



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-7-49-57>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.357.7

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ СПЛАВОМ ОЛОВО-МЕДЬ

Д.Ю. ГУЛЬПА, И.И. КУЗЬМАР, Л.К. КУШНЕР, Н.В. ДЕЖКУНОВ, А.А. ХМЫЛЬ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 4 июля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. При сборке изделий электронной промышленности широко используются паяемые покрытия сплавами на основе олова. Переориентация производства на бессвинцовые технологии ставит задачу разработки новых технологических процессов формирования покрытий для электрических контактов, обладающих стабильностью электрических свойств, высокой способностью к пайке, сохраняющейся длительное время. Экспериментально исследованы особенности процесса электроосаждения покрытий сплавом олово-медь и установлены закономерности влияния состава электролита, плотности тока, интенсивности ультразвука на катодный выход сплава по току, скорость осаждения, элементный состав, структуру и функциональные свойства осадков. Для сонохимического воздействия использовалась разработанная в НИЛ 5.2 НИЧ БГУИР экспериментальная установка, позволяющая варьировать интенсивность ультразвуковых колебаний в пределах 0,058–1,7 Вт/см². Установлено, что использование ультразвука изменяет механизм формирования электрохимического сплава, уменьшает катодную поляризацию, повышает значение предельного тока, позволяет управлять составом и структурой осадков. При увеличении интенсивности от 0,12 до 0,95 Вт/см² количество меди в покрытии увеличивается в 4,5 раза. Коэффициента растекания припоя равен 92,59–98,44 %.

Ключевые слова: электрохимические покрытия, сплав олово-медь, ультразвуковые колебания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гульпа Д.Ю., Кузьмар И.И., Кушнер Л.К., Дежкунов Н.В., Хмыль А.А. Электрохимическое осаждение покрытий сплавом олово-медь. Доклады БГУИР. 2021; 19(7): 49-57.

ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF TIN-COPPER ALLOY COATINGS

DMITRY Y. GULPA, INA I. KUZMAR, LARISA K. KUSHNER, NICOLAY V. DEZHKUNOV,
ALEXANDER A. KHYML

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 4 July 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Solderable tin-base alloy coatings are widely used when assembling electronic products. The reorientation of production to lead-free technologies sets the task of developing new technological processes for the formation of coatings for electrical contacts with stable electrical properties, high soldering ability, which lasts for a long time. The features of the process of electrodeposition of coatings with a tin-copper alloy were experimentally investigated and the regularities of the influence of the electrolyte composition, current density, and ultrasound intensity on the cathode current efficiency of the alloy, the deposition rate, elemental composition, structure and functional properties of the precipitation were established. For sonochemical treatment an experimental setup developed at Research Laboratory 5.2 of BSUIR, which makes it possible to vary the intensity of ultrasonic vibrations in the range of 0.058–1.7 W/cm², was used. It has been established that the use of ultrasound changes the formation mechanism of the electrochemical alloy, reduces cathodic polarization, increases the value of the limiting current and makes it possible to control the composition and structure of the precipitates. With an increase in the intensity from 0.12 to 0.95 W/cm² the amount of copper in the coating increases by 4.5 times. The spreading coefficient of the solder is 92.59–98.44 %.

Keywords: electrochemical coatings, tin-copper alloy, ultrasonic vibrations.

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

For citation. Gulpa D.Y., Kuzmar I.I., Kushner L.K., Dezhkunov N.V., Khmyl A.A. Electrochemical deposition of tin-copper alloy coatings. Doklady BGUIR. 2021; 19(7): 49-57.

Введение

Паяемые электрохимические покрытия на основе олова применяют при сборке изделий электронной техники [1]. Их качество во многом определяет надежность работы электронных приборов. Преимуществами гальванического метода нанесения паяемых материалов являются легкость управления толщиной осаждаемого покрытия, отсутствие локального нагрева, доступность и низкая стоимость оборудования для реализации, возможность управления составом и функциональными свойствами осадков. Однако оловянные покрытия имеют ряд недостатков. Так, в течение времени на их поверхности начинается самопроизвольный рост нитевидных кристаллов «усов» («whisker»), которые могут стать причиной короткого замыкания либо механической деформации изделий. Кроме того, в условиях хранения луженых деталей резко ухудшается способность поверхности к пайке, что недопустимо при изготовлении радиоэлектронных приборов. Переход к использованию сплавов на основе олова позволяет решить многие проблемы. Авторами экспериментально исследованы особенности процесса электроосаждения покрытий сплавом олово-медь и установлены закономерности влияния состава электролита, плотности тока, интенсивности ультразвука на катодный выход сплава по току, скорость осаждения, элементный состав, структуру и функциональные свойства осадков.

