

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-35-42>

Поступила в редакцию 23.04.2019

Received 23.04.2019

А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Н. Ю. Мельник*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Cr–Ni–Si ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния режимов термообработки на удельное поверхностное сопротивление (УПС) и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистивных пленок, полученных из мишеней системы Cr–Ni–Si методом магнетронного распыления. На основании обобщения экспериментальных данных предложена диаграмма состав–УПС пленок системы Cr–Ni–Si толщиной 100 нм. Установлено, что резистивные пленки системы Cr–Ni–Si, нанесенные методом магнетронного распыления на кремниевые полупроводниковые пластины с подслоем SiO₂, при толщине 100 нм имеют УПС до 350 Ом/кв. Показано, что для изготовления мишеней магнетронных распылительных систем (МРС) методом литья необходимо снизить температуру плавления и хрупкость сплавов, то есть определить их эвтектические составы. Проведены расчеты и установлено, что эвтектики в системе Cr–Ni–Si содержат 36,4 и 38,5 ат.% Ni, что в 4–6 раз выше, чем у сплавов серии РС этой системы. В связи с большим содержанием Ni УПС пленок эвтектических составов толщиной 100 нм находится в диапазоне от 100 до 200 Ом/кв. Отмечено, что для повышения УПС резистивных пленок и снижения температуры плавления сплавов целесообразна разработка новых четырех- и пятикомпонентных сплавов на основе системы Cr–Ni–Si с введением в нее тугоплавких (Mo, Nb) и редкоземельных (La, Y) элементов.

Ключевые слова: резистивные сплавы, мишени, электрические свойства, резистивные пленки, магнетронное распыление

Для цитирования: Волочко, А. Т. Сплавы системы Cr–Ni–Si для получения резистивных элементов интегральных микросхем методом магнетронного распыления / А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Н. Ю. Мельник // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 35–42. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-35-42>

Alexander T. Volochko, Victor A. Zelenin, Natalia Yu. Melnik*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***ALLOYS OF THE Cr–Ni–Si SYSTEM FOR OBTAINING RESISTIVE ELEMENTS OF INTEGRATED MICROCIRCUITS BY MAGNETRON SPUTTERING**

Abstract. This article presents the results of the study of the effect of annealing on the sheet resistivity and temperature coefficient of resistance (TCR) of resistive films obtained from targets of the Cr–Ni–Si system using magnetron sputtering. A diagram of the composition–sheet resistivity of the Cr–Ni–Si system films with a thickness of 100 nm is proposed. It was established that resistive films of the Cr–Ni–Si system deposited by magnetron sputtering on silicon semiconductor plates with a SiO₂ sublayer with a thickness of 100 nm, have sheet resistivity up to 350 Ω/square. It is shown that it is necessary to determine their eutectic compositions for the manufacture of targets by casting. Calculations were carried out and it was established that eutectics of the Cr–Ni–Si system contain 36.4 and 38.5 at% Ni, which is 4 to 6 times higher than in the PC series alloys of this system. Due to the high content of Ni sheet resistivity films of eutectic compositions with a thickness of 100 nm is in the range from 100 to 200 Ω/square. It was noted that it is necessary to develop new four-five-component alloys based on the Cr–Ni–Si system with the introduction of refractory (Mo, Nb) and rare-earth (La, Y) elements into it, in order to increase the sheet resistivity of films and to decrease the melting temperature of alloys.

Keywords: resistive alloys, targets, electrical properties, resistive films, magnetron sputtering

For citation: Volochko A. T., Zelenin V. A., Melnik N. Yu. Alloys of the Cr–Ni–Si system for obtaining resistive elements of integrated microcircuits by magnetron sputtering. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 35–42 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-35-42>

Введение. Особое место среди резистивных материалов занимают силициды, позволяющие получать резистивные пленки в широком диапазоне удельных сопротивлений [1]. Электропроводность пленок уменьшается с увеличением концентрации кремния, поскольку

наличие ковалентных связей металл–кремний уменьшает концентрацию свободных электронов и увеличивает удельное сопротивление. Диапазон удельных сопротивлений резистивных пленок, необходимых для решения большинства проблем, связанных с изготовлением резистивных элементов интегральных микросхем (ИМС), практически перекрыт сплавами серии РС, но не все они технологичны, что касается изготовления мишеней. Основными требованиями, которые предъявляются к мишеням для магнетронного распыления, являются отсутствие быстродиффундирующих в кремнии элементов (Fe, Cu и др.), однородная мелкозернистая структура сплава, низкая пористость, отсутствие трещин и неметаллических включений.

