

Ю. В. Ніколенко, В. А. Дідук, Я. Д. Король, Ю. О. Ляшенко

РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОСАДЖЕННЯ МІДІ В РЕЖИМІ СТОХАСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ

В роботі описано розроблений апаратно-програмний комплекс, що дозволяє в режимі реального часу підтримувати задану залежність напруги під час електролітичного осадження міді, в тому числі імпульсний, гармонічний, стохастичний та інші режими електроосадження. Описано застосування моделі генератора нелінійних коливань Чуа для побудови часового ряду стохастичних коливань напруги в околі двох стаціонарних значень, що розраховуються з поляризаційної кривої, відповідної застосованому електроліту. Засобами растрової електронної мікроскопії та рентгенівської дифрактометрії показано, що зеренні структури нанесених прошарків міді в випадках стаціонарного та стохастичного режимів електроосадження відрізняються за своєю морфологічною будовою. Більш однорідна структура прошарку міді утворюється за застосування стохастичної напруги. За стохастичного осадження формується більш структурно ідеальний прошарок міді з незначним мікроспотвореннями кристалітів та за відсутності механічних напруг.

Ключові слова: електроосадження міді, електрохімічна комірка, зеренна структура плівок, дифрактограма міді, стохастичні коливання напруги, генератор Чуа.

Вступ

Сучасна тенденція до мініатюризації електронних приладів підвищує вимоги до якості лютей та методів з'єднання електронних компонентів. Невеликі зпаї з'єднання є чутливими до дефектів в міжфазній області між олов'яним припоєм і мідним контактом. У технологічних процесах мідні контакти утворюються шляхом електролітичного осадження, тому виникає необхідність розробки технологій нанесення плівок міді з однорідною та бездефектною структурою. Теорія та технологія стаціонарного режиму електроосадження з застосуванням постійної напруги, що прикладена до електродів електрохімічної комірки, розроблені в науковій літературі найбільш детально [1]. Проте стаціонарний режим електроосадження має ряд недоліків, як, наприклад, нерівномірність товщини електроосаджених плівок. Це зв'язано з нестійкістю стаціонарного режиму електроосадження, коли флуктуаційно утворені нерівності на електродах приводять до зменшення відстані між ними і, відповідно, до зростання потоку електросадження на цих ділянках. та росту зформованих виступів. Для боротьби з таким явищем застосовуються різного типу неоднорідні в часі режими електроосадження [2-6], такі як імпульсний, коливальний, реверсивний (інверсний) режими електроосадження. Найбільш досконалі поверхневі покриття отримуються в режимі реверсивного електроосадження, коли катод і анод періодично міняються місцями за рахунок зміни полярності струму. При цьому енергетична ефективність процесу знижується, так як певний проміжок часу нанесений прошарок міді зтрачується в місцях зформованих виступів.

Метою дослідження є створення та апробація методики стохастичного режиму електроосадження без застосування інверсних струмів. Проведено аналіз впливу стаціонарного та стохастичного режимів електролітичного осадження на структуру отриманих прошарків міді на мідних підкладках. В ході виконання роботи виготовлено

апаратно-програмний комплекс для контролю процесу електролітичного осадження, проведено електролітичне осадження міді на поверхню мідної пластини при прикладенні постійної та стохастичної напруги до електродів електрохімічної комірки, досліджено кристалічні структури отриманих прошарків осадженої міді методами рентгенодифракційного аналізу та електронної растрової мікроскопії.

1. Опис методики електролітичного осадження Cu

Для отримання мідних прошарків методом електролітичного осадження нами були використані сірчаноокислотні електроліти [1-7]. Отриманий прошарок міді характеризується особливою кристалічною структурою і присутністю вакансій та пор. Міцність мідних покриттів, отриманих з кислотних електролітів, є 80-100 кгс/мм², що, очевидно, зв'язано з умовами їх кристалізації. Гальванічно осаджена мідь має яскраво виражений рожевий колір, в атмосферних умовах реагує з вологою і вуглекислим газом і, відповідно, покривається оксидами. Стандартний потенціал міді +0,34 В. Зазвичай режим застосування електролітичного осадження міді обмежений низькими густинами струму, які лежать в межах 0,5-1,0 А/дм², при цьому вихід по струму не перевищує 60-70%. Застосування сірчаноокислотного електроліту в режимі перемішування дозволяє використовувати густану струму до 6-7 А/дм², а при обертанні підкладок ще більшу з виходом по струму до 100%.

