

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) Юлія ЯМНЕНКО
(ініціали, прізвище)
“ ” 2020р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальністю _____ 171 Електроніка _____
(код і назва)

освітня програма (спеціалізація) _____ Електронні прилади та пристрої _____

на тему: Технологія формування покриттів і силових модулів _____

Виконав : студент II курсу, групи ДЕ - з91мп
(шифр групи)

Касяненко Вадим Вікторович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник професор, д. т. н. Кузьмичев Анатолій Іванович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент доцент, к.т.н., доц. Татарчук Д. Д. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант
по нормоконтролю доцент, к.т.н. Батрак Л.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет Електроніки

(повна назва)

Кафедра Електронних пристроїв та систем

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

Юлія ЯМНЕНКО

(прізвище ініціали)

« ____ » _____ 2020 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Касяненко Вадиму Вікторовичу

1. Тема дисертації Технологія формування покриттів і силових модулів

науковий керівник дисертації Кузьмичев Анатолій Іванович професор, д. т. н.
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 05 » листопада 2020 року № 3242-с

2. Термін подання студентом дисертації « 09 » грудня 2020 р.

3. Об'єкт дослідження: адгезійна міцність покриттів міді на підкладках

4. Вихідні дані Мінімальні значення шорсткості Ra <2,0 мкм, необхідні для досягнення максимальних значень адгезійної міцності до 60 МПа, можуть бути отримані при розташуванні підкладки щодо магнетронній розпилювальної системи під кутом 90 ° і 180 ° при відстані від мішені до підкладки від 25 до 60 мм.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити визначити вимоги до матеріалів і технології металізації керамічних поверхонь. Визначити технологічні режими нанесення покриттів, що забезпечують адгезійну міцність одержуваних покриттів більше 50 МПа.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу схематичні зображення; функціональні та конструкторсько-технологічні схеми; структурні схеми; плакати з рисунками, графіками та формулами.

7. Орієнтовний перелік публікацій. Касяненко В., Кузьмичев А. Способи металізації кераміки, використовувані при виробництві силових електронних модулів і електровакуумних приладів //Міжнародний мультидисциплінарний науковий журнал ЛОГОС. ОНЛАЙН, DOI 10.36074/2663-4139.15.06, 70. Касяненко В. В., Кузьмичев А. І. « Адгезійна міцність двошарових металевих покриттів на підкладках оксиду алюмінію» East European Science Journal 11№63, 2020г. Дата виходу журналу15.12.2020р

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання **20.01.2020**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір і затвердження теми дисертації та наукового керівника	10.12.2019	
2	Отримання завдання на магістерську дисертацію	20.01.2020	
3	Огляд літературних джерел	05.03.2020	
4	Конкретизація мети та завдань дослідження	01.06.2020	
5	Відпрацювання технології нанесення покриттів	05.09.2020	
6	Відпрацювання технології формування металевих покриттів	20.10.2020	
7	Розрахунок і аналіз адгезійної міцності струмопровідних покриттів	16.11.2020	
8	Публікація статей	19.11.2020	
9	Оформлення пояснювальної записки	03.12.2020	
10	Підготовка доповіді, презентації та демонстраційного матеріалу	05.12.2020	

Студент

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(підпис)

Касяненко В.В.
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Кузьмичев А. І.
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по Спосібам металізації кераміки, використовувані при виробництві силових електронних модулів і електровакуумних приладів. Доведений вибір керамічних та інших матеріалів, які використовувались у виробництві силових електронних модулів розробка, монтаж і налагодження лабораторної установки для відпрацювання технології нанесення покриттів.

Була використана лабораторна установка для відпрацювання технології формування металевих покриттів та проведення робіт з відпрацювання технології; дослідження отриманих зразків. Були визначенні діапазону технологічних режимів для формування покриттів методом магнетронного розпилення. Визначення технологічних режимів роботи джерела при нанесенні покриття міді методом парострумінного осадження обробка експериментальних даних і видача рекомендацій щодо використання результатів роботи.

Виходячи з даних, отриманих в ході дослідження, шорсткість адгезійного підшару титану впливає на адгезійну міцність струмопровідного шару міді на підкладці оксиду алюмінію. Мінімальні значення шорсткості $Ra < 2,0$ мкм, необхідні для досягнення максимальних значень адгезійної міцності до 60 МПа, можуть бути отримані при розташуванні підкладки щодо магнетронній розпилювальної системи під кутом 90° і 180° при відстані від мішені до підкладки від 25 до 60 мм.

Ключові слова: адгезія; кераміка; мідь; теплопровідність; плівка.

SUMMARY

The Master's thesis presents an overview of scientific and technical literature on the methods of metallization of ceramics used in the production of power electronic modules and electrovacuum devices. Ceramic materials used in the production of power electronic modules development, installation and adjustment of the laboratory unit for the development of coating technology.

The laboratory facility was used to work out the technology of forming metal coatings and to carry out works on working out the technology; study of samples obtained. Determination of the range of technological modes for the formation of coatings by magnetron sputtering. Determination of technological modes of the source when applying copper coating by the method of steam-jet deposition processing of experimental data and issuing recommendations on the use of the results of work.

Based on the data we obtained during the study, the roughness of the titanium adhesive sublayer influences the adhesive strength of the conductive copper layer on the aluminum oxide substrate. Minimum roughness values $R_a < 2.0 \mu\text{m}$, required to achieve maximum adhesion strengths up to 60 MPa, can be obtained by placing the substrate relative to the magnetron sputtering system at an angle of 90° and 180° at a distance from the target to the substrate of 25 to 60 mm.

Keywords: *adhesion; ceramics; copper; thermal conductivity; film.*

ЗМІСТ

<i>ВСТУП</i>	8
<i>РОЗДІЛ 1. МАТЕРІАЛИ, ТЕХНОЛОГІЯ І УСТАТКУВАННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ МЕТАЛІЗАЦІЇ КЕРАМІЧНИХ ПІДКЛАДОК</i>	13
1.1. Керамічні матеріали, використовувані у виробництві силових електронних модулів.....	13
1.2. Способи металізації кераміки, які використовуються при виробництві силових електронних модулів і електричних вакуумних приладів.....	22
Висновки до першого розділу	38
<i>РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ</i>	40
2.1. Загальна інформація про установку для відпрацювання технології, формування металевих покриттів.....	40
2.2. Визначення діапазону технологічних режимів для формування покриттів методом магнетронного розпилення.....	46
2.3. Визначення технологічних режимів роботи джерела при нанесенні покриття міді методом парострумінного осадження.....	51
Висновки до другого розділу	62
<i>РОЗДІЛ 3. ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ДВОШАРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ НА ПІДКЛАДКАХ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ</i>	63
3.1. Попередня підготовка зразків перед проведенням нанесення покриття	63
3.2. Виявлення впливу адгезійного підшару на адгезійну міцність основного струмопровідного шару	68

3.3. Виявлення залежності адгезійної міцності від режимів роботи джерела живлення магнетронній розпилювальній системи	72
---	----

Висновки до третього розділу	79
------------------------------------	----

<i>РОЗДІЛ 4. ВИЯВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ ВІД ПОЛОЖЕННЯ ПІДКЛАДКИ ЩОДО ДЖЕРЕЛА МАТЕРІАЛУ</i>	<i>80</i>
---	------------------

4.1. Виявлення залежності температурного режиму нанесення від положення підкладки щодо магнетронній розпилювальній системи ..	80
---	----

4.2. Виявлення залежності адгезійної міцності покриттів від положення підкладки щодо магнетронній розпилювальній системи ..	84
---	----

Висновки до четвертого розділу	89
--------------------------------------	----

<i>РОЗДІЛ 5. ПРОПОЗИЦІЯ ДО СТАРТАП-ПРОЕКТУ</i>	<i>90</i>
---	------------------

5.1. Опис ідеї проекту	90
------------------------------	----

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту	91
---	----

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	92
--	----

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	96
---	----

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	97
---	----

Висновки до п'ятого розділу	99
-----------------------------------	----

<i>ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....</i>	<i>100</i>
---	-------------------

<i>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</i>	<i>101</i>
---	-------------------

<i>ДОДАТКИ</i>	<i>109</i>
-----------------------------	-------------------

<i>ABSTRACT.....</i>	<i>110</i>
-----------------------------	-------------------

ВСТУП

Модулі силової електроніки застосовуються в областях техніки, пов'язаних з необхідністю передачі високоточних сигналів. Області застосування цих модулів є системи навігації в авіації, елементи комутації силових схем і інші високонавантажені з'єднання. Головним вузлом модуля є підкладка з кераміки, на якій утворені струмопровідні доріжки і монтують компоненти силової електроніки. Комутаційна плата- це готова підкладка.

Основні функції, що виконує комутаційна плата:

- діелектрична основа друкованої схеми, яка формується з однієї чи двох сторонах;
- тепловідвод від кристалів та елементів схеми.

Була використана для виготовлення підкладок кераміка негігроскопічна і термостійка, це ізоляційний матеріал з досить високими механічними та діелектричними властивостями. Проста у виготовленні та не дорога. Для виготовлення силових модулів потрібно використовувати керамічні підкладки з оксиду чи нітриду алюмінію із багат шаровим покриттям товщина якого становить від декількох мікрон до декількох десятків мікрон (залежить від області застосування), що забезпечує потрібну якість адгезії шару покриття до кераміки і наноситься з одного або з обох сторін керамічної пластини.

Основні вимоги до готового продукту - це мінімальні розміри і невисока вартість матеріалів і виробничого процесу. Крім того, вирішальними факторами є висока продуктивність, стійкість до впливу навколишнього середовища і надійність. Конструкція готового модуля повинна забезпечувати мінімальні значення перехідних термічних опорів, розподілену індуктивність силових шин, висока ізоляційна напруга.

Адгезія покриття залежить від декількох факторів: технології покриття, матеріалів плівки і підкладки; зазвичай зменшується в процесі експлуатації готової установки. В процесі експлуатації силові модулі піддаються

температурних і механічних впливів, в тому числі вібрації. Згодом компоненти виходять з ладу через перегрів і механічного пошкодження установки. Розриви відбуваються в структурі підкладки, по якій проводиться покриття. Зазвичай причиною такого руйнування є слабка адгезійна міцність металевої плівки з керамічною основою.

Дослідженнями технологій формування покриттів і силових модулів в цілому займалися С. Флюренцев (аналіз сучасного стану та прогноз розвитку приладів сигової електроніки), Ю. Непочатов (розробка технології виготовлення металізованих підкладок для виробів сигової електроніки), В.К. Егорша (формування з'єднань метал-кераміка). Дослідженнями тонкоплівкової технології займалися Ю. В. Панфілов (вивчення технології формування тонкоплівкових покриттів), В.В. Одіноков (технології металізації у вакуумі), М. К. Марахтанов (формування тонкоплівкових покриттів методом магнетронного розпилення). Однак, до теперішнього часу залишилися не вирішеними питання використання тонкоплівкових технологій на керамічних підкладках при виробництві силових високонавантажених модулів.

Актуальність теми. В даний час при виробництві силових модулів промисловості для металізації використовуються атмосферні товстоплівкові технології, такі як впалювання пасти, Direct Bonding Coating (DBC), Direct Plated Coating (DPC), холодну газодинамічне нанесення. Перехід на тонкоплівкові технології такі як термічне випаровування і магнетронного розпилення дозволять отримати стабільну якість покриттів і відтворюваність результатів при їх отриманні. Через це виникла необхідність отримання струмопровідних покриттів на керамічних підкладках, які використовуються для виробництва силових модулів, методами тонкоплівкової технології. Однак для тонкоплівкових технологій до теперішнього моменту не вирішені питання отримання стабільних значень адгезійної міцності на керамічних підкладках, що стримує їх впровадження у виробництво виробів сигової електроніки і електровакуумних приладів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська дисертація є продовженням дипломного проєкту освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» на тему: Покращення тепловідводу від потужних мікроелектронних пристроїв [68]. Дисертація була підготовлена відповідно до науково-дослідного плану кафедри Електроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського".

Мета і завдання досліджень. Підвищення адгезійної міцності покриттів при металізації методами тонкоплівкової технології керамічних підкладок, які використовуються для виготовлення пристроїв силової електроніки і електровакуумних приладів.

Методи дослідження:

1. На основі аналізу існуючих вимог до пристроїв силової електроніки електровакуумним приладів, а також методів отримання металевих покриттів, визначити вимоги до матеріалів і технології металізації керамічних поверхонь.

2. Розробити лабораторну установку для проведення досліджень процесів нанесення покриттів на керамічні підкладки.

3. Визначити технологічні режими нанесення покриттів, що забезпечують адгезійну міцність одержуваних покриттів більше 50 МПа.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Показано, що при нанесенні адгезійного підшару титану методом магнетронного розпилення при тиску 1,5 Па при розташуванні підкладки на відстані від 25 до 60 мм і кутах нахилу підкладки щодо мішені від 0 ° до 180 ° шорсткість адгезійного підшару титану залежить від розташування підкладки та її кута нахилу щодо мішені магнетронній розпилювальної системи під час формування такого адгезійного підшару.

2. Виявлено, що при нанесенні покриттів міді на підкладках оксиду алюмінію з вихідної шорсткістю поверхні $R_a = 1,6$ мкм зменшення шорсткості адгезійного підшару титану від значення $R_a = 10,0$ мкм до 7

значення $Ra = 2,0$ мкм приводить до збільшення показника адгезійної міцності.

3. Виявлено, що при нанесенні адгезійного підшару титану методом магнетронного розпилення при тиску 1,5 Па при розташуванні підкладки на відстані від 25 до 60 мм і кутах нахилу підкладки щодо мішені від 0° до 180° найбільший вплив на адгезійну міцність покриттів надає кут нахилу підкладки.

Практичне значення одержаних результатів - Використання розробленої лабораторної установки для формування покриттів дозволяє проводити відпрацювання технології формування двошарових покриттів в єдиному вакуумному циклі. Модульна конструкція установки забезпечує мобільність і дозволяється легко розширювати склад технологічних методів під час досліджень. Установка може бути використана для проведення досліджень і в навчальному процесі при підготовці фахівців за напрямками «Електроніка та наноелектроніка» і «Наноінженерії».

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора полягає в проведенні аналітичного огляду методів металізації; виявленні вимог до з'єднань метал-кераміка стосовно до сфери виробництва силових електронних компонентів; монтажу і налагодження лабораторної установки для відпрацювання технології нанесення покриттів; проведення робіт з відпрацювання технології; дослідженню отриманих зразків, обробці експериментальних даних і видачу рекомендацій щодо використання результатів роботи.

Публікації – по темі дисертаційної роботи було опубліковано 2 статті. Касяненко В., Кузьмичев А. Способи металізації кераміки, використовувані при виробництві силових електронних модулів і електровакуумних приладів //Міжнародний мультидисциплінарний науковий журнал ЛОГОС. ОНЛАЙН, DOI 10.36074/2663-4139.15.06, Касяненко В. В., Кузьмичев А. І. « Адгезійна міцність двошарових металевих покриттів на підкладках оксиду алюмінію» East European Science Journal 11№63, 2020г. Дата виходу журналу 15.12.2020р

Структура та обсяг дисертації – дисертація складається з чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури. Робота містить 112 сторінок друкованого тексту 46 рисунків і 34 таблиці.

РОЗДІЛ 1. МАТЕРІАЛИ, ТЕХНОЛОГІЯ І УСТАТКУВАННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ МЕТАЛІЗАЦІЇ КЕРАМІЧНИХ ПІДКЛАДОК

1.1. Керамічні матеріали, використовувані у виробництві силових електронних модулів

Зростаючий попит на надійні силові модулі високої потужності викликаний бурхливим розвитком ринку силових перетворювальних пристроїв, таких як: приводів, систем управління споживанням енергії, джерел живлення різного призначення (безперебійних, імпульсних) і транспортних засобів на електричній тязі [5].

В автомобільній промисловості є багато застосувань, наприклад в підкапотній області, де температура наближається до 200°C ; датчиках і контролерах вихлопних систем, де максимальні температури можуть досягати 650°C .

Для контролю роботи двигуна потрібні електронні прилади, здатні надійно функціонувати при температурах понад 400°C . Для забезпечення надійності безпечної експлуатації літаків, вимоги до температурної стійкості пристрої можуть бути розширені до діапазону від 500 до 600°C .

Незалежно від застосування ключем до успішної високотемпературної електроніки є стабільні високотемпературні електронні компоненти (інтегральні схеми, резистори, конденсатори), і покриття цих компонентів з використанням правильно підібраних матеріалів [7].

В процесі роботи модулі піддаються різним впливам, що призводить до виходу їх з ладу.

Основні причини зниження адгезійної міцності показані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Причина	Результат
Термомеханічна несумісність матеріалу підкладки і шару металізації	Відшарування плівки від підкладки, руйнування плівки
Хімічна несумісність матеріалу підкладки і металізації	Окислення покриття, зміна електричних властивостей, руйнування плівки
Низька Теплопровідність матеріалу підкладки	Перегрів елементів, руйнування паяних з'єднань

Зовнішній вигляд елементів, що зазнали руйнування показаний на рис.1.1.

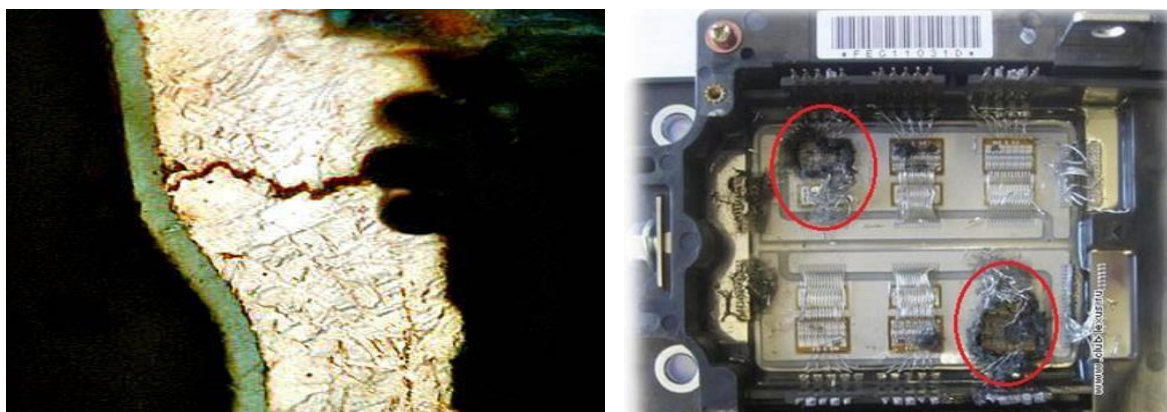


Рис. 1.1. Руйнування струмопровідної доріжки при термоциклюванні через різницю коефіцієнтів теплового розширення підкладки і матеріалу

Основним елементом конструкції силового модуля є металізована керамічна підкладка, на якій розташовані силові напівпровідникові кристали [5]. Підкладка - основа багатьох електронних компонентів і інтегрованих виробів, що впливає на їх параметри. При виробництві силових модулів поширене використання керамічних підкладок. Це визначається їх екологічністю, доступністю вихідної сировини, стійкістю до окислення, здатністю витримувати екстремально високі температури і на порядок вищою, ніж у металів, пружністю [6].

Керамічна підкладка виконує наступні основні функції [5]:

- є несучим елементом для електронних компонентів і струмопровідних доріжок;

- здійснює електричну ізоляцію струмоведучих шин топологічного малюнка, розташованих на одній стороні, один від одного, а також від струмоведучих шин на іншій стороні;

- передає тепло, що виділяється активними силовими напівпровідниковими кристалами (діодами, транзисторами, тиристорами), на тепловідвід і радіатори.

Зовнішній вигляд керамічної підкладки з сформованої топологією комутаційних доріжок представлений на рис. 1.2.

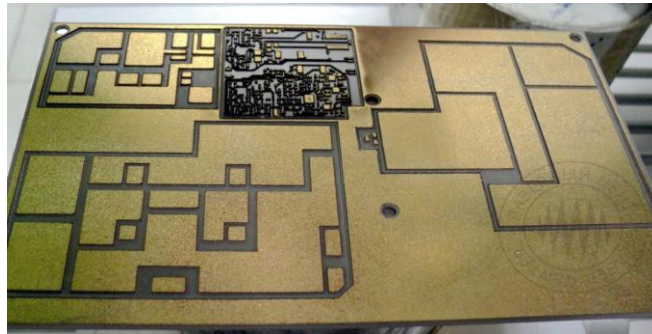


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд комутаційної плати, виконаної з керамічного матеріалу, на якій сформована топологія провідних доріжок

Відведення тепла через підкладку, на якій розміщуються тепловиділяючі чіпи, є простим і зручним засобом зниження теплового опору ланцюга і, відповідно, температури напівпровідникових елементів. [68].

Використовувана для підкладок кераміка негігроскопічна, термостійка, є ізоляційним матеріалом з високими механічними та електричними властивостями. Вона відрізняється порівняльною простотою виготовлення і невисокою вартістю [5].

В якості основи комутаційних плат силових модулів використовуються керамічні підкладки на основі оксиду алюмінію Al_2O_3 і нітриду алюмінію AlN з мідним шаром з однієї або обох сторін керамічної пластини. Це забезпечує безвідмовність і високу напругу пробою ізоляції, а також мінімальні значення теплових опорів. Поверхня керамічних підкладок,

отриманих за стандартною технологією запіканням (sintered) і випалюванням (as-fired) вихідних.

Матеріал має безліч дефектів. Тому перед нанесенням малюнка і подальшими операціями виробництва поверхню підкладки шліфують і полірують, при необхідності з двох сторін. Практично всі відомі компанії-виробники підкладок для елементів і пристроїв мікроелектроніки, а також фірми, що займаються контрактним виробництвом інтегральних схем, виконують таку попередню обробку поверхні [6].

Кожен матеріал підкладки має свої особливості, що визначають область застосування. Найбільш популярний оксид алюмінію Al_2O_3 (alumina). Це синтетичний матеріал кристалічної структури, застосовуваний в інтегральних схемах середньої або невеликої потужності з кремнієм (Si), арсенідом галію (GaAs) і ін. В діапазоні ВЧ. Поліровані підкладки з Al_2O_3 застосовуються і в СВЧ-діапазоні. Для товстоплівкових схем підходить оксид алюмінію з відсотковим вмістом 96%, а для тонкоплівкових - 99,6% -й Al_2O_3 [1]. Загальні характеристики кераміки, використовуваної для виготовлення підкладок наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Властивості	Електроізоляція	Теплопровідність	Макс. темп. прим., °C	Термостійкість	Зносостійкість	Ударостійкість	Стійкість до корозії
Оксид алюмінію (Al_2O_3)	Хороша	Прийнятна	1900	Прийнятна	Хороша	Слабка	Хороша
Нітрид алюмінію (AlN)		Відмінна	1200		Прийнятна		Прийнятна
Кварц (SiO_2)		Прийнятна	1100	Хороша	Неприйнятна	Неприйнятна	Слабка
Карбід кремнію (SiC)	Неприйнятна	Хороша	1800	Відмінна	Відмінна	Прийнятна	Хороша

Широке поширення в електроніці ці підкладки отримали завдяки власному поєднанню електрофізичних властивостей в широкому діапазоні частот, високої зносостійкості і стійкості до корозії при дуже високих температурах, а також механічній міцності. Наявність же оксиду робить таку підкладку стійкою і до радіації.