Используемые в настоящее время резистивные сплавы и мишени из них содержат в качестве основных компонентов силициды хрома, имеющие значительно более высокое удельное сопротивление по сравнению с силицидами большинства металлов [2]. Наиболее широко для нанесения резистивных пленок используются сплавы систем Cr–Ni–Si и Cr–Co–Si. Однако мишени из них, полученные методами порошковой металлургии, как правило, содержат большое количество кислорода, имеют высокую пористость и неупорядоченную структуру и вследствие этого не удовлетворяют вышеперечисленным требованиям.

Зависимость электрических свойств от технологических факторов для резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si для пленок, полученных методом термического испарения, представлены в [3]. Так как метод термического испарения заменяется более технологичным методом магнетронного распыления, существует необходимость в установлении зависимости электрических свойств от технологических факторов для пленок, полученных методом магнетронного распыления.

Целью работы являлось исследование влияния режимов термообработки на удельное поверхностное сопротивление (УПС) и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистивных пленок, полученных методом магнетронного распыления литых мишеней системы Cr–Ni–Si.

Для достижения цели решены следующие задачи:

проведен анализ составов известных резистивных сплавов серии РС, относящихся к системе Cr–Ni–Si;

проведены расчеты эвтектических составов сплавов этой системы, позволяющие снизить температуру плавления, получить мелкозернистую структуру отливок и тем самым снизить вероятность их растрескивания;

получены образцы мишеней из силицидных сплавов, удовлетворяющие предъявляемым требованиям;

исследовано влияние температуры отжига на УПС и ТКС резистивных пленок;

построена диаграмма состав–УПС резистивных пленок системы Cr–Ni–Si.

Анализ составов резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si. Для изготовления резисторов с широким диапазоном поверхностного сопротивления от 10 до 10^4 Ом/кв разработаны резистивные сплавы серии РС [2]. Составы и некоторые свойства применяемых в промышленности стандартных резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si приведены в таблице.

Предварительное заключение о литейных свойствах сплавов можно сделать на основании их положения на диаграммах состояния систем Cr–Si и Ni–Si, приведенных на рис. 1 и 2.

Как следует из рис. 1, разброс температур плавления рассматриваемых сплавов составляет около 200 °С. Анализ расположения сплавов (по концентрации Si) на диаграмме состояния Cr–Si

свидетельствует о том, что при более высоком содержании кремния в сплаве РС-4206 температура его плавления была бы ближе к эвтектической (1305 °С).

Анализ расположения резистивных сплавов на диаграмме состояния Ni–Si показал, что в сплаве РС-4206 при затвердевании формируется высокотемпературная модификация β -NiSi₂, которая при последующем остывании при температуре 980 °С превращается в низкотемпературную α -NiSi₂, что повышает уровень механических напряжений в отливках

Составы и параметры резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si

Compositions and parameters of resistive alloys of the Cr–Ni–Si system

Сплав	Температура плавления, °С	Удельное сопротивление, ρ , 10^{-6} Ом·м	ТКС, 10^{-4} K ⁻¹	Состав, ат.%		
				Cr	Ni	Si
РС-5406Н	1400	2,5–3	6–9	37,2	4,7	58,1
РС-4206	1460	–	–	26,5	4,3	69,2
РС-3710	1250	5–7	15–25	35,2	8,4	56,4

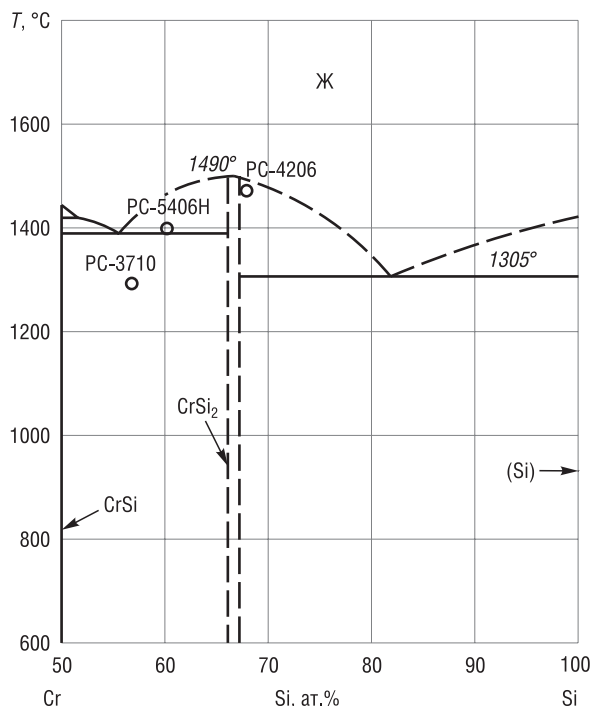


Рис. 1. Условное расположение сплавов PC на диаграмме состояния системы Cr–Si (по содержанию Si)