Опис апаратно-програмного комплексу управління процесом електролітичного осадження

Для управління процесом стаціонарного або стохастичного пульсуючого режимів електроосадження розроблено апаратно-програмний комплекс, що функціонально забезпечує режим потенціостатичного управління процесом із застосуванням двохелектродної схеми. Приладом можна керувати безпосередньо з комп'ютера, задаючи потрібний режим електроосадження. Мікропроцесорний виконавчий блок (МВБ) керування напругою на електродах електрохімічної комірки виготовлено на основі блок-схеми, що зображена на Рис.1 а [4], де ЦПП – центральний процесорний пристрій; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ПМ – підсилюючий модуль; USB – USB-інтерфейс до управляючого комп'ютера; S1, S2 – ключі; U – підсилювач для вимірювання потенціалу; I-U – підсилювач для вимірювання сили струму; COUNTER – електрод з вихідною напругою; REF, COMP – електроди порівняння; WORK – робочий електрод.

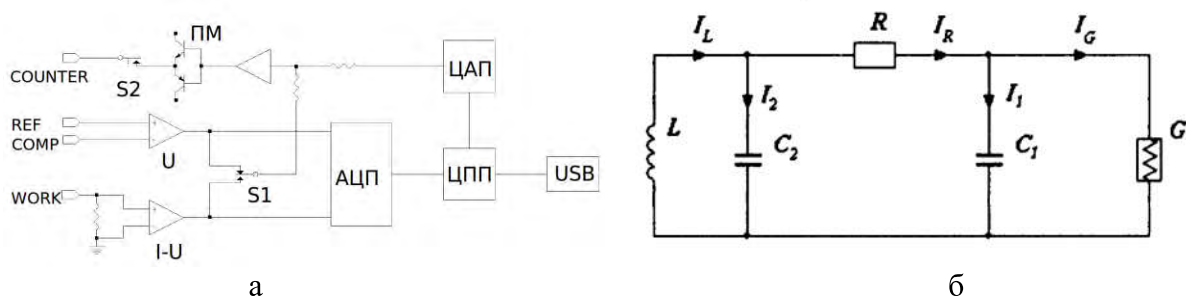


Рис. 1. а – блок-схема мікропроцесорного виконавчого блоку;
б – принципова схема генератора Чуа.

Стаціонарний режим електроосадження виконувався з прикладенням постійної напруги до електродів. Змінний стохастичний режим виконувався за прикладення напруги, розрахованої на основі моделі хаотичних коливань Чуа [8-10]. Генератор Чуа – історично перша електрична схема нелінійного коливального контура, створеного для генерації хаотичних коливань. У контурі Чуа в залежності від початкових умов та значень трьох параметрів здійснюються коливання напруги різної амплітуди та частоти

біля двох нестійких стаціонарних положень. Схема Чуа [8-10] є найпростішою автономною схемою (див. Рис. 1 б), що містить три енергонакопичувальні елементи C_1 , C_2 і L та один нелінійний елемент G з кусково-лінійною вольт-амперною характеристикою та (функціонально) з від'ємним опором. Залежно від параметрів елементів схеми генератор Чуа може демонструвати різні регулярні і хаотичні коливальні режими. Часові залежності трьох незалежних змінних x , y , z розраховуються в моделі Чуа як розв'язок системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \alpha(y - h(x)), \\ \frac{dy}{dt} &= x - y + z, \\ \frac{dz}{dt} &= -\beta y,\end{aligned}\tag{1}$$

де α і β – параметри, що залежать від C_1 , C_2 і L ; $h(x) = m_1x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)[|x + 1| - |x - 1|]$ - кусково-лінійна вольт-амперна характеристика нелінійного елемента G . Розрахунок часової залежності $x(t)$ використано нами для задання стохастичної напруги на електродах.

Алгоритм роботи розробленого апаратно-програмного комплексу управління процесом електролітичного осадження

Для забезпечення в кожний момент часу заданого значення напруги на електродах електрохімічної комірки розроблено МВБ. Управління МВБ в реальному часі здійснюється з підключеного до нього комп'ютера. Для керування напругою на електродах електрохімічної двохелектродної комірки розроблено програмне середовище, в якому задається один з можливих режимів роботи: 1. Задання постійної напруги/струму на електродах; 2. Застосування заданого математичним виразом закону зміни напруги/струму в часі; 3. Застосування даних з попередньо записаного файлу зі значеннями напруги, яку потрібно підтримувати на електродах в кожний момент часу. Алгоритм роботи апаратно-програмного комплексу наступний:

1. В розробленому програмному забезпеченні на основі заданих параметрів на управляючому комп'ютері розраховуються значення постійної або стохастичної напруги в залежності від часу. Розраховані значення напруги в реальному часі автоматично через USB порт комп'ютера передаються на МВБ керування напругою на електродах електрохімічної комірки.

2. У МВБ отримане з комп'ютера для даного моменту часу значення напруги опрацьовується мікроконтролером, що передає її значення на цифрово-аналоговий перетворювач. Цифрово-аналоговий перетворювач конвертує цифровий сигнал в аналоговий в заданому інтервалі напруг.

