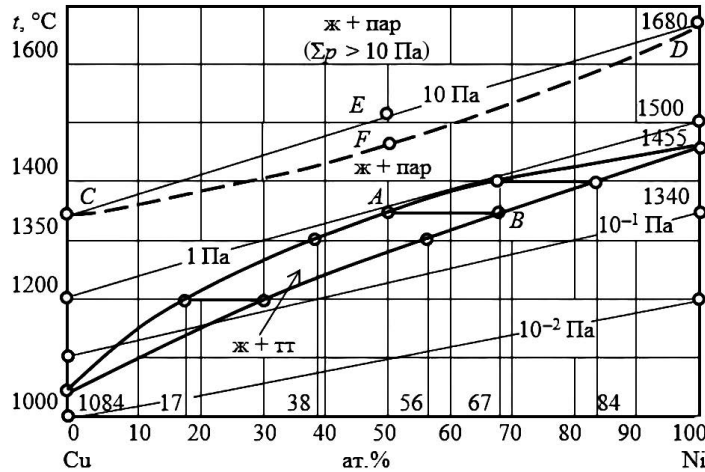


Рис. 2. Диаграмма состояния системы Cu–Ni с указанием изобар  $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni})$   
Fig. 2. State diagram of the Cu–Ni system showing isobars  $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni})$

В соответствии с рис. 2 жидкие растворы в системе Cu–Ni при температуре 1200 °С образуются при содержании в сплавах Ni до 17 ат.%, при 1300 °С – до 38 ат.%, при 1400 °С – до 67 ат.%. Соответственно при содержании Ni более 30, 56 и 84 ат.% при тех же температурах сплавы находятся в состоянии твердых растворов. При температуре 1350 °С сплавы с содержанием Ni до 50 ат.% испаряются путем фазового перехода ж→пар, а с содержанием Ni более 67 ат.% сублимируют путем перехода тг→пар. Поскольку сплавы системы Cu–Ni являются неограниченными твердыми растворами, их испарение подчиняется закону Рауля, т. е. отношение числа атомов никеля  $n_{\text{Ni}}$  к числу атомов меди  $n_{\text{Cu}}$  в потоке пара в любой момент времени определяется выражением [3]

$$\frac{n_{\text{Ni}}}{n_{\text{Cu}}} = \frac{f_{\text{Ni}} x_{\text{Ni}} P_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}} x_{\text{Cu}} P_{\text{Cu}}} \cdot \left( \frac{A_{\text{Cu}}}{A_{\text{Ni}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{Ni}}, f_{\text{Cu}}$  – коэффициент активности атомов никеля и меди в расплаве;  $P_{\text{Ni}}, P_{\text{Cu}}$  – равновесное давление паров Ni и Cu при температуре испарения;  $A_{\text{Ni}}, A_{\text{Cu}}$  – атомная масса Ni и Cu ( $A_{\text{Ni}} = 58,71$ ,  $A_{\text{Cu}} = 63,54$ );  $x_{\text{Ni}}, x_{\text{Cu}}$  – молярная концентрация Ni и Cu в сплаве,  $x_{\text{Ni}} + x_{\text{Cu}} = 1$ .

Давление паров Cu при температуре 1350 °С составляет ~10 Па, а паров Ni – 0,1 Па (рис. 1). В случае электронно-лучевого метода испарения в вакууме ( $5 \cdot 10^{-3}$  Па) при температуре 1350 °С сплав Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> находится в состоянии кипения, т. е. пары Ni и Cu образуются не только на границе раздела жидкость–пар, но и во всем объеме расплавленной электронным лучом зоны. Отношение  $\frac{f_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}}}$  в этом случае равно отношению объемов, занимаемых атомами Ni и Cu в расплаве,

т. е.  $\frac{f_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}}} = \left( \frac{R_{\text{Ni}}}{R_{\text{Cu}}} \right)^3$ , где  $R_{\text{Ni}}, R_{\text{Cu}}$  – радиусы атомов элементов вблизи температур их плавления,

$R_{\text{Ni}} = 0,1246$  нм,  $R_{\text{Cu}} = 0,1280$  нм. Тогда, подставляя значения  $R_{\text{Ni}}$  и  $R_{\text{Cu}}$ , получаем  $\frac{f_{\text{Ni}}}{f_{\text{Cu}}} = 0,9224$  [5].