Методика проведения эксперимента

Для электроосаждения покрытий сплавом олово-медь использованы сульфатно-тиомочевинные электролиты следующего состава: 1,998 М H₂SO₄, 0,2 М SnSO₄, 0,1997 М CS(NH₂)₂, 0,04 М CuSO₄•5H₂O, 0,0259 М неионогенный ПАВ неонал АФ9-10. Кроме этого, в электролит № 1 присутствовал антиоксидант 2 г/л ЦКН-32[2], а в электролите № 2 – 0,0045 моль/л гидрохинон [3], который повышает стабильность раствора, предотвращая окисления олова (II). Температура электролита составляла 18–20 °С.

Покрытия получены как без перемешивания, так и с перемешиванием электролита магнитной мешалкой. Для ультразвукового стимулирования использована разработанная в НИЛ 5.2 НИЧ БГУИР экспериментальная установка, включающая генератор УЗГ53-22 с пьезокерамическим излучателем, работающим на частоте 36,7–38 кГц с акустической мощностью 15 Вт и возможностью варьирования интенсивности ультразвуковых колебаний (УЗК) в пределах $I_{УЗК} = 0,058–1,7$ Вт/см² (рис. 1).

Кинетические закономерности электроосаждения покрытий сплавом олово-медь изучены методом вольтамперометрии с использованием импульсного потенциостата-

гальваностата «ElinsP-45X» при линейной скорости развертки потенциала 5 мВ/с. Потенциал рабочего электрода измерен относительно хлорсеребряного электрода сравнения и пересчитан относительно стандартной водородной шкалы. По поляризационным кривым, снятым в потенциодинамическом режиме, найден предельный ток. Значения тока обмена j_0 и коэффициента переноса α рассчитаны с использованием графического представления уравнений Тафеля [4]. Рассчитаны катодный выход по току (ВТ_k) и скорость осаждения (ν) [5, 6].

Элементный состав покрытий исследован рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре «ElvaX»; микрорельеф покрытий – с помощью растрового электронного микроскопа S-4800. Фазовый состав покрытий установлен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0. Изучены функциональные свойства покрытий: четырехзондовым методом измерено контактное электросопротивление, а для оценки смачиваемости покрытий рассчитан коэффициент растекания припоя [1].

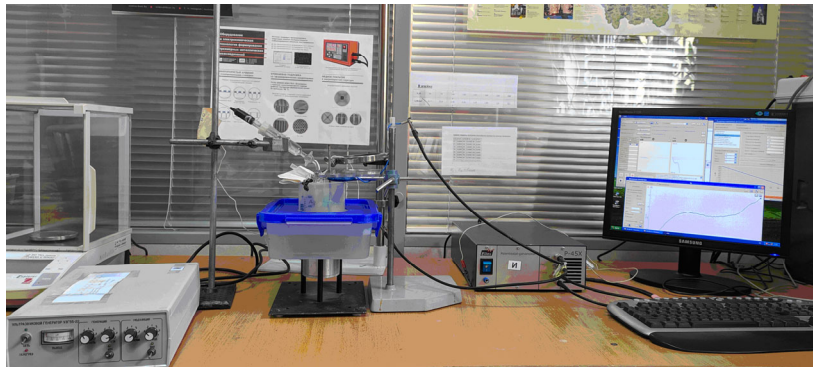


Рис. 1. Оборудование для проведения кинетических исследований, включающее потенциостат-гальваностат «ElinsP-45X» и экспериментальную ультразвуковую установку
Fig. 1. Equipment for kinetic studies, including “ElinsP-45X” potentiostat-galvanostat and experimental ultrasonic device

Результаты и их обсуждение

Из сульфатно-тиомочевинный электролита получены электрохимические покрытия сплавом олово-медь. На рис. 2 представлены зависимости выхода по току и скорости осаждения сплава Sn-Cu от плотности тока. Плотность тока, перемешивание и ультразвуковое воздействие на электролит влияют на скорость осаждения покрытий и выход по току сплава (расчетный параметр, определяющий эффективность процесса электроосаждения) (рис. 2, 3). Суммарный катодный выход металлов по току увеличивается с 86,90 % при $i = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$, достигая своего максимума 92,00 % при $i = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$, а затем снижается и достигает 70,08 % при $i = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$.