3. Вихідний аналоговий сигнал з ЦАПу через блок підсилювача БП поступає на електроди електрохімічної комірки.

4. На аноді в режимі реального часу вимірюється напруга та подається на блок підсилення, звідки надходить в мікроконтролер для забезпечення зворотнього зв'язку МВБ з програмою управління на комп'ютері. Отримані значення застосовуються для корекції управляючого сигналу та записуються у файл для можливості їх подальшого аналізу.

Розробка МВБ

На Рис. 2 зображено цифрову модель МВБ керування напругою на електродах електрохімічної комірки. На розробленій платі розташовані мікроконтролер, вітки

зворотнього зв'язку для вимірювання струму та напруги. Паралельний цифро-аналоговий перетворювач в моделі замінено на ланцюжок світлодіодів D3 – D10. В розробленій моделі відпрацьовані основні етапи управління роботою паралельного цифро-аналогового перетворювача та перенормування вимірних сигналів у вітках зворотного зв'язку. Використано мікроконтролер ATmega8, що є КМОП 8-розрядним мікроконтролером з низьким енергоспоживанням на основі RISC AVR архітектури [11-12]. Виконуючи одну повноцінну інструкцію за один такт, ATmega8 досягає пропускної здатності 1MIPS, що забезпечує достатню для проведення експерименту швидкість обробки даних та ефективність управління процесом електроосадження [13, 14].

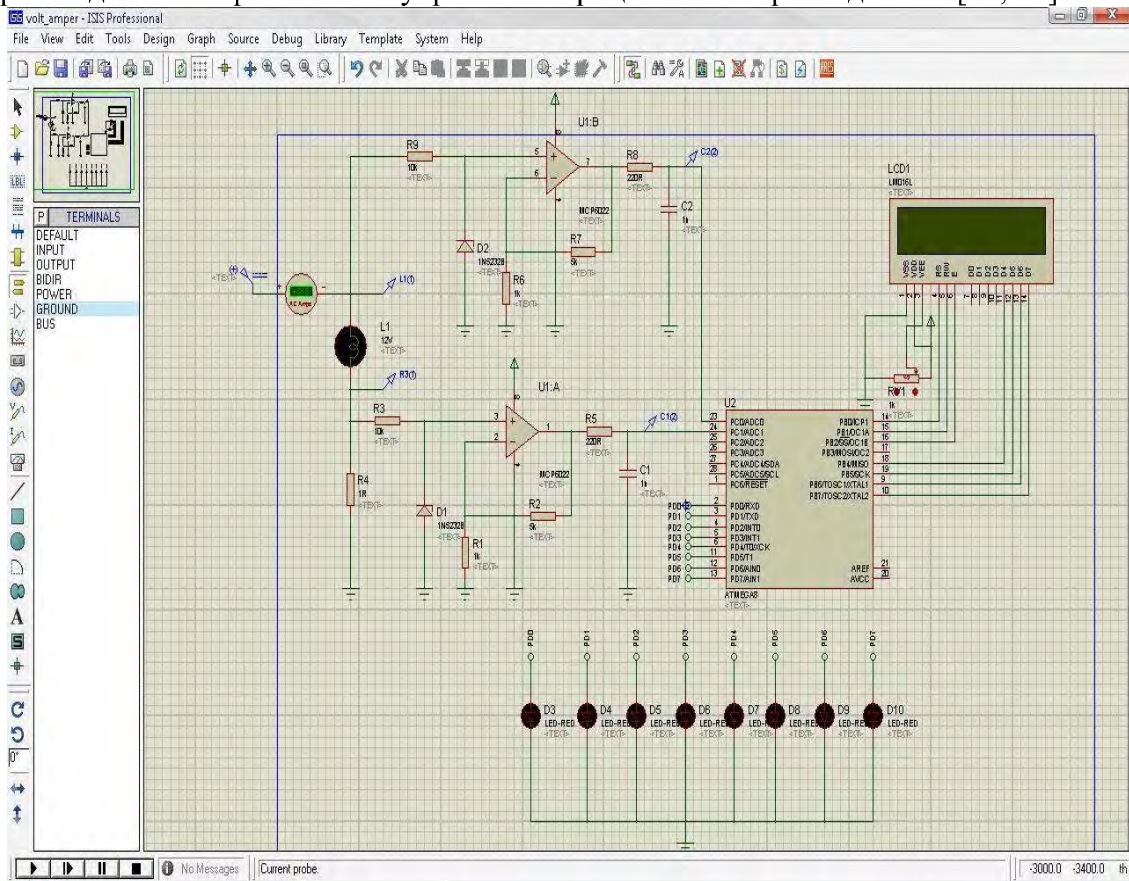


Рис. 2. Цифрова модель МВБ.