В електроніці найчастіше застосовується оксид алюмінію з вмістом від 80 до 99,99% Al_2O_3 . Підкладки на основі 75% -го Al_2O_3 мають більшу міцність при вигині і кращою якістю поверхні, ніж матеріали з більш високим відсотковим вмістом оксиду. Однак, при зниженні процентного вмісту Al_2O_3 зростає значення діелектричних втрат. Залежно від процентного вмісту, Al_2O_3 можна зустріти під різними назвами: муллит (70-95% Al_2O_3), корунд, алюмінооксид, поликор (більше 95% Al_2O_3).

Оксид берилію BeO (berillia) має неперевершене поєднання електрофізичних, температурних і механічних властивостей і має теплопровідність на порядок більшою, ніж у оксиду алюмінію. Це робить його найбільш привабливим для застосування в надпотужних товсто- і тонкоплівкових інтегральних елементах і пристроях діапазону від 50 Гц до СВЧ. Однак токсичність оксиду берилію обмежує його застосування. Більшість виробників електронних пристроїв замінили BeO на більш безпечний нітрид алюмінію AlN , чиї властивості найбільш близькі до властивостей BeO .

Теплопровідність AlN знаходиться в діапазоні від 170 до 220 Вт / (м · ° К), її значення залежить від вихідних порошкових матеріалів і Спосібів виробництва підкладки. Коефіцієнт термічного розширення нітриду алюмінію дорівнює 5,6 ppm / ° С і близький до аналогічного параметру кремнію (4,1 ppm / ° С) і арсеніду галію (6,5 ppm / ° С). Крім того, цей матеріал може використовуватися в товсто- і тонкоплівкової технології, для високотемпературної пайки або пайки м'яким припоєм. Мінуси нітриду алюмінію - непридатність до застосування у вологому середовищі, при механічних ударах і температурах понад 1000 ° С. Тому для виготовлення

високотемпературних виробів замість AlN і BeO застосовуються алмазні підкладки [6].

За теплопровідності і коефіцієнта теплового розширення підкладки на основі AlN аналогічні кремнієвим кристалів, на відміну від підкладок на основі оксиду алюмінію. Це дає кращу стійкість до термоциклювання і можливість використання в модулях більшої потужності. Областями застосування таких модулів є залізнична техніка та інші пристрої, які відчувають значні температурні впливи.

Карбід кремнію SiC (карборунд) застосовується для виробництва напівпровідникових приладів на основі нітриду галію. Така область застосування обумовлена високим значенням теплопровідності і великим показником зносостійкості.

Плавлений кварц SiO₂ (Fused Silica) використовується для створення мікросхем, фільтрів зі стабільними характеристиками, генераторів і інших пристроїв, що працюють за принципом п'єзоелектричного ефекту.

Сапфір (99,99999% Al₂O₃) - синтетичний матеріал з кристалічною структурою, що використовується в різних галузях промисловості: від оптоелектроніки до виробництва годин. На його основі виготовляються радіочастотні перемикачі для мобільних пристроїв зі зниженим енергоспоживанням. Завдяки високій хімічній чистоті, після полірування поверхню сапфіра стає дуже гладкою. Використання сапфіра для підкладок обмежується в основному його вартістю і складністю виготовлення.

Електрофізичні властивості підкладки визначаються складом і структурою кристалічних фаз, що утворюють кераміку певного виду. Найважливіші властивості - це відносна діелектрична проникність ϵ_r (визначає електроізоляційні властивості матеріалу) і тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$ (визначає погонні діелектричні втрати). [2]

Термомеханічні властивості - комплекс показників, що характеризують механічні властивості керамічних матеріалів при зміні температури. У специфікації матеріалів найчастіше наводяться межа міцності при вигині σ_{1g}

(flexural strength, МПа) і гранична температура застосування підкладки $T_{\text{макс}}$ (maximal temperature of use, ° C). В асортименті компаній - виробників підкладок представлений широкий спектр виробів з описаних матеріалів. Детальна інформація про властивості використовуваної кераміки представлена в табл. 1.3, де *- для чистоти 10 ГГц, ** - для температури 20-1000.

Таблиця 1.3.

Електрофізичні характеристики керамічних матеріалів різних виробників

Склад	Бренд	Назва	r на частоті 1 МГц	$Tg\delta$. 10^{-4} на частоті 1 МГц	λ , Вт/(м. К)	КТР, ppm/°C для 200800°C	ρ_k , г/см ³	$\sigma_{\text{изг}}$ МПа
75% Al_2O_3	CeramTec	Rubalit HSS	9	-	22	9,5	-	800
85% Al_2O_3	GBC materials	GBC 85%	7,6	6	23	-	3,4	-
96% Al_2O_3	НЭВЗ-Керамикс	-	9	2	2467	8,2	3,72	≥ 300
	GBC materials	GBC 96%	9	3	24	-	3,67	-
	Поликор	БК-96	9,2±0,2	4		7,9	3,7	310,8
	Kyocera	A-476	9,4	4	24	7,9	3,7	350
	Diel Labs	PJ	9,5±1	4	26	6,4-8,2	-	-
	CoorsTek	DuraStrate	9,55	4	-	8,4	3,81	482
	Maruwa	HA-96-2	9,8	3	24	7,8	3,75	500
	CeramTec	Rubalit 708 HP	9,9	-	24	8,03	-	500
99,5% Al_2O_3	Microcer-tic	AL-995	9,58	3,2	29,3	9,43	3,86	296
	Accumet	-	9,6	-	35	8,43	3,7-3,97	310-379
	MTC	Deranox 995	9,7*	1	25,6	8,5	3,89	330
	CoorsTek	ADS-995	9,8	1	25,5	8,33	3,88	572
	ATC	-	9,8	2	0,088	6,7	-	-
	DuPont	-	9,8	2	36	8,2	3,85	380

Таблица 1.3 (продовження)

99,6% Al_2O_3	Accumet	-	9,9±0,1	-	27	7-8,3	3,87	-
	Diel Labs	Pl	9,9±0,15	1	27	6,5-7,5	-	-
	Kyocera	A493	9,9±2	2	33	8,2	3,86	-
	CoorsTek	ADS-996	9,9	1	26,6	8,3	3,88	592
	CoorsTek	Superstrate TPS	9,9	1	27	8,2	3,95	682
	CoorsTek	Superstrate 996	9,9	1	26,9	8,2	3,88	620
	Maruwa	HA-996	9,9	2	29	8,1	3,85	-
	CeramTec	Rubalit 710	10,1	2	28	8,5	3,9	400
99,7% Al_2O_3	Поликор	БК-100-1	9,6±0,2	1		8	3,96	320
99,9% Al_2O_3	MTC	Deranox 999	10,1	1	30	8,9	3,95	500
	ATC	-	6,6*	3	0,6	7,5	-	-
	American Berillia	BERLOX	6,6	3	265	8	2,85	242
	MATERION	BW 1000	6,7	120	-	9	-	-
	DuPont	-	6,7	3	260	8,5	2,89	230
	Accumet	-	10,2	-	270	9	2,85	225
	Diel Labs	AG	8,6±0,35	50	140-180	4,6	-	-
	Microcertic	ALN	8,6	50	180	5,6**	3,32	300
	Accumet	K170	8,6	-	170	4,6	3,28	-
	AdTech		8,6	10	160	4,0**	3,26	280
	ATC	-	8,7	10	0,4	4,5	-	
	Kyocera	AN215	8,7	3	150	4,8	3,4	310
	НЭВЗ-Кераміка	-	8,7	3	180-200	6,2	3,3	260
	DuPont	-	8,9	1	170-200	4,6	2,3	290
	CeramTec	Alunit	9	1	180	5,6	3,33	360

	Maruwa	AN-XXX	9	3	180-230	5,4	3,25-3,30	-
	ATC	-	3,78	1	0,0033	0,5	-	-
	Diel Labs	QZ	3,82	0,15	1,28	0,55	-	-
	MTC	HVX(99,9 SiO ₂)	3,6	-	0,9	0,5	1,35	15,2
	Accumet	-	3,826	0,15	-	0,55	2,2	-
	Microcertic	SiC	-	-	125	5,2	>3,1	400

Межа міцності при вигині визначає короткочасну міцність кераміки при робочій температурі. Гранична температура застосування керамічного матеріалу лежить між температурою початку розм'якшення і температурою, при якій зразок деформується на 4%.

Основні теплофізичні властивості, що визначають температурну стійкість кераміки, - теплопровідність λ (thermal conductivity, Вт / (м · К)) і температурний коефіцієнт лінійного розширення ТКЛР (КТР, STE - coefficient of thermal expansion, ppm / ° C).

Теплопровідність визначає швидкість поширення тепла через матеріал. Температурний коефіцієнт лінійного розширення визначається як відносна зміна лінійних розмірів зразків керамічного матеріалу при нагріванні на 1 ° C. При виробництві плівкових інтегральних схем необхідно максимально погоджувати ТКЛР підкладки і плівок.

Залежність теплопровідності різних керамічних матеріалів від робочої температури показана на рис. 1.3.

Температурні властивості характеризують здатність матеріалу витримувати високі температури. В цілому характеристики керамічних матеріалів менше залежать від температури, ніж характеристики металів. Одне з найважливіших властивостей цієї групи - термостійкість, або стійкість до теплового удару (thermal shock resistance), що визначає здатність

керамічного матеріалу витримувати різкі коливання температури, не руйнуючись.

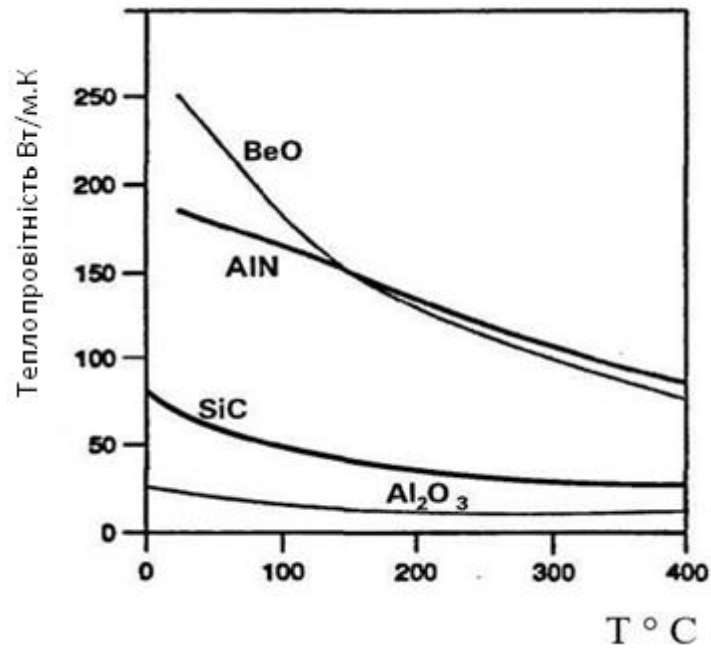


Рис. 1.3. Залежність теплопровідності різних керамічних матеріалів від робочої температури

Термічна стійкість керамічних матеріалів залежить від їх фізико-хімічних і механічних властивостей, форми і розміру виробів, умов їх нагрівання і охолодження. Різноманіття сучасних неорганічних базових матеріалів дозволяє підібрати варіант матеріалу підкладки, відповідний для виробництва інтегральних схем, товсто- і тонкоплівкових елементів і пристроїв, які відповідають необхідним вимогам. При виборі підкладки потрібно керуватися найбільш важливими для проєктованого пристрою параметрами [6].

1.2. Способи металізації кераміки, які використовуються при виробництві силових електронних модулів і електричних вакуумних приладів

Металізація кераміки можлива різними методами як при атмосферному тиску (методом холодного газодинамічного напилення або накачуванням

металізованої фольги, гальванічним методом в рідкому середовищі), так і в вакуумі з використанням технологій Еліон, які є одними з найбільш ефективних і екологічних методів. [4] В табл. 1.4. наведено класифікація основних способів металізації кераміки.

Таблиця 1.4

Способи металізації	
Атмосферні	Вакумні
DBC (Direct Bonded Copper)	Резистивне випаровування
DPC (Direct Plated Copper)	Дугове випаровування
ХГН (Холодне газодинамічне напилення)	Магнетронне розпилення
Впалювання пасти	Парострумінне осадження (PVD)

Розглянемо класифікацію цих методів детальніше.

Спосіб який використовують найчастіше є товстоплівкова технологія методом впалювання.

Основою технології випалу товстоплівкової пасти є використання дешевих та високопродуктивних процесів, що вимагають малих разових витрат на підготовку виробництва, тому це економічно доцільно з точки зору дрібносерійного виробництва. Висока надійність товстоплівкових елементів обумовлена сильною (понад 50 кгс / см²) адгезією до керамічної підкладки, що досягається спалюванням пасти у поверхневому шарі кераміки.

Загалом, технологія товстоплівкової плівки складається з серії послідовних однакових циклів: приготування пасти, виготовлення сітчастих трафаретів, нанесення пасти трафаретним друком, сушіння, випалювання пасти в конвеєрних електричних печах та заміна пасти та трафарету.

Під час формування кожного шару (резистивного, струмопровідного, діелектричного тощо) використовуються відповідні пасти, які наносяться на основу за допомогою сітчастого трафарету, піддаються сушінню і випалюванню. По завершенню формування всі шари резисторів і конденсаторів можна регулювати (зазвичай лазерними) з заданою точністю.

Direct Bonding Copper (DBC) це технологія нанесення мідної фольги

(товщиною 0,125-0,7 мм) на керамічну підкладку з оксиду або нітриду алюмінію. Для технології, насамперед мідна фольга обробляється з одного боку, пресується до кераміки, тонкого шару чорного оксиду міді. Під час створення DBC структури, після обробки мідна фольга нагрівається до температури від 1065°C до 1085°C і припресовують до кераміки. При цьому відбувається евтектичний зв'язок і взаємна дифузія молекул кисню в області її контакту з керамікою, що описується рівнянням :

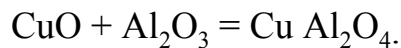


Схема технологічного процесу нанесення покриття методом DBC показана на рис. 1.4 [68].

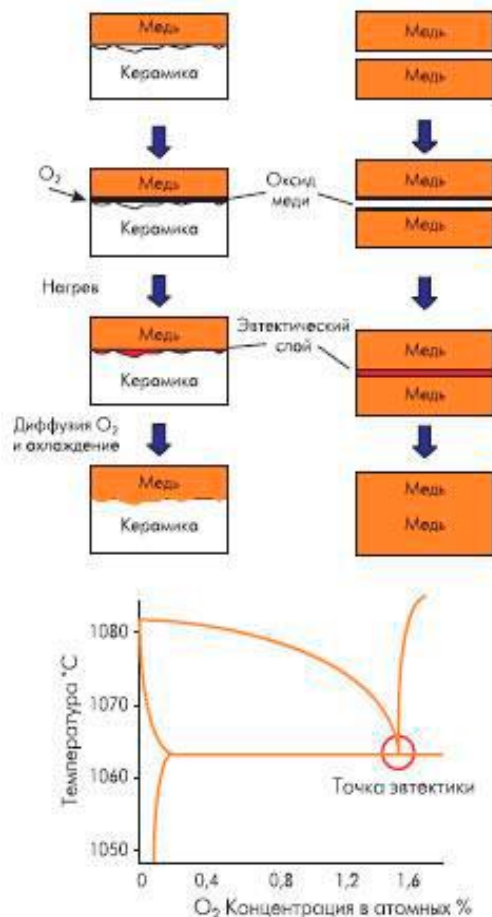


Рис. 1.4. Схема технологічного процесу Direct Bonding Coating (DBC)

Перевагами методу є:

- відносна простота процесу;

- можливість отримання товстих шарів міді;
- стійкі експлуатаційні властивості шару покриття.

Недоліки методу:

• різницю в КТР міді та кераміки, що викликає механічні напруги в підкладці під-час термоциклювання. Для покращення надійності потрібно підбирати товщину для пари «кераміка–мідь» ;

• складність утворення перехідних отворів в структурі підкладки, внаслідок того, що кераміка на основі нітриду алюмінію відрізняється низькою адгезією до неї міді, потрібна повторна обробка поверхні щоб отримати тонкий шар оксиду міді на поверхні, що покращує тепловий опір;

- висока собівартість. [69].

Технологія Direct Plated Coating (DPC) передбачає напилення тонкошарової металізації методом вакуумного осадження тонких плівок з подальшим її нарощуванням до необхідної товщини гальванічним способом. DPC - окремий випадок технології Active Metal Brazing (AMB) - технології активної «приварювання» металів до кераміки, оскільки вона розглядає використання саме міді в якості основного металу. Зазвичай напилюють пару титан-мідь: титан забезпечує хорошу адгезію до кераміки, а мідь - один з кращих по теплопровідності металів. Після напилення мідь нарощують гальванічним способом [69].

Перевагами методу є:

- якісна адгезія металу до кераміки;
- достатні електропровідні властивості;
- можливість формування перехідних отворів;

Недоліки методу:

- складний технологічний процес;
- досить висока собівартість.

Технологія холодного газодинамічного напилення металів (ХГН) є відносно новою стосовно використання у виробництві електронних приладів.

Принцип технології, це закріплення частинок металу, які рухаються з надзвуковою швидкістю, на поверхні при зіткненні з нею. Процес отримав назву «холодного напилення» через максимальну температуру 150°C. Незважаючи його універсальність, в різних напрямках, та дешевизну для застосування в електроніці, [5] стосовно до цієї області він вимагає пильної уваги і вивчення.

Особливості цієї технології полягають у наступному:

1. Для напилення використовується суміш порошків кераміки (корунду) і металу (міді, алюмінію). Ніж легше метал, тим більша відсоткова надає корунду в суміші. При напиленні алюмінію співвідношення корунд/алюміній становить 85:15, а при напиленні міді співвідношення корунд/мідь — 45:55. Це означає, що метал у практично чистому вигляді, не буде напилюватись без домішок кераміки.

2. Дисперсія порошків для напилення рівна 25...100мкм, в одночас як в процесі парострумінного напилення причеплюються атоми металу. Саме тому структура та шар покриття при ХГН не будуть однорідними.

3. На даний момент не були всебічно досліджені електричні характеристики підкладок з таким напиленням. Відсутні данні і про кристалографічні аналізи вказаних покриттів і про проведення випробувань на термоциклювання.

4. Гірша адгезія (майже в 2 рази), навіть порівняно з DBC металізацією не дає можливості рекомендувати таку технологію для використання у виробках, спеціалізованого призначання, електроніка для військового призначення.

Якщо в майбутньому технологія холодного газодинамічного напилення буде дороблена за умови використання нанопорошків металів без домішок і буде достатньо вивчена, ця технологія посяде своє місце в електроніці. Однак в наш час використання технології дає більше запитань, а

ніж вирішення поставлених проблем та не дозволяє забезпечити безпроблемне виробництво високонадійних приладів.

Дякуючи можливості варіювати параметри електронних і іонних пучків, газорозрядної плазми і типом впливу на матеріали що оброблюються, елітронні технології мають широкий спектр для виробництва та досліджень, реалізація яких створює передумови для цього. Одним з ключових процесів виробництва виробів мікроелектроніки є нанесення тонких плівок в вакуумі. Розглянемо можливість використання тонкоплівкових технологій для виробництва силових модулів і електровакуумних пристроїв. Функціональні властивості тонкоплівкових елементів залежать від правильного вибору способу нанесення, параметрів пристрою і технологічних режимів. Добре освоєний процес термічного нанесення у вакуумі, він дозволяє отримувати безліч пасивних елементів, виконувати металізацію напівпровідникових структур, які використовуються при виготовленні фотошаблонів, тощо. З його допомогою можна записувати плівки з металів, напівпровідників і діелектриків. Ця технологія забезпечує високу швидкість росту плівки, гарний ступінь чистоти і забезпечує отримання високоякісних плівок при відносно низьких температурах підкладки. Відносно проста автоматизація такого процесу дозволяє створювати складні вакуумні установки і комплекси, які керуються автоматизованими системами управління.

Схема процесу термічного випаровування представлена на рис.1.5 [69].

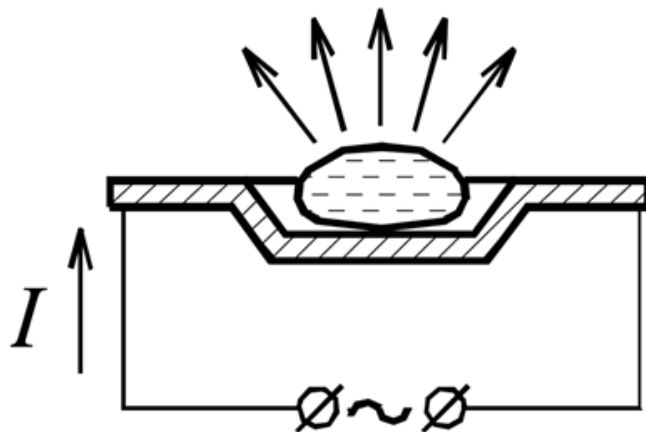


Рис. 1.5. Схема процесу термічного випаровування

До недоліків методу відносяться:

- зміна процентного співвідношення компонентів при напиленні сплавів і складних речовин;
- недостатня рівномірність товщини плівок на великих підкладках;
- складність отримання плівок тугоплавких матеріалів;
- висока інерційність при використанні випарників (після виключення нагріву випарників пароутворення триває, тому пропроцес напилення плівки, як правило, припиняється з допомогою механічної заслонки);
- порівняно невисока адгезія плівок;
- складність створення випарників з ресурсом роботи більше 100 годин [69].

Щоб реалізувати резистивне випаровування використовують для цього нагрівачі-випарники поверхневого типу із резистивним нагріванням які виконанні у формі спіралей та випарники тигельного типу з непрямим нагріванням, мають як повністю відкритий, так і квазізамкнутий об'єми. Найчастіше для термічного нанесення у вакуумі застосовують випарники з вольфраму. Найпоширеніші танталові і молібденові танталові випаровувачі. Нікель і хромель використовуються досить рідко. Ще, досить широко застосовується спосіб короткої вакуумної дуги для випаровування та розігрівання матеріалу.

