

УДК 621.3.049.77+546.56

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІДНИХ ПЛІВОК ДЛЯ ІНТЕГРОВАНІХ МІКРОСХЕМ**

***Прищепна М.М., к.т.н., доцент***

*Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Підвищення якості плівок, і перш за все - металевих, в сучасних умовах розглядають як реальний напрямок удосконалення виробництва і якості мікробірок, гібридних і напівпровідникових мікросхем.

Вибір або розроблення технологій виготовлення мікробірок і мікросхем базується на необхідності забезпечення високих експлуатаційних характеристик плівкових елементів, низької їх вартості і високої надійності. Серед матеріалів для полосків і комутаційних провідників мікросхем перевагу віддають міді, яка має високу електро- і теплопровідність. У роботі досліджували мікроструктурні параметри мідних плівок: період ґратки, густину, домінуючу орієнтацію кристалітів, внутрішні мікронапруги в плівках, розміри зерен, склад мікродомішок. Серед електричних параметрів досліджували електропровідність на постійному струмі, температурний коефіцієнт опору. Серед механічних параметрів досліджували адгезію плівок до підложки, коефіцієнт шорсткості поверхні, корозійну стійкість і ін.

Найважливішими інтегральними макропараметрами мідних плівок були вибрані: електропровідність, корозійна стійкість і адгезія до підложки, величина яких залежить від мікроструктурних параметрів плівок. Загально відомо, що значення названих параметрів залежать від вибраного методу нанесення, товщини плівок, властивостей підложки і, як правило, дещо гірші параметрів масивних зразків міді.

Досліджували технологію термойонного нанесення плівок. Ця технологія дозволяє створювати одношарову конструкцію провідників з хорошою адгезією до підложки, питомим опором мідних плівок, близьким до масивних зразків, і високою корозійною стійкістю.

За відпрацьованою технологією термойонного нанесення було виготовлено кілька партій зразків плівок, які відрізнялися різною швидкістю конденсації плівок на підложках і різною товщиною плівок. У кожній партії було по 5 ситалових і 5 полікорових пластин.

### **Рентгеноструктурний аналіз плівок**

Рентгеноструктурні дослідження мідних плівок проводили на дифрактометрі рентгенівському ДРОН-2.0 у відфільтрованому  $FeK_{\alpha}$  випромінюванні.

Для підвищення точності визначення параметрів елементарної комірки плівки міді, запис дифрактограм проводили в автоматичному режимі з швидкістю  $0,25^\circ/\text{хв}$ . і щілиною перед лічильником  $0,1$  мм.