2. Результати експериментального дослідження впливу режиму електроосадження міді на структуру мідного покриття

Для проведення експерименту по електроосадженню було підготовлено мідні зразки з розмірами 14x14x1,41 мм. Процес шліфування та поліровки підкладок проходив в декілька етапів. Для цього були використані шліфувальні круги P180-P4000, алмазно-спиртові пасти TMP, RAM та DMV. Після кожного етапу полірування зразки очищувалися в ультразвуковій ванні. Після процесу полірування зразки піддавались електролітичному осадуванню міді, кожен з них за своїм часовим законом прикладання напруги до електродів електрохімічної комірки. Електроліт, що використовувався, містив 100 г мідного купоросу, 22 г сірчаної кислоти та 0,5л дистильованої води. Відстань між катодом і анодом була фіксована – 50 мм, перемішування не застосовувалося.

Протягом всього часу електроосадження відстань між катодом і анодом була фіксована – 50 мм. В ході експерименту на кожен з пластин було осаждено мідь товщиною близько 70 мкм. Діапазон напруг, що застосовується в процесі

електроосадження міді, був 0.1-0.6 В. Такий діапазон напруг встановлено в результаті вимірювання катодної поляризації (Рис. 3) міді при заданих розмірах зразків, концентрації та температурі електролітичного розчину.

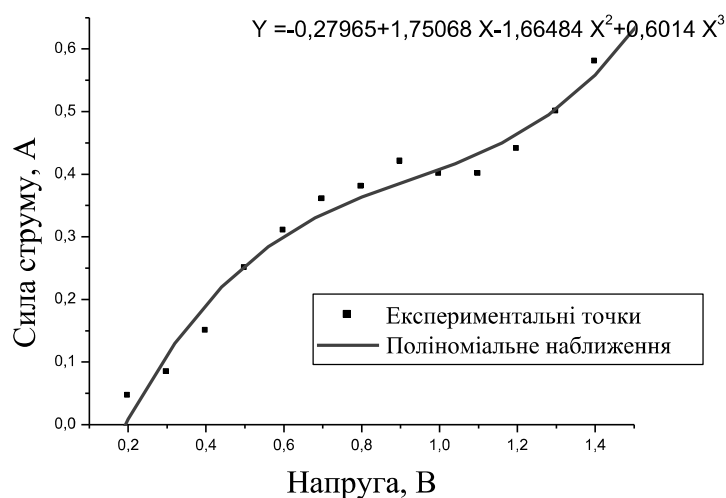


Рис. 3. Поляризаційна крива електроосадження міді.

Один тип зразків було виготовлено шляхом електроосадження міді на мідні відполіровані підкладки за постійної напруги на електродах, а другий з використанням стохастичної напруги.

На Рис. 4 а приведено часові залежності стохастичної напруги електроосадження, що розраховані на основі часової залежності змінної $x(t)$ моделі генератора Чуа (1). Стохастичний режим електроосадження виконувався з заданням двох стаціонарних значень напруги 0.4 та 1.5 В, які були встановлені з аналізу поляризаційної кривої (див. Рис. 3). Таким чином, стохастичні неперервні коливання відбувалися в околах цих двох стаціонарів з випадковою амплітудою в діапазоні 0-2.75 В з випадковими переходами коливань від одного стаціонару до другого.