Вакуумне дугове випаровування має ряд переваг:

- висока продуктивністю процесу нанесення, забезпечує швидкість конденсації до 10 мкм/хв на нерухому основу площею 100 см²;
- малі витрати енергії на одиницю маси випарованого речовини;
- низьким робоча напруга — 20-40, що робить його відносно безпечним для персоналу;
- простотою конструкції і легкістю управління дуговими джерелами;
- точне відтворення в покритті складу випаровуючого металу або сплаву.

Дугового випарник торцевого типу являє собою асиметричну конструкцію. Ерозія матеріалу здійснюється з торця катода, поміщеного у вакуум. З протилежного боку катод охолоджується водою. Співвісно з катодом розташований анод який охолоджується водою, а також електростати енергетичний екран. Екран перешкоджає переміщенню катодної плями з торцевої поверхні на бічну поверхню катода. Порушення дугового розряду здійснюється за допомогою електричного вводу, переміщуваного магнітом і що включається в ланцюг анода в момент його контакту з катодом. Схема випаровування із розігрівом електричною дугою показана на рис. 1.6. [69]

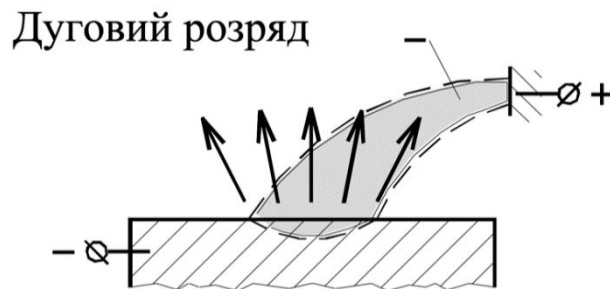


Рис. 1.6. Схема процесу випаровування з допомогою дугового розряду [31]

Магнетронне розпилення дає досить високу однорідність одержуваних шарів і стабільну якість одержуваного покриття. Магнетронні системи це системи розпилення діодного типу. В даних пристроїв розпилювання матеріалу визивається бомбардуванням поверхні мішені іонами газу аргону, що утворюється у плазмі тліючого розряду. Для таких систем є характерна досить велика швидкість розпилення, яка досягається за рахунок збільшення щільності іонного струму завдяки іонізації плазми безпосередньо у розпилюється поверхні мішені з допомогою сильного магнітного поля, поперечного електричного. Обмеження розташування іонів навколо мішені перешкоджає бомбардуванню ними підкладок, через що зменшується температура і зменшуються радіаційні дефекти в структурі тонких плівок. Основні елементи пристрою це мішень (катод), анод і магнітна система.

Силові лінії магнітного поля виявляються замкненими між полюсами магнітної системи магнетрона. - запилення поверхні мішені є область, розташована між мостами входу і виходу силових ліній магнітного поля. Ця зона має вигляд замкнутої доріжки. Геометрія зони розпилення повністю визначається формою і розташуванням полюсів магнітної системи. При падінні постійної напруги між мішенню і анодом виникає неоднорідний електричне поле і порушується тліючий розряд. Замкнуте магнітне поле у поверхні мішені дозволяє зосередити плазму розряду безпосередньо-державно у розпорошується матеріалу. Електрони, що покинули катод під взаємодією іонного бомбардування, потрапляють в магнітне поле, їм надають складну циклоїдальну замкнену траєкторію біля поверхні мішені. Вони потрапляють у пастку, створювану з одного боку магнітним полем, яка прагне повернути електрони на катод, а з іншого боку - поверхнею мішені, яка їх відштовхує. Електрони циркулюють в цій пастці до тих пір, поки не відбудеться кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу, в результаті яких електрон втрачає отриману від електричного поля енергію. Таким чином, велика частина енергії електрона, перед тим, як він потрапить на анод, який використовується для іонізації і збудження, що дуже покращує ефективність процесу іонізації і призводить до збільшення концентрації позитивних іонів навколо поверхні мішені. Отже, збільшується інтенсивність іонного бомбардування мішені і зростання швидкості розпилення і, звичайно, швидкості осадження плівки [69].

Пристрій магнетронної розпилювальної системи показано на Рис. 1.7., де 1 – мішень (катод); 2 – магнітна система; 3 – джерело живлення; 4 – анод; 5– траєкторія руху електрона; 6 – зона розпилення мішені; 7 – силові лінії магнітного поля.

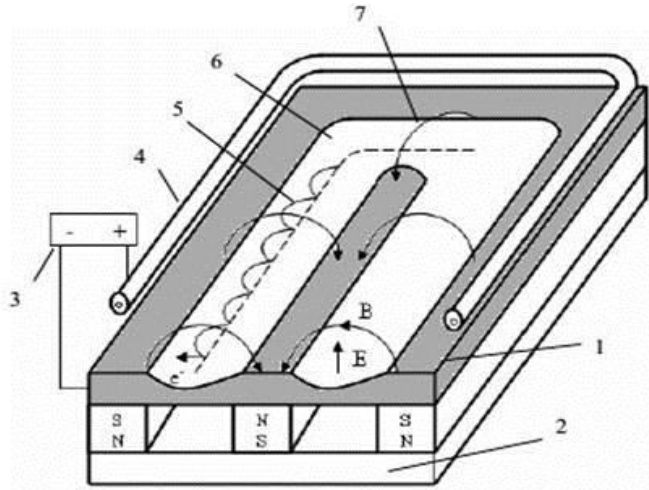


Рис. 1.7. Схема магнетронної розпилювальної системи з плоскою мішенню

Основними перевагами методу магнетронного розпилення являються:

- плівки, отримані цим способом, характеризуються високою рівномірністю, відносно низькою пористістю і високим рівнем адгезії до підкладки;
- можливість нанесення плівок складного складу;
- можливість наносити плівки на великі площі;
- відносно дешевий метод нанесення;
- низькі температури підкладки;
- висока однорідність плівки;
- хороша керованість [31].

Магнетронний спосіб відносно інших методів отримання покриттів потребує більш потужної системи для відкачування, бо в результаті збудження та іонізації залишкових газів відразу зростає хімічна активність газів. Ще магнетронний спосіб потребує відносно складної технічної реалізації методу і дороге обладнання. [69]

У магнетронів, що працюють на постійному струмі, висока швидкість осадження, однак тільки з мішеннями, виготовленими з провідного матеріалу. В такому разі покриття з'єднання металу (нітрид або оксид), яке виступає ізолятором, формується в атмосфері реактивного газу. Результати показують, що тонкоплівкова технологія не може надати окремих видів поєднання

товстоплівкової технології в цілому, а за іншими показниками не перевищує їх. Масове використання тонкоплівкових технологій дозволить зменшити відсоток браку та покращити якість з'єднань.

Парострумінне осадження, зване в англomовній літературі Jet Vapor Deposition (JVD) - метод, який використовує високошвидкісну струмінь інертного газу для доставки компонентів плівки до підкладки. Цей спосіб знаходить застосування в вакуумних установках, обладнаних потужною системою відкачування. Як правило, при використанні парострумінного осадження камеру відкачують до тиску порядку 1 торр.

Роботи останніх років показують, що дана технологія прекрасно підходить для нанесення припою у виробх силової електроніки, особливо в тих випадках, де збільшення щільності елементів пред'являє жорсткі вимоги до припою.

Осадження припою, в якості якого часто використовуються дорогі сплави, такі як евтектика Au / Sn, звужує можливості застосування класичних методів осадження покриттів. Як правило, це пов'язано з низьким коефіцієнтом використання матеріалу. У ряді випадків парострумінних осадження стає основним способом отримання шарів припою з високу адгезію.

Метод спочатку був розроблений американською фірмою Jet Process Corporation і за даними розробника в даний час запроваджено в комерційне застосування. Факт впровадження, однак, не підтверджується ніякими сторонніми джерелами.

Парострумінне осадження використовується для різних матеріалів при нанесенні тонко і товстоплівкових покриттів. Він показує хороші результати при нанесенні покриттів з багатокомпонентних матеріалів, відрізняється високою швидкістю і економічністю.

Парострумінне осадження являє собою комбінацію хімічного і фізичного осадження. Як і при фізичному осадженні молекули матеріалу покриття формуються на видаленні від підкладки і рухаються прямолінійно

в її сторону. Однак рух молекул покриття відбувається в струмені робочого газу, що рухається з надзвуковою швидкістю. Тиск в камері при цьому істотно нижче атмосферного, але вище, ніж при традиційних методах фізичного осадження покриттів. В якості робочих газів-носіїв використовуються інертні гази: гелій, аргон, рідше азот. Важливою обставиною є те, що осадження відбувається в екологічно чистому середовищі, без застосування токсичних речовин і каталізаторів. Під час осадження немає необхідності нагрівати підкладку, її температура залишається близькою до кімнатної.

Під методами парострумінного осадження зазвичай мають на увазі цілу групу Способів осадження плівок або покриттів. Метод отримання молекул матеріалу покриття може бути різним: термічне випаровування, електронно-променеве випаровування, лазерна абляція і інші. Основним технологічним ознакою методу парострумінного осадження є наявність надзвуковий струменя газу, яка доставляє атоми, молекули або навіть краплі матеріалу до підкладки і забезпечує їх ефективне осадження на невеликій площі підкладки.

Типовий джерело парострумінного осадження надає собою циліндричну камеру діаметром 7,62 см (3 дюйми), з вихідним соплом діаметром близько 1 см. Гелій, аргон або азот подається всередину джерела і надходить у вакуумну камеру через сопло. Схема пристрою джерела парострумінного осадження з термічним випарником показана на рис. 1.8.

Зазвичай тиск всередині джерела одно кільком Торре, а тиск в камері становить 1 Торр, або менше. Точне співвідношення тисків залежить від матеріалу, що наноситься і необхідних властивостей покриття.

Коли співвідношення тисків перевищує значення 2, величина потоку газу досягає критичного значення і швидкість газу, що проходить через сопло, досягає швидкості звуку. Наприклад для гелію при температурі 298 К швидкість струменя становить близько 105 см / с.

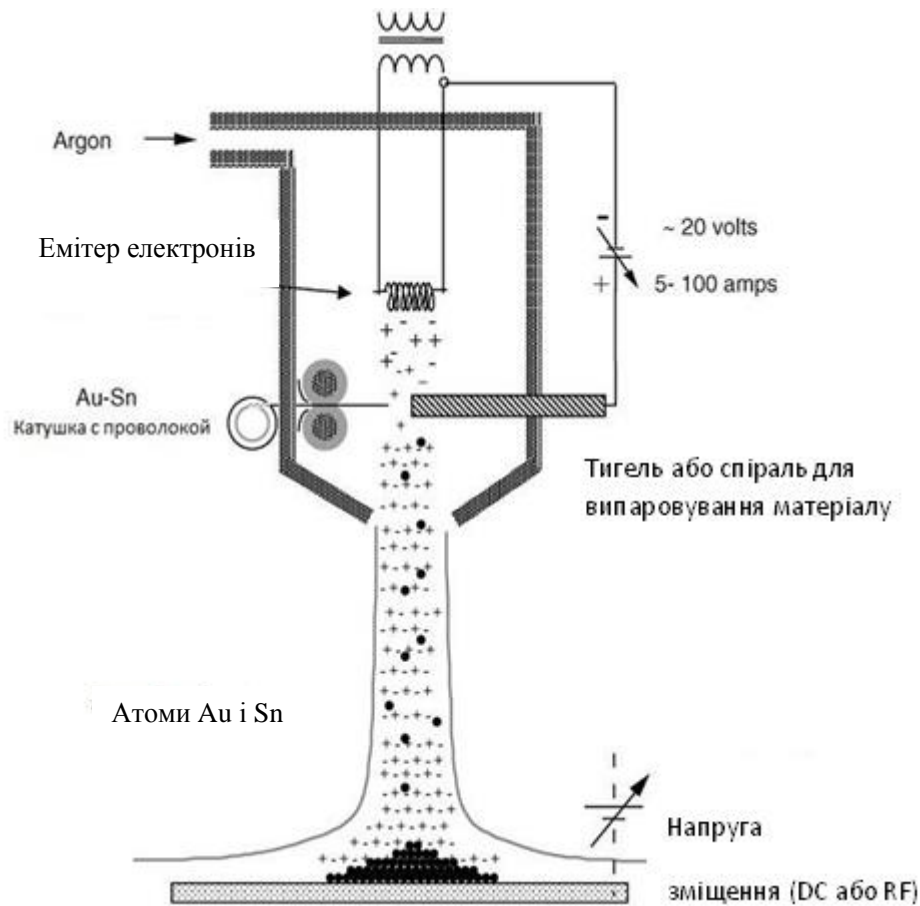


Рис. 1.8. Схема пристрою джерела парострумінного осадження (JVD)

Тонка дрiт матеріалу безперервно подається в зону, що нагрівається за допомогою тигля або спіралі, зробленої з вольфраму. При контакті дроту з нагрівачем вона розплавляється, змочує спіраль і починає випаровуватися. Випаровуються атоми матеріалу захоплюються потоком газу в сторону сопла, проходять через нього з надзвуковою швидкістю і осідають на підкладці у вигляді кола діаметром близько 1 см. Розподіл матеріалу в зоні осадження підкоряється закону Гаусса.

Установка другої спіралі в якості джерела термоелектронів дозволяє підпалити плазмовий розряд, який разом з потоком газу захоплюється і переноситься в сторону підкладки. Бомбардування підкладки високоенергетичними іонами аргону дозволяє вирішити два завдання: попереднє очищення і активацію поверхні підкладки; додаткову обробку зростаючої плівки. Таке рішення дозволяє обійтися без окремого джерела іонів для очищення підкладки перед нанесенням.

Джерела матеріалу, що застосовуються для методу парострумінного осадження, можуть мати різні варіанти конструкцій, але всі вони монтуються на фланцях, приєднаних до камери, що відкачується до низького вакууму. Високошвидкісний потік газу, що надходить через джерела в вакуумну камеру, відкачують механічними форвакуумними насосами або насосами Рутса, що забезпечують швидкості відкачки порядку від 500 до 10000 літрів в хвилину. Через наявність сопла джерело парострумінного осадження дозволяє отримати на підкладці плівки у вигляді кола діаметром близько 12 мм 2. Для нанесення покриттів з однаковою товщиною на великі поверхні джерело і підкладка повинні переміщатися відносно один одного, як показано на рис. 1.9.



Рис. 1.9. Приклад взаємного руху джерела і підкладки для нанесення покриття на великі поверхні різними матеріалами.

У разі відносного взаємного сканування джерела і підкладки час нанесення покриття на всій поверхні підкладки шаром матеріалу товщиною h мкм буде визначатися як

$$t_o = h \cdot t_o \cdot S_{\text{підкл.}} / S_{\text{плями}},$$

де h - необхідна товщина покриття в мкм; t_o - час осадження покриття товщиною 1 мкм на запылюють плямі без сканування джерела щодо підкладки; $S_{\text{підкл.}}$ - площа підкладки; $S_{\text{плями}}$ - площа запылюють плями при нерухомому джерелі.

Швидкість взаємного сканування залежить від необхідної товщини, реальної швидкості нанесення з нерухомого джерела і розраховується для кожного конкретного випадку.

У тому випадку, якщо потрібно наносити багатошарові покриття, можлива комплектація установки декількома джерелами, заправленими

В цьому випадку джерела працюють поперемінно, і на підкладках формується багатошарове покриття.

Для запылення бічних поверхонь підкладки та отворів (при їх наявності) необхідно забезпечити взаємне хитання підкладки і джерела відносно один одного, щоб струмінь матеріалу потрапляла на бічні поверхні під кутом, відмінним від нуля градусів. При цьому товщина покриття на бічній поверхні буде відрізнятися від товщини покриття на підкладці в цілому.

Основними перевагами методу парострумінного осадження є:

- універсальність, метод дає можливість напылення як чистих металів, так сплавів, в тому числі евтектики Au / Sn.
- низький тепловий опір одержуваних покриттів.
- високі значення адгезії одержуваних покриттів, величина адгезії плівок міді до керамічних підкладок становить понад 7 Н / мм².
- велика економічність, коефіцієнт використання матеріалу при парострумінних осадженні може досягати 90% і більше.

- можливість поєднувати технологію парострумінного осадження з подальшим нарощуванням плівки гальванічним Способом. Цей спосіб дає отримувати покриття товщиною в десятки мікрон.

- можливість запилення отворів.

Порівняння методів товстоплівкових технологій з методами нанесення тонких плівок в вакуумі представлено в табл. 1.5, де видно, що тонкоплівкові технології перевершують методи товстоплівкових технологій за всіма параметрами.

Таблиця 1.5

Товстоплівкові технології	Тонкоплівкові технології
Шар матеріалу наноситься трафаретом, а потім спалюється	Шар матеріала напилюється
Паста с гранулами	Однорідна плівка
Висота більша, ніж у тонкоплівкових шарів	Мала висота
Обмежений вибір паст	Гнучкість вибору матеріалів з оптимальними параметрами і характеристиками
Стандартні відхилення опору від номіналу	Малі відхилення опору від номіналу
Температурний коефіцієнт опору досить високий (100 ... 250 ppm / K)	Температурний коефіцієнт опору істотно нижче (25 ppm / K)
Хороша стабільність	Відмінна стабільність
Хороша точність	Відмінна точність

Був проведений аналіз ймовірності появи браку. Результати порівняння наведені в табл. 1.6.

За результатами є можливість спостерігати, що тонкоплівкова технологія забезпечує відсутність деяких видів браку товстоплівкової технології в цілому, а по іншим показникам не перевищує їх. Якщо, перейти до тонкоплівкових технологій, це допоможе зменшити відсоток браку і покращити міцність з'єднань.

Таблиця 1.6

Імовірність появи браку при використанні різних технологій формування металізації

Вид брака	Товстоплівкові технології	Тонкоплівкові технології
Забружнення	+++++	+++++
Просвіти кераміки	++++	+
Відшаровування	++++	++
Тріщини	++++	-
Подряпини	++++	-
Непокриті ділянки по кромках и фаскам	+++	+
Вздуття	++	-
Грудки	+++	-
Сторонні домішки	+++	+

Висновки до першого розділу

Збільшення адгезійної міцності з'єднань металу та кераміки є самою важливою задачею для виробництва силових електронних модулів і електровакуумних приладів. Для металізації кераміки широкого використання набули атмосферні способи, такі як: DBC (Direct Bonded Copper) або ж пресування фольги з міді до основи підкладки; DPC (Direct Plated Copper) - покриття шару міді; холодне газодинамічне напилення металів, метод нанесення пасти на підкладку або впалювання.

Описані методи мають низку недоліків, до яких відносяться:

- різниця коефіцієнтів, що спричиняє руйнування шару покриття при різкій зміні температури;
- складність отримання перехідних шарів на стінках отворів в підкладках;
- слабка адгезія шару міді до поверхні підкладки, для цього потрібний додадковий адгезійний шар, підвищує тепловий опір готового модуля;
- забруднення плівки сторонніми домішками;

- досить велика собівартість кінцевих виробів.

Отож, якщо застосовувати методи вакуумної металізації, такі як: дугове і термічне випаровування; магнетронного розпилення; парострумінного осадження дає можливість позбутися від вказаних недоліків і покращити якість металізованого покриття.

РОЗДІЛ 2. ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

2.1. Загальна інформація про установку для відпрацювання технології, формування металевих покриттів

Однією з умов отримання високої адгезійної міцності є можливість формування багатошарових покриттів в єдиному вакуумному циклі, без розгерметизації обсягу вакуумної камери і контакту виробу з атмосферою.

Розроблена лабораторна установка призначена для нанесення плівок методами магнетронного і термічного випаровування в єдиному вакуумному циклі. Установка є повністю оригінальною розробкою. Установка була спроектована, виготовлена і введена в експлуатацію в ході виконання дисертаційного дослідження.

Загальний вигляд установки представлений на рис. 2.1, де 1 - Камера нанесення, 2 - магнетронна розпилювальна система, 3 Камера випаровування, 4 - Система відкачування, 5 - Система подачі газу.

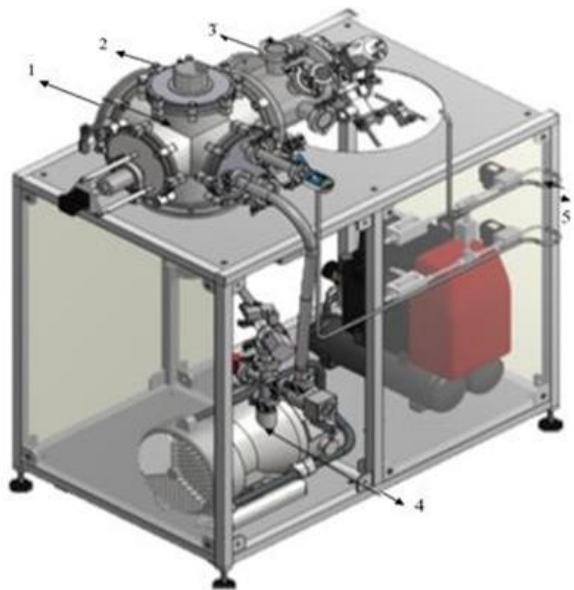


Рис. 2.1. Зовнішній вигляд установки для відпрацювання технології формування металевих покриттів

Установка складається з вакуумної камери, технологічної системи, систем відкачування і напуску газу, систем живлення і керування, системи реєстрації режимів проведення експериментальних досліджень.

Вакуумна схема установки представлена на рис. 2.2, де NI1-спіральний насос, NR1-турбомолекулярний насос, P1-широкодіапазонний вакуумметр, PT1-терморезистивний датчик, VF1-заслонка, VP1-VP4- кутові пневматичні клапани, VE2-прямий пневматичний клапан.