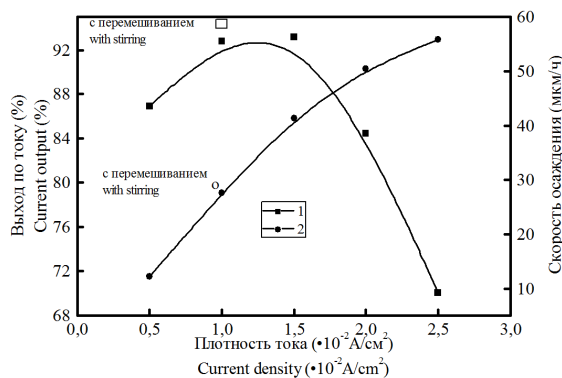


Рис. 2. Влияние плотности тока на выход по току (1) и скорость осаждения (2) сплава Sn-Cu
Fig. 2. The effect of current density to the current output (1) and the rate of precipitation (2) of the Sn-Cu alloy

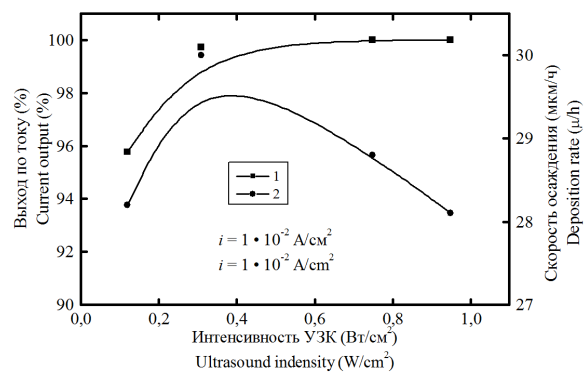


Рис. 3. Влияние ультразвука на выход по току (1) и скорость осаждения (2) сплава Sn-Cu
Fig. 3. Influence of ultrasound on the current efficiency (1) and deposition rate (2) of the Sn-Cu alloy

При перемешивании электролита значения VT_k и ν увеличиваются. Влияние ультразвуковых колебаний на параметры электроосаждения показано на рис. 3. При воздействии ультразвука с интенсивностью $0,75\text{--}0,95\text{ Вт/см}^2$ и плотности тока $1,0\cdot 10^{-2}\text{ А/см}^2$ значение VT_k наибольшее и достигает значений, близких (рис. 2) или равных 100 % (кривая 1, рис. 3). Максимальное значение скорости осаждения сплава Sn-Cu при $i = 1\cdot 10^{-2}\text{ А/см}^2$ получено при воздействии на процесс УЗК интенсивностью $0,31\text{ Вт/см}^2$ и составило 30 мкм/ч (кривая 2, рис. 3).

Поляризационные кривые получены из электролитов с разным составом и представлены на рис. 4, а. Стационарный потенциал поверхности образца независимо от условий электролиза составлял $0,400\pm 0,005\text{ В}$. Для предложенного электролита значение предельного тока $3,2\cdot 10^{-2}\text{ А/см}^2$ (кривая 2, рис. 4, а). Электроосаждение подчиняется законам смешанной кинетики. В составе электролитов присутствуют поверхностно-активные вещества, которые образуют пассивирующую пленку на поверхности катода. Для ВАХ характерно образование «плато», когда происходит рост потенциала электрода при значениях тока, близких к предельному. Олово и медь выделяются в сплав в области рабочих плотностей тока с деполяризацией по сравнению с их отдельным осаждением. Перемешивание электролита и ультразвук влияют на потенциал выделения металла, происходит деполяризация [7, 8]. Значение предельного тока увеличивается до $11,8\cdot 10^{-2}\text{ А/см}^2$ при перемешивании (рис. 4, b) и до $4,5\text{--}6,3\cdot 10^{-2}\text{ А/см}^2$ при повышении интенсивности УЗК от $0,12$ до $0,95\text{ Вт/см}^2$.

