



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-5-12>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 539.216:546.824.31

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК СПЛАВОВ СИСТЕМ Cr–Ni, Cr–Ni–Si И Fe–Ni МЕТОДАМИ СУБЛИМАЦИИ И ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

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 «Оптрон» НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21.02.2023

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

**Аннотация.** Рассмотрены процессы формирования пленок сплавов систем Cr–Ni, Cr–Ni–Si и Fe–Ni стабильного элементного состава методами испарения. Показано, что из-за большой разницы в температурах плавления Ni и Cr пленки нихрома получают методом сублимации. Предложена конструкция испарителя, позволяющая стабилизировать состав пленок. Проведены расчеты азеотропных составов сплавов системы Cr–Ni–Si. Определено положение изобар суммарного давления железа и никеля на диаграмме состояния, при испарении в вакууме. Рассчитан и экспериментально проверен азеотропный состав сплава системы Fe–Ni.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, сплавы систем Cr–Ni, Cr–Ni–Si и Fe–Ni, сублимация, испарение, элементный состав, давление паров, азеотропные составы.

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

**Для цитирования.** Зеленин, В. А. Формирование пленок сплавов систем Cr–Ni, Cr–Ni–Si и Fe–Ni методами сублимации и испарения для изделий электронной техники / В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко, А. Д. Гладинов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 5–12. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-5-12>.

## FORMATION OF FILMS OF ALLOYS OF Cr–Ni, Cr–Ni–Si AND Fe–Ni SYSTEMS BY SUBLIMATION AND EVAPORATION METHODS FOR ELECTRONIC PRODUCTS

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 “Optron” of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.02.2023

**Abstract.** The processes of formation of films of alloys of the Cr–Ni, Cr–Ni–Si and Fe–Ni systems with a stable elemental composition by evaporation methods are considered. It is shown that due to the large difference in the melting temperatures of Ni and Cr, nichrome films are obtained by sublimation. The design of the evaporator is proposed, which makes it possible to stabilize the composition of the films. Calculations of azeotropic compo-

sitions of alloys of the Cr–Ni–Si system have been carried out. The position of the isobars of the total pressure of iron and nickel on the state diagram was determined during evaporation in vacuum. The azeotropic composition of the alloy of the Fe–Ni system was calculated and experimentally verified.

**Keywords:** thin films, alloys of the Cr–Ni, Cr–Ni–Si and Fe–Ni systems, sublimation, evaporation, elemental composition, vapor pressure, azeotropic compositions.

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

**For citation.** Zelenin V. A., Narushko E. O., Gladinov A. D. (2023) Formation of Films of Alloys of Cr–Ni, Cr–Ni–Si and Fe–Ni Systems by Sublimation and Evaporation Methods for Electronic Products. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 5–12. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-5-12> (in Russian).