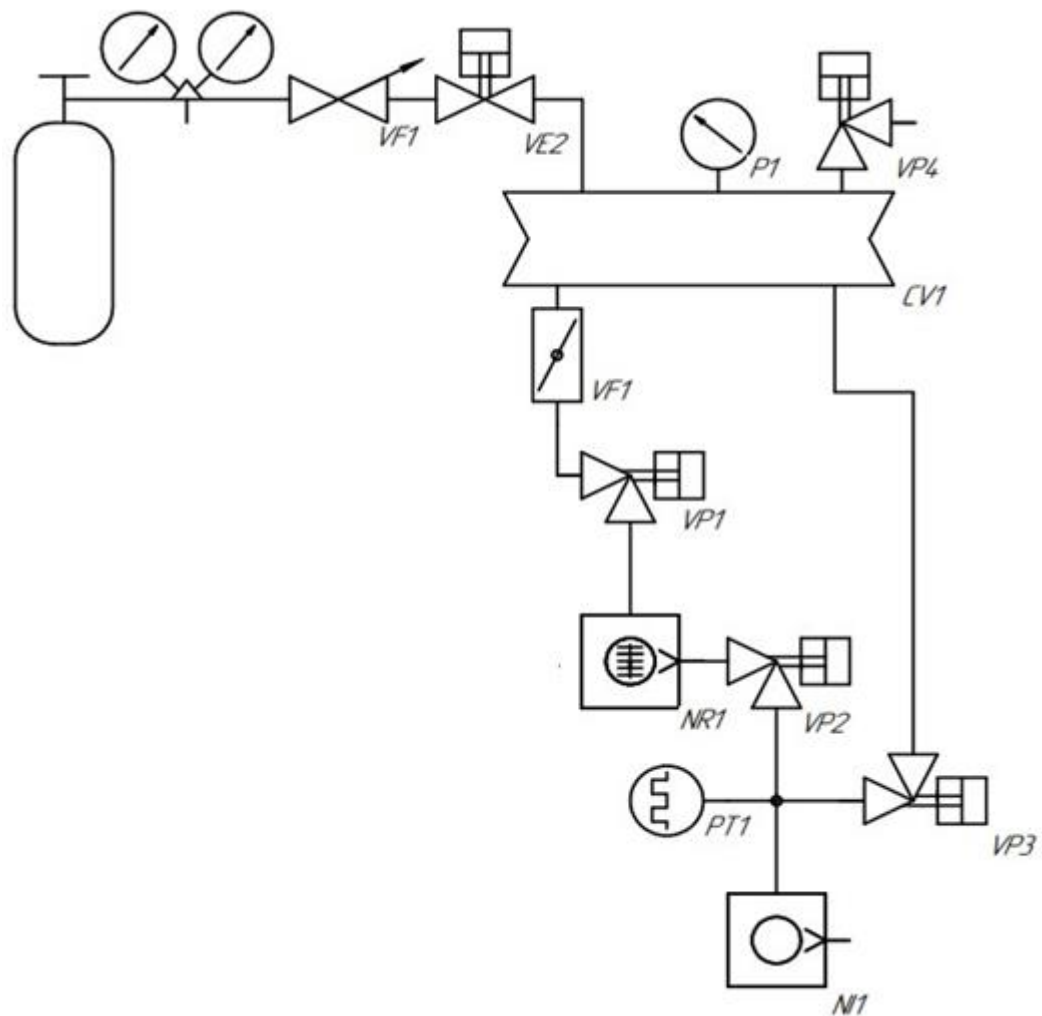


Рис. 2.2. Схема вакуумної системи установки для відпрацювання технології формування металевих покриттів

Вакуумна камера виконана з використанням стандартних вакуумних компонентів і має приєднувальні розміри стандарту ISO, що дозволяє при

необхідності здійснювати швидку заміну технологічних джерел, в тому числі з розширенням реалізованих технологічних методів.

Система відкачування виконана на базі турбомолекулярного насоса Edwards nEXT-75 (NR1) і спірального механічного насоса Edwards XDS-10 (NI1). [18]

Такий набір засобів відкачування дозволяє отримати повністю безмасляний вакуум, що є важливою умовою для отримання високої адгезійної міцності формованих покриттів. Технічні характеристики використовуваних насосів представлені в табл. 2.1 і 2.2 Зовнішній вигляд використовуваних насосів представлений на рис. 2.3.

Таблиця 2.1.

Характеристики турбомолекулярного насоса Edwards EXT75DX

Характеристика	Значення
Швидкість відкачки, л/с	61
Вхідний фланець	ISO63-K
Вихідний фланець	ISO16-KF
Граничне тиск, Па	10 ⁻⁶
Частота обертання, об/хв	90000
Час виходу на режим, с	110
Рекомендований форвакуумний насос	XDS10

Характеристики спірального насоса Edwards XDS10

Таблиця 2.2.

Характеристика	Значення
Швидкість відкачки, м ³ /ч	9,3
Граничне тиск, Па	1
Вхідний фланець	ISO25-KF
Вихідний фланець	ISO25-KF
Частота обертання, об/хв	1500



а)

б)

Рис. 2.3. Зовнішній вигляд турбомолекулярного насоса Edwards nEXT75 (а) і спірального насоса Edwards XDS10 (б)

Вакуумна система установки оснащена двома лініями відкачування: основний, яка проходить через клапани VP1, VP2 і байпасній, яка проходить через клапан VP3. Використання байпасній лінії відкачування дозволяє проводити розгерметизацію обсягу вакуумної камери без зупинки високовакуумного турбомолекулярного насоса. Таке рішення істотно скорочує час на підготовчі операції, пов'язані з відкачуванням при проведенні великої кількості експериментів. З метою діафрагмування потоку відкачування на вакуумній лінії встановлений клапан-метелик VF1, який дозволяє плавно змінювати провідність відкачуваної лінії при роботі технологічних джерел. Ця можливість використовується в процесі експериментів для зниження витрати робочого газу і навантаження на відкачувану систему.

Газова система установки включає в себе газові балони разом з редукторами, металеві трубки для подачі газу, які з'єднуються з камерою, регулятори витрати газу, запірні клапани і контролер газової системи. Система подачі газу має два незалежні канали, які дозволяють подавати в камеру аргон, азот або їх суміш у будь-якій пропорції. В установці використовується контролер газової системи компанії VSYS моделі VC412 (рис. 2.4). Контролер газової системи здійснює регулювання складу і кількості газу за процентним співвідношенням компонентів, кількості газу,

що подається, і по тиску у вакуумній камері через механізм зворотного зв'язку. Тиск у вакуумній камері при цьому контролюється за допомогою ємнісних датчиків, що забезпечує високу точність вимірювання. Регулювання тиску може здійснюватися контролером як шляхом управління величини подачі газу, так і зміною провідності магістралі відкачування за допомогою діафрагмує клапана. [19]



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд контролера газової системи VSYS VC412

Два незалежних джерела наносяться матеріалів (термічний випарник і магнетрон розпилювальна система) дозволяють формувати двошарові покриття в єдиному вакуумному циклі.

Особливістю використовуваної магнетронної розпилювальної системи є можливість нанесення покриттів з гарячою мішені. За допомогою системи охолодження до магнетрона постійно підводиться охолоджена вода по замкнутому контуру охолодження. Це запобігає перегріванню пристрою і вихід з ладу його магнітної системи. Однак передбачено охолодження тільки магнітів. Сама ж мета же не охолоджується, і в процесі роботи під впливом іонного бомбардування розігрівається до температури порядку близько 900°C.

Підкладкотримач виконаний таким чином, що досліджувані зразки можуть вводитися в технологічну зону кожного з джерел. Це реалізовано установкою підкладкотримача на введення обертання.

Схема установки зразків у вакуумній камері щодо джерел матеріалу представлена на рис. 2.5. , де 1 - Введення обертання, 2 - Підкладкотримач, 3

- Підкладка, 4 - Магнетронно розпилювальна система, 5 - Струмівідвід, 6 - Термічний випарник.

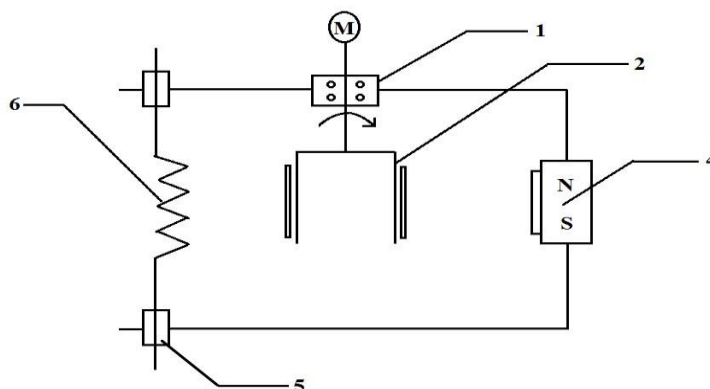


Рис. 2.5. Схема розташування технологічних джерел щодо підкладкотримача

Для контролю температури підкладки установка оснащена термопарним перетворювачем, який дозволяє проводити вимірювання безпосередньо в процесі формування покриття.

Джерела живлення технологічної системи APEL-PDC виробництва компанії «Прикладна електроніка» виконані у вигляді окремих блоків. За допомогою них подається електроживлення на магнетрон распилювальную систему і термічний випарник. Джерела живлення мають можливість стабілізації технологічних режимів по потужності, струму і напрузі, а також мають можливість роботи в імпульсному режимі з частотою імпульсів до 100 кГц і коефіцієнтом заповнення імпульсів від 0 до 100%.

Зовнішній вигляд джерела живлення магнетронній розпилювальній системи представлений на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд джерела живлення магнетронній розпилювальній системи ApeI-M-5PDC-650

Вся силова і керуюча електроніка, що відповідає за роботу установки, змонтована в стійці управління. Принципова електрична схема силової і керуючої системи представлена у додатку А.

2.2. Визначення діапазону технологічних режимів для формування покриттів методом магнетронного розпилення

Для відпрацювання технології металізації була проведена серія пробних нанесень плівок з використанням магнетронній розпилювальної системи. Як матеріал мішені використовувався титан, а в якості матеріалу підкладки використовувалася полірована корундова кераміка.

В ході проведення експериментів з нанесення покриттів перед початком нанесення проводилася тренування мішені протягом 5 хвилин.

Ознакою закінчення тренування є різке зростання струму з його подальшою стабілізацією. Одночасно з очищенням відбувається нагрів мішені до температури близько 900° за Цельсієм, після чого нанесення йде з гарячого катода.

Ілюстрація залежності іонного струму від часу проведення процесу нанесення приведена на рис. 2.7.

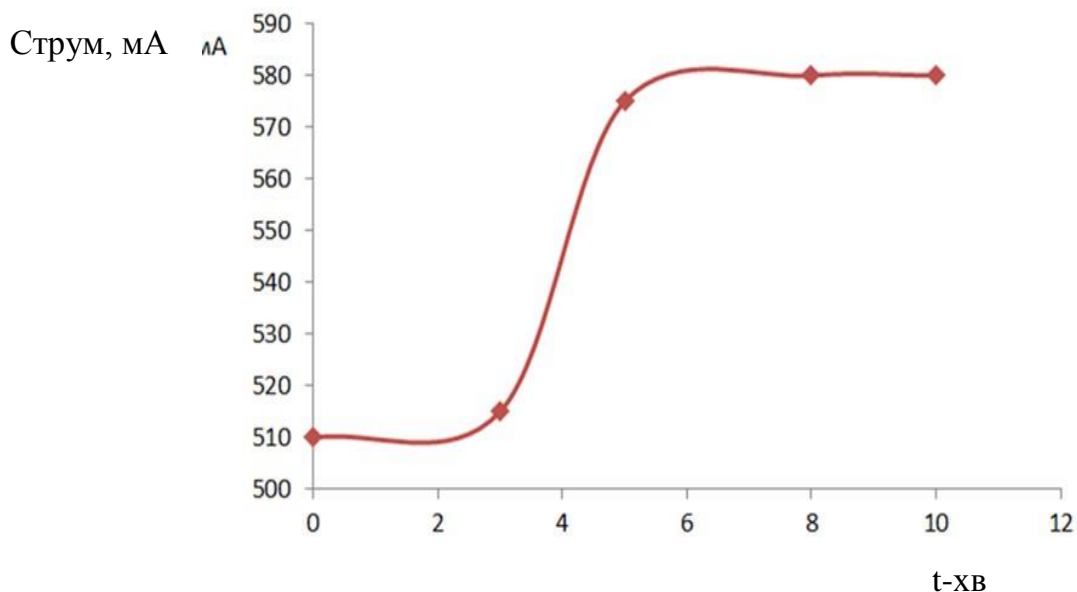


Рис. 2.7. Залежність іонного струму від часу проведення процесу нанесення

В ході випробувань установки були визначені діапазони подачі газу і потужності, при яких стабільно виходять покриття без візуальних дефектів. Для титану ці значення склали: подача газу 30 sccm, діапазон потужності: від 350 до 420 Вт, діапазон струму від 520 до 600 мА. На цих режимах була проведена серія експериментів з нанесення плівки титану на підкладку оксиду алюмінію. [20]

Нанесення плівок титану проводилося в режимі стабілізації потужності на блоці живлення магнетронній розпилювальної системи. Нанесення проводилося для трьох різних значень потужності. Під час нанесення фіксувалися значення напруги, що подається на магнетрон розпилювальну систему, і значення іонного струму. Використовувані режими нанесення наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Номер режиму	Подача газу (Q, sccm)	Потужність (P, Вт)	Тиск камері (P, мбар)	Напруга (U, В)	Ток (I, mA)	Час нанесення (t, с)
1	30	350	$4,3 \times 10^{-2}$	від 630 до 673	від 550 до 510	300
2	30	385	$4,4 \times 10^{-2}$	від 690 до 750	від 570 до 530	300
3	30	420	$4,3 \times 10^{-2}$	від 745 до 770	від 580 до 510	300

Всього було проведено 9 експериментів. Для виявлення повторюваності результатів кожен режим був відтворений 3 рази.

Перед нанесенням поліровані підкладки піддавалися обробці в розчині ізопропілового спирту при кімнатній температурі в ультразвуковій ванні протягом 10 хвилин. Час нанесення становило 300 секунд для кожного із зразків.

Для вимірювання товщини отриманого покриття плівки були піддані травленню кислотою для отримання сходинок. Товщина плівки була виміряна на скануючому зондовому мікроскопі Солвер НЕКСТ.

Результати вимірювання товщини покриття представлені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Номер режиму	Товщина плівки (мін.), нм	Товщина плівки (макс.), нм	Товщина плівки (середн.), нм	Швидкість осадження (мін.), нм/с	Швидкість осадження (макс.), нм/с	Швидкість осадження (середн.), нм/с
1	555	600	583	1,85	2,00	1,94
2	525	648	596	1,75	2,16	1,98
3	580	650	599	1,89	2,17	1,99

За товщиною плівки і часу нанесення непрямым шляхом була розрахована середня швидкість нанесення плівки. Діапазон швидкостей росту для кожного з режимів представлений на рис. 2.8.

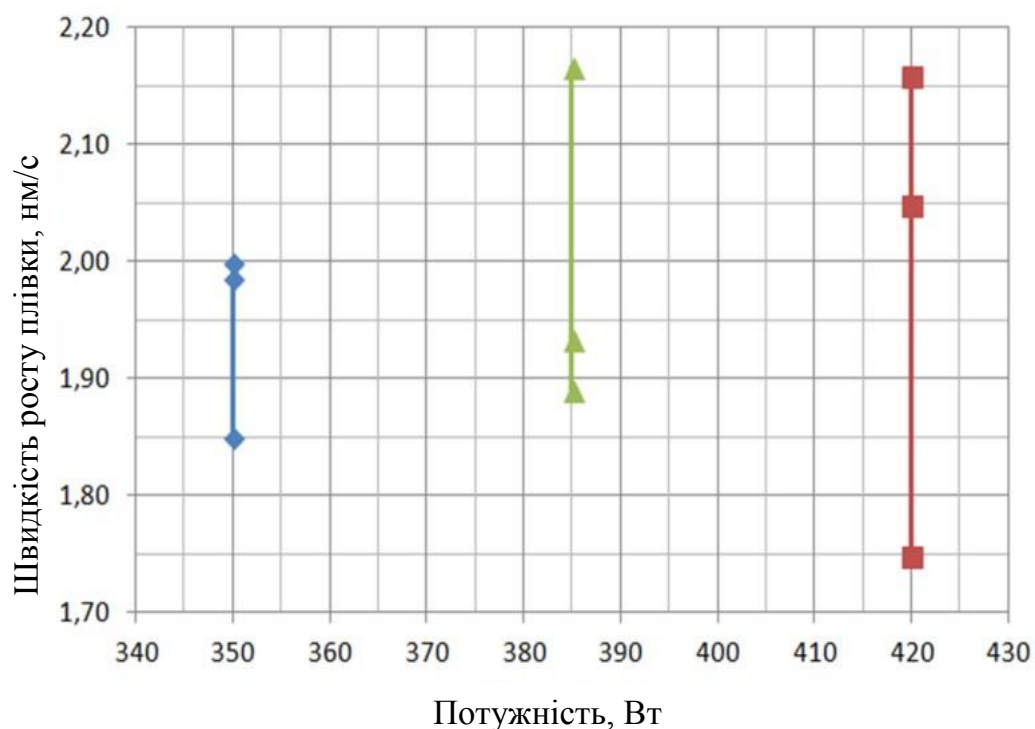


Рис. 2.8. Швидкості нанесення плівки титану для різних значень потужності магнетронній розпилювальної системи

За результатами експериментів видно, що швидкості осадження лежать в межах від 1,75 нм / с до 2,16 нм / с; або від 105 нм / хв до 129 нм / хв, що є високим показником для нанесення плівок титану з використанням магнетронній розпилювальної системи. На скануючому зондовому мікроскопі був отриманий знімок рельєфу поверхні нанесеної плівки. Зовнішній вигляд рельєфу поверхні наведено на рис. 2.9.

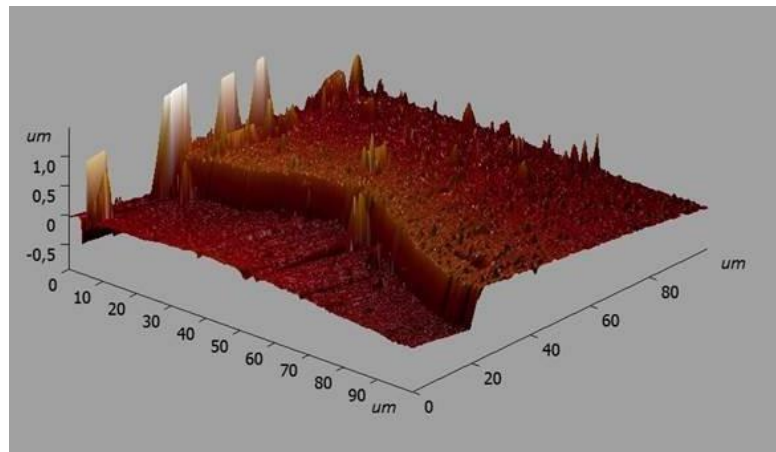


Рис. 2.9. Зовнішній вигляд рельєфу поверхні нанесеної плівки титану

Як видно, покриття мають щільну, гладку структуру з низькою шорсткістю.

Отримані зразки покриттів були досліджені на показники адгезійної міцності методом сітчастих надрізів і на відрив.

У першому випадку зразки дряпались в двох напрямках за допомогою приладу Elcometer 107. Зовнішній вигляд приладу Elcometr 107 показаний на рис. 2.10.

У другому випадку до плівки клеїлась спеціальний «грибок», який після відривався за допомогою спеціального приладу, при цьому вимірювалася сила, при якій відбувається руйнування покриття або клею. Зовнішній вигляд приладу для вимірювання адгезійної міцності методом відриву показаний на рис. 2.11.

Всі отримані зразки показали високі значення адгезійної міцності.



Рис. 2.10. Зовнішній вигляд приладу для вимірювання адгезійної міцності



Рис. 2.11. Зовнішній вигляд приладу для вимірювання адгезійної міцності методом відриву

За методом сітчастих надрізів був отриманий максимально можливий показник 5В, який характеризується тим, що подряпини чіткі, мають гладкі краю без сколів і руйнувань. Зовнішній вигляд зразків після випробувань методом сітчастих надрізів показаний на рис. 2.12. Зверху вказані значення потужності магнетронній розпилювальної системи, при яких були отримані покриття.

Виміряні показники адгезійної міцності на відрив склали від 5,5 до 8 МПа, причому руйнування відбувалося по клею, яким грибок був приклеєний до покриття. Отже, реальна адгезійна міцність покриття до підкладки вище цих з

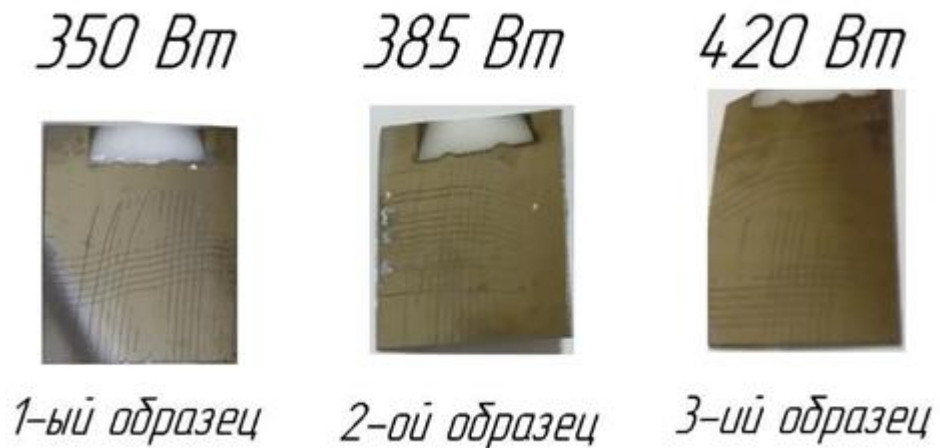


Рис. 2.12. Зразки покриттів після випробувань методом сітчастих надрізів.

Результати вимірювання адгезійної міцності методом відриву представлені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5.

Результати вимірювання адгезії для отриманих зразків титану

Номер зразка	Потужність (Р, Вт)	Виміряне Значення адгезії методом сітчастих надрізів	Виміряно значення адгезії методом відриву	Примітка
1	350	5 В	5,5Н/мм ²	Руйнування по стику клей-плівка
2	385	5 В	8 Н/мм ²	
3	420	5 В	6 Н/мм ²	

2.3. Визначення технологічних режимів роботи джерела при нанесенні покриття міді методом парострумінного осадження

Для визначення можливості формування проводять покриттів методом парострумінного осадження установка нанесення покриттів, описана в першому розділі, була додатково оснащена спеціальною системою відкачування і джерелом випаровування, що використовують струмінь інертного газу для доставки атомів випарованого матеріалу до підкладки.

Вимоги до системи відкачування для проведення процесу парострумінного осадження полягають в підвищених значеннях продуктивності, що необхідно для видалення обсягів робочого газу, використовуваного для доставки матеріалу до підкладки.

Для забезпечення стабільної швидкості відкачки застосовувалася комбінація з спірального насоса і насоса Рутса. Принцип роботи насоса полягає в наступному.

Два збалансованих, паралельно розташованих ротора, що мають форму цифри 8, з'єднані з двигуном і обертаються в протилежні сторони. При обертанні роторів відсмоктується газ потрапляє в порожнину між ротором і статором, і переміщається в напрямку вихлопу. Геометрія роторів така, що при їх обертанні відсмоктується газ не може переміщатися назад, - обсяг між роторами відсутня, відбувається «перекочування» поверхні одного ротора по поверхні іншого.

При цьому ротори вакуумного насоса не стосуються статора і один одного, між ними завжди підтримується мінімально-можливий зазор. Наявність зазору також забезпечує високу швидкість обертання роторів. Тому від геометрії і якості виготовлення роторів і статора залежать характеристики і надійність роботи. Ротори насосів можуть бути з'єднані з двигунами різними Способами: шпинделем, ремінною передачею, один з роторів і двигун можуть мати загальний вал.