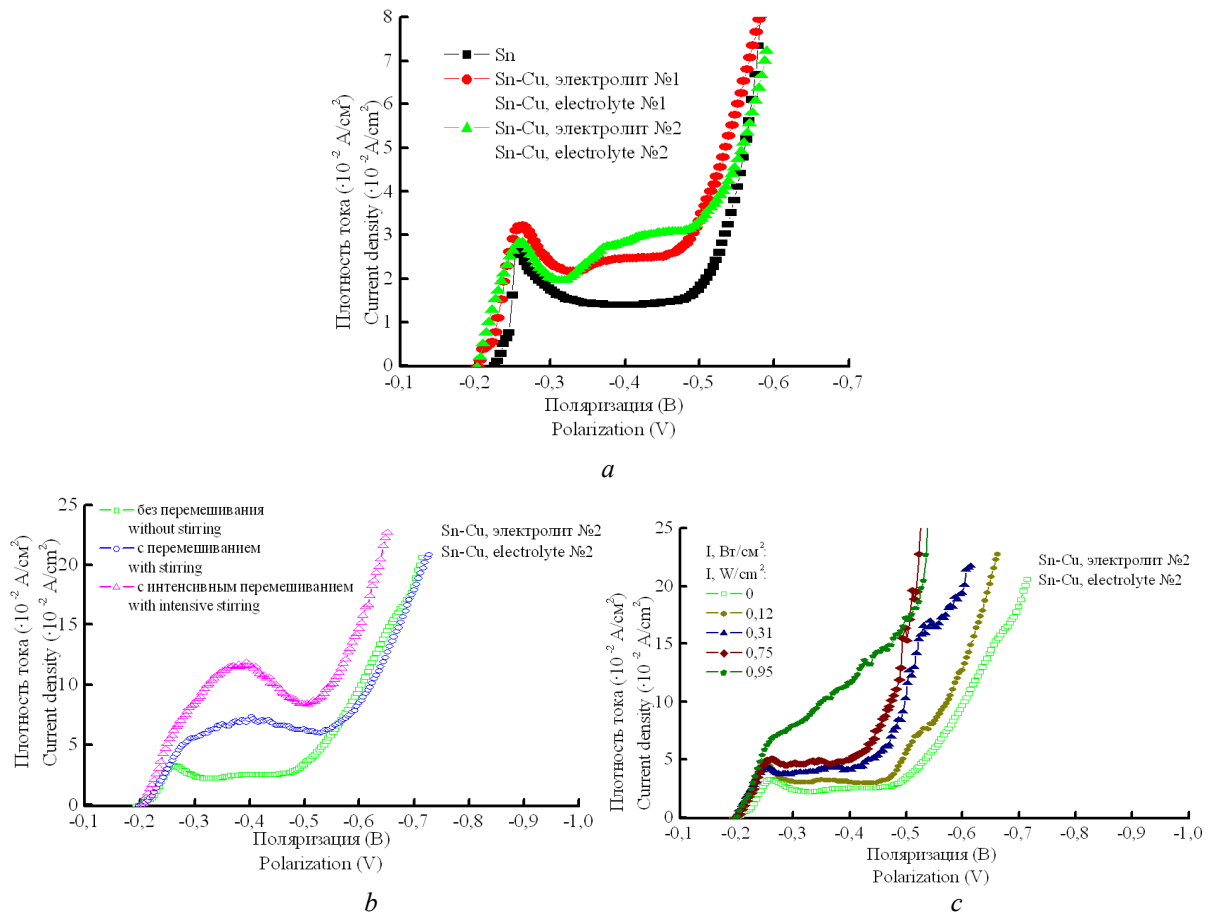


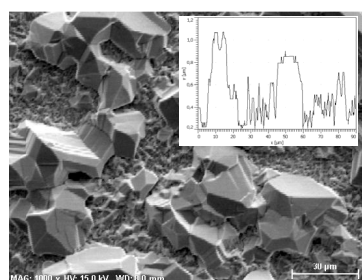
Рис. 4. Поляризационные кривые, полученные при различных условиях осаждения
Fig. 4. Polarization curves obtained under various conditions of precipitation

В табл. 1 приведены кинетические характеристики процесса электроосаждения. При перемешивании электролита сопротивление электрода снижается. Значение тока обмена увеличивается как для оловянных покрытий, так и для сплава. Однако для процесса сплавообразования интенсивность ультразвука $0,31\text{--}0,75\text{ Вт/см}^2$ увеличивает в 4 раза этот параметр и повышает симметричность катодных и анодных процессов. Для чистого олова такого сильного влияния не отмечено.

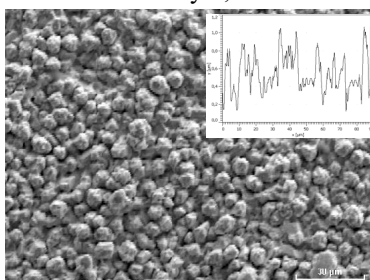
Таблица 1. Кинетические характеристики процесса электроосаждения
Table 1. Kinetic characteristics of the electrodeposition process