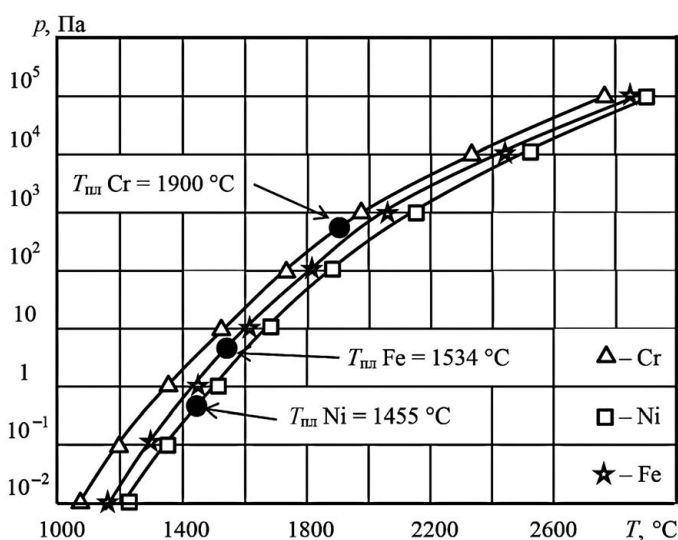
## Введение

Одна из проблем использования многокомпонентных материалов при изготовлении изделий электронной техники состоит в том, что тонкопленочные элементы и структуры из магнитных материалов, например из пермаллоев, обладающих высокой относительной магнитной проницаемостью, как правило, получают методами испарения. В случаях, когда предпочтительнее технологии распыления, выбирают сплавы с низкими значениями температуры Кюри, например Ni + 7 мас.% V, Ni + 15 мас.% Cr или Ni + 35 мас.% Cu, мишени из которых не экранируют магнитное поле. Тем не менее в ряде случаев формирование многослойных структур изделий электронной техники проводят методами испарения [1, 2]. Вопросы влияния условий испарения в вакууме на элементный состав пленок систем Cu–Ni и Ag–Cu рассмотрены в [3].

Исследованы процессы формирования пленок стабильного элементного состава методами сублимации и испарения, широко используемыми при изготовлении изделий электронной техники сплавов систем Cr–Ni, Cr–Ni–Si и Fe–Ni.

## Давление паров Cr, Ni и Fe, сублимация сплавов системы Cr–Ni

Зависимости давления паров элементов Cr, Ni и Fe от температуры, согласно [4], приведены на рис. 1. Как следует из рис. 1, давление паров Cr при температурах 1200–1400 °C на порядок больше, чем у Ni, а давление паров Fe во всем представленном на рис. 1 диапазоне температур больше, чем у Ni в 1,5–2 раза.



**Рис. 1.** Влияние температуры на давление паров Cr, Ni и Fe  
**Fig. 1.** Effect of temperature on vapor pressure of Cr, Ni and Fe

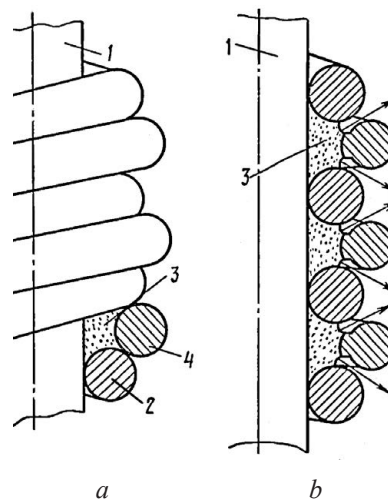
Из-за большой разницы в температурах плавления Ni (1455 °C) и Cr (1900 °C) пленки их сплавов проще всего получить методом сублимации испарителей, изготовленных из сплава X20H80 при температурах 1300–1400 °C. Поскольку сплав X20H80 представляет собой гомогенный твер-

дый раствор хрома в никеле, его сублимация подчиняется закону Рауля, т. е. отношение числа атомов никеля  $n_{Ni}$  к числу атомов хрома  $n_{Cr}$  в потоке пара определяется выражением

$$\frac{n_{Ni}}{n_{Cr}} = \frac{f_{Ni} x_{Ni} p_{Ni}^* \sqrt{A_{Cr}}}{f_{Cr} x_{Cr} p_{Cr}^* \sqrt{A_{Ni}}}, \quad (1)$$

где  $f_{Ni}$ ,  $f_{Cr}$  – коэффициент активности атомов Ni и Cr;  $x_{Ni}$ ,  $x_{Cr}$  – молярная концентрация Ni и Cr в поверхностном слое испарителя,  $x_{Ni} + x_{Cr} = 1$ ;  $p_{Ni}^*$ ,  $p_{Cr}^*$  – термодинамически равновесное давление паров Ni и Cr при температуре сублимации;  $A_{Ni}$ ,  $A_{Cr}$  – атомная масса Ni и Cr.