Для відкачування використовувався насос Edwards EH-250. Його технічні характеристики представлені в табл. 2.6, зовнішній вигляд представлений на рис. 2.13.

Для реалізації методу парострумінного осадження було розроблене джерело матеріалу, схема якого представлена на малюнку. Особливістю джерела стало використання матеріалу у вигляді дроту діаметром 0,3 мм і кільцевого розподільника газу, що має отвори різного діаметру, щоб забезпечити рівномірну подачу газу навколо всієї зони випаровування матеріалу.

Таблиця 2.6

Характеристика	Значення
Швидкість відкачки, м ³ /ч	240
Граничне тиск, Па	10-1
Вхідний фланець	ISO63
Вихідний фланець	ISO40-KF
Частота обертання, об/хв	2900



Рис. 2.13 Зовнішній вигляд бустерного насоса EH250

Принцип роботи джерела полягає в наступному – випаровується матеріал у вигляді дроту (12) подається в область спіралі випарника (5), встановленого поруч з газовим розподільником (11). Газ в розподільник подається за допомогою регулятора витрати газу (8). Випарник живиться від низьковольтного потужнострумовеого джерела живлення (6). Робочий газ, захоплюючи за собою молекули випарованого матеріалу надходить через сопло (4) в основну вакуумну камери і доставляє молекули матеріалу (9) до підкладки (3).

Джерело пара знаходиться вище по потоку від виходу сопла, області, в якій газ-носії прискорюється до швидкості звуку.

На плоскій підкладці, розташованій перпендикулярно струмені, і кілька сантиметрів нижче за течією формується плівка наноситься; площа і форма

плівки, що утворилася в круговій зоні можна порівняти з площею зрізу сопла. Розподіл матеріалу в зоні осадження підкоряється закону Гаусса.

Робочий газ, несучи з собою частинки випаруваного матеріалу після закінчення в камеру нанесення, де тиск менше, ніж тиск в джерелі, розширюється, що призводить до зниження температури і конденсації молекул матеріалу.

Зовнішній вигляд джерела матеріалу показаний на рис. 2.14., де 1 - робоча камера; 2 - камера джерела матеріалу; 3 - підкладка; 4 - сопло; 5 - випарник; 6 - джерело живлення випарника; 7 - система подачі матеріалу; 8 - регулятор подачі газу; 9 - зростаюча плівка; 10 - Струмоввід; 11 - газовий розподільник; 12 - випаровується матеріал.

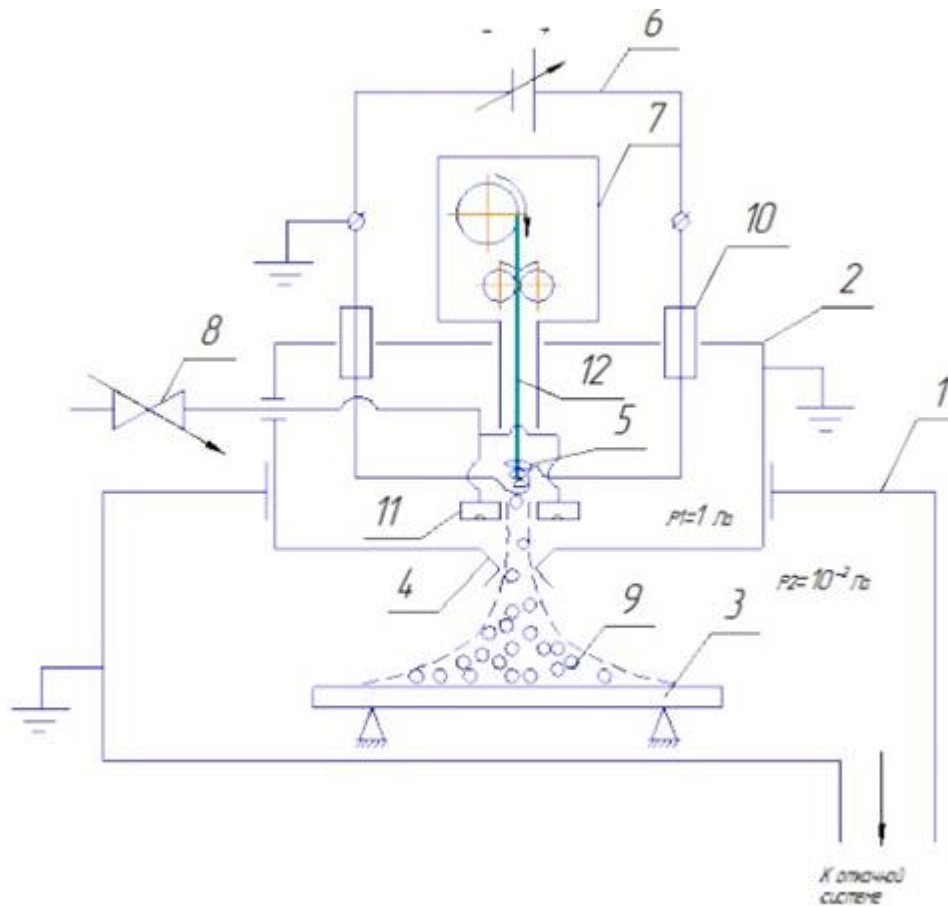


Рис. 2.14 - Схема джерела матеріалу, що наноситься

Однією з основних завдань при підборі режимів парострумінного нанесення є визначення потоку газу, що подається в джерело, так як від цього залежить перепад тисків в системі джерело-камера, і, отже, довжина струменя, що рухається з надзвуковою швидкістю.



Рис. 2.15 Зовнішній вигляд джерела нанесення матеріалу методом парострумінного осадження

За наявними літературними даними діаметр отвору сопла джерела становить близько 10 мм. Оскільки довжина каналу, що є соплом джерела свідомо менше, ніж 200 мм, то протягом газу через сопло можна розглядати як випадок перебігу газу через короткий трубопровід.

Визначимо режим течії газу через сопло джерела. Критерієм режиму течії газу є твір тиску на характерний розмір вакуумної камери. Характерним розміром в нашому випадку є діаметр трубопроводу (сопла) джерела. Значення коефіцієнтів для різних режимів течії газу наведені в табл. 2.7.

Для нашого випадку $P \cdot d = 133 \cdot 0,01 = 1,33$ м·Па. Таким чином, ми маємо справу з вязкістним режимом, поблизу з кордоном молекулярно-вязкістного режиму.

Значення коефіцієнтів для визначення режиму течії газу

Режим	Критерій режиму течії газу
Вязкістний	$P \cdot d \geq 1,2 \text{ м} \cdot \text{Па}$
Молекулярновязкістний	$0,004 < P \cdot d < 1,2 \text{ м} \cdot \text{Па}$
Молекулярний	$P \cdot d < 0,004 \text{ м} \cdot \text{Па}$

Для вязкісного режиму течії газу провідність короткого трубопроводу круглого перетину розраховується за формулою:

$$U = \frac{\pi D^4 (p_1 - p_2)}{128 \eta [1 + 4,54 \cdot 10^{-2} M Q / (\eta R T l)]},$$

де D - діаметр трубопроводу, м; p_1 і p_2 - тиск з одного і з іншого боку трубопроводу, Па; η - динамічна в'язкість газу, Па · с; M - молярна маса газу г / моль; Q - потік газу, що протікає через трубопровід, м³ · Па / с; R - універсальна газова постійна; T - температура газу, К; l - довжина трубопроводу, м.

Так як потік газу Q на початок розрахунку невідомий, то в рівняння підставляють довільне значення потоку і ведуть розрахунок методом послідовних наближень до тих пір, поки різниця між прийнятим значенням Q і значенням $Q = U (p_1 - p_2)$ не стане близькою до нуля.

Розрахунок провідності і потоку газу проводився за допомогою спеціально написаної комп'ютерної програми. Текст програми приведений в додатку 1.

Як робочий газ для розрахунку був прийнятий аргон.

За результатами розрахунку значення величини потоку газу, що проходить через джерело під час його роботи, склало $Q = 0,5 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$.

Відома залежність для визначення відстані, на якому струмінь газу, що виходить в область зниженого тиску, ще зберігає надзвукову швидкість [5]

$$L = 0,67d \sqrt{\frac{P_u}{P_k}},$$

де L - довжина струменя (мм), d - діаметр сопла (мм), P_i -тиск в джерелі (мбар), P_k -тиск в камері (мбар).

Були проведені експерименти для визначення залежності перепаду тиску від потоку газу, що подається в джерело. Завданням проведених досліджень було визначення оптимального значення подачі газу, при якому виникає найбільший перепад тисків в камері і джерелі, так як від перепаду тисків в системі джерело-камера залежить довжина струменя, що рухається з надзвуковою швидкістю.

Експериментальним шляхом було з'ясовано, що при напуску газу в камеру джерела відбувається збільшення відносини тисків, хоч і тиску в обох камерах збільшується.

Було проведено ряд дослідів, аналіз яких дозволив вибрати параметри, при яких довжина надзвуковий струменя буде максимальна.

Експерименти проводилися для сопла діаметром 12 мм, в якості робочого газу використовувався аргон. Залежність довжини струменя від подаваного потоку газу приведена в табл. 2.8 та на рис. 2.16.

Таблиця 2.8

Результати вимірювання тиску для різних значень потоку газу, що подається в джерело

Потік газу, ссст	Тиск в камері джерела, P_u , мбар	Тиск камери підкладки, P_k , мбар	Відношення тисків, P_u / P_k	Положення диска Маха, мм
0	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	1,52	9,91
15	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	1,63	10,26
30	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	2,00	11,37
45	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	2,4	12,46
60	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	2,36	12,35
90	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	2,41	12,48
120	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	2,27	12,11

150	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	1,96	11,25
180	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1,86	10,96
210	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	1,82	10,85
240	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	1,79	10,76
270	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	1,75	10,64
300	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	1,82	10,85
600	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	1,85	10,94
900	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	1,96	11,26
1200	$4,2 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	2,19	11,90
1500	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	2,41	12,48
1700	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	3,00	13,93

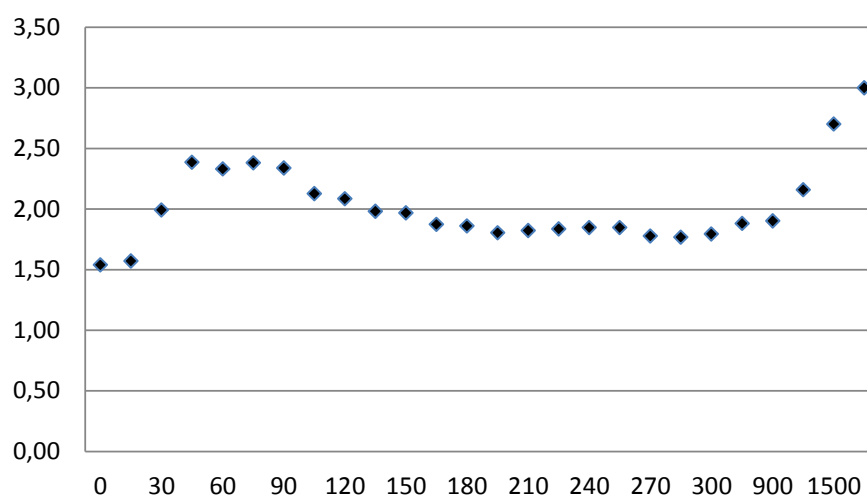


Рис. 2.16. Залежність перепаду тисків джерело / камера від подачі газу

Після досягнення деякого критичного значення подачі газу тиск у джерелі починає рости швидше тиску в камері. Очевидно, це пов'язано зі значенням провідності сопла.

При обраній системі відкачування для сопла діаметром 12 мм при значенні подачі газу понад 600 sccm починається зростання перепаду тисків. Однак говорити про можливість отримання надзвуковий струменя робочого газу можна і в діапазоні від 60 до 100 sccm.

Для отриманих значень подачі газу з використанням розробленого джерела матеріалу було проведено пробне нанесення плівки міді на нерухому підкладку. Були отримано покриття у вигляді круглого плями діаметром близько 15 мм.

Зовнішній вигляд отриманого зразка покриття представлений на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Зовнішній вигляд отриманого зразка покриття. Підкладка показана в натуральну величину

Для отримання суцільного покриття на всій поверхні підкладки необхідно забезпечити взаємне сканування підкладки щодо джерела. Таке сканування було реалізовано за допомогою трикоординатної системи закріплення підкладок.

Столик, де розміщується підкладка, дозволяє здійснювати сканування за координатами X і Y , а також регулювати відстань сопло-підкладкар з координування Z .

Були проведені експерименти з нанесення покриттів для наступних умов:

- потужність випарника: 220 Вт;
- подача газу: 900 sccm
- подача матеріалу (мідний дріт діаметром 0,3 мм): 3 см / хв;
- кідстань сопло-підкладка: 10 мм;

- крок сканування по координаті x: 10 мм.
- кількість проходів щодо джерела - 1
- швидкість сканування 0,5 см / с

Зовнішній вигляд столика для розміщення зразків представлений на рис.2.18.

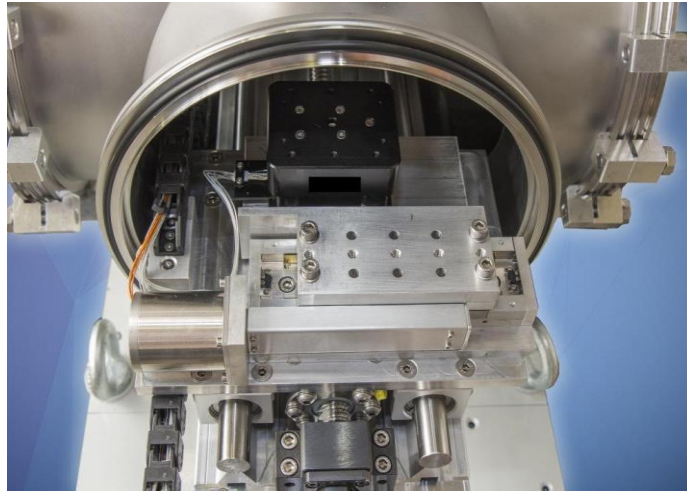


Рис. 2.18. Зовнішній вигляд системи позиціонування підкладок

За результатами нанесення були отримані зразки покриття з яскраво вираженими світлими смугами міді, які були отримані безпосередньо навпроти сопла джерела. Фотографія типового зразка покриття і АСМскан світлої смуги міді представлені на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Зовнішній вигляд зразка покриття, отриманого методом парострумінного осадження при русі підкладки щодо джерела з кроком 10 мм.

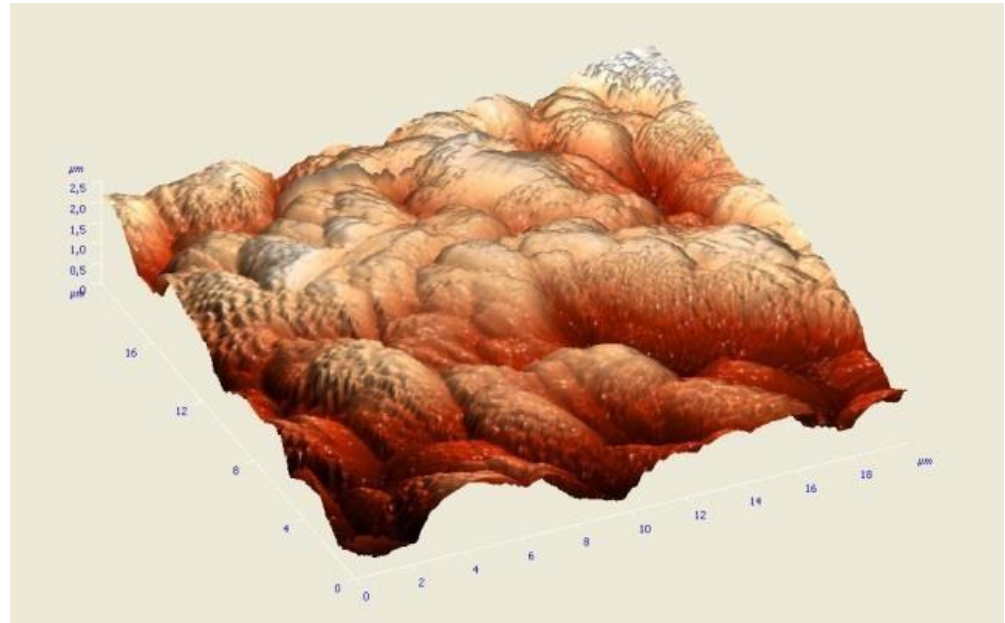


Рис. 2.20. Зовнішній вигляд покриття, отриманого навпаки сопла джерела

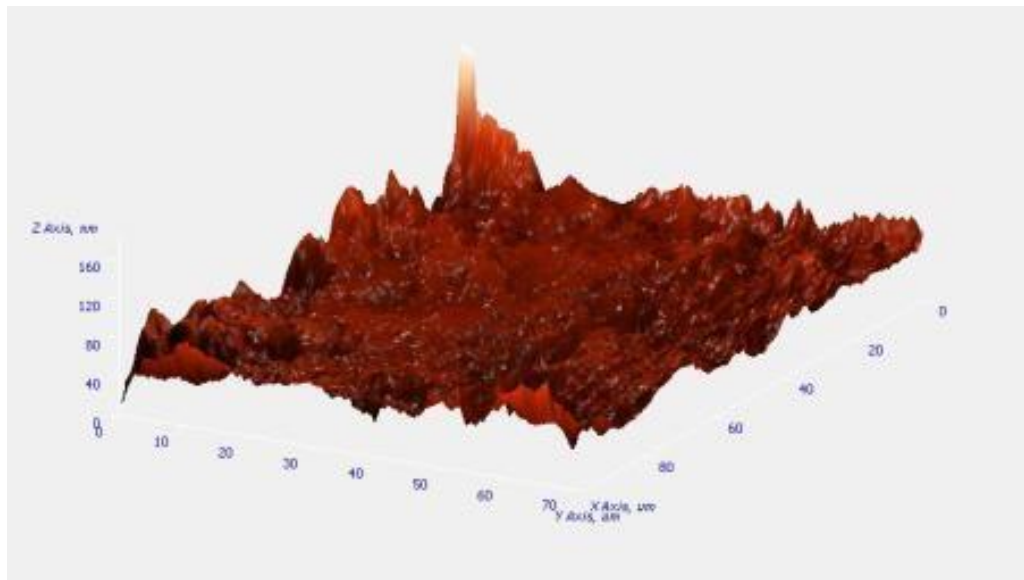


Рис. 2.21. Зовнішній вигляд покриття, отриманого в стороні сопла джерела матеріалу

Аналіз зображення показує наявність збільшення товщини покриття навпроти сопла по відношенню до товщини покриття на решті поверхні підкладки. Різниця товщини покриття сягає від 1,0 до 2,0 мкм. Причому, така різниця в товщині досягається за рахунок наявності яскраво виражених кластерів міді. Поява кластерів стабільно на всій траєкторії сопла при зазначених режимах. Зниження потужності нагрівача або подачі газу призводить до появи пропусків в лінії кластерів. Нанесення плівки в

кластерному режимі роботи джерела дозволяє отримувати покриття з Швидкістю нанесення до 2 мкм/с на локальній ділянці підкладки. Така товщина покриття забезпечується на ділянці шириною 2 мм навпроти центру сопла джерела.

Висновки до другого розділу

1. Розроблена і введена в експлуатацію лабораторну установку може бути використана для відпрацювання технології отримання металевих покриттів.

2. Установка дозволяє отримувати двошарові покриття двома технологічними методами без розгерметизації вакуумної камери.

3. Після введення установки в експлуатацію були отримані перші зразки покриттів та визначено діапазони режимів роботи установки, при яких можливе отримання покриттів.

4. Отримані результати вимірювання адгезійної міцності покриттів дозволяють говорити про можливість використання обраних режимів для нанесення підшару титану в якості адгезійного підшару під матеріали, які використовуються при пайку компонентів (мідь, олово-золото і ін.).

5. Нанесення плівки методом парострумінного осадження в кластерному режимі роботи джерела дозволяє отримувати покриття із швидкістю нанесення до 2мкм/с на локальній ділянці підкладки. Така товщина покриття забезпечується на ділянці шириною 2 мм навпроти центру сопла джерела.

РОЗДІЛ 3. ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ДВОШАРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ НА ПІДКЛАДКАХ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ

3.1. Попередня підготовка зразків перед проведенням нанесення покриття

Наявність на поверхні підкладки різного роду забруднень призводить до різкого зниження відсотка виходу придатних виробів на наступних технологічних операціях. Забруднення підкладок зазвичай відбувається при механічній обробці напівпровідникових злитків і пластин (різанні, шліфування та полірування), а також за рахунок адсорбції різних речовин з технологічних середовищ [70].

Серед всіх видів забруднень особливу увагу слід приділяти органічним забруднень, так як вони при нагріванні розкладаються і виділяють газоподібні речовини (кисень, оксид і діоксид вуглецю, пари води та ін.), Які в значній мірі погіршують наступні технологічні процеси (дифузії, епітаксії, осадження захисних діелектричних плівок і ін.).

Для повного очищення підкладки від забруднень необхідно вибрати технологічний процес, який включав би в себе ряд послідовних операцій, кожна з яких дозволяла б видаляти з поверхні один або кілька видів забруднень.

При виборі остаточного технологічного процесу очищення напівпровідникових підкладок слід пам'ятати про економічні аспекти цього процесу і будувати його таким чином, щоб при мінімальних витратах отримати найбільш чисту поверхню. В цьому випадку треба завжди виходити з вимог по чистоті поверхні підкладки, що диктуються тією технологічною операцією, на яку надходять ці підкладки. [70]

Найпростішим способом очищення є механічна очистка поверхні. Вона призначена для видалення механічних забруднень, таких як: залишки окалини і іржі, великих скупчень мастильного матеріалу.

При механічному очищенні поверхню обробляють металевими щітками, наждачним папером і протирають ганчір'ям. Дану очищення в основному застосовують при обробці поверхні металевих елементів вакуумної камери, внутрішньокамерних пристроїв і пристосувань [5].

Грубе хімічне очищення використовується для видалення з поверхні оброблюваних деталей видимих органічних забруднень, таких як: залишки масел, мастильні матеріали, барвники, відбитки пальців і жирові плями. Щоб видалити продукти очищення і забезпечити якісний стан поверхні після грубої хімічної очистки рекомендується застосовувати м'які тканини типу бязі і ін.

Тонку хімічну очистку в розчинах неорганічних кислот і лугах, а також в парах органічних розчинників застосовують для забезпечення якісної підготовки поверхні перед нанесенням покриття. Для інтенсифікації процесу очищення використовують ультразвукові ванни; процес очищення ведуть, як правило, при температурі розчину вище кімнатної.