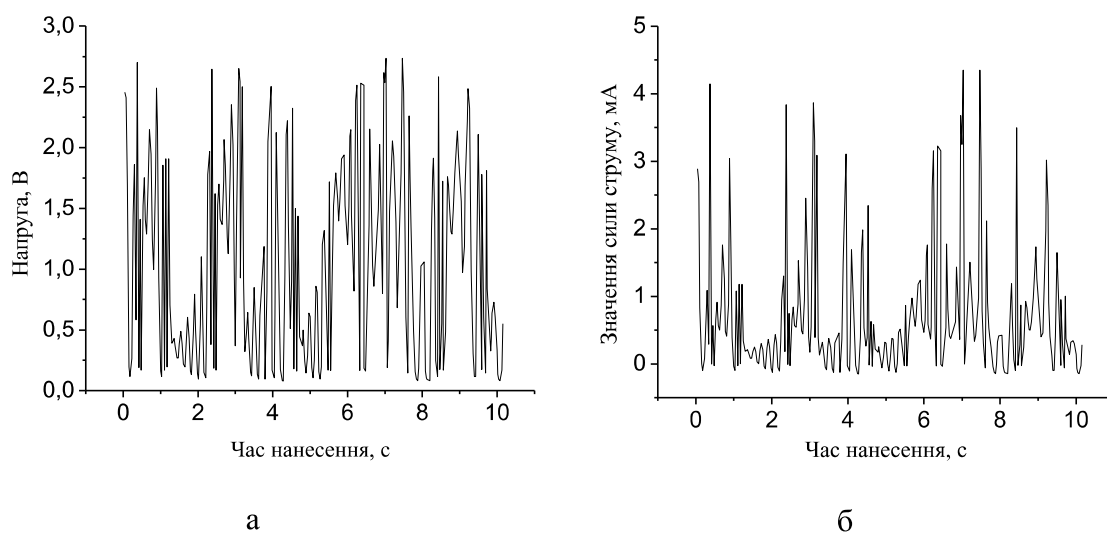


Рис. 4. Часова залежність: а – напруги на електродах; б – сили струму за стохастичного режиму електроосадження.

На рис. 4 б приведено часову залежність сили струму електроосадження, що розрахована з використанням поляризаційної кривої (див. поліноміальне наближення на Рис. 3), виходячи зі значень стохастичної напруги (див. Рис. 4 а).

Для встановлення відмінностей у зеренній структурі осаджені прошарки міді, отримані за постійної та стохастичної напруги, були досліджені методом електронної растрової мікроскопії. Їх зображення у вторинних електронах за збільшення в 2000 разів представлено на Рис. 5.

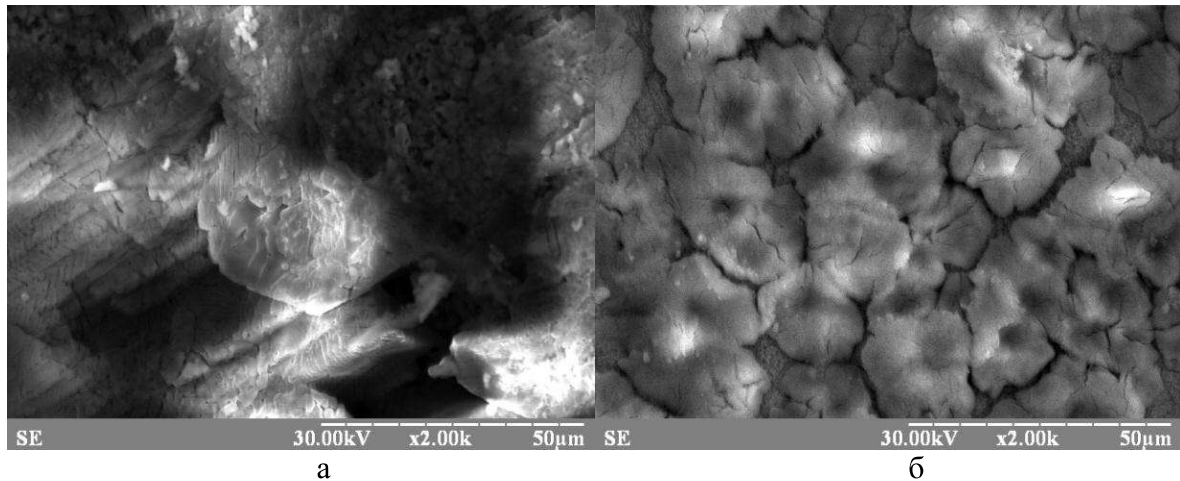


Рис. 5. Зображення поверхні електроосадженої міді а – за постійної напруги на електродах; б – за стохастичної напруги на електродах.

З Рис. 5 б видно, що за застосування стохастичної напруги осаджений прошарок міді складається з округлих монодисперсних зерен, в той час, як при постійній напрузі формуються зерна ламелярної структури і зерна неправильної форми значно більшого розміру.

Також за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-2.0 у монохроматичному FeK_α -випромінюванні було проведено рентгеноструктурний аналіз зразків: 1) №1 з прошарком міді, гальванічно нанесеним на мідну підкладку за постійної напруги електроосадження, 2) №2 з прошарком міді, гальванічно нанесеним на мідну підкладку за стохастичної напруги електроосадження. На рис. 6, представлено дифрактограми описаних зразків у порівнянні з дифрактограмою відпаленого порошку міді у якості еталону (зразок №3). Видно, що за стохастичного методу осадження формується майже структурно ідеальний полікристалічний прошарок міді. На відміну від цього, в зразках із застосуванням електролітичного осадження за постійної напруги спостерігається дуже гостра текстура – утворюються кристаліти з переважною орієнтацією площин (220) паралельно поверхні зразка.