Молярные концентрации Ni и Cr в поверхностном слое испарителя из сплава X20H80 при температуре  $\sim 1300$  °C изменяются от  $x_{Ni} = 0,78$ ,  $x_{Cr} = 0,22$  в начальный период процесса сублимации до  $x_{Ni} = 0,97$ ,  $x_{Cr} = 0,03$ , устанавливающихся по истечении 3 ч. Коэффициенты активности изменяются от  $f_{Ni} = 0,9$  и  $f_{Cr} = 1,0$  – для начала процесса до  $f_{Ni} = 1,0$  и  $f_{Cr} = 0,5$  – по истечении 3 ч, т. е. отношение  $f_{Ni}/f_{Cr}$  по истечении  $\sim 30$  мин сублимации близко к 1,0 [5]. При этом в соответствии с (1) соотношение атомов Ni:Cr = 1:1 в пленке достигается при концентрации атомов Ni и Cr в поверхностном слое испарителя  $\frac{x_{Ni}}{x_{Cr}} \approx 10$ . Из-за обеднения испарителя атомами хрома их концентрация в осаждаемой пленке снижается. Стабилизировать состав пленок позволяет использование испарителей специальной конструкции (рис. 2) [6].



**Рис. 2.** Общий вид испарителя для нанесения пленок нихрома (а), сублимация смеси порошков никеля и хрома через зазоры между спиралями (б): 1 – стержень из нихрома; 2, 4 – спирали из нихрома; 3 – смесь порошков никеля и хрома

**Fig. 2.** General view of the evaporator for deposition of nichrome films (a), sublimation of a mixture of nickel and chromium powders through the gaps between the spirals (b): 1 – nichrome rod; 2, 4 – nichrome spirals; 3 – a mixture of nickel and chromium powders

Стабильность элементного состава пленок, осаждаемых методом сублимации испарителя предложенной конструкции, обусловлена тем, что площадь обедненного хромом поверхностного слоя нихромовых спиралей со временем уменьшается, а площадь поверхности сублимации смеси порошков через зазоры между спиралями увеличивается. Использование испарителя представленной на рис. 2 конструкции позволило разработать технологию серийного производства прецизионных тонкопленочных нихромовых резисторов с температурным коэффициентом сопротивления в диапазоне  $\pm(100 \cdot 10^{-6})$  K<sup>-1</sup>. Кроме того, повысить однородность состава пленок двухкомпонентного сплава можно введением в сплав третьего компонента. Так, в [7] было показано, что использование в качестве третьего компонента кремния позволяет, наряду с повышением стабильности элементного состава, увеличить поверхностное сопротивление пленок.

### Расчет сплава системы Cr–Ni–Si азеотропного состава

В системе Cr–Ni–Si образуются два термодинамически стабильных соединения CrSi<sub>2</sub> и NiSi, испарение которых происходит конгруэнтно, т. е. составы их паров близки к стехиометрическим

составам данных силицидов. Однако при испарении сплавов и совместном испарении смесей силицидов воспроизведение состава пленок достигается только при условии, когда испарение всех составляющих смеси заканчивается одновременно. Для достижения одновременности завершения испарения всех составляющих их концентрации должны быть пропорциональны давлениям паров.

Известно, что процесс испарения смесей термодинамически стабильных соединений подчиняется зависимости испарения в вакууме растворов или химических соединений, имеющих на диаграмме состояния широкую область гомогенности [8]. При использовании в качестве составляющих сплава термодинамически стабильных соединений  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$  условие получения однородных пленок постоянного химического состава может быть записано в виде уравнений:

$$x_{\text{NiSi}} : x_{\text{CrSi}_2} = \frac{\sum \overline{p_{\text{NiSi}}}}{\sqrt{M_{\text{NiSi}}}} : \frac{\sum \overline{p_{\text{CrSi}_2}}}{\sqrt{M_{\text{CrSi}_2}}}; \quad (2)$$

$$x_{\text{NiSi}} + x_{\text{CrSi}_2} = 1, \quad (3)$$

где  $x_{\text{NiSi}}$ ,  $x_{\text{CrSi}_2}$  – молярная концентрация  $\text{NiSi}$  и  $\text{CrSi}_2$  в сплаве;  $\sum \overline{p_{\text{NiSi}}}$ ,  $\sum \overline{p_{\text{CrSi}_2}}$  – среднее значение суммарного давления паров соединений.