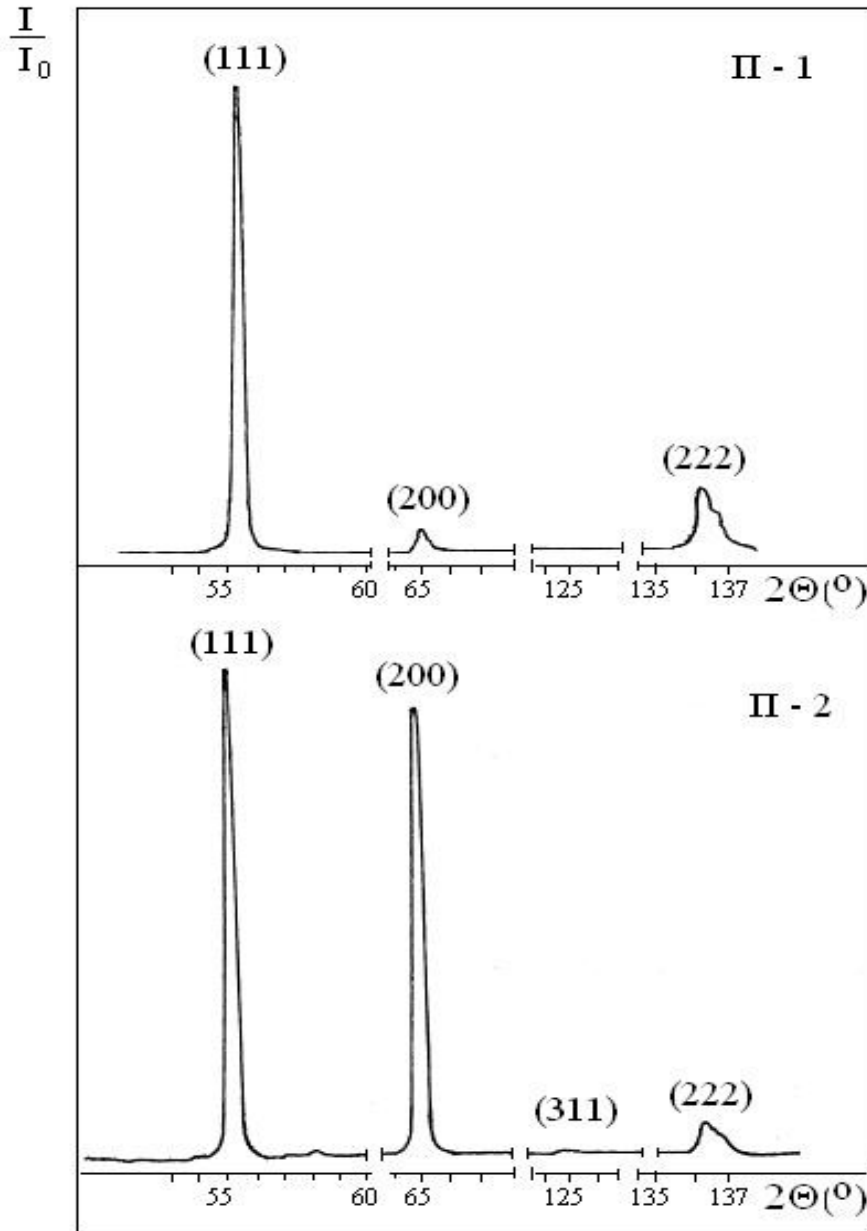


Рис. 1. Дифрактограми партій П - 1 і П - 2, виготовлених на ситаловій підложці

Дифрактограми досліджуваних плівок зображені на рис. 1. За характером вирішуваних задач і методиками, рентгеноструктурні дослідження були розділені на три групи: визначення параметрів ґратки і розрахунки теоретичної

рентгенівської густини; визначення домінуючої орієнтації кристалітів; аналіз порушень кристалічної структури. Усі розрахунки проводили відносно інтенсивності віддзеркалення дифракційної лінії (222).

Розраховані за отриманими дифрактограмами (рис. 1) значення періоду ґратки  $a$  і рентгенівської густини наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Партія	Швидкість конденс., мкм/хв	Товщина плівки, мкм	Період ґратки, $a$ , нм	Густина рентген., $\rho$ , кг /м <sup>3</sup>	Домінуюча орієнтація, %		Півширина дифракційн. лінії, $B$ , (рад) 10 <sup>3</sup>	
					(111)	(200)	(111)	(222)
П-1	0,8	3,25	0,3613	8893	100	7	1,1	2,9
П-2	0,8	4,35	0,3613	8893	100	94	1,1	2,8
П-3	5	2,15	0,3611	8907	100	2	1,31	9,6
П-4	2	14,5	0,3614	8885	100	58	0,8	1,7
Мідь (гран.)	–	–	0,3615	8900	100	53	–	–

Густину плівок розраховували також методом аналітичного зважування. Отримані значення густини плівок перевищували значення рентгенівської густини на (11...15)%. Для порівняння, у табл. 1 наведені значення відповідних параметрів масивних полікристалічних зразків міді, з якої були виготовлені плівки. Проведені дослідження показали, що період ґратки і рентгенівська густина плівок, виготовлених за технологією ТЙН близькі за значеннями до відповідних параметрів масивних полікристалічних зразків.

Домінуючу орієнтацію кристалітів визначали за співвідношенням інтенсивностей дифракційних ліній досліджуваних плівок. У табл. 1 наведені такі співвідношення для кристалографічних орієнтацій (111) і (200).

Дифракційні лінії від інших орієнтацій кристалітів практично відсутні (рис. 1). Різниця у співвідношеннях інтенсивностей ліній на дифрактограмах плівок від табличних (для масивних зразків) свідчить про наявність у плівках домінуючої орієнтації кристалітів. Так у плівках партії П-1 на ситалі і партії П-3 на полікорі кристаліти орієнтовані площинами (111) паралельно площині підложки, інших орієнтацій практично немає (рис. 1). У плівках міді партій П-2 та П-4 на ситалі виділяється дві орієнтації кристалітів (111) та (200). Для партії П-2 орієнтація (200) паралельно площині підложки за інтенсивністю дифракційної лінії (94 %) значно перевищує відповідну орієнтацію в масивних зразках міді, прийняту як еталонну – 53 %. При збільшенні товщини плівки, співвідношення інтенсивностей ліній на дифрактограмах плівок (партія

П-4) стають схожими на співвідношення інтенсивностей ліній масивних зразків. Тобто, за структурою такі плівки наближаються до структури гранул, з яких вони були виготовлені.