Основні хімічні речовини, що застосовуються для очищення поверхні, наведені в табл. 3.1. [24]

Ультразвукове очищення видаляє великі жирові забруднення завдяки інтенсивному локальному перемішуванню під дією ударних хвиль, створюваних в розчиннику. В ході промивки розчинник, насичений домішками, необхідно безперервно видаляти з поверхні підкладки; при цьому його замінює чистий розчинник. Механічні коливання, що створюються на підкладці, сприяють видаленню макро забруднень, лусочок металів, пилу та ін. [70]

При використанні ультразвукової ванни з частотами 20-50 кГц усунення забруднень відбувається за рахунок кавітаційного ефекту. Явище кавітації полягає в «схлопуванні» газових бульбашок, що утворюються при

стисненні і розширенні рідини. При використанні ультразвукової ванни, в розчині, що омиває пластину, створюються змінні стискають і розтягують напруги, під дією яких утворюються кавітаційні бульбашки [6].

Таблиця 3.1

Характеристики деяких хімічних розчинників застосовуються для очищення поверхні

Розчинник	Призначення
Бензин з низьким октановим числом	Видалення грубих жирових забруднень і первинне очищення вакуумної камери і внутрішньокамерних пристроїв після механічної обробки
Бензин з високим октановим числом	Повторна очищення поверхні після обробки бензином низької якості
Ізопропиловий спирт	Видалення ефірних масел (замінник етанолу, етилового спирту)
Етиловий спирт (етанол)	Розчинення лакофарбових матеріалів
Ацетон	Розчинення перхлорвінілових і поліакрилових лаків, ацетатів целюлози та ін.
Тетрахлорид вуглецю	Очищення поверхні металів і деяких полімерів, наприклад полістиролу (в процесі обробки можливо травлення поверхні)
Трихлоретилен	Знежирення поверхні металів, видалення масел, жирів, воску

Ефективність ультразвукового очищення в основному визначається частотою коливань; крім того, воно залежить від потужності випромінювання і температури розчинника. Фактично ультразвукове очищення ефективно видаляє тільки великі забруднення, тому рекомендується її завершувати знежиренням в парах органічних розчинників. [29].

З підвищенням частоти збільшується проникаюча здатність рідини за рахунок зменшення довжини хвилі коливань, зменшується ймовірність руйнування зразків за рахунок зменшення розмірів кавітаційних бульбашок. З підвищенням потужності УЗ-коливань до певних значень інтенсивність

кавітації зростає. Підвищення температури підвищує розчинність забруднень і впливає на умову виникнення кавітації. Для кожної рідини існує оптимальна температура обробки [7].

Обробку пластин і підкладок зазвичай ведуть при ультразвукових коливаннях, коли кавітація відсутня і очищення інтенсифікується за рахунок вихрових акустичних потоків рідини. [70]

Ультразвукові коливання значно підвищують продуктивність і поліпшують якість не тільки знежирення, а й інших операцій рідинної обробки.

Схема обробки пластин в ультразвуковій ванні показана на рис. 3.1. 1 - ванна; 2 - касета з пластинами; 3 - концентратор; 4 - Генератор ультразвукових коливань; 5 - магнітострикційний випромінювач.

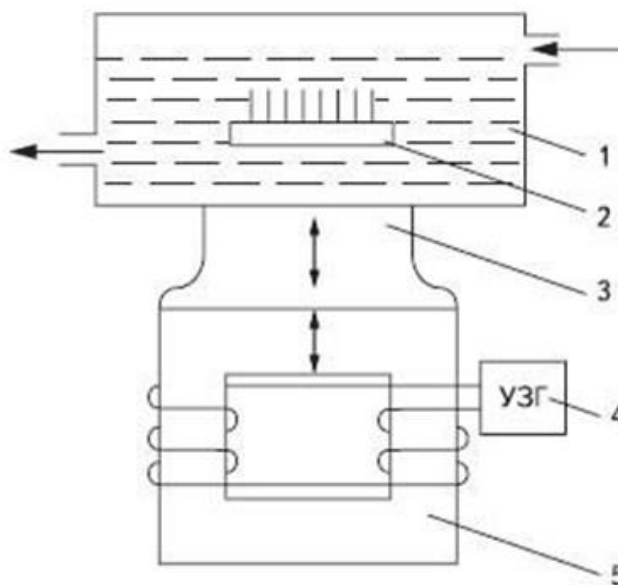


Рис. 3.1. Схема процесу ультразвукового очищення в протоці розчинника

Для видалення залишків органічних розчинників використовують промивання деонізованою водою.

Після промивання в деонізованій воді підкладку слід витягувати таким чином, щоб мінімізувати кількість рідини на поверхні. Решта на поверхні краплі води після висихання проявляться у вигляді видимих плям, що змінюють властивості формованого покриття. Тому краплі води слід здувати

струменем чистого Обезпилення повітря або видаляти за допомогою центрифуги. [15]

Осушення проводиться у паровому очищувачі або в чистій печі з використанням гарячого очищеного повітря або азоту. Очищення поверхні підкладки необхідно проводити безпосередньо перед приміщенням у вакуумну камеру, так як при тривалому очікуванні чистота поверхні може бути порушена, що призведе до зниження якості осаджуваної плівки.

Зазвичай після хімічної очистки, промивки в дистильованій воді і сушки підкладка надходить в камеру металізації. При цьому можливе повторне забруднення поверхні внаслідок адсорбції молекул різних речовин з навколишнього повітря. [27]

Недоліком хімічної підготовки поверхні є також і те, що ця обробка в принципі не забезпечує видалення фізично адсорбованої вологи, тим більше хемосорбірованої. Фізична адсорбована волога виділяється в процесі відкачування тільки прогрівом підкладок в вакуумі при високій температурі.

В рамках даної роботи у всіх експериментів з відпрацювання технології для проведення ультразвукової відмивання використовувалася ультразвукова ванна Водолій. Зовнішній вигляд ванни представлений на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Зовнішній вигляд ультразвукової ванни, що використовувалася для очищення

Як хімічного розчинника використовувався ізопропіловий спирт. Ізопропіловий спирт, він же ізопропанол - це прозора безбарвна рідина з різким «спиртовим» запахом. Він досить просто змішується з органічними розчинниками і водою. Цей спирт не залишає розлучень після випаровування і тому вважається відмінним засобом для чищення оптичних лінз, дзеркал, глянцевих скляних і металевих поверхонь, а також для обробки поверхні підкладки. [70]

В якості підкладок у всіх експериментах використовувалися шліфовані пластини оксиду алюмінію з шорсткістю Ra 1,6 мкм. Перед нанесенням покриття проводилася підготовка пластин, яка полягала в наступному. Пластини відмивалися в розчині підігрітого ізопропілового спирту в ультразвукової ванні протягом 10 хвилин. Температура миючої рідини становила 40 ° С. Сушка пластин проводилася при кімнатній температурі. [70]

3.2. Виявлення впливу адгезійного підшару на адгезійну міцність основного струмопровідного шару

Для виявлення впливу підшару титану на адгезійну міцність шару міді була проведена серія експериментів з отримання структур Al_2O_3 / Cu і $Al_2O_3 / Ti / Cu$. [70]. Адгезійний підшар титану наносився методом магнетронного розпилення. Основний шар міді наносився методом термічного випаровування. Діапазон варіювання параметрів технологічного процесу представлений в Табл. 3.2 та 3.3

Таблиця 3.2

Номер зразка	Покриття	Спосіб нанесення покритті	Тиск в камері (Р,мбар)	Потужність (W, кВт)	Час осадження (t, с)

1	Cu	Термічне випаровування	$1,3 \times 10^{-3}$	0,20	300
2	Cu	Термічне випаровування	$1,0 \times 10^{-3}$	0,20	300
3	Cu	Термічне випаровування	$8,7 \times 10^{-4}$	0,20	300

Для кожного набору режимів було отримано три зразка покриттів.

Всі отримані зразки піддавалися випробуванням на адгезійну міцність покриття методом відриву.

Схема вимірювання адгезійної міцності показана на Рис. 3.4.

Підкладка приклеювалася на сталеву плиту, до покриття припаював спеціальний грибок з відомою площею підстави

Таблиця 3.3

Номер зразка	Покриття	Спосіб нанесення	Подача газу (Q, sccm)	Тиск в камері (P, мбар)	Потужність (W, кВт)	Час осадження (t, с)
1	Ti	Магнетронне розпилення	30	$1,2 \times 10^{-2}$	0,38	300
	Cu	Термічне випаровування	-	$1,3 \times 10^{-4}$	0,20	300
2	Ti	Магнетронне розпилення	30	$1,3 \times 10^{-2}$	0,38	300
	Cu	Термічне випаровування	-	$1,0 \times 10^{-4}$	0,20	300

Зовнішній вигляд грибка, який використовувався при проведенні випробувань, показаний на Рис. 3.5. Площа капелюшки грибка становила близько 1 мм².

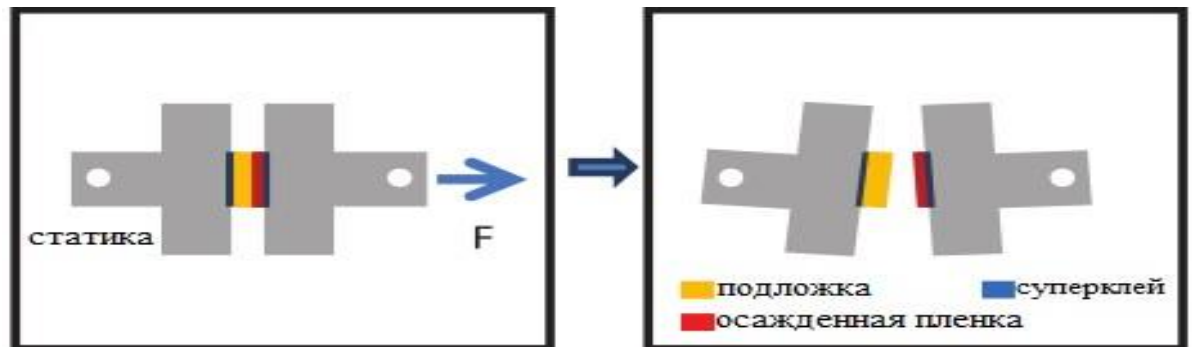


Рис. 3.4. Схема проведення вимірювання адгезійної міцності методом відриву

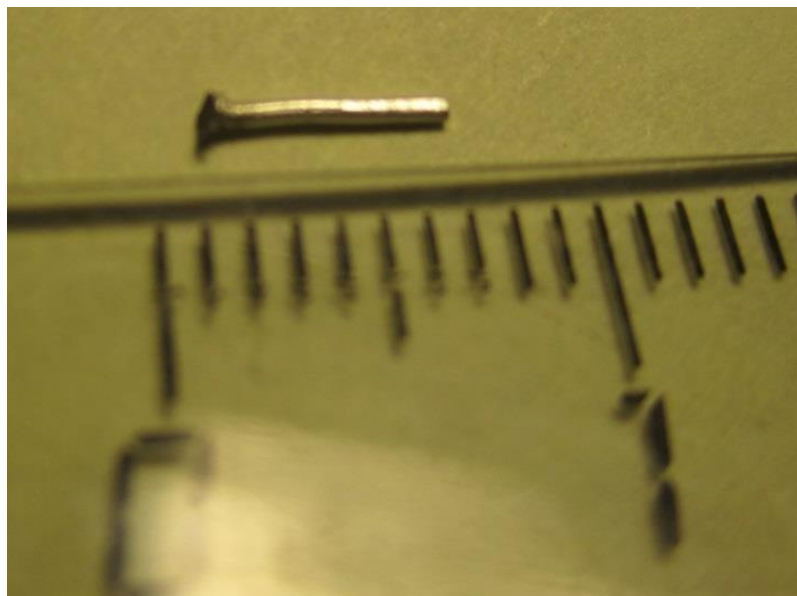


Рис. 3.5. Зовнішній вигляд грибка, який використовувався при проведенні випробувань на адгезійну міцність методом відриву

Після пайки до грибка прикладалася зусилля, і вимірювалася величина сили, при якій відбувалося руйнування з'єднання. Залежно від характеру руйнування (стик покриття / підкладка; стик покриття / грибок; міжшарове з'єднання покриття) робився висновок про величину адгезійної міцності.

Були проведені вимірювання адгезійної міцності у зразків покриттів з підслоєм і без нього. [70]

Результати вимірювання адгезійної міцності покриття з адгезійним підслоєм і без нього показані на Рис. 3.6.

В ході проведення експерименту було встановлено, що вставка адгезійного підшару приводить до збільшення адгезійної міцності токопроводящего покриття в 10 разів до розміру 45 МПа. Тому всі подальші дослідження виконувалися на зразках із застосуванням адгезійного підшару титану.

Результати вимірювання адгезійної міцності зразків наведені в Табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7
Потужність термічного випаровування (кВт)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Потужність магнетронного розпилення (Вт)				380	380	380	380
Площа припаяного провода (мм ²)	36	36	36	16	14	49	70
Виміряне Значення адгезії одношарового покриття (МПа)	<5	<5	<5				
Виміряне Значення адгезії двошарового покриття (МПа)				40	40	45	46

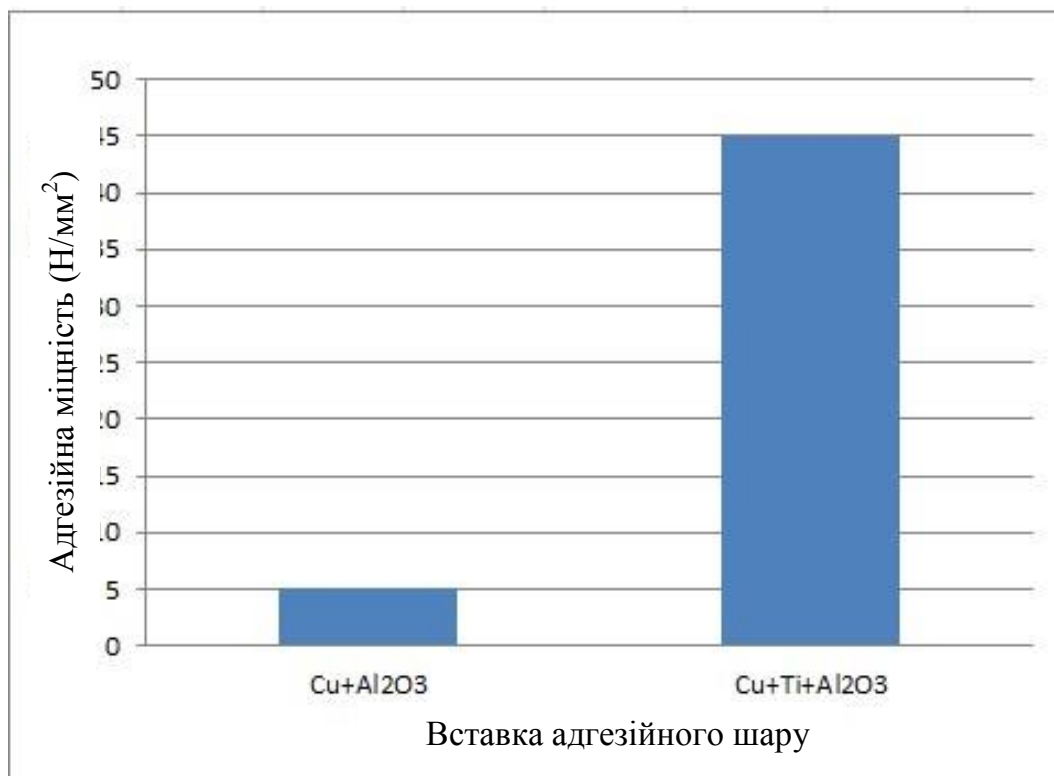


Рис 3.6. Вплив підшару титану на адгезійну міцність покриття міді на підкладці оксиду алюмінію

3.3. Виявлення залежності адгезійної міцності від режимів роботи джерела живлення магнетронній розпилювальної системи

Друга серія експериментів була спрямована на виявлення залежності адгезійної міцності від режимів роботи магнетронній розпилювальної системи при нанесенні адгезійного підшару.

Були проведені серії експериментів при роботі магнетронній розпилювальної системи в режимі постійного струму, а також в імпульсному режимі при різних параметрах частоти і шпаруватості імпульсів і при різному робочому тиску у вакуумній камері. Тиск в камері регулювалося за рахунок зміни величини подачі робочого газу аргону. [70]

Технологічні режими, використані при отриманні покриттів, наведені в Табл. 3.5 - 3.8 У кожному режимі було отримано не менше трьох зразків покриттів. Результати вимірювання адгезійної міцності методом відриву для отриманих зразків наведені в Табл. 3.5.

Режими формування двошарового покриття

Таблиця 3.5

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
1	Подача газа, ссст	30	-
	Тиск в камері, мбар	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-4}$
	Потужність джерела, Вт	180	200
	Напруга на МРС, В	655	-
	Ток на МРС, мА	270	-
	F, кГц	30	-
	D, %	50	-
	Час осадження, хв	5	5

Режими формування двошарового покриття

Таблиця 3.6

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
2	Подача газа, ссст	30	-
	Тиск в камері, мбар	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-4}$
	Потужність джерела, кВт	380	200
	Напруга, В	550	-
	Струм, мА	1115	-
	F, кГц	30	-
	D, %	70	-
	Час осадження, хв	5	5

Режими формування двошарового покриття

Таблиця 3.7.

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
3	Подача газа, ссст	30	-
	Тиск в камері, мбар	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-4}$

Потужність джерела, кВт	380	200
Напруга, В	550	-
Струм, мА	270	-
F, кГц	90	-
D, %	70	-
Час осадження, хв	5	5

Після обробки результатів вимірювання було встановлено, що при роботі магнетронній розпилювальної системи найкращі значення адгезійної міцності показали зразки, отримані на частоті імпульсів 90 кГц при коефіцієнті заповнення 70%. Зменшення частоти імпульсів при збереженні коефіцієнта заповнення призводить до незначного зниження міцності. Зниження ж коефіцієнта заповнення призводить до втрати адгезійної міцності покриття і зводить нанівець ефект від адгезійного підшару. Результати цієї серії експериментів показані на Рис. 3.7. [22]

Режими формування двошарового покриття

Таблиця 3.8.

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
4	Подача газа, ссст	30	-
	Тиск в камері, мбар	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-4}$
	Потужність джерела, кВт	190	200
	Напруга, В	655	-
	Струм, мА	300	-
	F, кГц	70	-
	D, %	50	-
	Час осадження, хв	5	5

Результати вимірювання адгезійної міцності отриманих зразків

Таблиця 3.9.

Номер зразка	1	2	3	4
Виміряне значення адгезії двшарового покриття, МПа	3 1,4	39 ,0	42, 1	2,7

Для виявлення впливу тиску у вакуумній камері при нанесенні адгезійного підшару на адгезійну міцність покриття були проведені експерименти з нанесення покриттів титану при різноманітному тиску у вакуумній камері. Тиск в камері регулювався зміною подачі робочого газу і провідності каналу системи відкачування. Формування покриттів адгезійного підшару проводилося як в режимі постійного струму, так і в імпульсному режимі. [70]

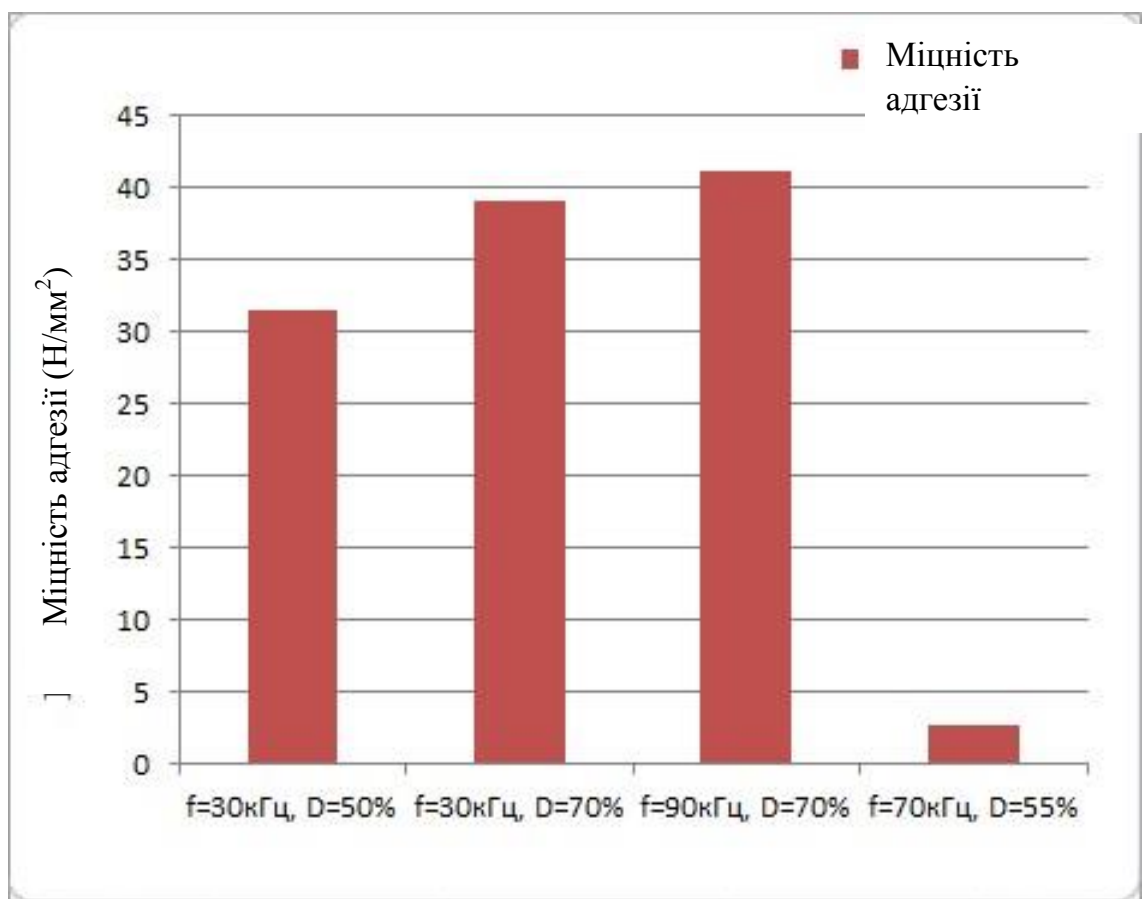


Рис. 3.7. Вплив параметрів імпульсного режиму роботи магнетронної розпилювальної системи при нанесенні підшару на адгезійну міцність покриттів

Технологічні режими, використані при отриманні покриттів з джерелом живлення магнетронній розпилювальної системи постійного струму, наведені в Табл. 3.10 - 3.12. У кожному режимі було отримано не менше трьох зразків покриттів. [70]

Режими формування двошарового покриття при нанесенні адгезійного підшару в режимі постійного струму

Таблиця 3.10.