Условия электроосаждения Electrodeposition conditions	Постоянные Тафеля Tafel constant				Ток обмена, $j_0, \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ Exchange current density, $j_0, \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$		Коэффициент переноса, α Charge transfer coefficient, α		
	a		b		Sn	Sn-Cu	Sn	Sn-Cu	
	Sn	Sn-Cu	Sn	Sn-Cu					
без перемешивания without stirring	0,200	0,133	0,097	0,048	85,48	16,44	0,300	0,63	
с перемешиванием with stirring	0,170	0,124	0,084	0,046	95,07	19,98	0,348	0,63	
с интенсивным перемешиванием with intensive stirring	0,190	0,128	0,096	0,059	103,49	67,55	0,304	0,49	
Интенсивность УЗК, Вт/см ² Ultrasonic inspection, W/cm ²	0,12	0,130	0,114	0,063	0,053	77,76	73,26	0,462	0,55
	0,31	0,130	0,115	0,063	0,053	85,55	70,77	0,462	0,55
	0,58	0,130	0,118	0,063	0,055	85,55	68,78	0,462	0,53
	0,75	0,130	0,117	0,063	0,054	85,55	70,23	0,463	0,54
	0,95	0,150	0,114	0,064	0,054	47,72	78,91	0,455	0,54

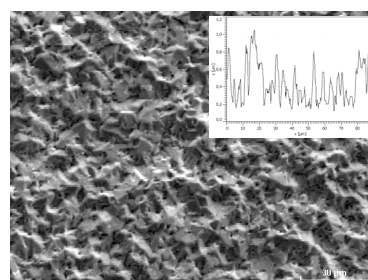
Качественные осадки получены в диапазоне i от 0,5 до $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ (рис. 5, 6). Низкое значение ВТ_k при $i = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ можно объяснить тем, что в этих условиях наблюдается низкое значение поляризации катода, плотность адсорбционных пленок на нем невысока и создаются благоприятные условия для адсорбции атомов водорода. При увеличении плотности тока условия для разряда ионов Sn и Cu улучшаются, и суммарное значение катодного выхода по току увеличивается, достигая максимума.



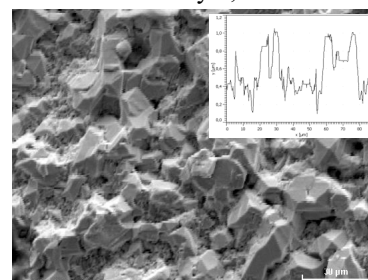
a – плотность тока $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$
a – current density $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$



c – плотность тока $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$
c – current density $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$



b – плотность тока $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$
b – current density $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$



d – плотность тока $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$
d – current density $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$

Рис. 5. SEM изображение электрохимических покрытий Sn-Cu из электролита № 1 без перемешивания (*a-c*) и с перемешиванием (*d*)

Fig. 5. SEM images of electrochemical Sn-Cu coatings obtained from electrolyte № 1 without stirring (*a-c*) and with stirring (*d*)