Мікронапруження в плівках оцінювали за дефектами кристалічної структури плівок міді. Для цього вимірювали півширину  $B$  дифракційних ліній від площин (111) і (222) за умов мінімальної інструментальної ширини лінії. Як еталонну було прийнято дифрактограму гранул вакуумплавленої міді, з яких були виготовлені плівки. Для всіх отриманих плівок півширина  $B$  дифракційної лінії була приблизно в 1,5 рази вужчою, ніж для гранул міді, що свідчить, що мікронапруги в плівках були менші ніж у гранулах. Кількісні значення мікронапруженностей і розміри блоків у зв'язку з таким співвідношенням півширин не були розраховані. Для порівняння плівок за мікронапруженностями в табл. 1 наведено значення півширини  $B$  для всіх партій. Отримані результати свідчать, що мінімальні мікронапруженності характерні для полікристалічних плівок (партія П-4), а максимальні - для текстурованих плівок (партія П-3) з переважною орієнтацією кристалітів. Як показали дослідження, співвідношення інтенсивностей дифракційних ліній (домінуючу орієнтацію кристалітів) і значення мікронапруг у плівках є можливість регулювати, змінюючи значення технологічних факторів нанесення.

#### Дослідження морфології поверхні

Дослідження проводили методом растрової електронної мікроскопії з використанням РЕМ моделі *JSM – IC845* і просвічуючого електронного мікроскопа моделі *H - 800*. Мікрофотографії дослідження морфології поверхні мідних плівок на полікорових і ситалових підложках, отриманих методом РЕМ в режимі вторинних електронів, зображені на рис. 2. У процесі досліджень розраховували середній розмір зерна на поверхні -  $\bar{D}_3$ .

Розраховані на поверхні плівок значення  $\bar{D}_3$  наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Партія	Товщина плівки, мкм	Розмір зерна, $\bar{D}_3$ , мкм		Коефіцієнт шорсткості		Адгезія, МПа	
		Ситал	Полікор	Ситал	Полікор	Ситал	Полікор
П-1	3,25	1,8	0,85	0,16	0,13	-	3,0
П-2	4,35	1,9	0,5	0,12	0,1	-	7,0
П-3	2,15	1,4	0,4	0,125	0,13	>12,0	-
П-4	14,5	8,0	-	0,13	0,1		>12,0

Розмір зерна  $\bar{D}_3$  плівок на ситалових підложках у 2...4 рази більший відповідних зерен у плівці міді на полікорових підложках (рис. 2, табл. 2.). Проведені дослідження показали, що змінювання енергетичних технологічних факторів процесу нанесення призводить до зміни розмірів зерна плівок як на ситалі, так і на полікорі.