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
1	Тиск в камері, мбар	$8,3 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-3}$
	Потужність джерела, Вт	400	200
	Час осадження, хв	5	5

Режими формування двошарового покриття при нанесенні адгезійного підшару в режимі постійного струму

Таблиця 3.11

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
1	Тиск в камері, мбар	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-4}$
	Потужність джерела, Вт	360	200
	Час осадження, хв	5	5

Режими формування двошарового покриття при нанесенні адгезійного підшару в режимі постійного струму.

Таблиця 3.12.

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
1	Тиск в камері, мбар	$4,5 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-4}$

	Потужність джерела, Вт	220	200
	Час осадження, хв	5	5

Технологічні режими, використані при отриманні покриттів з джерелом живлення магнетронній розпилювальної системи імпульсного струму, наведені в Табл. 3.13 – 3.17. Використовувалися параметри імпульсного режиму, які показали найкращу адгезійну міцність: частота імпульсів 90 кГц, коефіцієнт заповнення 70%. Напруга, що прикладається до магнетронній розпилювальної системи, визначалася можливістю отримання стабільного горіння розряду при даному тиску. У кожному режимі було отримано не менше трьох зразків покриттів. [70]

Режими формування двошарового покриття при нанесенні адгезійного підшару в імпульсному режимі струму

Таблиця 3.13

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
1	Тиск в камері, мбар	$8,3 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-3}$
	Напруга джерела МРС, В	460	-
	Час осадження, хв	5	5

Режими формування двошарового покриття при нанесенні адгезійного підшару в імпульсному режимі струму.

Таблиця 3.14.

№ режима	Показник	Значення	
		Ti	Cu
2	Тиск в камері, мбар	$1,3 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-3}$
	Напруга джерела МРС, В	570	-

	Час осадження, хв	5	5
--	-------------------	---	---

Режими формування двошарового покриття при нанесенні адгезійного підшару в імпульсному режимі струму

Таблиця 3.15.

№ режиму	Показник	Значення	
		Ti	Cu
3	Тиск в камері, мбар	$4,5 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-3}$
	Напруга джерела МРС, В	750	-
	Час осадження, хв	5	5

Зведені результати вимірювання адгезійної міцності зразків наведені в Табл. 3.16 і на Рис. 3.8

Результати вимірювання адгезійної міцності отриманих зразків

Таблиця 3.16.

Номер режима	1	2	3
Тиск в камері, мбар	$8,3 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$
Виміряне значення адгезії двошарового покриття (постійний струм), МПа	62,7	28,0	32,7
Виміряне значення адгезії двошарового покриття (імпульсний режим), МПа	40,8	27,4	118

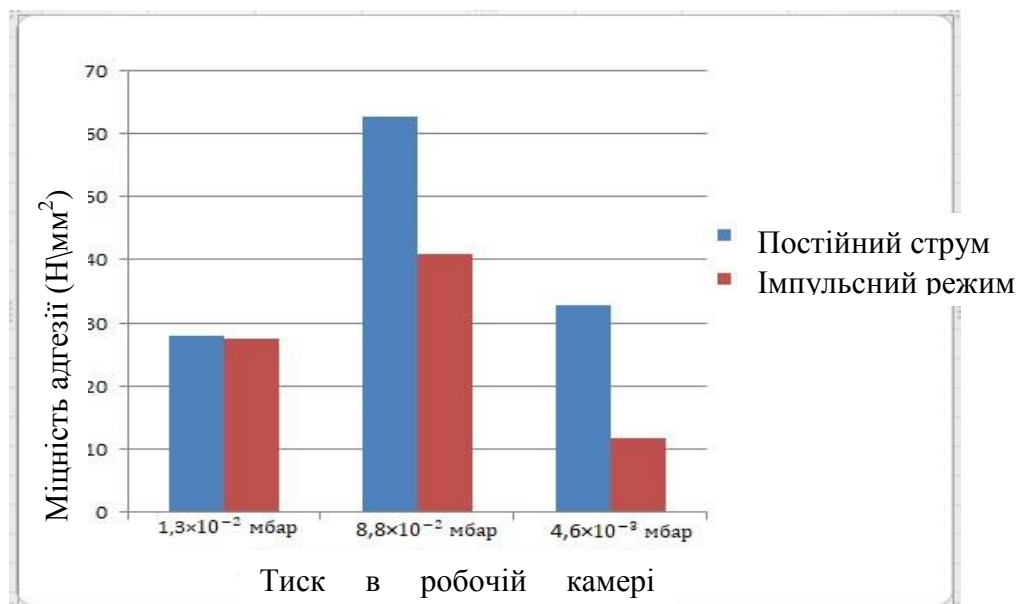


Рис. 3.8. Вплив тиску у вакуумній камері при нанесенні підшару на адгезійну міцність покриттів

Найкращі значення адгезійної міцності показали зразки, отримані при роботі магнетронній розпилювальної системи в режимі постійного струму при тиску $8,8 \cdot 10^{-2}$ мбар. Причому ці зразки показали найкращий результат за весь час досліджень. Всі подальші дослідження проводилися з параметрами режиму, які показали найкращий результат за адгезійної міцності. [70]

Висновки до третього розділу

1. Для збільшення адгезійної міцності покриттів міді на підкладках оксиду алюмінію необхідно використовувати адгезійний підшар, наприклад, підшар титану. Використання такого підшару приводить до збільшення адгезійної міцності в 10 і більше разів.

2. Режими роботи магнетронній розпилювальної системи і параметри технологічного процесу істотно впливають на адгезійну міцність одержуваних покриттів.

3. Найкращі результати адгезійної міцності отримані при нанесенні адгезійного підшару при роботі магнетронній розпилювальної системи в режимі постійного струму при тиску у вакуумній камері $8,8 \cdot 10^{-2}$ мбар.

РОЗДІЛ 4. ВИЯВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ ВІД ПОЛОЖЕННЯ ПІДКЛАДКИ ЩОДО ДЖЕРЕЛА МАТЕРІАЛУ

4.1. Виявлення залежності температурного режиму нанесення від положення підкладки щодо магнетронній розпилювальної системи

В процесі відпрацювання режимів спостерігалися випадки руйнування зразків. Оскільки нанесення йде з гарячою мішені, нагрітої до температури близько 1000 ° С було висловлено припущення, що руйнування відбувається через теплового впливу. Зовнішній вигляд зразків, що зруйнувалися в процесі нанесення, представлений на Рис. 4.1.

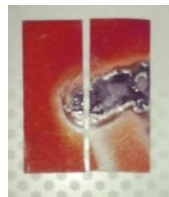


Рис. 4.1. Зовнішній вигляд зразків, що зруйнувалися в процесі нанесення

Для визначення ступеня температурного впливу на зразки в процесі формування покриття підкладкотримач був оснащений термопарою, що дозволяє фіксувати температуру зразків в процесі нанесення.

Була проведена серія експериментів з дослідження температурного режиму підкладки під час нанесення покриттів.

Нанесення покриття проводилося з магнетронній розпилювальної системи при наступних режимах:

- потужність розпилення - 380 Вт;
- робочий газ - аргон, подача 30 sccm;
- відстань від мішені до підкладки становила 75 мм.

Вимірювання температури підкладки проводилися для різних режимів роботи джерела живлення магнетронній розпилювальної системи (f - частота імпульсів, D - коефіцієнт заповнення імпульсів):

- $f = 30 \text{ кГц}$; $D = 50\%$,
- $f = 30 \text{ кГц}$; $D = 70\%$,
- $f = 90 \text{ kHz}$; $D = 70\%$
- $f = 70 \text{ kHz}$; $D = 55\%$

Отримані залежності температури підкладки від часу роботи магнетронній розпилювальної системи для різних режимів роботи джерела живлення показані на Рис. 4.2.

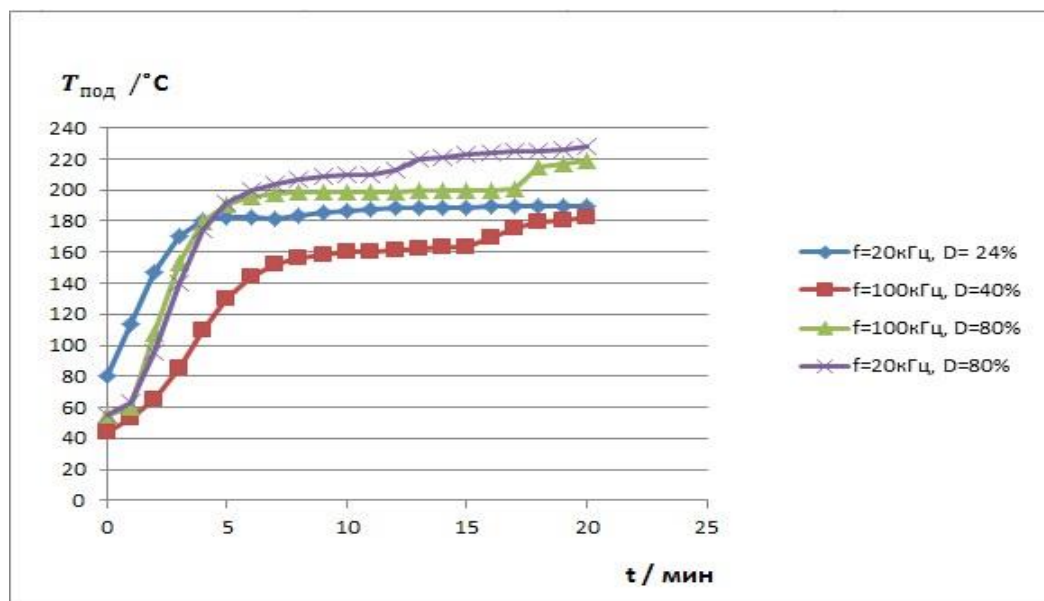


Рис. 4.2. Залежність температури підкладки від часу роботи магнетронній розпилювальної системи для різних режимів роботи джерела живлення

Визначено, що підкладка нагрівається до температури 220°C і вище, причому на початковій стадії швидкість нагріву досягає до $40^{\circ}\text{C} / \text{хв}$.

Очевидно, що досягнуті швидкості нагріву підкладок в початковий період нанесення призводять до їх руйнування. Щоб уникнути руйнування, необхідно обмежувати температурний вплив на підкладку під час формування покриттів. Це можна зробити, збільшивши відстань від мішені

до підкладки, однак, такий спосіб призведе до значного падіння швидкості формування покриття.

В ході проведення вимірювань температури було виявлено, що завдяки дифузному розсіюванню матеріалу в зоні нанесення відбувається запилення зворотного боку підкладки, яка звернена в сторону, протилежну мішені магнетронній розпилювальної системи. Зовнішній вигляд такого зразка показаний на рисунку 4.3. На малюнку видно плівка, отримана на зворотному боці підкладки. Плівка сформована у вигляді кіл, так як майданчик підкладкотримача має отвори відповідної форми і, фактично, працює як маска.

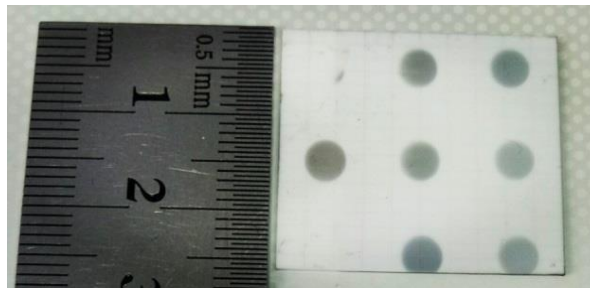


Рис. 4.3. Запилення задньої сторони підкладки під час нанесення покриття

Для перевірки гіпотези про вплив дифузного розсіювання на запилення зворотного боку підкладки була розрахована довжина вільного пробігу молекул в зоні формування покриттів. Вона склала

$$L = \frac{0,63}{\rho} = \frac{0,63}{1} \approx 0,63 \text{ см},$$

що приблизно в 10 разів менше, ніж відстань від підкладки до мішені.

Відомо, у вакуумній камері при зниженому тиск теплообмін відбувається переважно за рахунок випромінювання. В теорії променистого теплообміну величина потоку, що падає на одну поверхню з іншої поверхні, залежить від кутового коефіцієнта, який може бути розрахований за формулою $v = \frac{v_e \cdot S_s \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot \alpha}{\pi \cdot r^2}$

де φ і θ кути між лінією, що з'єднує поверхні до і їх нормаліями.

Отже, змінюючи кут нахилу підкладки щодо мішені, можна знизити величину теплового впливу на неї. При цьому повинно бути таке становище підкладки, при якому температурний вплив мінімально, а швидкість формування покриття достатня.

Для проведення досліджень залежності температурного впливу від положення підкладки щодо мішені була спроектована і виготовлена спеціальне оснащення, що дозволяє розміщувати підкладки на різній відстані і під різними кутами відносно магнетронній розпилювальної системи. Це дозволило регулювати температурний вплив на підкладку з боку магнетронній розпилювальної системи. При видаленні підкладки від мішені і збільшенні кута розташування підкладки щодо мішені магнетронній розпилювальної системи знижується температурний вплив на підкладку і зростаючу плівку, а також відбувається зниження швидкості росту покриття. Схема оснащення і розташування зразків наведена на Рис. 4.4.

Температура підкладки була виміряна для різних положень підкладки. Максимальна відстань від мішені до підкладки становила 110 мм, а мінімальна відстань між ними була не менш 75 мм.

Результати вимірювання температури для різних положень підкладки щодо мішені представлені на Рис. 4.5.

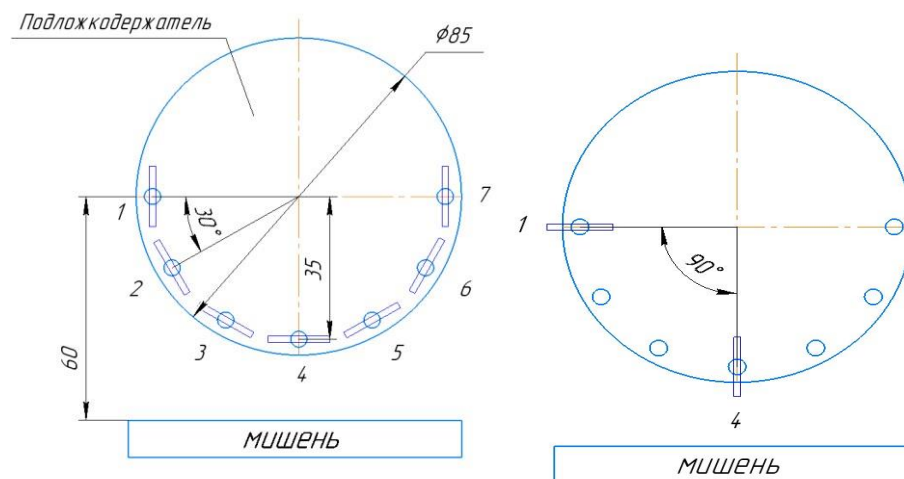


Рис. 4.4. Схема розташування підкладки на підкладкотримача з різними кутами і відстанями від мішені до підкладки

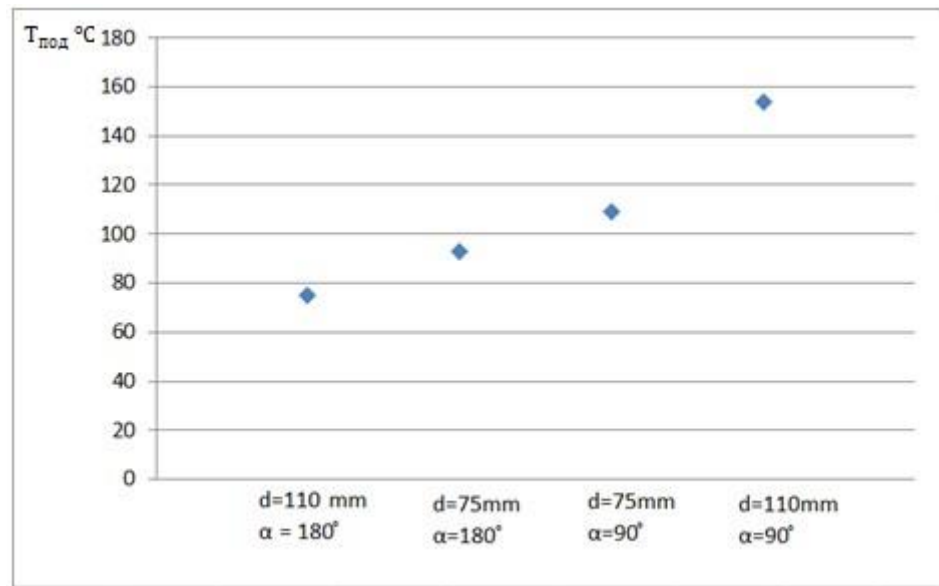


Рис. 4.5. Залежність температури підкладки від кута і її розташування відносно мішені

4.2. Виявлення залежності адгезійної міцності покриттів від положення підкладки щодо магнетронній розпилювальної системи

Для виявлення впливу положення підкладки під час нанесення адгезійного підшару на адгезійну міцність покриттів були проведені експерименти по формуванню адгезійного підшару титану допомогою раніше описаної оснастки. Основними цілями експериментів були визначення впливу кута нахилу підкладки на товщину плівки, її шорсткість і адгезійну міцність. Режими, при яких були отримані зразки покриттів, вказані в Табл. 4.1 [28].

Режими нанесення адгезійного підшару, використані для виявлення впливу положення підкладки на властивості одержуваного покриття

Таблиця 4.1

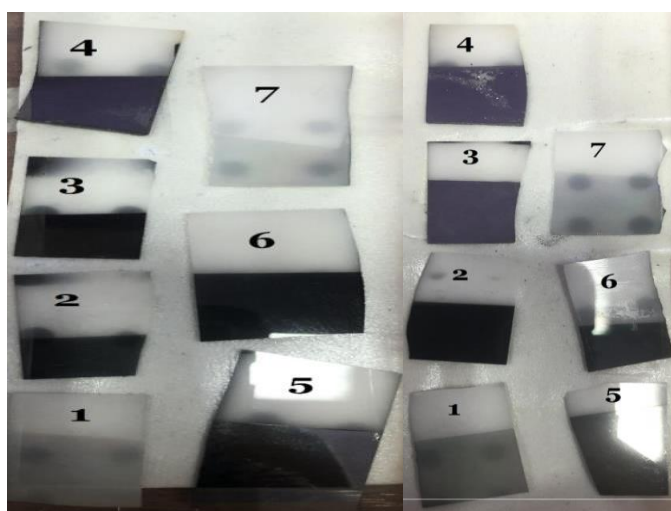
№ режима	Швидкість подачі газа, л/с	Робочий тиск Р, Па	Потужність W, Вт	Напруга U, В	Час нанесення t, хв
I	2,4	1,5	380	595-690	15
II	2,4	1,5	380	650-674	15

Для кожного режиму проводилося одночасне напилення на підкладки, розташовані на різних позиціях підкладкотримача. Підкладки розташовувалися під різними кутами по відношенню до мішені магнетрона. Для кожного режиму нанесення було виконано три рази. Таким чином, для кожного з режимів був отриманий 21 зразок.

На всіх зразках була сформована сходинка, позоволяющая виміряти товщину плівки. Фотографії отриманих зразків представлені на Рис. 4.6.

Зразки були досліджені на атомно-силовому мікроскопі. У процесі досліджень вимірювалася товщина і шорсткість покриття.

Результати вимірювання представлені в Табл. 4.2.



а)

б)

а - режим напилення А; б - режим напилення Б

Рис. 4.6. Зовнішній вигляд зразків з нанесеним адгезійним підслоєм

Як видно з Табл., в експериментах кут нахилу зразка по відношенню до мішені мало впливає на товщину отриманого тонкопленочного покриття. Це підтверджує припущення про те, що формування покриття відбувається в хмарі молекул розпорошеного матеріалу, в режимі дифузного розсіяння.

Однак, результати вимірювання шорсткості покриттів показали високий вплив положення підкладки щодо мішені на шорсткість покриття. Найбільшу шорсткість мають зразки, отримані при куті нахилу щодо мішені рівному 30 °, найменше значення шорсткості показали зразки, отримані при куті нахилу рівному 180 °, тобто паралельні мішені[70].

Залежність шорсткості плівки від кута нахилу показана на рис. 4.7.

Результати визначення товщини і шорсткості адгезійного підшару

Таблиця 4.2

№ режима	№ зразка	Кут нахилу зразка, °	Товщина покриття, мкм	Шорховатість Ra, нм
А	1	180	1,32	1,257
	2	60	1,46	3,348
	3	30	1,57	3,650
	4	90	1,19	1,112
	5	30	1,39	9,471
	6	60	1,34	4,768
	7	180	1,33	1,717
Б	1	180	1,42	2,896
	2	60	1,36	5,432
	3	30	1,22	6,762
	4	90	1,29	1,026
	5	30	1,51	10,130
	6	60	1,46	4,325
	7	180	1,34	1,122

Отримані в процесі нанесення зразки були досліджені за допомогою методу сітчастих надрізів. Зовнішній вигляд покриттів, отриманий за допомогою мікроскопа, показаний в Табл. 4.3.

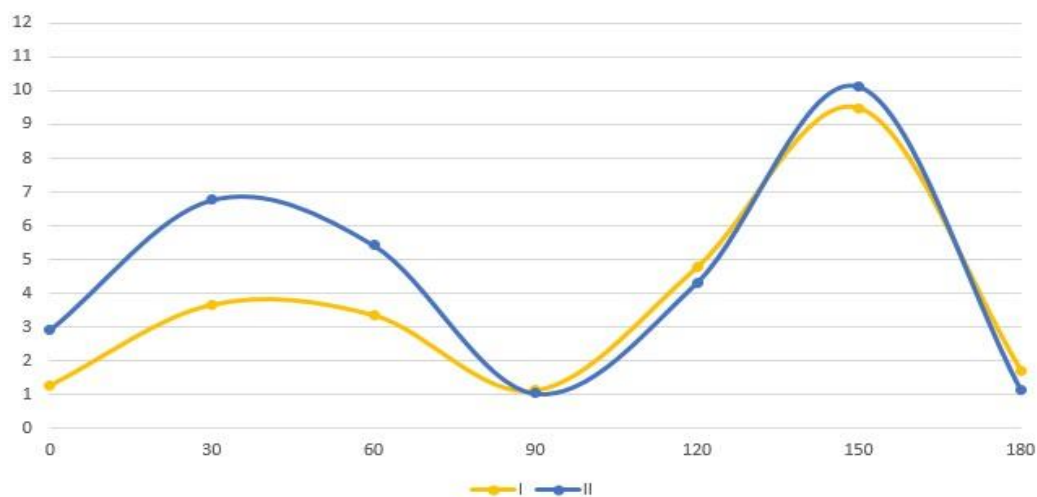







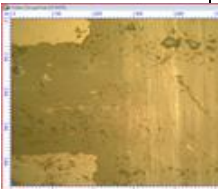


Рис. 4.7. Залежність шорсткості зразків від кута нахилу щодо мішені магнетронній розпилювальної системи

Зовнішній вигляд адгезійного підшару після нанесення і після проведення випробувань за методом сітчастих надрізів

Таблиця 4.3.