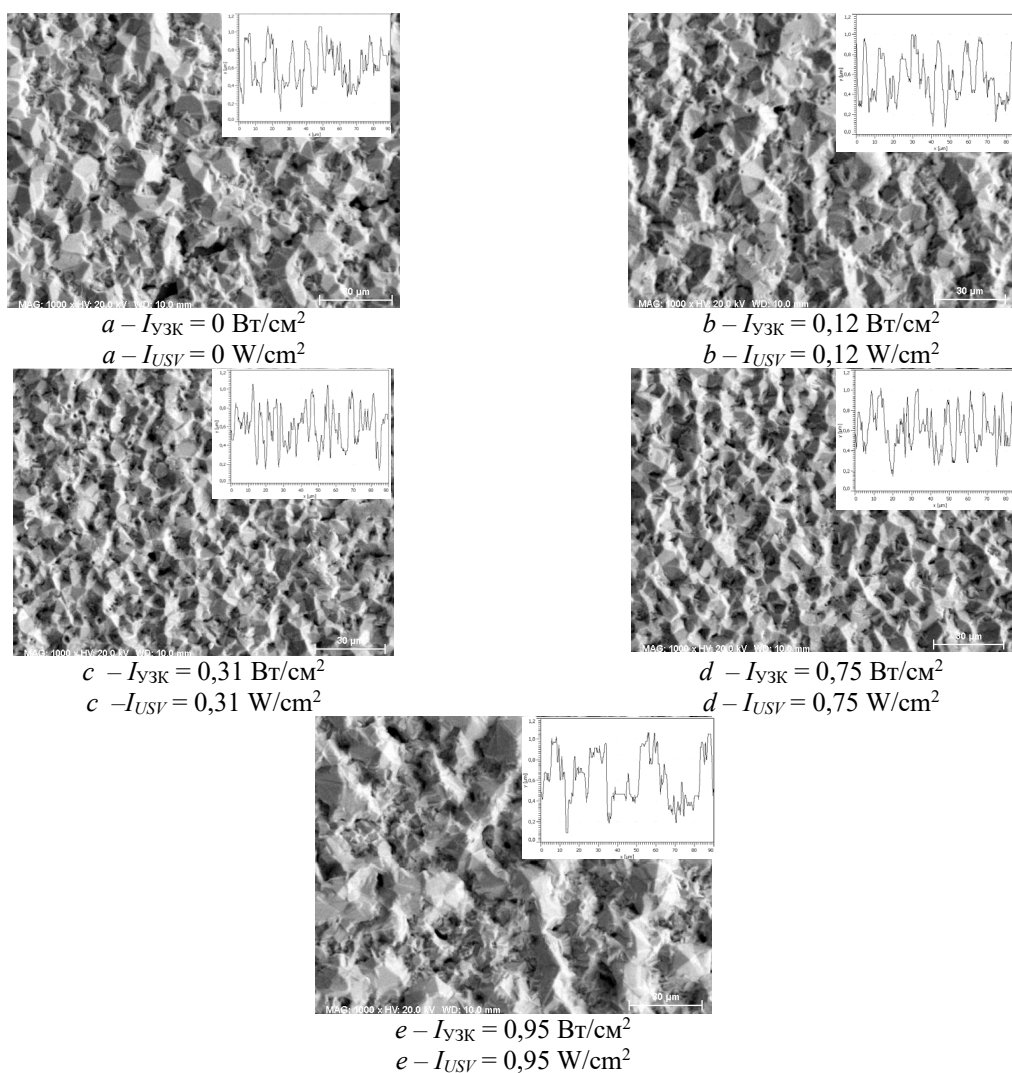


Рис. 6. SEM изображение поверхности электрохимических покрытий сплавом Sn-Cu, полученных из электролита № 2 ($i = 1 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$)

Fig. 6. SEM images of electrochemical Sn-Cu coatings obtained from electrolyte № 2 ($i = 1 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$)

При низкой плотности тока только отдельные кристаллиты беспрепятственно растут в направлении, тангенциальном плоскости подложки. При повышении плотности тока увеличивается число центров кристаллизации, происходит их быстрый и относительно равномерный рост как в тангенциальном, так и в нормальном направлении к поверхности подложки. При высоких плотностях тока, наоборот, получает значительное развитие непрерывно растущая поверхность электролиза, что приводит к появлению большого числа центров кристаллизации (рис. 5). Одновременно увеличивается поляризация катодного процесса, и ее значение достигает уровня выделения водорода. В этих условиях нарушается процесс равновесного образования структуры, увеличивается кристаллическая шероховатость поверхности, появляется темный рыхлый пористый осадок.

Результаты элементного анализа осадков, полученных при различных условиях электроосаждения, приведены в табл. 2. Доля олова в сплаве нелинейно возрастает с увеличением плотности тока до $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ и достигает при этом максимального содержания 98,47%. Введение в раствор тиомочевины подавляет процесс восстановления олова. При плотности тока $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ обеспечивается минимальное содержание олова в сплаве (88,21 мас. %). Перемешивание электролита незначительно увеличивает количество олова в сплаве с 95,33 до 96,42 мас. % при $I = 1 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$. При сонохимическом осаждении происходит снижение содержания олова в сплаве: при плотности тока $1 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ – с 95,77 до 81,74 мас. % при интенсивности УЗК от $0,12 \text{ Вт/см}^2$ и $0,95 \text{ Вт/см}^2$ соответственно.

Соноэлектрохимическое осаждение, как и механическое перемешивание электролита, позволяет повысить скорость обновления электролита у катода, снять диффузионные ограничения на процесс электролиза (табл. 2). Наблюдаем уменьшение поляризации катода и увеличение предельной плотности тока. В результате этого возможно осаждение сплава при больших плотностях тока (рис. 6). При этом количество меди в покрытии увеличилось с 4,67 до 7,49 мас. % при интенсивности ультразвука $0,75 \text{ Вт/см}^2$, скорость нанесения покрытия – с 27,5 до 28,8 мкм/ч, катодный выход по току сплава увеличился на 7 %.