Fig. 1. Conditional location of PC alloys on the equilibrium diagram Cr–Si systems (according to Si content)

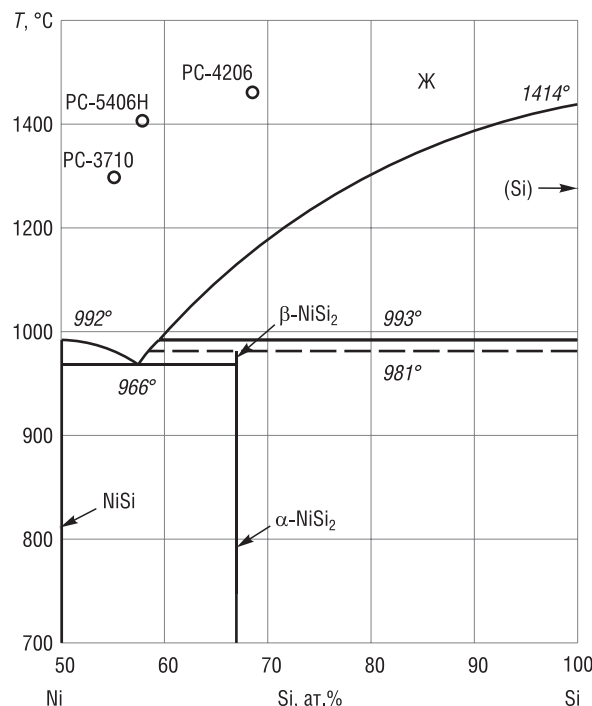


Рис. 2. Условное расположение сплавов PC на диаграмме состояния системы Ni–Si (по концентрации Si)

Fig. 2. Conditional location of PC alloys on the equilibrium diagram Ni–Si systems (according to Si content)

и приводит к их растрескиванию. В связи с этим высококремнистые сплавы с никелем для изготовления мишеней должны иметь температуру плавления не выше 980 °С. Этому требованию, по соотношению Ni и Si, больше всего отвечают сплавы PC-3710 и PC-5406H, однако наличие Cr значительно повышает их температуру плавления (рис. 2).

Таким образом, предварительный анализ соответствия требованиям к трещиностойкости резистивных сплавов серии PC по их расположению по отношению к точкам эвтектик на двойных диаграммах состояния показал, что предпочтение следует отдать сплавам PC-3710 и PC-5406H.

Более точное заключение по возможностям повышения работоспособности мишеней из резистивных сплавов можно сделать путем поиска точек эвтектик в тройной системе Cr–Ni–Si. Определение их координат позволит приблизить составы сплавов к эвтектическим и тем самым повысить литейные свойства и предотвратить образование микротрещин при кристаллизации и остывании отливок.

Расчет температур плавления и координат тройных эвтектик в системе Cr–Ni–Si. В [4] предложен метод расчета температур и концентраций элементов в различных двух- и многокомпонентных системах. Исходными данными предложенного метода являются температуры плавления входящих в эвтектики компонентов, которыми могут быть чистые элементы, химические соединения или твердые растворы предельной растворимости.

При поэтапном определении температуры плавления эвтектики многокомпонентной системы $T_{эвт}$ сначала проводят расчет эвтектической температуры компонентов T_1, T_2 , разбитых по парам в порядке убывания температур их плавления:

$$T_{эвт} = K_{эт}(T_1 + T_2), \tag{1}$$

$K_{эт}$ – коэффициент эвтектической температуры.