При получении сплавов системы  $\text{Cr-Ni-Si}$  отдельно приготавливали двухкомпонентные сплавы (лигатуры), соответствующие стехиометрии соединений  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$ , и затем по формулам (2) и (3) определяли их молярные концентрации в сплаве. Давления паров элементов при диссоциации силицидов  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$  рассчитывали по следующим уравнениям, взятым из [9]:

– для  $\text{CrSi}_2$ :

$$\lg p_{\text{Si}} = \frac{-25129}{T} - 0,331 \cdot 10^{-3} T + 8,071; \quad (4)$$

$$\lg p_{\text{Cr}} = \frac{-25129}{T} - 0,331 \cdot 10^{-3} T + 7,770; \quad (5)$$

– для  $\text{NiSi}$ :

$$\lg p_{\text{Ni}} = \frac{-25400}{T} - 0,361 \cdot 10^{-3} T + 8,069. \quad (6)$$

Расчетные значения давлений паров элементов при диссоциации силицидов  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$  в диапазоне температур 2000–2500 К приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, отношение суммарных давлений паров соединений  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$  в диапазоне температур испарения от 2000 до 2500 К находится в пределах от 1,18 до 1,15, в то время как давления паров элементов  $\text{Cr}$  и  $\text{Ni}$  отличаются на порядок (рис. 1).

**Таблица 1.** Давление паров при различных температурах испарения силицидов  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$   
**Table 1.** Vapor pressure at different evaporation temperatures of  $\text{CrSi}_2$  and  $\text{NiSi}$  silicides

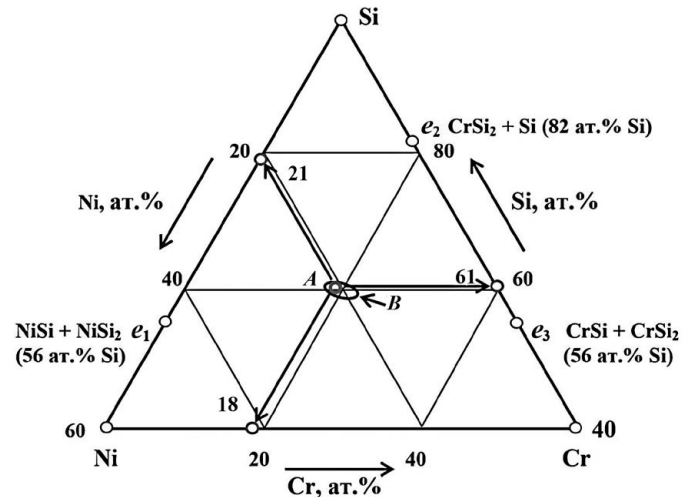
Соединение / Compound	Показатель / Index	Давление паров, Па, при температуре, К / Vapor pressure, Pa, at the temperature, K					
		2000	2100	2200	2300	2400	2500
$\text{CrSi}_2$	$p_{\text{Cr}}$	0,350	1,28	4,16	12,1	32,0	78,0
	$p_{\text{Si}}$	0,699	2,57	8,33	24,2	64,0	156,0
	$\Sigma p_{\text{CrSi}_2}$	1,049	3,85	12,5	36,3	96,0	232,0
$\text{NiSi}$	$p_{\text{Ni}} = p_{\text{Si}}$	0,444	1,64	5,36	15,7	41,6	101,0
	$\Sigma p_{\text{NiSi}}$	0,888	3,28	10,72	31,4	83,2	202,0
	$\Sigma p_{\text{CrSi}_2} / \Sigma p_{\text{NiSi}}$	1,180	1,17	1,16	1,156	1,154	1,15

Испарение трехкомпонентного сплава  $\text{Cr-Ni-Si}$  рассматривали как процесс диссоциации смеси соединений  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$ , в достаточно высокой степени сохраняющих в расплаве свои индивидуальные свойства. В соответствии с данными, приведенными в табл. 1, расчетная температура испарения сплава, обеспечивающая требуемое давление паров, составляет 2100 К. Прием-

лемый интервал температур испарения 2050–2150 К. Средние значения давления паров в данном интервале температур для  $\text{CrSi}_2$  и  $\text{NiSi}$  составляют соответственно примерно 5,5 и 4,2 Па.