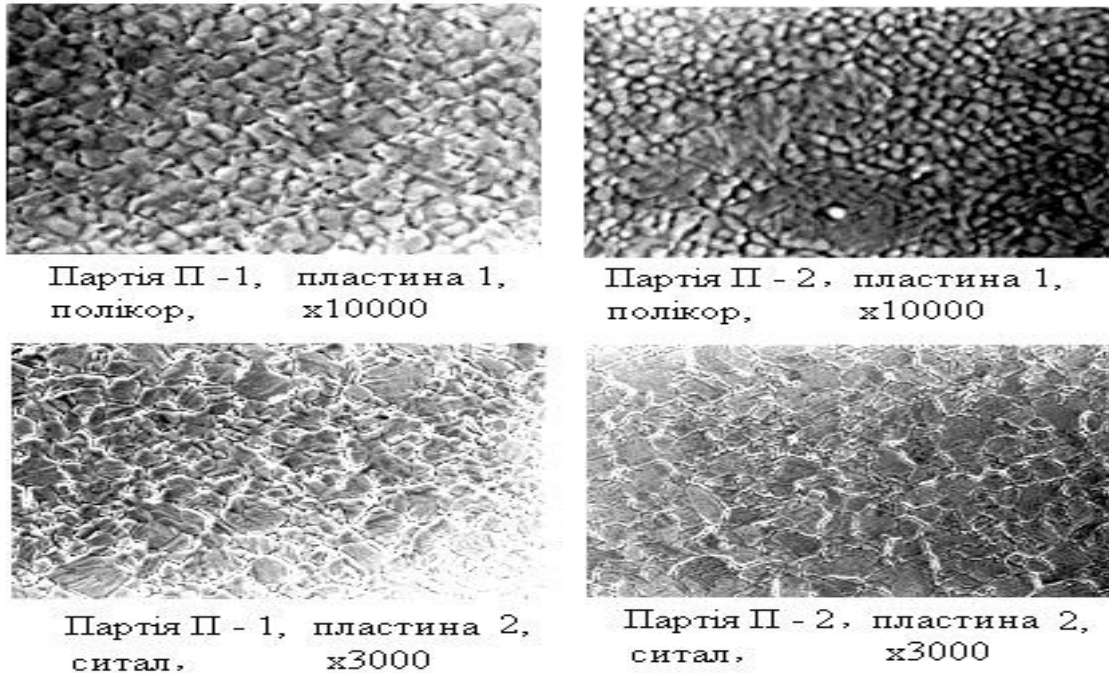


Рис. 2. Мікрофотографії мідних плівок партій П - 1, П - 2

### Дослідження елементного складу плівок

Дослідження елементного складу плівок міді виконували методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ) з використанням пристрою для аналізу елементного складу шарів. Для досліджень використовували растровий електронний мікроскоп моделі *JSM – IC845* з Link – системою *AN – 10000/ 85 S*.

Аналіз елементного складу в приповерхневій області плівок виконували за спектрами, отриманими в широкому діапазоні енергетичного збудження атомів за чутливості вимірювального детектора  $5 \cdot 10^{-19}$  ат/см<sup>3</sup>.

Результати досліджень представлені енергетичними спектрами для зразків мідних плівок на полікорі партій П-1 і П-2 (рис. 3), які характеризують усі інші зразки, на яких за визначеної чутливості методу аналізу, домішок не було зафіксовано. Лише на рівні слідів зафіксовано присутність у плівках силіцію, яка пояснюється попередніми циклами використання вакуумного об-

ладнання.

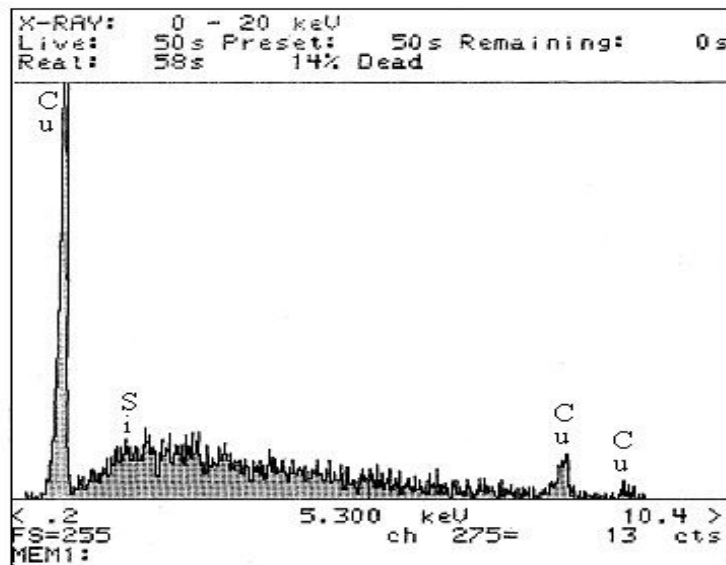


Рис. 3. Елементний склад мідних плівок

### Дослідження коефіцієнта шорсткості плівок

Коефіцієнт шорсткості поверхні плівок є інтегральною характеристикою якості поверхні і ураховує морфологію поверхні. Методика досліджень ґрунтувалася на вимірюванні інтенсивності дифузної складової віддзеркаленого опромінення за бокового освітлення досліджуваної поверхні. Для ідеальної дзеркальної поверхні дифузне віддзеркалення відсутнє і коефіцієнт шорсткості поверхні дорівнює нулю. У всіх інших випадках коефіцієнт шорсткості буде відрізнятися від нуля.