При подстановке всех значений в (1) получаем, что концентрация никеля в пленке составляет 0,96 ат.%, т. е. в ~50 раз меньше, чем в испаряемом сплаве.

Точки C и D на рис. 2 соответствуют температурам, при которых давления паров Cu и Ni равны 10 Па. Для идеальных растворов проходящая через эти точки изобара является прямой.

Отклонения от закона Рауля связаны с изменением прочности связей атомов Cu и Ni при смешении, а также с изменениями их активности. Более высокая активность атомов меди в расплаве, обусловленная большими их размерами, чем никеля, оказывает гораздо большее влияние на положение изобар. При повышении активности атомов меди их парциальное давление при испарении увеличивается. Изобара реальных сплавов смещается при этом вниз от прямой  $CD$ . Положение центральной точки  $F$  на изобаре (рис. 2), соответствующей суммарному давлению паров  $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni}) = 10 \text{ Па}$ , находится на  $\sim 40^\circ \text{C}$  ниже точки  $E$  на прямой  $CD$ .

### Процесс испарения сплавов системы Ag–Cu

Доработанная в процессе исследований диаграмма состояния системы Ag–Cu представлена на рис. 3.

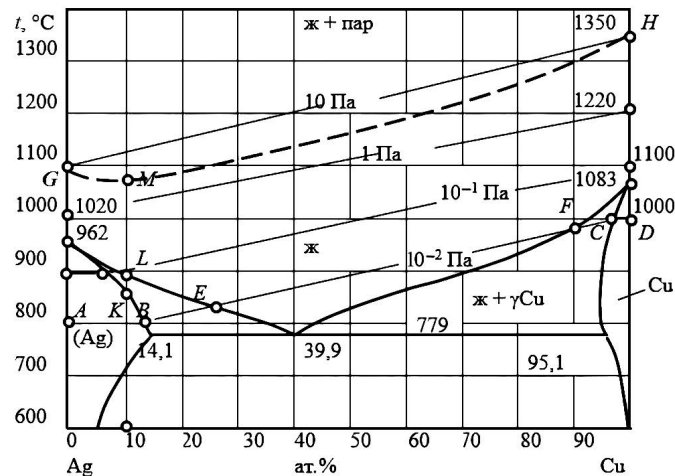


Рис. 3. Диаграмма состояния системы Ag–Cu  
Fig. 3. State diagram of the Ag–Cu system

Требуемый диапазон суммарного давления паров  $\Sigma p(\text{Ag}, \text{Cu}) = (1-10) \text{ Па}$ , необходимого для получения пленок толщиной до 200 нм, достигается при температурах от 1100 до 1300 °C. Поскольку в системе Ag–Cu соединения не образуются, процесс испарения доэвтектических, эвтектических и заэвтектических сплавов подчиняется закону Рауля (1). Так как фазовый переход ж→пар происходит в вакууме ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ ), а суммарное давление паров на 2–3 порядка больше, то расплавы находятся в состоянии кипения. Изобара  $AD$ , соответствующая давлению паров  $\Sigma p(\text{Cu} + \text{Ni}) = 10^{-2} \text{ Па}$ , свидетельствует о том, что при температурах, ниже температуры плавления, происходят процессы сублимации твердого раствора меди в серебре (участок  $AB$ ) и твердого раствора серебра в меди (участок  $CD$ ). На участках  $BE$  и  $FC$  происходят процессы испарения жидкой фазы и сублимации твердых растворов, а участок  $EF$  соответствует кипению расплава. Коэффициенты активности атомов  $f_{\text{Cu}}$  и  $f_{\text{Ag}}$  при кипении определяются из формулы

$$\frac{f_{\text{Ag}}}{f_{\text{Cu}}} = \left( \frac{R_{\text{Ag}}}{R_{\text{Cu}}} \right)^3, \quad (2)$$

где  $R_{\text{Ag}}$ ,  $R_{\text{Cu}}$  – радиус атома вблизи температуры плавления,  $R_{\text{Ag}} = 0,1445 \text{ нм}$ ,  $R_{\text{Cu}} = 0,1280 \text{ нм}$ , тогда, подставляя значения  $R_{\text{Ag}}$  и  $R_{\text{Cu}}$ , получаем  $\frac{f_{\text{Ag}}}{f_{\text{Cu}}} = 1,44$ .