В [4] для случая сочетания переходных металлов с неметаллами или с промежуточными элементами для определения коэффициентов эвтектической температуры для различных систем предлагают формулу

$$K_{эт} = 0,497 \exp(-0,2657X). \tag{2}$$

Расчет масштабного температурного параметра X , используемого при определении коэффициента эвтектической температуры $K_{\text{эт}}$, проводят согласно выражению

$$X = (T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)^{0,74}. \quad (3)$$

Расчет эвтектической концентрации (в мас.%) осуществляют по формулам:

$$C_{\text{эвт}}^{T_1} = [(T_2 - T_{\text{эвт}})/(T_1 + T_2 - 2T_{\text{эвт}})] \times 100 \%; \quad (4)$$

$$C_{\text{эвт}}^{T_2} = [(T_1 - T_{\text{эвт}})/(T_1 + T_2 - 2T_{\text{эвт}})] \times 100 \%. \quad (5)$$

Температуру плавления тройной эвтектики в системе Ni–Cr–Si можно рассчитать, используя в качестве исходных данных температуры плавления эвтектик CrSi₂–CrSi (1380 °C), CrSi₂–Si (1305 °C), а также температуру плавления эвтектики NiSi–NiSi₂ (966 °C) и температуры плавления ее компонентов NiSi (992 °C) и NiSi₂ (993 °C).

Определение температур плавления тройных эвтектик в системе Ni–Cr–Si для сплавов PC-3710 и PC-5406H сводим к расчету двойной системы (CrSi₂–CrSi)_{эвт}–NiSi:

$$\begin{aligned} X &= (1380 - 992)/(1380 + 992)^{0,74} = 1,234; \\ K_{\text{эт}} &= 0,497 \exp(-0,2657 \times 1,234) = 0,358; \\ T_{\text{эвт}} &= 0,358 \times (1380 + 992) = 849,2 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Принимая $T_{\text{эвт}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$, определяем концентрации элементов в тройной эвтектике:

$$C_{\text{эвт}}^{T_1} = 100 \times (992 - 850)/(2372 - 1700) = 21,1 \text{ мас. \% (CrSi}_2\text{–CrSi)}_{\text{эвт}}.$$

Концентрация NiSi в тройной эвтектике составляет 78,9 мас.% (53,5 мас.% Ni и 25,4 мас.% Si). В 21,1 мас.% эвтектики CrSi₂–CrSi состава 59,3 мас.% Cr и 40,7 мас.% Si содержится 12,5 мас.% Cr и 8,6 мас.% Si.

Таким образом, установлено, что эвтектика в тройной системе Ni–Cr–Si плавится при температуре $T_{\text{эвт}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ и содержит 53,5 мас.% (38,5 ат.%) Ni, 12,5 мас.% (10,2 ат.%) Cr и 34,0 мас.% (51,3 ат.%) Si.

Определение температур плавления тройных эвтектик в системе Ni–Cr–Si для сплава PC-4206 сводим к расчету двойной системы (CrSi₂–Si)_{эвт}–NiSi:

$$\begin{aligned} X &= (1305 - 992)/(1305 + 992)^{0,74} = 1,01926; \\ K_{\text{эт}} &= 0,497 \exp(-0,2657 \times 1,01926) = 0,379; \\ T_{\text{эвт}} &= 0,379 \times (1305 + 992) = 870,8 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Принимая $T_{\text{эвт}} = 870 \text{ }^\circ\text{C}$, определяем концентрации элементов в тройной эвтектике:

$$C_{\text{эвт}}^{T_1} = 100 \times (992 - 870)/(2297 - 1740) = 21,9 \text{ мас. \% (CrSi}_2\text{–Si)}_{\text{эвт}}.$$

Концентрация NiSi в тройной эвтектике составляет 78,1 мас.% (53,0 мас.% Ni и 25,1 мас.% Si). В 21,9 мас.% эвтектики CrSi₂–Si состава 29,0 мас.% Cr и 71,0 мас.% Si содержится 6,4 мас.% Cr и 15,5 мас.% Si.

Таким образом, установлено, что высококремнистая эвтектика в тройной системе Ni–Cr–Si плавится при температуре $T_{\text{эвт}} = 870 \text{ }^\circ\text{C}$ и содержит 53,0 мас.% (36,4 ат.%) Ni, 6,4 мас.% (5,0 ат.%) Cr и 40,6 мас.% (58,6 ат.%) Si.

Результаты анализа расположения координат сплавов PC относительно двойных и тройных точек эвтектик представлены на диаграмме состояния системы Ni–Cr–Si (рис. 3). Точки тройных эвтектик E_5 и E_6 в системе Ni–Cr–Si расположены вблизи горизонтальной линии, соединяющей эвтектики NiSi–NiSi₂ и CrSi–CrSi₂ (e_2 – e_4). Поскольку эвтектики содержат только 10,2 и 5,0 ат.% Cr, то и находятся вблизи точки e_2 эвтектики NiSi–NiSi₂.