Вимірювання шорсткості поверхні виконували на устаткуванні, у якого як фотоприймач дифузного випромінювання використовували вакуумний фотоелемент із темновим струмом  $-5 \cdot 10^{-12}$  А. У табл. 2 наведено значення коефіцієнта шорсткості. Похибка вимірювання складає приблизно  $\pm 0,005$ .

Отримані результати підтверджують, що мідні плівки на ситалових підложках мають більше значення коефіцієнта шорсткості в порівнянні з мідними плівками на полікорових підложках, що пов'язано з більшими розмірами зерен міді на ситалових підложках.

### Дослідження корозійної стійкості плівок

Корозійна стійкість мідних плівок є однією із найважливіших характеристик, що визначають можливість їх використання для створення провідників і полосків гібридних інтегрованих мікросхем і мікрозбірок. Як показали дослідження, швидкість окисдування мідних плівок пропорційна кількості дефектів як на поверхні, так і в об'ємі плівок. Корозійну стійкість плівок оцінювали

за величиною поляризаційного опору. Поляризаційний опір – це опір, що виникає на межі розділу плівка – електроліт при зануренні підложки з плівкою в електроліт.

Вимірювання проводили в 0,003 % водному розчині соляної кислоти. Відомо, чим більший поляризаційний опір, тим вища корозійна стійкість плівки. Дослідження показали, що поляризаційний опір для всіх зразків мідних плівок знаходився в межах 4890...5590 Ом·см<sup>2</sup>, що в 2...4 рази перевищує значення цього параметру для плівок міді, отриманих термічним, електронним випаровуванням і магнетронним розпиленням. Поляризаційний опір плівок на ситалі, що мали розмір зерна в межах 2 мкм, перевищував значення поляризаційного опору плівок міді на полікорі приблизно на 10 %, що мали розмір зерна в межах 0,4 мкм. Це свідчить про те, що дифузія кисню проходить по межах зерен. Тому плівки, що мали більші розміри зерен, мали також і більше значення поляризаційного опору, а відтак і корозійну стійкість. Як показали дослідження, коефіцієнт дифузії кисню в плівки міді, отриманих термоміонним напиленням, значно менший ніж для інших методів нанесення.

Проведені дослідження корозійної стійкості плівок міді показали, що значення поляризаційного опору корелює з коефіцієнтом шоркості поверхні. За умов збільшення розмірів зерна (табл. 2), зростає коефіцієнт шоркості, однак для всіх проведених досліджень він не перевищував 0,16.

#### **Дослідження адгезії плівок**

Дослідження адгезії мідних плівок проводили на спеціальних тестових структурах з розмірами поверхні контактування мідних плівок з поверхнею підложки 0,5×0,5 мм і 1,0 ×1,0 мм. В процесі досліджень вимірювали силу відриву тестових структур і розраховували адгезію плівок. Результати досліджень наведені в табл. 2. Дослідження показали, що в залежності від типу підложки, умов підготовки поверхні та технологічних факторів процесу нанесення плівок, можливо отримати адгезію плівок до підложок у межах 3...12 МПа без спеціального підшару.

#### **Дослідження електропровідності плівок**

Дослідження електропровідності плівок включало дослідження питомого опору мідних плівок і дослідження температурного коефіцієнта питомого опору.

Питомий опір мідних плівок вимірювали з використанням спеціальних тестових структур, виготовлених фотолітографією на мідних плівках, отриманих в процесі досліджень, на ситалових і полікорових підложках. У процесі досліджень в інтервалі температур (25...100)°С розраховували: поверхневий опір, об'ємний опір і температурний коефіцієнт опору (див. табл. 3).

Таблиця 3

Партія	Товщина плівки, мкм	Розмір зерен $\bar{D}_z$ , мкм		Питомий опір, $\rho_v$ , Ом·м		ТКр, К <sup>-1</sup>
		Ситал	Полікор	Ситал	Полікор	
П-1	3,25	1,8	0,85	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$1,81 \cdot 10^{-8}$	$4,26 \cdot 10^{-3}$
П-2	4,35	1,9	0,5	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$1,80 \cdot 10^{-8}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$
П-3	2,15	1,4	0,4	$1,77 \cdot 10^{-8}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$	-
П-4	14,5	8,0	-	$1,67 \cdot 10^{-8}$	-	$4,41 \cdot 10^{-3}$
Мідь (гранули)	-	-	-	$1,673 \cdot 10^{-8}$	$1,673 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$

Як свідчать отримані результати, питомий опір і температурний коефіцієнт питомого опору для всіх плівок близькі до значень відповідних параметрів масивних зразків. Питомий опір мідних плівок на ситалових підложках менший питомого опору мідних плівок на полікорових підложках, що корелює з розмірами зерен, які в 2...4 рази менші на полікорових підложках. При збільшенні товщини плівок і середніх розмірів зерен питомий опір зменшується.