Средние значения давлений паров меди и серебра  $P_{\text{Ag}}$  в диапазоне температур от 1100 до 1300 °C составляют 8 и 50 Па, относительные атомные массы элементов Cu и Ag равны 63,54 и 107,87 соответственно. Подставляя все указанные значения в (1), при условии  $\frac{n_{\text{Ag}}}{n_{\text{Cu}}} = 1$ , получаем:

$$1,44 \cdot \frac{50}{8} \cdot \left( \frac{63,54}{107,87} \right)^{\frac{1}{2}} = 6,9 x_{\text{Ag}} = x_{\text{Cu}}.$$

Из условия  $x_{\text{Ag}} + x_{\text{Cu}} = 1$  находим, что  $x_{\text{Ag}} = 0,1$ ,  $x_{\text{Cu}} = 0,9$ .

Таким образом установлено, что азеотропным в системе Ag–Cu является сплав, содержащий 16 мас.% (10 ат.%) Ag и 84 мас.% (90 ат.%) Cu. При температурах ниже 850 °C сплав Ag<sub>10</sub>Cu<sub>90</sub> находится в состоянии твердого раствора (рис. 3, точка *K*). Его сублимация происходит с несколько отличным соотношением паров Ag и Cu, чем при кипении, вследствие того, что активности этих элементов пропорциональны площадям, занимаемым атомами на сублимирующей поверхности. Эти площади определяются параметрами кристаллических решеток *a*, которые для Ag и Cu равны 0,4086 и 0,3615 нм соответственно:

$$\frac{f_{\text{Ag}}}{f_{\text{Cu}}} = \frac{a_{\text{Ag}}^2}{a_{\text{Cu}}^2} = \frac{0,4086^2}{0,3615^2} = 1,28.$$

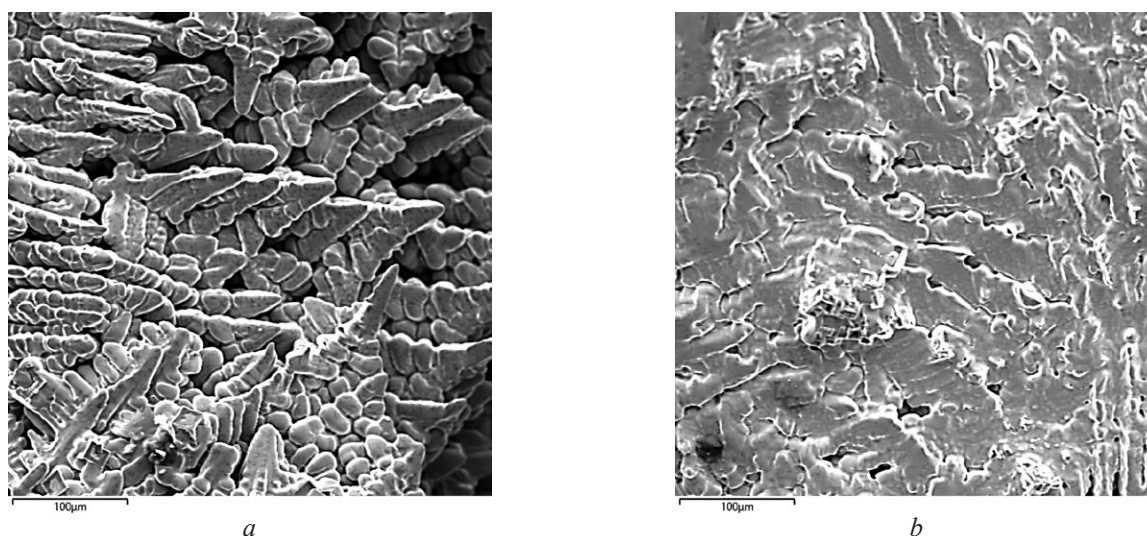
Показанная пунктиром на рис. 3 изобара *GH*, соответствующая суммарному давлению паров  $\Sigma p(\text{Ag}, \text{Cu}) = 10$  Па, проходит через минимум в точке *M*, соответствующей сплаву Ag<sub>10</sub>Cu<sub>90</sub>.