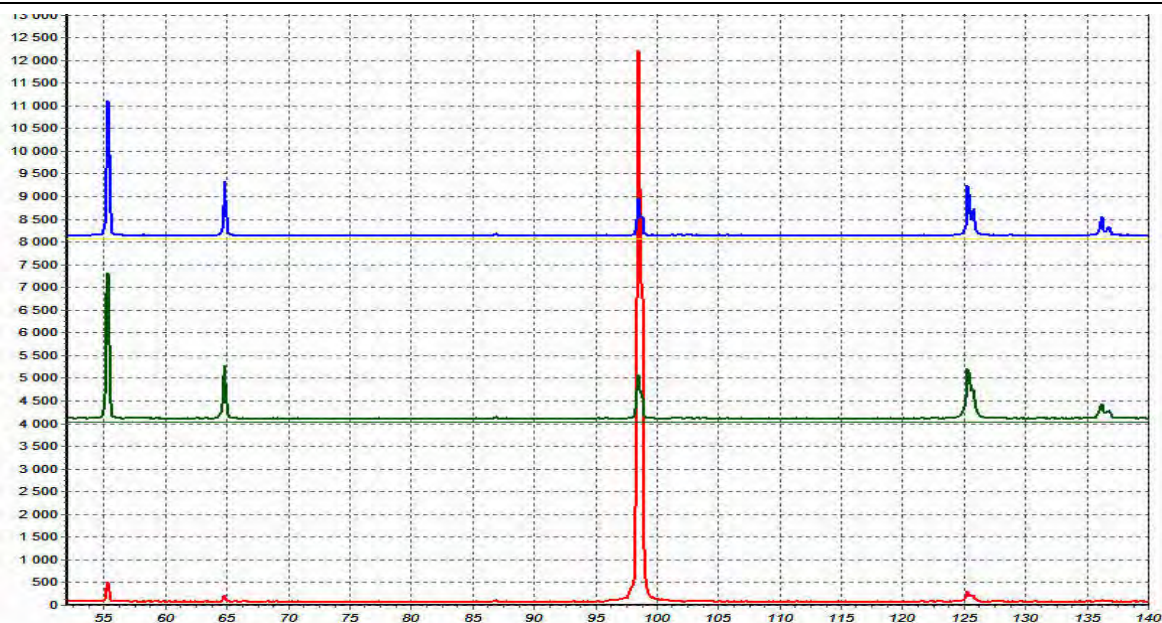


Рис. 6. Дифрактограми зразків №1, №2 (знизу до верху) у порівнянні з дифрактограмою порошку міді №3. По горизонтальній осі – кут дифракції 2θ , по вертикальній осі – інтенсивність I , с^{-1} .

В таблиці 1 наведено дані по абсолютним і відносним інтенсивностям ліній дифрактограм досліджених зразків.

Таблиця 1

Значення абсолютних і відносних інтенсивностей дифракційних максимумів та напівширин лінії (311) зразків №3 (еталон) та №2 (стохастична напруга) і №1 (постійна напруга).

Зразок	(111)		(200)		(220)		(311)			(222)	
	I , імп/с	I , %	I , імп/с	I , %	I , імп/с	I , %	I , імп/с	I , %	$\Delta_{1/2}$, град	I , імп/с	I , %
№3	3050	100	1270	42	900	30	1160	38	0,272	480	16
№2	3200	100	1150	36	970	30	1100	34	0,325	320	10
№1	430	4	150	1	12000	100	240	2	0,334	40	0,3

Як відомо, при розмірі окремих кристалітів, менших за 0,1 мкм або за наявності неоднорідностей параметра ґратки (мікростворень) дифракційні лінії полікристалів уширюються. Макроскопічні напруги приводять до зміщення положень максимумів. Для оцінки мікроструктурних параметрів прошарків електроосадженої міді було проведено відділення $K_{\alpha 1}$ -компоненти максимуму (311) зразків №1 і №2 та еталону (№3). Співставлені дифракційні розподіли подано на Рис. 8. Видно, що інтегральні ширини ліній різного типу прошарків незначно відрізняються від лінії еталона, а кутове положення співпадає в межах похибки. Це свідчить про незначні мікростворення кристалітів та відсутність механічних напруг в досліджених зразках.

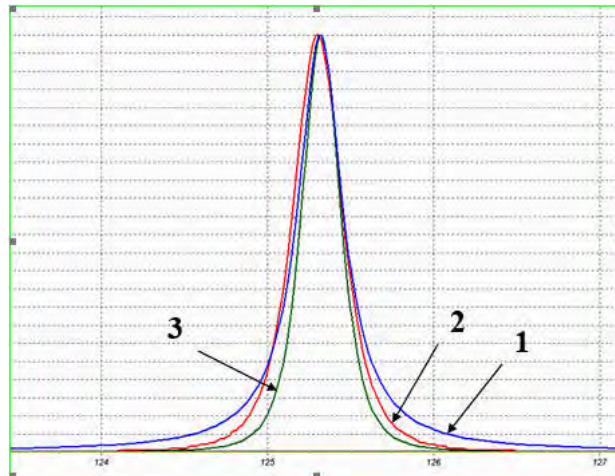


Рис. 7. $K_{\alpha 1}$ -компоненти максимуму (311) зразків біля $2\Theta=125^\circ$.
Номерація ліній відповідає номерації зразків.