По уравнениям (2) и (3) находим молярные концентрации силицидов в сплаве:  $x_{\text{CrSi}_2} = 0,54$ ,  $x_{\text{NiSi}} = 0,46$ . Содержание силицидов в сплаве:  $C_{\text{CrSi}_2} = 59,4$  мас.%;  $C_{\text{NiSi}} = 40,9$  мас.%; Содержание элементов в сплаве:  $C_{\text{Cr}} = 28,5$  мас.% (18,0 ат.%;);  $C_{\text{Ni}} = 27,5$  мас.% (21,0 ат.%;);  $C_{\text{Si}} = 44$  мас.% (61,0 ат.%).

Расположение резистивного сплава системы  $\text{Cr-Ni-Si}$  азеотропного состава (точка  $A$ ) представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Расположение сплава азеотропного состава системы  $\text{Cr-Ni-Si}$  для температуры испарения 2100 К (точка  $A$ ) и сплавов азеотропных составов для температур испарения 2000–2500 К (область  $B$ )

**Fig. 3.** Disposition of an alloy of azeotropic composition of the  $\text{Cr-Ni-Si}$  system for an evaporation temperature of 2100 K (point  $A$ ) and alloys of azeotropic compositions for evaporation temperatures of 2000–2500 K (region  $B$ )

Выделенная на диаграмме овальная область  $B$  соответствует полному набору сплавов азеотропных составов, испаряемых в диапазоне температур от 2000 до 2500 К. С повышением температуры испарения содержание кремния и никеля в сплаве уменьшается, а хрома – увеличивается. По стехиометрическому составу все азеотропные сплавы близки к условному соединению  $(\text{CrNi})\text{Si}_3$ .

### Процесс испарения сплавов системы $\text{Fe-Ni}$

Диаграмма состояния системы  $\text{Fe-Ni}$  представлена на рис. 4. Сплавы этой системы являются неограниченными твердыми растворами, поэтому при их испарении фазовый переход ж→пар подчиняется закону Рауля (1). Размеры радиусов элементов вблизи температур их плавления –  $R_{\text{Ni}} = 0,1246$  нм. Следовательно, соотношение активностей  $\text{Fe}$  и  $\text{Ni}$  в соответствии с [3]

$$\frac{f_{\text{Fe}}}{f_{\text{Ni}}} = \left( \frac{R_{\text{Fe}}}{R_{\text{Ni}}} \right)^3 = \left( \frac{0,1290}{0,1246} \right)^3 = 1,11.$$

Необходимая скорость нанесения покрытий систем  $\text{Fe-Ni}$  толщиной 200–500 нм обеспечивается при давлении паров  $\text{Ni}$  и  $\text{Fe}$  в пределах от 1 до 20 Па. Согласно рис. 4, температуры испарения сплавов системы  $\text{Fe-Ni}$  должны находиться в диапазоне 1500–1650 °С. Среднее значение давления паров  $\text{Fe}$  в данном температурном диапазоне составляет 13 Па, а паров  $\text{Ni}$  – 11 Па. Атомные массы элементов  $\text{Ni}$  и  $\text{Fe}$  равны 58,71 и 55,85 а. е. м. соответственно. Подставляя все указанные значения в (1), для системы  $\text{Fe-Ni}$  получаем:

$$1,11 \cdot \left( \frac{13}{11} \right) \cdot \left( \frac{58,71}{55,85} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,345x_{\text{Ni}} = x_{\text{Fe}}.$$

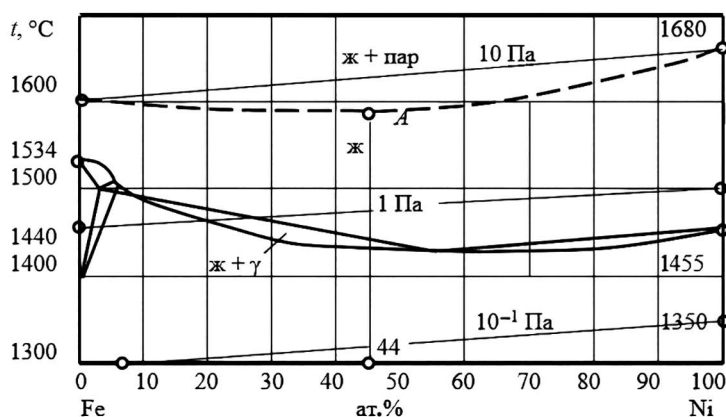


Рис. 4. Диаграмма состояния системы Fe–Ni  
Fig. 4. State diagram of the Fe–Ni system