Координаты резистивных сплавов серии PC расположены параллельно линии, соединяющей двойные эвтектики e_3 и e_4 , и находятся на достаточно большом расстоянии от тройных эвтектик E_5 и E_6 , что повышает вероятность образования микротрещин при изготовлении из таких сплавов мишеней методом литья.

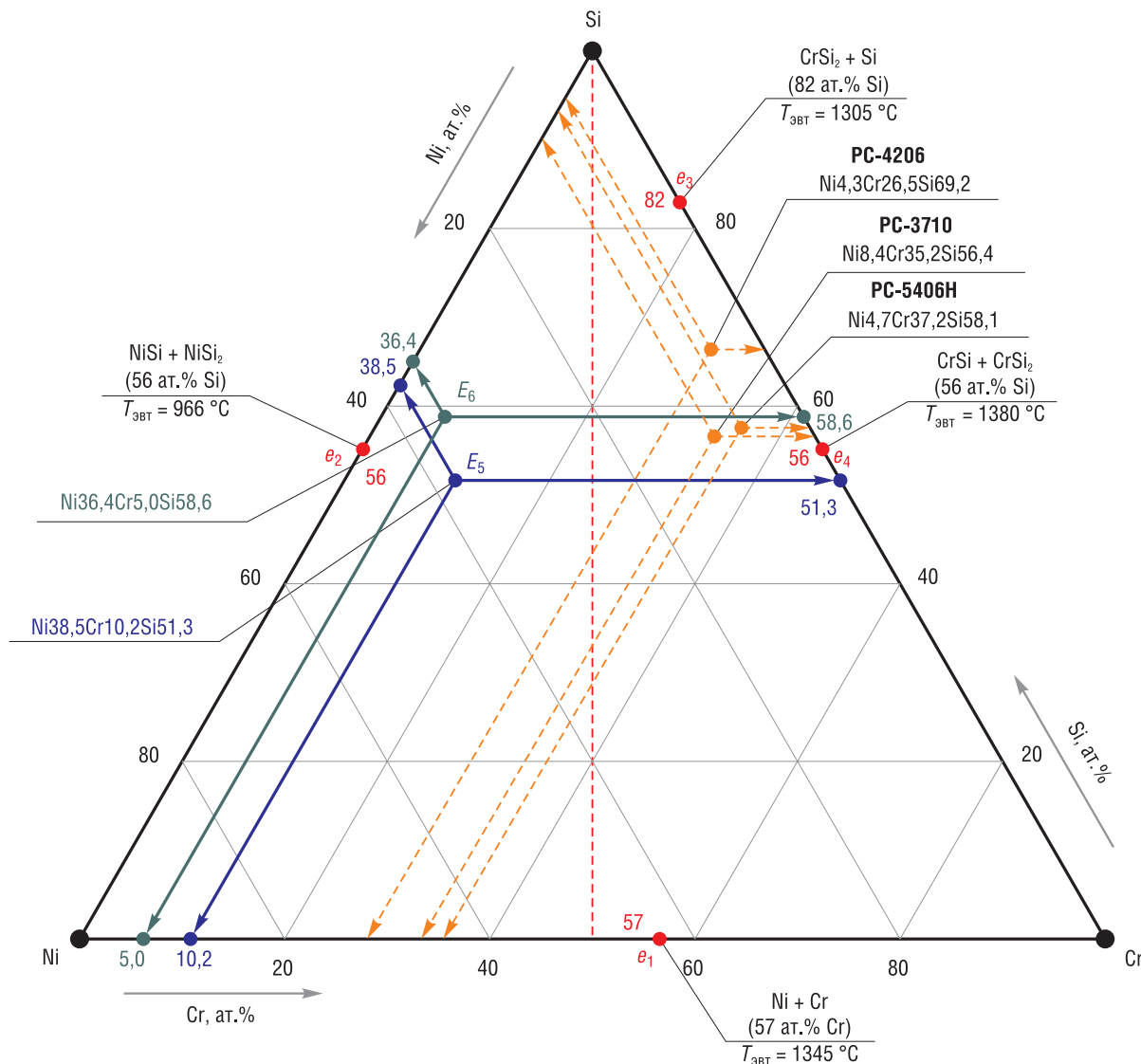


Рис. 3. Расположение резистивных сплавов относительно двойных и тройных эвтектик в системе Cr–Ni–Si.
 $E_5 = \text{Ni}_{38,5}\text{Cr}_{10,2}\text{Si}_{51,3}$; $E_6 = \text{Ni}_{36,4}\text{Cr}_{5,0}\text{Si}_{58,6}$ (ат.%)