Висновки

В роботі описано розроблений апаратно-програмний комплекс, що дозволяє в режимі реального часу підтримувати задану напругу, що прикладається до електродів електрохімічної комірки, в процесах електролітичного осадження міді. В результаті впровадження розробленого апаратно-програмного комплексу отримано можливість застосування різноманітних режимів електроосадження: при постійній напрузі, при імпульсній напрузі та в будь-якому іншому (в т.ч. стохастичному) режимі електроосадження.

На основі побудованої поляризаційної кривої, що характеризує осадження міді на мідну підкладку за заданої концентрації та температури електроліту, визначено інтервали напруги, що відповідають активованому та дифузійному режиму електроосадження. Стохастичний режим електроосадження проводився з застосуванням генератора нелінійних коливань Чуа, коли нелінійні коливання відбуваються в околах двох значень напруги, визначених з поляризаційної кривої, з випадковими неперервними переходами між ними.

Засобами растрової електронної мікроскопії показано, що зеренні структури нанесених прошарків міді в випадках стаціонарного та стохастичного режимів електролітичного осадження міді суттєво відрізняються за своєю морфологічною будовою. В випадку застосування стохастичної напруги осаджений прошарок міді складається з округлих монодисперсних зерен. За постійної напруги формуються як зерна ламелярної структури так і зерна неправильної форми значно більшого розміру, чим у випадку застосування стохастичної напруги. Методами рентгенівської дифрактометрії встановлено, що в зразках із застосуванням електролітичного осадження за постійної напруги спостерігається дуже гостра текстура – утворюються кристаліти з переважною орієнтацією площин (220) паралельно поверхні зразка. За стохастичного методу осадження формується майже структурно ідеальний полікристалічний прошарок міді з незначним мікрспотвореннями кристалітів та з відсутністю механічних напруг.

В наступному планується встановити вплив типу структури електроосаджених прошарків міді на хід твердофазних реакцій в системі Cu-Sn.

Подяки

Робота виконана в рамках держбюджетної теми МОН України.

Список використаної літератури:

1. Беленький М. А. Электроосаждение металлических покрытий: Справочник / М. А. Беленький, А. Ф. Иванов. – М.: Metallurgiya, 1985. – 292 с.
2. Попов К. I. Morphology of electrochemically and chemically deposited metals / К. I. Popov, S. S. Djokic, N. D. Nikolic, V. D. Jovic. – Switzerland: Springer, 2016. – 379 p.
3. Медведев А. Импульсная металлизация печатных плат / А. Медведев, П. Семенов // Технологии в электронной промышленности, – 2005. – № 3. – С. 68-70.
4. Sheshadri B. S. The effect of alternating current on the morphology of electrodeposited copper electrodeposition and surface treatment / B. S. Sheshadri, H. V. Setty // Electrodeposition and Surface Treatment. – 1973. – Vol. 2, № 74. – P. 223 – 231.
5. Килимник А. Б. Электрохимические процессы на постоянном и переменном токе / А. Б. Килимник // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 903-916.
6. Стевич З. Управление импульсным режимом в гальванотехнике / З. Стевич, М. Райчич-Вуясинович, З. Стоилькович // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 5. – С. 51-52.
7. Астафьев Е. А. Что такое потенциостат и как им пользоваться / Е. А. Астафьев. – Черноголовка: ООО «ЭЛИНС», 2013. – 50 с.
8. Гринченко В. Т. Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы / В. Т. Гринченко, В. Т. Мацыпура, А. А. Снарский. – ЛКИ, 2007. – 264 с.
9. Chua L. Dynamic nonlinear networks: state-of-the-art / L. Chua // IEEE Transactions on circuits and systems. – 1980. – Vol. 27, № 11. – P. 1059-1087.
10. Matsumoto T. A chaotic attractor from Chua's circuit / T. Matsumoto // IEEE Transactions on circuits and systems. – 1984. – Vol. 31, № 12. – P. 1055-1058.
11. 2015 Atmel Corporation. / rev.: atmel-8159f-8-bit avr microcontroller datasheet complete-09/2015 [электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf назва з екрану.
12. Таймеры счетчики микроконтроллеров Avr [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://samou4ka.net/page/tajmer-schetchik-mikrokontrollerov-avr> – назва з екрану.
13. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы Atmel / А. В. Евстифеев. – М.: Издательский дом «Додека XXI», 2004. – 288 с.
14. Колонтаевський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка / Ю. П. Колонтаевський – К, 2009. – 355 с.