В процесі досліджень в плівках не було виявлено домішок, тому можна стверджувати, що основним механізмом розсіювання носіїв у плівках є розсіювання на фонах і на межах зерен. А оскільки розміри зерен в плівках на полікорових підложках менші, то, як наслідок, збільшується розсіювання носіїв на границях зерен і зростає питомий опір плівок, що і підтверджується дослідженнями. Зроблений висновок підтверджується також розрахунками температурного коефіцієнта опору. Так, всі плівки на полікорових підложках мають ТКр за величиною більший, ніж ТКр масивних зразків.

Тонкі плівки на ситалі мають ТКр менше ТКр масивного зразка, але при збільшенні товщини ТКр зростає, досягаючи табличного значення, а після і перевищує його. Як показали дослідження, тонкі плівки текстуровані з переважною орієнтацією (111) паралельно площині підложки. При збільшенні товщини плівки зростає відносна частина кристалітів з орієнтацією (200). Тому, можливо, збільшення ТКр для товстих плівок міді, може бути пов'язане з додатковим розсіюванням носіїв в кристалітах з орієнтацією (200).

### Висновки

1. Середній розмір зерна мідних плівок на ситалових підложках в 2...4 рази більший розмірів зерен плівок на полікорових підложках, що корелює з відповідними значеннями об'ємного питомого опору  $\rho_v$ , температурного коефі-



цієнта питомого опору, корозійної стійкості і ін.

2. Об'ємний питомий опір, температурний коефіцієнт питомого опору близькі за значеннями до відповідних параметрів масивних зразків.

3. Період ґратки і рентгенівська густина міді в плівках відповідає табличним значенням масивного матеріалу.

4. Плівки мають чітко виражену текстуру з орієнтацією (111) і (200) і малу ширину дифракційної лінії.

5. Плівки мають високий рівень чистоти.

6. Корозійна стійкість мідних плівок за величиною поляризаційного опору складає 0,6 по відношенню до корозійної стійкості алюмінію.

7. Плівки мають високу адгезію до підложки.

8. Плівки міді, отримані методом термойонного нанесення, можна використовувати для виготовлення мікробірок, гібридних інтегрованих мікросхем і приладів НВЧ.

*Прищепка М. М. Дослідження електрофізичних властивостей мідних плівок для інтегрованих мікросхем. Проведено комплексне дослідження мікроструктурних, електричних і механічних параметрів мідних плівок, отриманих термойонним нанесенням (ТІН) на ситалові й полікорові підложки. Досліджувані параметри порівнювали з відповідними параметрами гранул вакуумплавленої міді, з якої були виготовлені досліджувані зразки. Проведені дослідження показали, що основні параметри плівок міді, виготовлених за технологією ТІН, близькі за значеннями до масивних зразків вакуумплавленої міді.*

**Ключові слова:** мідні плівки, термойонне нанесення, мікроструктурні параметри

*Прищепка М. М. Исследование электрофизических свойств медных пленок для интегральных микросхем. Проведено комплексное исследование микроструктурных, электрических и механических параметров медных пленок, полученных термоионным нанесением (ТИН) на ситалловые и поликоровые подложки. Исследуемые параметры сравнивали с соответствующими параметрами гранул вакуумплавленной меди, из которой были изготовлены исследуемые образцы. Проведенные исследования показали, что основные параметры пленок меди, изготовленных по технологии ТИН, близки по значениям к массивным образцам вакуумплавленной меди.*

**Ключевые слова:** медные пленки, термоионное нанесение, микроструктурные параметры

*Prischepa M.M Investigation the electrical properties of copper films for integrated circuits. A comprehensive investigation of the microstructure, electrical and mechanical parameters of copper films obtained thermionic application (TIA) on the glass-ceramic substrate and polycore. The studied parameters were compared with the corresponding parameters of granules fused in a vacuum of copper, of which had been made the studied samples. Studies have shown that the main parameters of copper technology with TIA, close to the values of bulk samples fused in a vacuum of copper.*

**Key words:** Copper film, thermionic deposition, microstructure parameters