Fig. 3. The location of resistive alloys relative to double and ternary eutectics in the Cr–Ni–Si system.
 $E_5 = \text{Ni}_{38,5}\text{Cr}_{10,2}\text{Si}_{51,3}$; $E_6 = \text{Ni}_{36,4}\text{Cr}_{5,0}\text{Si}_{58,6}$ (at.%)

Экспериментальная проверка расчетов и их обсуждение. В качестве исходных материалов для выплавки мишеней мы использовали поликристаллический кремний марки Кр00 (ГОСТ 2169), хром электролитический рафинированный марки ЭРХ-1, никель марки Н-1 (ГОСТ 849). Для выплавки сплавов применяли высокочастотную индукционную печь марки ИСТ-0.06. Плавку осуществляли в графито-шамотных тиглях в атмосфере аргона.

Было исследовано влияние режимов отжига на УПС и ТКС резистивных пленок толщиной 80 и 100 нм, полученных магнетронным распылением мишени из наиболее широко применяемого сплава РС-3710 (напряжение постоянного тока $U = 500\text{--}600$ В, давление аргона $1,5 \cdot 10^{-1}$ Па).

В качестве подложек использовали кремниевые пластины с выращенным на них подслоем высокотемпературного диоксида кремния SiO_2 толщиной 0,4 мкм. Термообработку проводили в диапазоне температур от 300 до 900 К в течение 30 мин в среде азота.

Установлено, что при температуре отжига $T_0 = 570$ °С в течение 30 мин в атмосфере азота УПС пленки сплава РС-3710 толщиной 100 нм проходит через минимум и составляет 150–200 Ом/кв. При $T_0 > 770$ К УПС пленок стабилизируется и составляет 300–330 Ом/кв.

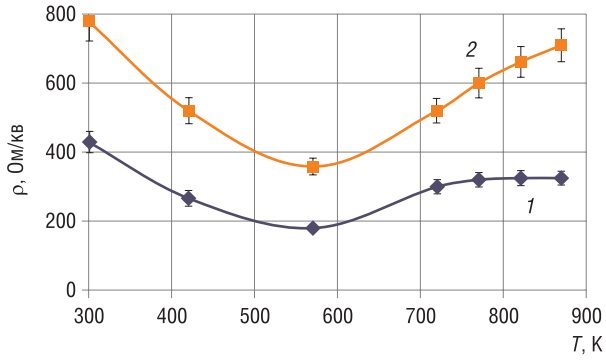


Рис. 4. Влияние температуры отжига пленок сплава РС-3710 в атмосфере азота на их удельное поверхностное сопротивление ρ . Толщина пленки: 1 – 100 нм, 2 – 80 нм; время отжига 30 мин

Fig. 4. Influence of the annealing temperature of PC-3710 alloy films in a nitrogen atmosphere on their sheet resistivity. Film thickness: 1 – 100 nm, 2 – 80 nm; annealing 30 min

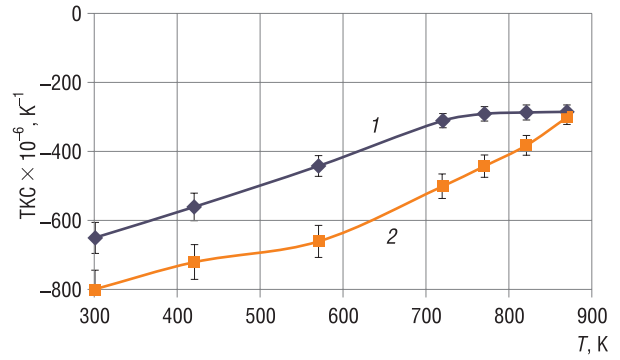


Рис. 5. Влияние температуры отжига на ТКР пленок сплава РС-3710. Толщина пленки: 1 – 100 нм, 2 – 80 нм; время отжига 30 мин

Fig. 5. Influence of the annealing temperature on TCR of PC-3710 alloy films. Film thickness: 1 – 100 nm, 2 – 80 nm; annealing 30 min