References

1. Belenky M. A., Ivanov A. F. (1985) *Elektroosazhdenie metallicheskih pokrytity: Spravochnik (Electrodeposition of metal coatings: Directory)*. M: Metallurg. p. 262 (in Rus.)
2. Popov K. I., Djokic S. S., Nikolic N. D., Jovic V. D. (2016) Morphology of electrochemically and chemically deposited metals *Switzerland: Springer, 1(17)*, 368-379.
3. Medvedev A. (2005) Impulsnaya metallizatsiya pechatnyih plat. *Tehnologii v elektronnoy promyishlennosti*, 3, 68-70 (in Rus.)
4. Sheshadri B. S. (1973) The effect of alternating current on the morphology of electrodeposited copper electrodeposition and surface treatment. *Electrodeposition and Surface Treatment*. 2(74), 223-231.
5. Kilimnik A. B. (2008) *Elektrohimicheskie protsessyyi na postoyannom i peremennom toke (Electrochemical processes in direct and alternating current)*. Vestnik TGTU (Bulletin TSTU), 14(4), 903-916 (in Rus)
6. Stevic Z., Raychich-Vuyasinovich M., Stoilkovic Z. (2003) *Upravlenie impulsnym rezhimom v galvanotekhnike (Control pulse mode in electroplating)*. Tehnologiya i konstruirovanie v elektronnoy apparature (Technology and design of electronic equipment), 1(5), 51-52 (in Rus).

7. Astafjevs E. A. (2013) *Chto takoe potentsiostat i kak im polzovatsya. What is a potentiostat and how to use it.* Chernogolovka: «ELINS» p. 50 (in Rus.)
8. Grinchenko V. T., Matsapura V. I., Snarskii A. A. (2007) *Vvedenie v nelineynuyu dinamiku. Haos i fraktalyi (Introduction to nonlinear dynamics. Chaos and Fractals).* LKI p. 264 (in Rus.).
9. Chua L. (1980) Dynamic nonlinear networks: state-of-the-art. *IEEE Transactions on circuits and systems*, 27(11), 1059-1087.
10. Matsumoto T. (1984) A chaotic attractor from Chua's circuit. *IEEE Transactions on circuits and systems*. 31(12). 1055-1058.
11. 2015 atmel corporation. / rev.: atmel-8159f-8-bit avr microcontroller_datasheet_complete-09/2015 [Electronic resoure]. – Access mode: http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf . – Title from the screen (in Rus).
12. Taymeryi schetchiki mikrokontrollerov avr [Electronic resoure]. – Access mode: <http://samou4ka.net/page/tajmer-schetchik-mikrokontrollerov-avr> – Title from the screen (in Rus).
13. Evstifeev A. V. (2004) *Mikrokontrolleryi AVR semeystv Tiny i Mega firmyi Atmel (Microcontrollers AVR families Tiny and Mega firm Atmel).* Moscow: «Dodeka XXI» p. 288 (in Rus.)
14. Kolontaevsky Y. P. (2009) *Elektronika i mikroskhemotehnika.* Kyiv: Nauka p. 355

Summary. *Yu. V. Nikolenko, V. A. Diduk, Ya. D. Korol, Yu. O. Lyashenko*
Development and application of hardware-software complex process control electrolytic copper deposition mode with stochastic vibrations.

In this paper we describe the hardware-software system that allows the real-time support of a given voltage between the electrodes of electrochemical cell during electrolytic deposition of copper. Application of this hardware-software system enables different modes of electrodeposition: at a constant voltage, with impulse voltage and any other (including stochastic) modes of electrodeposition.

The voltage intervals, which correspond to activated and diffusion-controlled regimes of electroplating were determined on the basis of the constructed polarization curve. This curve describes the deposition of copper on a copper plate at a given concentration and temperature of the electrolyte. Stochastic electrodeposition regime was performed using Chua generator of non-linear oscillations. In this case the non-linear oscillations occur in the interval between two voltage values, which are determined from the polarization curve with a random continuous transitions between these values.

SEM study shows that grain structure morphology of the deposited copper layers varies significantly depending on the deposition mode. In stochastic voltage mode the deposited copper layer consists of monodisperse rounded grains. The lamellar and irregular grains are formed during deposition in the constant voltage mode. The size of these cristallites is much bigger than size of the cristallites formed in stochastic mode. The XRD measurements revealed that the cristallites formed in constant voltage mode are textured with preferential (220) orientation of atomic planes parallel to the sample surface. In stochastic mode we observed almost ideal polycrystalline copper layer with nigligible microdistortion of the cristallites and absence of mechanical stresses.

Keywords: electroplated copper, electrochemical cell, film grain structure, diffraction pattern of electroplated copper, stochastic voltage oscillations, Chua generator.