### Материалы и методы исследования

Для приготовления сплавов систем Cu–Ni и Ag–Cu использовали медь марки М0 и никель марки Н0 согласно ГОСТ 492–2006 «Цветные металлы. Никель. Цинк. Технические условия. Марки» и сплав серебра с медью (92,5 мас.% Ag, 7,5 мас.% Cu, проба 925). Плавку проводили в модернизированной индукционной печи типа ИСВ 0.004. ПИМ1 в тиглях из диоксида циркония в атмосфере аргона. Из полученных отливок вырезали образцы массой до 5 г и после повторной их переплавки в вакууме ( $1 \cdot 10^{-2}$  Па) в тиглях из спектрально чистого графита проводили электронно-лучевое испарение полученных вакуумным переплавом слитков. Пленки толщиной до 200 нм осаждали на подложки из монокристаллического кремния с предварительно выращенным на их поверхности слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 0,4 мкм. Элементный состав поверхностных слоев извлеченного из тигля слитка сплава Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>, а также осажденной при его испарении пленки толщиной 200 нм исследовали с помощью электронного микроскопа Tescan Mira 3, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments AZtecLive Standard с безазотным детектором Ultim MAX 100.

### Результаты исследований и их обсуждение

Микрорельеф участков поверхности слитка сплава Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>, сформированный при кристаллизации слитка в зонах кипения расплава (рис. 4, *a*), температура которых при прямом воздействии электронного луча была выше 1350 °C, и в зонах сублимации (рис. 4, *b*), температура которых была ниже линии солидуса, представлен на рис. 4.