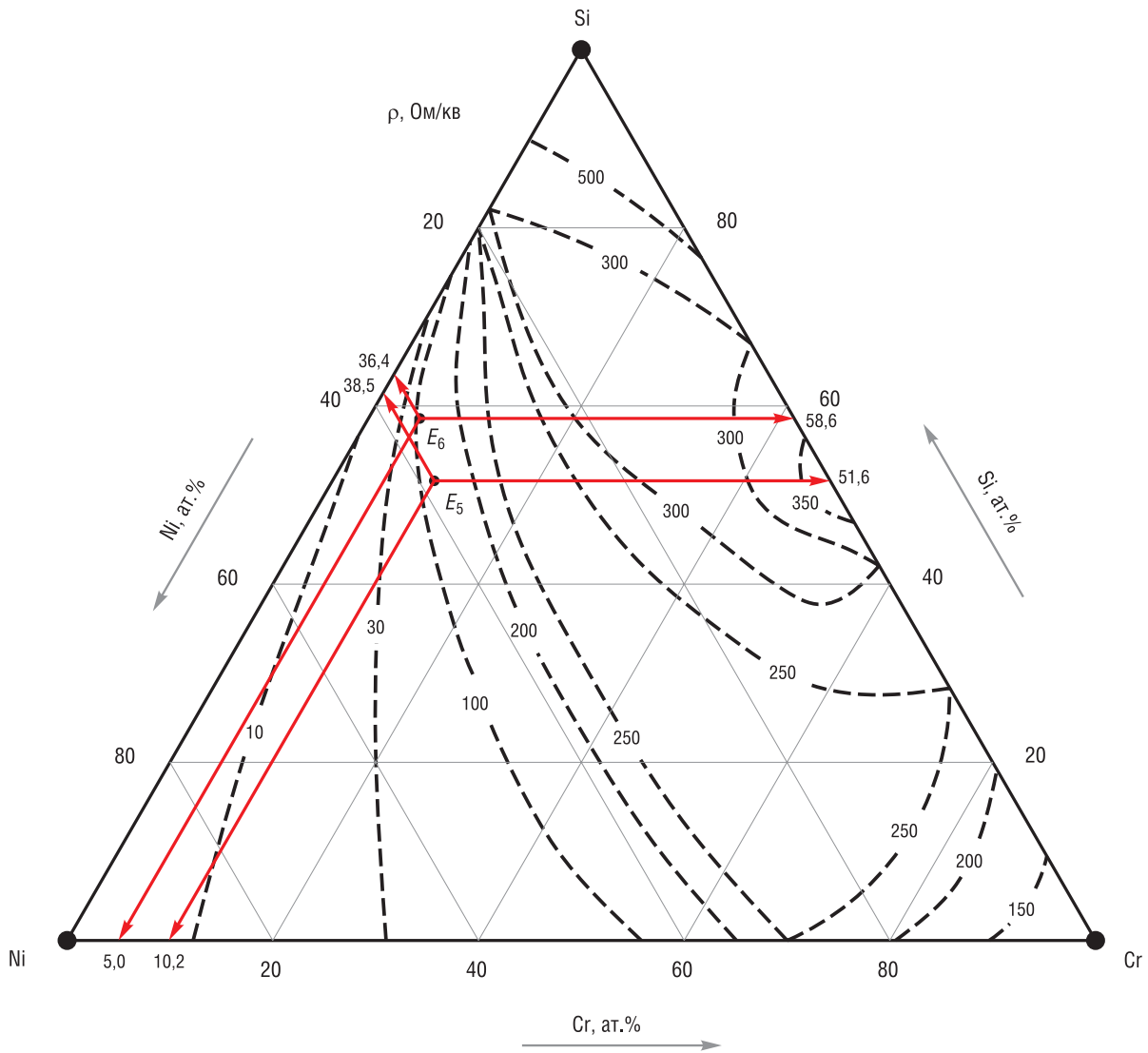


Рис. 6. Диаграмма состав–УПС пленок системы Cr–Ni–Si толщиной 100 нм, нанесенных на подложки Si–SiO₂ методом магнетронного распыления и отожженных при $T_0 = 700$ К в течение 30 мин

Fig. 6. Composition–sheet resistivity diagram of 100 nm films of the Cr–Ni–Si system deposited on Si–SiO₂ substrates by magnetron sputtering and annealed at $T_0 = 700$ K for 30 min

УПС пленок толщиной 80 нм также проходит через минимум при $T_0 = 570$ К и составляет 350–400 Ом/кв. При $T_0 > 570$ К УПС пленок толщиной 80 нм непрерывно возрастает и достигает 700 Ом/кв (рис. 4).