Из условия  $x_{Ni} + x_{Cr} = 1$  находим, что  $x_{Fe} = 0,574$ ,  $x_{Ni} = 0,426$ . Таким образом, согласно проведенным расчетам установлено, что азеотропным в системе Fe–Ni является сплав, содержащий 56 мас.% (~57 ат.%) Fe и 44 мас.% (~43 ат.%) Ni. Этому составу соответствует минимальное значение температуры, при которой суммарное давление паров достигает 10 Па (рис. 4, точка A на изобаре).

О воспроизводимости состава слоев из сплавов системы Fe–Ni, полученных электронно-лучевым методом испарения, судили по результатам анализа их элементного состава. В качестве исходных материалов использовали никель марки НП2, кобальт К0 и железо 005ЖР. Из данных материалов были приготовлены пять навесок сплавов.

### Результаты исследований и их обсуждение

Составы сплавов, а также средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 200 нм приведены в табл. 2. Составы сплавов системы Fe–Ni, а также средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 200 нм, полученных методом их электронно-лучевого испарения, приведены в табл. 2. Каждое значение получено по данным элементного анализа не менее трех образцов.

Таблица 2. Составы сплавов системы Fe–Ni и средние значения содержания элементов в покрытиях толщиной 200 нм, полученных электронно-лучевым испарением  
Table 2. Compositions of alloys of the Fe–Ni system and average contents of elements in 200 nm thick coatings obtained by electron-beam evaporation

Номер сплава / Number of alloy	Состав сплава, ат.% / Composition of alloy, at.%		Состав пленок толщиной 200 нм, ат.% / Composition of films 200 nm thick, at.%		
	Fe	Ni	Fe	Ni	Прочие
1	30	70	51,5	45,4	3,1
2	40	60	38,8	58,0	3,2
3	55	45	51,0	47,6	1,4
4	60	40	58,7	38,8	2,5
5	70	30	68,5	28,7	2,8

Из табл. 2 видно, что элементный состав пленок при испарении сплава состава Fe55Ni45 сохраняется, т. е. происходит его конгруэнтное испарение. Вместе с тем, ввиду весьма близких значений давления паров, молекулярных масс, параметров кристаллических решеток Fe и Ni, а также неограниченной растворимости этих элементов в расплавах, элементный состав пленок системы Fe–Ni достаточно близок ко всем исследованным авторами составам испаряемых сплавов.

## Заключение

1. Рассмотрены процессы формирования пленок сплавов систем Cr–Ni, Cr–Ni–Si и Fe–Ni методами сублимации и испарения. Показано, что при поддержании концентрации атомов Ni и Cr в поверхностном слое испарителя  $\frac{x_{Ni}}{x_{Cr}} \approx 10$  формируются пленки с соотношением элементов Ni:Cr  $\approx 1:1$ .

2. Предложена конструкция испарителя, позволяющая стабилизировать состав пленок нихрома. Проведены расчеты и определена область сплавов азеотропных составов системы Cr–Ni–Si для температур испарения 2000–2500 К. Рассчитаны и экспериментально подтверждены азеотропные составы сплавов систем Cr–Ni–Si и Fe–Ni [10, 11].