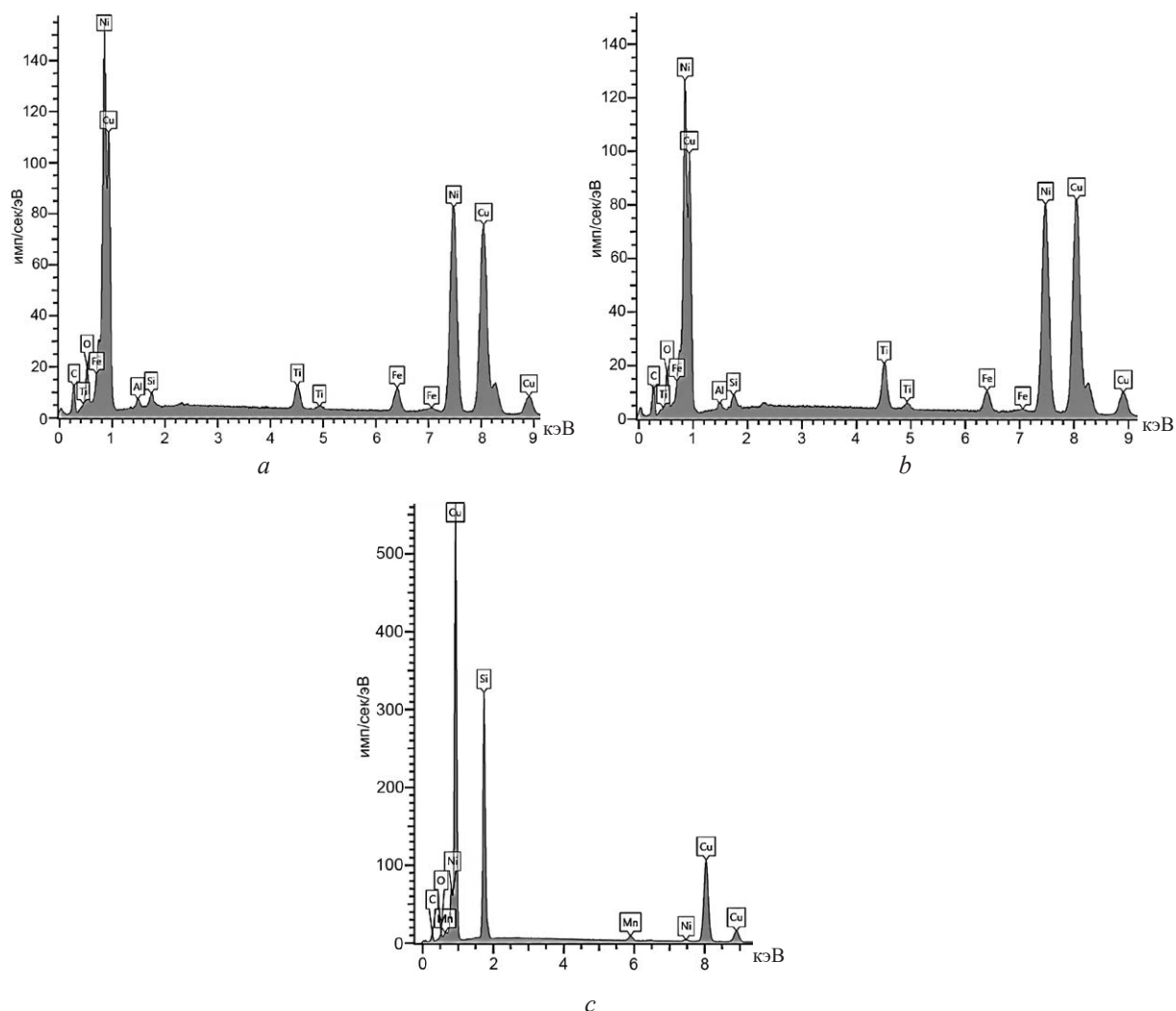


**Рис. 4.** Микрорельеф участков поверхности сплава Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>, сформировавшихся при его: *a* – кипении,  $T = 1400$  °C; *b* – сублимации,  $T \approx 1300$  °C  
**Fig. 4.** Microrelief of sections of the surface of the Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> alloy formed during its: *a* – boiling,  $T = 1400$  °C; *b* – sublimation,  $T \approx 1300$  °C

В зонах кипения сплава микрорельеф поверхности после кристаллизации слитка состоит из столбчатых кристаллитов конической формы с закругленными вершинами размерами от 10 до 70 мкм (рис. 4, а). В зонах сублимации формируется сглаженный микрорельеф поверхности, состоящий из кристаллитов размерами до 120 мкм с волнообразными границами между ними. Результаты исследований элементного состава поверхностных слоев слитка сплава  $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ , сформированных при кипении и сублимации, а также осажденного покрытия толщиной 200 нм, представлены в табл. 1 и на рис. 5.

**Таблица 1.** Средние значения содержания элементов в зонах испарения и сублимации сплава  $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$  и в пленке  
**Table 1.** Average values of the content of elements in the zones of evaporation and sublimation alloy  $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$  and in film

Объект / Object	Содержание, мас.% / Content, wt.%					
	основных элементов / basic elements		примесей / impurities			
	Ni	Cu	C	O	Si	Прочие
Зона кипения	39,59	44,29	8,31	2,83	0,54	4,43
Зона сублимации	36,75	47,16	7,90	2,59	0,49	4,75
Покровение (пленка)	0,89	61,11	9,12	0,89	26,46	1,53



**Рис. 5.** Спектрограммы поверхностного слоя сплава  $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$  в зонах кипения (а), сублимации (b) и покрытия (с), полученного методом электронно-лучевого испарения, мас. %

**Fig. 5.** Spectrograms of the surface layer of the  $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$  alloy in the zones of boiling (a), sublimation (b) and the film (c), obtained by electron beam evaporation, wt. %

Содержание основных элементов Cu и Ni в зоне кипения сплава Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> составило 49,2 и 50,8 ат.% соответственно, в зоне сублимации – 46 ат.% Ni и 54 ат.% Cu. Поскольку отношения активностей Ni и Cu при сублимации  $\frac{f_{Ni}}{f_{Cu}} = \left(\frac{R_{Ni}}{R_{Cu}}\right)^2 = 0,9476$  больше, чем при кипении сплава  $\left(\frac{f_{Ni}}{f_{Cu}} = 0,9224\right)$ , поверхностный слой зоны сублимации обедняется никелем и обогащается медью. Элементный состав покрытия толщиной 200 нм более чем в 60 раз превышает содержание атомов никеля, что согласуется с проведенными выше расчетами.

Элементы Si и O на спектрограмме покрытия (рис. 5, с) присутствуют вследствие того, что толщина анализируемого при энергии электронов 20 кВ поверхностного слоя образца превышает толщину осажденного на кремниевую подложку покрытия. Углерод в пленке присутствует благодаря использованию графитовых тиглей.