Таблица 2. Влияние условий электроосаждения на элементный состав покрытия Sn-Cu
Table 2. Influence of electrodeposition conditions on the elemental composition of the Sn-Cu coating

Условия электроосаждения Electrodeposition conditions	Плотность тока, $\cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2$ Current density, 10^{-2} А/см^2	Состав, мас. % Composition, wt. %		
		Sn	Cu	
без перемешивания without stirring	0,5	88,21	11,79	
	1,0	95,33	4,67	
	1,5	97,13	2,87	
	2,0	98,22	1,78	
	2,5	98,47	1,53	
с перемешиванием магнитной мешалкой with stirring with magnetic stirrer	1,0	96,42	1,58	
Интенсивность УЗК, Вт/см^2 Ultrasonic inspection, W/cm^2	0,12	1,0	95,77	4,21
	0,31		95,22	4,78
	0,75		92,51	7,49
	0,95		81,74	19,26

Фазовый состав полученных электрохимических покрытий сплавом Sn-Cu представлен на рис. 7. Характерно образование нескольких фаз: α -(Cu, Sn) – твердый раствор, Sn – почти чистое олово (растворимость Cu и Ag в Sn меньше 0,01 %), химические соединения $\text{Cu}_{6,26}\text{Sn}_5$ [9]. Наличие избыточного количества олова в решетке сплава ухудшает его блеск, микротвердость, износостойкость, но при этом увеличиваются пластичность и паяемость [10]. Малое количество меди повышает надежность электронных устройств, но снижает их способность к пайке.

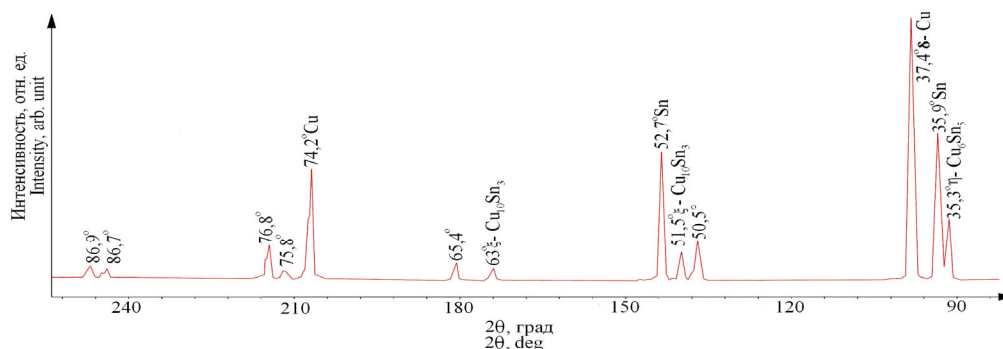


Рис. 7. Рентгенограмма электрохимического покрытия Sn-Cu
Fig. 7. XRD pattern of the electrochemical coating Sn-Cu

Контактное электросопротивление осадков увеличивается с повышением плотности тока, что связано с уплотнением покрытия, увеличением его кристаллической шероховатости и снижением количества легирующего компонента в сплаве. Оценка стабильности величины контактного электросопротивления после 6 месяцев хранения в исследовательской лаборатории показала (табл. 3), что в покрытиях происходит релаксация напряженного состояния, стабилизация структуры, которые приводят к снижению изучаемого показателя на 10–17 %. Коэффициент растекания припоя у свежесозаженных образцов равен 92,59–98,44 %, что соответствует показателю очень хорошей склонности к пайке. Результаты последующих исследований показали, что покрытия сплавом Sn-Cu сохраняют высокое значение показателя паяемости после хранения в течение шести месяцев в условиях лаборатории. Изменение структуры и состава покрытий, достигнутые вследствие соноэлектрохимического воздействия,

обеспечили высокое значение величины коэффициента растекания припоя по поверхности сплава (рис. 5, 6).

Таблица 3. Свойства покрытий сплавом Sn-Cu (1 – свежесозданное, 2 – после 6 месяцев хранения)
Table 3. Properties of coatings with Sn-Cu alloy (1 – freshly precipitated, 2 – after 6 months of storage)

Плотность катодного тока, 10^{-2} А/см ² Density of the cathodic current, 10^{-2} A/cm ²	Контактное электросопротивление, мОм Contact electrical resistance, mOhm		Коэффициент растекания припоя, % Solder spreading coefficient, %	
	1	2	1	2
0,5	2,95	2,64	95,21	96,13
1,0	3,32	2,83	97,44	98,47
1,5	3,15	2,87	96,30	97,58
2,0	3,68	3,11	94,74	96,14
2,5	3,96	3,27	92,59	94,10

Заключение

Изучены особенности формирования паяемых покрытий электрохимическим сплавом Sn-Cu из сульфатно-тиомочевинного электролита. Установлены физико-химические закономерности осаждения. Показано влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на стабильность электролита, структуру, состав и функциональные свойства. Полученные покрытия обладают хорошими свойствами для использования при реализации бессвинцовых технологий.