## 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. Минск: Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 2021. Кн. 1. Новые технологии и материалы. С. 208–223.
2. Волочко, А. Т. Многослойные покрытия на элементах компьютера как средство технической защиты информации / А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Е. О. Нарушко // Проблемы информационной безопасности: II Междунар. науч.-практ. конф., г. Симферополь, 25–27 февр. 2016 г. Симферополь, 2016. С. 16–19.
3. 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>.
4. Технология тонких пленок: справочник. В 2 т. / Пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. М.: Советское радио, 1977. Т. 1. С. 9–174.
5. Технология тонких пленок: справочник. В 2 т. / Пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. М.: Советское радио, 1977. Т. 2. С. 578–622.
6. Испаритель для нанесения нихромовых пленок: а. с. 1120706 СССР / Л. И. Гурский, А. П. Жебин, В. А. Зеленин. Заявлено 21.04.1982. Опубликовано 27.09.2013. Бюл. № 27.
7. Структура, топология и свойства пленочных резисторов / Л. И. Гурский [и др.]; под ред. В. А. Лабунова. Минск: Наука и техника, 1987. 264 с.
8. Куликов, И. С. Термическая диссоциация соединений / И. С. Куликов. М.: Metallurgy, 1969. 574 с.
9. Зеленин, В. А. Высокостабильные элементы и структуры для изделий нанoeлектроники / В. А. Зеленин. Минск: Белорусская наука, 2022. 290 с.
10. Гладинов, А. Д. Расчет температур плавления резистивных сплавов систем Co–Cr–Si и Co–Cr–La–Si / А. Д. Гладинов // Литые и металлургические – 2020: сб. науч. работ III Междунар. науч.-практ. интернет-конф. студентов и магистрантов, г. Минск, 18–19 нояб. 2020 г. Минск: Белор. национ. техн. ун-т, 2020. С. 85–87.
11. Зеленин, В. А. Экранирующие свойства покрытий системы Ni–Fe / В. А. Зеленин, Г. В. Марков, Е. О. Нарушко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. Минск: Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 2014. Кн. 1. Материаловедение. С. 271–280.

## 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: a Collection of Scientific Papers. In 2 Books. Book 1. New Technologies and Materials*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 208–223 (in Russian).
2. Volochko A. T., Zelenin V. A., Narushko E. O. (2016) Multilayer Coatings on Computer Elements as a Means of Technical Protection of Information. *Problems of Information Security, II International Scientific and Practical Conference, Simferopol, Febr. 25–27, 2016*. Simferopol. 16–19 (in Russian).
3. 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).
4. Elinson M. I., Smolko G. G. (ed.) (1977) *Thin Film Technology: a Handbook. In 2 Vol.* Moscow, Soviet Radio Publ. Vol. 1. 9–174 (in Russian).
5. Elinson M. I., Smolko G. G. (ed.) (1977) *Thin Film Technology: a Handbook. In 2 Vol.* Moscow, Soviet Radio Publ. Vol. 2. 578–622 (in Russian).
6. Gursky L. I., Zhebin A. P., Zelenin V. A. (2013) Evaporator for Applying Nichrome Films. *Certificate of Authorship. 1120706 USSR*. Claimed 21.04.1982. Published on 27.09.2013. Bulletin No 27.

7. Gurskii L. I., Zelenin V. A., Zhebin A. P. et al. (1987) *Structure, Topology and Properties of Film Resistors*. Minsk, Nauka i Technika Publ. 264 (in Russian).
8. Kulikov I. S. (1969) *Thermal Dissociation of Compounds*. Moscow, Metallurgiya Publ. 574 (in Russian).
9. Zelenin V. A. (2022) *Highly Stable Elements and Structures for Nanoelectronics Products*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 290 (in Russian).
10. Gladinov A. D. (2020) Calculation of Melting Temperatures for Co–Cr–Si and Co–Cr–La–Si Resistive Alloy Systems. *Casting and Metallurgy – 2020: Collection of Scientific Works of the III International Scientific and Practical Internet-Conference for Students and Master’s Students, Minsk, Nov. 18–19, 2020*. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 85–87 (in Russian).
11. Zelenin V. A., Markov G. V., Narushko E. O. (2014) Screening Properties of Coatings of the Ni–Fe System. *Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials: Collection of Scientific Works*. Minsk, Book 1: Materials Science. 271–280.

### Вклад авторов / Authors’ contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

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

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

**Гладинов А. Д.**, м. н. с. ОАО «Оптрон» Национальной академии наук Беларуси

#### 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.), 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 Scientific Researcher at the Joint-Stock Company “Optron” of the National Academy of Sciences of Belarus

#### 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