Таким образом, экспериментально установлено, что при электронно-лучевом способе испарения сплавов системы Cu–Ni элементный состав покрытий существенно отличается от составов испаряемых сплавов. В связи с этим более приемлемый способ получения покрытий стабильного состава в системе Cu–Ni – одновременное параллельное электронно-лучевое испарение меди и никеля из двух тиглей. Как следует из рис. 1, при разнице температур испарения ~300 °С давления паров Cu (1300 °С) и Ni (1600 °С) примерно равны. Следовательно, состав покрытий в этом случае будет близок к эквиаtomному (Cu<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>). Преимущества последовательного нанесения слоев меди и никеля были использованы при разработке технологии изготовления многослойных тонкопленочных экранов ЭМИ [6].

Составы сплавов системы Ag–Cu, а также средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 50 нм, полученных методом электронно-лучевого испарения, приведены в табл. 2. Каждое значение рассчитано по данным анализа не менее трех образцов. Из табл. 2 следует, что при атомном соотношении элементов в сплаве Cu:Ag = 90:10 такое же соотношение элементов сохраняется и в покрытии, т. е. происходит конгруэнтное испарение сплава. При отклонении от расчетного соотношения элементов Ag и Cu происходит фракционирование сплава с соответствующим изменением элементного состава покрытия.

**Таблица 2.** Составы сплавов системы Ag–Cu и средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 50 нм, полученных электронно-лучевым испарением  
**Table 2.** Compositions of alloys of the Ag–Cu system and average contents of elements in 50 nm thick coatings obtained by electron-beam evaporation

Элементный состав сплава, ат.% / Elemental composition of the alloy, at.%		Состав покрытия толщиной 50 нм, ат.% / Coating composition of 50 nm thickness, at.%		
Ag	Cu	Ag	Cu	Прочие
30	70	45,4	51,5	3,1
20	80	28,0	67,8	4,2
10	90	10,0	84,2	5,8
5	95	3,4	90,3	6,3

## Заключение

1. Рассмотрены процессы формирования покрытий систем Cu–Ni и Ag–Cu стабильного элементного состава методом электронно-лучевого испарения. Исследованы микрорельеф и элементный состав поверхностного слоя сплавов в зонах их испарения и сублимации, а также элементный состав осаждаемых покрытий. Предложен способ получения пленок стабильного состава в системе Cu–Ni, заключающийся в одновременном электронно-лучевом испарении меди и никеля из двух тиглей.

2. Рассчитан и экспериментально проверен азеотропный состав сплава системы Ag–Cu. Результаты исследований использованы при разработке составов и технологии изготовления тонкопленочных экранов электромагнитного излучения. Получены патенты Республики Беларусь на экранирующие покрытия, содержащие слои из сплавов азеотропных составов [7, 8].

### Список литературы

1. Зеленин, В. А. Силицидные сплавы азеотропных и эвтектических составов для катодов и мишеней вакуумно-дуговых и магнетронных установок / В. А. Зеленин // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. в 2 кн. Кн. 1. Новые технологии и материалы; редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2021. С. 208–223.*
2. Оптически прозрачные электромагнитные экраны / А. Т. Волочко [и др.] // *Доклады БГУИР. 2015. № 3. С. 53–57.*
3. Зеленин, В. А. Высокостабильные элементы и структуры для изделий наноэлектроники / В. А. Зеленин. Минск: Беларус. навука, 2022. 290 с.
4. Несмеянов, А. Н. Давление пара химических элементов / А. Н. Несмеянов. М.: Изд. АН СССР, 1961. 397 с.
5. Гладинов, А. Д. Расчет концентраций и температур плавления высококремнистых эвтектик в системах P3M–Si / А. Д. Гладинов // *Литье и металлургия 2019: сб. науч. работ II Междунар. науч.-практ. интернет-конф. студ. и магистр., 16–17 окт. 2019 г.; ред. А. П. Божок, И. А. Иванов. Минск: БНТУ, 2019. С. 62–63.*
6. Влияние режимов формирования на структуру тонких покрытий, используемых в многослойных экранах ЭМИ / Е. О. Нарушко [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. ФТИ НАН Беларуси. Минск, 2019. С. 60–66.*
7. Защитное экранирующее покрытие дисплея: пат. 23414 Респ. Беларусь, МПК G 12B 17/02, H 01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44 // А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, Г. В. Марков; заявитель Физико-технический институт НАН Беларуси», № а 20190321. заявл. 14.11.2019; опубл. 30.06.2021 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. С. 10.*
8. Экранирующее покрытие дисплея: пат. 23435 Респ. Беларусь, МПК G 12B 17/02, H01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44 / А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, Г. В. Марков; заявитель Физико-технический институт НАН Беларуси; № а 20190320, заявл. 14.11.2019; опубл. 30.06.2021 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2021. С. 6.*