Список литературы

1. Хмыль А.А., Ланин В.Л., Емельянов В.А. *Гальванические покрытия в изделиях электроники*. Минск: Интегралполиграф; 2017.
2. Ozga P. Electrodeposition of Sn-Ag and Sn-Ag-Cu alloys from thiourea aqueous solutions. *Archives of metallurgy and materials*. 2006;3;413-421.
3. Врублевская О.Н., Шикун М.А., Воробьева Т.Н., Рабенюк А.М., Гунич А.С., Мельникова С.Г. Электрохимическое осаждение сплава Sn-Ag, пригодного в качестве припоя. *Журнал Белорусского государственного ун-та. Химия*. 2018;1:83-91.
4. Антропов Л.И. *Теоретическая электрохимия*. Москва: Высшая школа; 1984.
5. Констин Н.А., Кублановский В.С. *Импульсный электролиз сплавов*. Киев: Научная мысль; 1996.
6. Вишомирский Р.М. *Кинетика электроосаждения металлов из комплексных электролитов*. Москва; 1969.
7. Лукашев Е.А. Исследование состава и кинетики осаждения алмазосодержащих композиционных электролитических покрытий на основе никеля. *Электрохимия*. 1994;30(1):93-97.
8. Василец В.К., Хмыль А.А., Кушнер Л.К., Кузьмар И.И. Влияние режимов нестационарного электролиза на кинетические закономерности осаждения сплава олово-висмут. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2016;2:11-16.
9. Хансен М., Андерко К. *Структура двойных сплавов*. Т. 2. Москва: Металлургиздат; 1962.
10. Кунтушев Д.В., Семкин Н.Д. Механизмы, влияющие на процесс формирования и роста в паяных соединениях интерметаллических соединений Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 . *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2012,4;51-58.

References

1. Khmyl A.A., Lanin V.L., Emelyanov V.A. [*Galvanic coatings in electronics products*]. Minsk: Integralpolygraph; 2017. (In Russ.)
2. Ozga P. Electrodeposition of Sn-Ag and Sn-Ag-Cu alloys from thiourea aqueous solutions. *Archives of metallurgy and materials*. 2006;3;413-421.
3. Vrublevskaya O.N., Shikun M.A., Vorobyva T.N., Rabenok A.M., Gunich A.S., Melnikova S.G. [Electrochemical precipitation of Sn-Ag alloy, suitable as solder]. *Journal Belarus State un-ty. Chemistry*. 2018,1;83-91. (In Russ.)
4. Anthropov L.I. [*Theoretical electrochemistry*]. Moscow: Higher School; 1984. (In Russ.)

5. Konstin N.A., Kublanovsky V.S. [*Pulse electrolysis of alloys*]. Kiev: Scientific Thought; 1996. (In Russ.)
6. Vishomirskis R.M. [*Kinetics Electrodeposition of metals from complex electrolytes*]. Moscow; 1969. (In Russ.)
7. Lukashev E.A. Study of the composition and kinetics of deposition of diamond-containing composite electrolytic coatings based on nickel. *Electrochemistry*. 1994;30(1):93-97. (In Russ.)
8. Vasilets V.K., Khmyl A.A., Kushner L.K., Kuzmar I.I. [The influence of modes of non-stationary electrolysis on the kinetic patterns of precipitation of tin-bismuth alloy]. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. A series of physico-technical sciences*. 2016,2;11-16. (In Russ.)
9. Hansen M., Andersko K. [*Structure of double alloys*]. Vol. 2. Moscow: Metallurgisdat. 1962. (In Russ.)
10. Kuntushev D.V., Semkin N.D. [Factors influencing formation and growth of intermetallic compounds Cu₃Sn and Cu₆Sn₅ in soldered joints]. *Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2012,4;51-58. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Гульпа Д.Ю., аспирант, младший научный сотрудник НИЛ 9.2 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кузьмар И.И., к.т.н., заведующая НИЛ 9.2 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кушнер Л.К., старший научный сотрудник НИЛ 9.2 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дежкунов Н.В., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 5.2 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Хмыль А.А., д.т.н., профессор, Почетный профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-88-98;
e-mail: kuzmar@bsuir.by
Кузьмар Инна Иосифовна

Information about the authors

Gulpa D.Y., Postgraduate student, Junior Researcher at the Research laboratory 9.2 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kuzmar I.I., PhD, Associate Professor, Head of the research laboratory 9.2 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kushner L.K., Senior Researcher at the research laboratory 9.2 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dezhkunov N.V., PhD, Associate Professor, Head of the research laboratory 5.2 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Khmyl A.A., D.Sci., Professor, Honorary Professor of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-88-98;
e-mail: kuzmar@bsuir.by
Kuzmar Ina Iosifovna