Сплавы на основе CrSi_2 (РС-3710, РС-4206, РС-4800) могут обеспечить формирование тонкопленочных резисторов с удельным поверхностным сопротивлением до 600 Ом/кв. Данные о наличии материалов, обеспечивающих получение пленок с $\rho \sim 1$ кОм/кв и выше при ТКС лучше $\pm (50-100) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ограничены.

Измерение УПС резистивных пленок проводили с помощью цифрового измерителя удельного сопротивления (ЦИУС-1) при температурах 300 и 400 К при смещении 0,3 В. Результаты измерений ТКС пленок представлены на рис. 5.

В ходе эксперимента установлено, что ТКС пленок толщиной 80 нм при повышении температуры отжига непрерывно смещается в сторону положительных значений от исходного значения $-800 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у неотожженных пленок до $-300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у пленок, отожженных при 600 °С. ТКС пленок толщиной 100 нм при повышении температуры отжига также смещается в сторону положительных значений от исходного значения $-650 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у неотожженных пленок до $-300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у пленок, отожженных при 500 °С. При дальнейшем повышении температуры отжига пленок сплава РС-3710 толщиной 100 нм величина их ТКС стабилизируется и составляет $-(280-320) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (см. рис. 5).

На основании обобщения экспериментальных данных нами построена диаграмма состав–УПС пленок системы Cr-Ni-Si толщиной 100 нм, нанесенных методом магнетронного распыления и отожженных при $T_0 = 700$ К в течение 30 мин (рис. 6).

Заключение. В ходе проведенных исследований установлено, что резистивные пленки системы Cr-Ni-Si , нанесенные методом магнетронного распыления на кремниевые полупроводниковые пластины с подслоем SiO_2 , при толщине 100 нм имеют УПС до 350 Ом/кв. Показано, что для изготовления мишеней МРС методом литья необходимо снизить температуру плавления и хрупкость сплавов, то есть определить их эвтектические составы.

Проведены расчеты и установлено, что эвтектики в системе Cr-Ni-Si содержат 36,4 и 38,5 ат.% Ni, что в 4–6 раз выше, чем у сплавов серии РС этой системы. В связи с большим содержанием Ni УПС пленок эвтектических составов толщиной 100 нм находится в диапазоне от 100 до 200 Ом/кв.

Для повышения УПС резистивных пленок и снижения температуры плавления сплавов целесообразна разработка новых четырех-пятикомпонентных сплавов на основе системы Cr-Ni-Si с введением в нее тугоплавких (Mo, Nb) и редкоземельных (La, Y) элементов.

Список использованных источников

1. Технология тонких пленок / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. – М.: Совет. радио, 1977. – Т. 2. – 768 с.
2. Готра, З. Ю. Резистивные материалы для низкоомных тонкопленочных резисторов интегральных схем / З. Ю. Готра, А. Н. Войтеков, И. Я. Хромяк // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 47–80.
3. Структура, топология и свойства пленочных резисторов / Л. И. Гурский [и др.]; под ред. В. А. Лабунова. – Минск: Наука и техника, 1987. – 264 с.
4. Крукович, М. Г. Расчет эвтектических концентраций и температуры в двух- и многокомпонентных системах / М. Г. Крукович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 10. – С. 9–17.

References

1. Maissel L., Glang R. (eds.). *Handbook of Thin Film Technology*. New York, Mc-Grow Hill, 1970. 800 p.
2. Gotra Z. Yu, Vojtekov A. N., Hromyak I. Ya. Resistive materials for low-resistance thin-film resistors of integrated circuits. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3, Mikroelektronika* [Electronic Equipment. Series 3, Microelectronics], 1984, no. 2, pp. 47–80 (in Russian).
3. Gurskii L. I., Zelenin V. A., Zhebin A. P., Vahrin G. L., Labunov V. A. *Structure, Topology and Properties of Film Resistors*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987. 264 p. (in Russian).
4. Krukovich M. G. Computation of Eutectic Concentrations and Temperature in Two-Component and Multicomponent Systems. *Metal Science and Heat Treatment*, 2005, vol. 47, no. 9–10, pp. 447–454. <https://doi.org/10.1007/s11041-006-0009-y>

Информация об авторах

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

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

Мельник Наталья Юрьевна – научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bukato_n@tut.by

Information about the authors

Alexander T. Volochko – 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

Victor A. Zelenin – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vazelenin@mail.ru

Natalia Yu. Melnik – Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bukato_n@tut.by