### References

1. Zelenin V. A. (2021) Silicide Alloys of Azeotropic and Eutectic Compositions for Cathodes and Targets of Vacuum-Arc and Magnetron Installations. *Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials. Sat. Scientific Works. In 2 Books. Book 1. New Technologies and Materials.* Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ. 208–223 (in Russian).
2. Volochko A. T., Zelenin V. A., Markov G. V., Narushko E. O. (2015) Optically Transparent Electromagnetic Screens. *Doklady BGUIR.* (3), 53–57 (in Russian).
3. Zelenin V. A. (2022) *Highly Stable Elements and Structures for Nanoelectronic Products.* Minsk, Belarusian Science Publ. 290 (in Russian).
4. Nesmeyanov A. N. (1961) *Vapor Pressure of Chemical Elements.* Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 397 (in Russian).
5. Gladinov A. D., Zelenin V. A. (2019) Calculation of Concentrations and Melting Temperatures of High-Silicon Eutectics in the P3M–Si Systems. *Casting and Metallurgy, Collection of Scientific Works of the II International Scientific and Practical Internet-Conference Among Students and Master's Students, Oct. 16–17, 2019.* Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 62–63 (in Russian).
6. Narushko E. O., Volochko A. T., Zelenin V. A., Markov G. V. (2019) Influence of Formation Modes on the Structure of Thin Coatings Used in EMI Multilayer Screens. *Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials, Sat. Scientific Papers Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus.* Minsk. 60–66 (in Russian).
7. Volochko A. T., Zelenin V. A., Narushko E. O., Markov G. V. (2019) Protective Screening Coating of the Display. *Patent 23414 Rep. Belarus, IPC G 12B 17/02, H 01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44. Applicant Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, No a 20190321, App. 14.11.2019, Publ. 30.06.2021.* Afitsyyny Bul., National Center Intellectual. Ulasnastsi. 10 (in Russian).
8. Volochko A. T., Zelenin V. A., Narushko E. O., Markov G. V. (2021) *Shielding Display Coating. US Patent 23435 Rep. Belarus, IPC G 12B 17/02, H01J 29/88, C 03C 17/34, H 01J 11/44. Applicant Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, No a 20190320, App. 14.11.2019. Publ. 30.06.2021.* Afitsyyny Bul., National Center intellectual. Ulasnastsi. 6 (in Russian).

### Вклад авторов

Зеленин В. А. разработал диаграммы состояния, дополненные изобарами и конодами, подготовил рукопись статьи.



Нарушко Е. О. разработала сплавы азеотропных составов.  
Гладинов А. Д. исследовал микрорельефы поверхностей образцов после их сублимации и испарения.

#### **Authors' contribution**

Zelenin V. A. developed state diagrams, supplemented by isobars and conodes, prepared the manuscript of the article.

Narushko E. O. developed alloys of azeotropic compositions.

Gladinov A. D. studied the microreliefs of the surfaces of samples after their sublimation and evaporation.

#### **Сведения об авторах**

**Зеленин В. А.**, д. т. н., доцент, гл. н. с. Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси

**Нарушко Е. О.**, к. т. н., инженер-технолог ОАО «Пеленг»

**Гладинов А. Д.**, мл. н. с. ОАО «Приборостроительный завод Оптрон»

#### **Адрес для корреспонденции**

220114, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Академика Высоцкого, 3–26  
Тел.: +375 29 345-86-72  
E-mail: lena-narushko@mail.ru  
Нарушко Елена Олеговна

#### **Information about the authors**

**Zelenin V. A.**, Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Principal Researcher at the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

**Narushko E. O.**, Cand. of Sci., Process Engineer at the Joint-Stock Company “Peleng”

**Gladinov A. D.**, Junior Researcher at the Joint-Stock Company “Instrument-Making Plant Optron”

#### **Address for correspondence**

220114, Republic of Belarus,  
Minsk, Academician Vysotsky St., 3–26  
Tel.: +375 29 345-86-72  
E-mail: lena-narushko@mail.ru  
Narushko Elena Olegovna