Положення підкладки (відстань до мішені/мм, Кут)	Вид покриття після нанесення	Вид покриття після випробувань
60/90°		
75/30°		
90/60°		

110/180°		
----------	--	---

Покриття, отримані в дуже близько від мішені, показали низьку стійкість. Пошкодження на них видно ще до проведення випробувань. Швидше за все, це пов'язано з температурним впливом, якому піддається плівка в процесі росту.

Найкращий результат показали покриття, отримані під кутами 60° і 180° по відношенню до мішені. Вимірювання шорсткості показало, що найменшу шорсткість покриття мали зразки, отримані під кутом 30 ° і 60 °. Однак, зі збільшенням відстані від підкладки до мішені різко падає швидкість росту покриття.









Після нанесення на адгезійний підшар основного шару міді були проведені повторні випробування за методом сітчастих надрізів. Зовнішній вигляд зразків наведено в табл. 4.4.

Як і в попередньому випадку покриття, в яких адгезійний підшар був отриманий в безпосередній близькості від мішені, показали низьку стійкість. Пошкодження на них видно ще до проведення випробувань. Швидше за все, це пов'язано з температурним впливом, якому піддається плівка в процесі росту.

Найкращий результат показали покриття, отримані під кутами 60 ° і 180 ° по відношенню до мішені. Вимірювання шорсткості показало, що найменшу шорсткість покриття мали зразки, отримані під кутом 30 ° і 60 °. Однак, зі збільшенням відстані від підкладки до мішені різко падає швидкість росту покриття.

Зовнішній вигляд основного шару після нанесення і після проведення випробувань за методом сітчастих надрізів

Таблиця 4.4

Положення підкладки (відстань мішені/мм, Кут)	Вид покриття після нанесення	Вид покриття після випробувань
60/90°		
75/30°		
90/60°		
110/180°		

Висновки до четвертого розділу

1. Температурний вплив від гарячої мішені на підкладку може призводити до руйнування підкладки під час формування покриття. Для зниження температурного впливу можна змінювати кут розташування підкладки щодо мішені. При підібраних режимах це не призводить до зниження швидкості росту плівки.

2. Кут розташування підкладки щодо магнетронної розпилювальної системи істотно впливає на шорсткість одержуваного покриття і його адгезійну міцність.

РОЗДІЛ 5. ПРОПОЗИЦІЯ ДО СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап — це нещодавно створена компанія, яка знаходиться лише на стадії розвитку, але має інноваційні ідеї. Саме ці нововведення допоможуть перевершити конкурентів та вийти на ринок з новим продуктом, послугою.

Основна особливість стартапів – недостатність фінансів, пошук інвесторів та відношення не тільки до ІТ-сфери, а і до будь-якої області ринку.

У даному розділі описано стартап-проект, що відповідає виконаній задачі магістерської дисертації.

5.1. Опис ідеї проекту

В даному розділі приведений аналіз стартап-проекту, метою якого є можливість виходу продукту на ринок і здійснювати конкуренцію між продуктами, які відіграють важливе місце у продажі. Згідно методики була проведена розробка стартапу та приведений аналіз усіх важливих аспектів.

У табл. 5.1 описано зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1

Опис ідеї стартап проекту		
Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Установки для відпрацювання технології формування металевих покриттів	Авіабудування	Покращення надійності
	Машинобудування	Підвищення довговічності
	Судові головні силові та допоміжні силові установки	1. Підвищення надійності роботи 2. Безпечність в роботі

Отже, пропонується налагодження виробництва установки для відпрацювання технології формування металевих покриттів, які дозволять покращити довговічність, безпечність роботи та економічність силової

електроніки в різних галузях. Більш є поширеною в таких галузях як промислове будівництво та машинобудування, судові головні силові та допоміжні установки, і сільськогосподарська техніка та військові розробки. [67]

Таблиця 5.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

п/п	Техніко-економічні характеристики та ідеї	товари/концепції конкурентів (потенційні)			V	N	S
		Запропонований проект	Конкурент «Edwards»	Конкурент «Плакарт»			
	Торгівельна марка	немає	є	є	+		
	Показники скорочення часу	Висока	Низька	Середня			+
	Показники оптимізованого використання робочих центрів	Висока	Висока	Середня			+
	Патенти на продукти	немає	є	немає		+	
	Економічність	Середня ціна	Висока ціна	Низька ціна		+	

Проаналізовано техніко-економічні характеристики ідеї стартап проекту: торгівельна марка, показники скорочення часу, показники оптимізованого використання робочих центрів, патенти на продукти, економічність.

Після порівняння характеристик проекту з конкурентами визначено перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару, що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (методика розрахунків), за допомогою яких можна реалізувати ідею створення проекту.

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п / п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Оптимізація роботи робочих центрів	Технологія планування виробництва	Наявні	не доступні
2	Швидка зміна пріоритетів виготовлення	Технологія планування виробництва	Не наявні	не доступні
3	Легка адаптивність до зміни виробів	Технологія планування виробництва	Наявні	не доступні
Обрана технологія реалізації ідеї стартапу: вдосконалення існуючого датчику тиску шляхом впровадження технології брегівських ґраток				

Отже, можна зробити такий висновок, що проект можливо реалізувати, так як наявна ідея повинна допомогти підвищити адгезію методом тонкоплівкового нанесення на підкладку. Розроблена установка є повністю інноваційним проектом та має високу надійність і точність в роботі.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначаємо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які при будь-яких обставин перешкоджають його реалізації.

Ринок характеризується важливим аспектом, який полягає у місткості – максимально можливий обсяг продажів первинного продукту протягом певного часу. Він виражається в натуральних або вартісних одиницях.

Для цього необхідно визначити особливості і перспективи розвитку попиту на конкретні товари, слабкі і сильні сторони. На основі вище сказаного вже можливо розроблювати подальшу стратегію та тактику маркетингу.

У табл. 5.4 проведений аналіз характеристики потенційного ринку стартап-проекту, тому можна зробити такий загальний висновок, що ринок має зростаючу динаміку (якісну оцінку) і хороший попит на запропонований в даній роботі продукт. [67]

Таблиця 5.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	70000-84000 грн/ум.о
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростаюча
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція зарубіжних фірм
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги до ГОСТ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	67%

Даний проект є конкурентоспроможним.

Наступним кроком буде визначення потенційних груп клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

п/п	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару	Потреба, що формує ринок
1	Заводи, наукові комплекси, машинобудівні компанії, авіакомпанії, високоточне будівництво.	Основним фактором є правильно підібраний перетворювач для того, щоб не призвело до непоправних наслідків.	Висока якість, висока точність результатів вимірювання, оптимальне співвідношення ціни та якості, наявність сервісного обслуговування.	1. Створення зручного використання приладу для вимірювання тиску в промислових масштабах 2. Забезпечити усі умови щодо точності вимірювань

Силові модулі використовуються тільки на крупних підприємствах отже інвестором модуть буди навіть державні замовлення.

У табл. 5.6 показано фактори загроз.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Зменшення продажу	Рекламні акції, знижки
2	Старіння	Поява нової продукції	Моніторинг трендів
3	Відсутність надійних постачальників високоякісного обладнання	Зменшення продажу	Пошуки постачальників закордоном
4	Криза	Зменшення продажу	Зменшення ціни товару та пошук нових партнерів
5	Технічний	Недостатня кількість фахівців	Впровадження постійної підтримки кваліфікованих спеціалістів

У табл. 5.7 бачимо визначення основних факторів можливостей, які спричиняють ринкове впровадження нашого стартап-проекту (вихід на нові ринки, впровадження нових технологій, поліпшення та удосконалення системи безпеки, політико-правові і економічні). [67]

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Вихід на нові ринки	Збільшення товарообігу	Підвищення попиту, розробка нових ідей
2	Впровадження нових технологій на ринку	Якісне покращення головних параметрів продукту	Підвищення попиту, розробка нових ідей
3	Поліпшення та удосконалення системи безпеки	Покращення умов використання та зберігання	Збільшення ціни та попиту, наукове дослідження
4	Політико правові	Покращення умов використання та зберігання	Зміна напрямку імпорту
5	Економічні	Підтримка інноваційного виробництва Якісне покращення основних параметрів продукту	Підвищення попиту та ціни на продук

У табл. 5.8 бачимо, що факторами конкурентоспроможності є використання високотехнологічного обладнання, висока надійність роботи

приладу, якість продукту, висока точність результатів вимірювання, простота реалізації.

Таблиця 5.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Використання високотехнологічного обладнання	Точність параметрів тестування та достовірність отриманих результатів, яка підтверджується якісними математичними розрахунками
2	Висока надійність роботи приладу	Гарантія правильної роботи обладнання
3	Якість продукту	Малі габарити та застосування нових технологій в розробці продукту
4	Висока точність результатів вимірювання	Достовірність отриманих результатів, мала похибка вимірювання
5	Простота реалізації	Забезпечується використанням існуючих методів вимірювання

Привели чотири фактори конкурентоспроможності: висока якість і прогнозованість виконання замовлення, оптимальне співвідношення ціни та якості, індивідуальний підхід, новизна.

Наступним кроком розробка SWOT- аналіз стартап-проекту у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Використання високотехнологічного обладнання; 1. Висока надійність роботи приладу; 2. Краща якість продукту; 3. Висока точність результатів вимірювання.	Слабкі сторони: 1. Висока собівартість кінцевого продукту; 2. Конкуренція. 3. Якщо висока ціна за продукт, то клієнт обирає більш дешевше, що спричиняє втрату потенційного заробітку.
Можливості: 1. Можливість розширення ринку; 2. Вихід на нові ринки; 3. Збільшення продаж; 4. Поліпшення характеристик системи.	Загрози: 1. Посилення конкуренції на ринку; 2. Криза; 3. Відсутність надійних постачальників високоякісного обладнання.

Описані такі альтернативи ґрунтуються на основі строків і ймовірності отримання певних ресурсів.

Таблиця 5.10 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний	Ймовірність	Строки реалізації
---	---------------------------	-------------	-------------------

п/п	комплекс заходів) ринкової поведінки)	отримання ресурсів	
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз завдяки сильним сторонам проекту	Велика	10 місяців
2	Стратегія компенсації слабких сторін проекту завдяки наявним ринковим можливостям	Велика	1 рік і 5 місяців

Був проведений аналіз розроблених альтернатив ринкового впровадження показує найкращу альтернативу з найбільшою ймовірністю отримання ресурсів, а також, яка є швидкою у виведенні на ринок. Тому визначаємо стратегію нейтралізації ринкових загроз завдяки сильним сторонам стартапу наявних ринкових можливостей.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.11 Вибір цільових груп потенційних споживачів

п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Приватні підприємства	Готові	Високий	Висока	+
2	Державні підприємства	Готові	Високий	Висока	+
Які цільові групи обрано: приватні та державні підприємства.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів обрано цільові групи, для яких запропонуємо свій проект для удосконалення робочих центрів та визначена стратегія охоплення ринку – диференційована група маркетингу, так як проводиться робота із одним сегментом і для нього розробляють конкретну програму ринкового впливу. Але додатково формулюють базову стратегію розвитку для роботи в обраному сегменті.

Таблиця 5.12 Визначення стратегії розвитку

п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?
	Удосконалення характеристик датчика	Оптимальне співвідношення ціна-якість, якісне обладнання, високоточні технології	Стартап не є «першопрохідцем»	У компанії майже не буде схожості з конкурентами, але можливий збіг датчиків, які використовують ся для вимірювання	Компанія шукатиме нових споживачів

Таблиця 5.13 Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартаппроєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока точність і оптимізація	Удосконалення та диференціація	Оптимальне співвідношення ціни та якості	Надійність, якість, висока точність, своєчасне виконання

Вимогами до товару цільової аудиторії є висока надійність, точність, покращення тепловідводу та адгезії покриттів.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка та обґрунтування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У табл. 5.14 підсумуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару. [67]

Таблиця 5.14 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Розробка виробів у термін, точність, захист від вибухів, якість та мобільність	Виконання всіх завдань, забезпечення достовірності результатів вимірювання, безпечна система складання, якісні матеріали та зручність в роботі	Вдосконалення системи, постійна технічна підтримка, вибір та закупівля високотехнологічного обладнання та якісних матеріалів, мобільність конструкції

У табл. 5.15 приведені ринкові ціни на товари замітники, товари аналоги, рівень доходів цільової групи споживачів. У результаті отримуємо дані верхньої та нижньої межі ціни на товар/послугу. [67]

Таблиця 5.15 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	100000 грн	85000 грн	55 тис. – 150 тис. грн

Для подальшого аналізу необхідно визначити збут підприємством свого товару.

Таблиця 5.16 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звична модифікована купівля, орієнтація на регулярне замовлення поставок	Встановлення та налаштування, встановлення контактів із споживачами, зменшення витрат	Канал нульового рівня	Власна система збуту. Виробник продає продукт клієнту, використовуючи такі способи: <ul style="list-style-type: none"> • торгівля через магазини; • торгівля через будівельні підприємства.

Наступним кроком визначення концепції маркетингових комунікацій у табл. 5.17.

Таблиця 5.17 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтація на регулярне замовлення поставок	Формальні/неформальні канали комунікації	Висока точність виміру, доступність клієнтам, мобільність конструкції	Інформування споживачів, розвиток попиту, стимулювання продажу, пошук вигідних партнерів	Даний прилад є абсолютно безпечним та унікальним

Висновки до п'ятого розділу

У данному розділі були розроблені пропозиції до стартап проекту відповідно до теми магістерської дисертації «Технологія формування покриттів і силових модулів». Потрібно зосередити більше увагу на пошуку партнерів серед державних закладів які займаються виготовленням модулів силової електроніки .

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Було визначено, що найбільш перспективним методом для отримання покриттів в силових електронних модулях і електровакуумних приладах є використання вакуумних методів, таких як магнетронного розпилення і термічне випаровування. Для збільшення швидкості нанесення покриттів можливе використання зазначених методів у поєднанні з методом парострумінного осадження.

2. Використання магнетронних розпилювальних систем з гарячою мішенню може призводити до руйнування підкладки на початковій стадії формування покриття.

3. Шорсткість адгезійного підшару титану впливає на адгезійну міцність струмопровідного шару міді на підкладці оксиду алюмінію. Мінімальні значення шорсткості $R_a < 2,0$ мкм, необхідні для досягнення максимальних значень адгезійної міцності до 60 МПа, можуть бути отримані при розташуванні підкладки щодо магнетронній розпилювальної системи під кутом 90° і 180° при відстані від мішені до підкладки від 25 до 60 мм.

4. Використання розробленої лабораторної установки формування покриттів дозволяє проводити відпрацювання технології формування двошарових покриттів в єдиному вакуумному циклі. Модульна конструкція установки забезпечує мобільність і дозволяється легко розширювати склад технологічних методів під час досліджень.

5. Установка може бути використана для проведення досліджень і в навчальному процесі при підготовці фахівців за напрямками «Електроніка та наноелектроніка» і «наноінженерії».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баданова Н.В., Колесник Л. Л. Способ металлизации керамических подложек. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской науднотехнической конференци «Студенческая весна 2014: Машиностроительные технології».– М.: МГТУ им. Н.Э Баумана. URL: http://studvesna.ru/db_files/articles/1340/article.pdf (дата звернення:18.06.2015) 2. Блинов И.Г., Кожитов Л.В. Оборудование полупроводникового производства : Учебное пособие для студентов вузов. М. : Машиностроение. 1986. 264 с.
3. Вакуумная техника: Справочник (3-е изд.)/ К.Е. Демихов [и др.]; Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова., перераб. И доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
4. Вакуумное оборудование тонкоплівкової технології производства изделий электронной техники : Учебник для студентов специальности «Электронное машиностроение». В 2 т.т. / Н.В. Василенко [и др.]. Красноярск. Сиб. аэрокосм. акад. : Кн. изд-во, 1996. Т. 1. 256 с.
5. Вакуумное оборудование тонкоплівкової технології производства изделий электронной техники : Учебник для студентов специальности «Электронное машиностроение». В 2 т.т. / Н.В. Василенко [и др.]. Красноярск. Сиб. аэрокосм. акад. : Кн. изд-во, 1996. Т. 2. 416 с.
6. Волчкевич Л.И. Автоматизация производства электронной техники : Учебное пособие. М. : Высшая школа. 1988. 287 с.
7. Волчкевич Л.И. Надежность автоматических линий. М. : Машиностроение. 1969. 309 с.
8. Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование магнетронных систем ионного розпилення материалов. Электронная техника. Сер. Микроэлектронника, 1977. Вып. 3 (69). С. 37 – 44.

9. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы.

М. : Радио и связь. 1982 г. 72 с.

10. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М. : Издательство «Мир», 1964. 715 с.

11. Деулин Е.А. Методические указания для выполнения домашнего задания и курсовых проектов по курсу «Основы вакуумной технологии». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 29 с.

12. Карпенко А.Ю., Батулин В.А. Источники кластерного пучка. Часть 1. Методы получения кластерных пучков // Журнал нано и электронной физики 2012. Том 4, № 3. С. 1–13

13. Карпенко А.Ю., Батулин В.А. Источники кластерного пучка. Часть 2. Формирование кластерных пучков в сопловых джерелах // Журнал нано и электронной физики 2012. Том 4, № 4. С. 1–15

14. Ковалев Л.К. Вакуумное оборудование для производства тонкопленочных структур квантовой электроники // Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1982. Вып. 2 (866). С. 83.

15. Ковалев Л.К. Особенности создания вакуумного оборудования гибкой производственной системы для изделий микроэлектроники // Электронная промышленность. 1988. Вып. 1. С. 3-14.

16. Ковалев Л.К. Расчет конструкций камер напылительных установок методами математического моделирования // Электронная техника. Сер.

10. Квантовая электроника. 1975. Вып. 1. С. 42-53.

17. Колесник Л.Л., Деев В.А., Селезнев А.В. Анализ возможности использования метода пароструминного осаждения для металлизации подложек // Вакуумная наука и техника: Материалы XX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, 2013. С. 165-167.

18. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг. Анализ возможностей применения кластерных ионов для обработки поверхности // Вакуумная наука и техника. Тезисы докладов XXII научно технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, 2015. С. 191-195.

19. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зао Пхо Аунг Возможность использования ионных кластеров для обработки поверхности // Вакуумная техника, материалы и технология. Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции, Москва, 2016. С. 28-33.

20. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг. Лабораторная установка для исследования свойств ионных кластеров // Вакуумная наука и техника. Материалы XXIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, (12-16 сентября) 2016. С. 111115.

21. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг, Мьо хв Латт. Отработка технології металлизации керамических подложек двумя методами // Вакуумная техника, материалы и технология. Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции, Москва, (11-13 апреля) 2017. С. 109-112.

22. Отработка технології металлизации алюмооксидной керамики для элементов электровакуумных приборов и устройств силовой электроники / Колесник Л.Л. [и др.] // Вакуумная техника и технології – 2017: Труды 24-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Под. ред. д-ра техн. наук А.А. Лисенкова. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 208-210.

23. Повышение адгезии токопроводящих покрытий на подложках оксида алюминія / Колесник Л.Л. [и др.] // Вакуумная наука и техника. Тезисы докладов XXIV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, 16-23 сентября 2017 г. С. 176-179.

24. Влияние технологического развития на повышение адгезионной прочности металлических тонкопленочных покрытий на керамические

підкладки оксида алюмінія/ Колесник Л.Л. [и др.] // Вакуумная наука и техника. Материалы XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, (15-22 сентября) 2018. С. 138-144.

25. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг. Повышение адгезії токопроводящих покрытий на керамических подложках оксида алюмінія // Нано-индустрия. Научно-технический журнал. 2018, Том 11 № 34 (83) С. 232-236.

26. Кострижицкий, А.И. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А.И. Кострижицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабаниченко и др. – М.: Машиностроение, 1991. 176 с.

27. Красов В.Г., Петраускас Г.Б., Чернозубов Ю.С. Толстопленочная технология в СВЧ микроэлектронике // М. : Радио и связь. 1985 г. 120 с.

28. Кузнецов М.М., Волчкевич Л.И., Замчалов Ю.П. Автоматизация производственных процессов. М. : Высшая школа. 1978. 431 с.

29. Куркин В.И. Основы расчета и конструирования оборудования электровакуумного производства : Учебное пособие. М. : Высшая школа. 1971. 544 с.

30. Марахтанов М.К. Ионные распылительные установки (Основы теории и расчета) : Учебное пособие по курсу «Конструирование и расчет установок ионного напыления». М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1990. 28 с.

31. Марахтанов М.К. Магнетронные системы ионного розпилення (Основы теории и расчета). М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1990. 76 с.

32. Мьо Чжо Хлаинг дисертація "Повышение адгезии покрытий при металлизации керамических подложек" Москва – 2018г. URL: <http://195.19.40.226/dissertations/var/www>

33. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Анросов А.В. Методы расчета вакуумных систем. М. : Издательство МЭИ. 2004. 220 с.

34. Оборудование полупроводникового производства / П.Н. Масленников [и др.]. М. : Радио и связь, 1981. 336 с.
35. Панфилов Ю.В. Расчёт режимов процесса нанесения тонких плёнок в вакууме и параметров оборудования. М. : Издательство МВТУ им Н.Э. Баумана. 1988. 16 с.
36. Панфилов Ю.В., Рябов В.Т., Цветков Ю.Б. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные роботы : Учебное пособие. М. : Радио и Связь. 1988. 320 с.
37. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1970. 505 с.
38. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии : Учебное пособие . М. : Высшая школа. 1988. 255 с.
39. Проников А.С. Надежность машин. М. : Машиностроение. 1978. 592 с.
40. Разработка технологии изготовления металлизированных подложек для изделий силовой электроники. Ю. Непочатов [и др.]. Современная электроника. № 9, 2010. С. 248-260
41. Реестр инновационных продуктов, технологий и услуг, рекомендованных к использованию в Российской Федерации, Керамические подкладки и корпуса светодиодов, ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" URL: <http://innoprod.startbase.ru/products/23652/> (дата звернення:07.05.2019).
42. Терентьев Ю.П., Ковалев Л.К., Суворов В.Н., Макаров В.И. Установка ионно-плазменного розпилення материалов // Оптико-механическая промышленность. 1972. № 5. С. 23-25.
43. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Ред. совет: К.В. Фролов [и др.] // Машиностроение. Энциклопедия. М. : Машиностроение 2000. Т. III 8. 744 с.
44. Технологическое оборудование для микроэлектроники, URL: <http://equip.eltech.com/catalog/5898> (дата звернення:07.05.15)

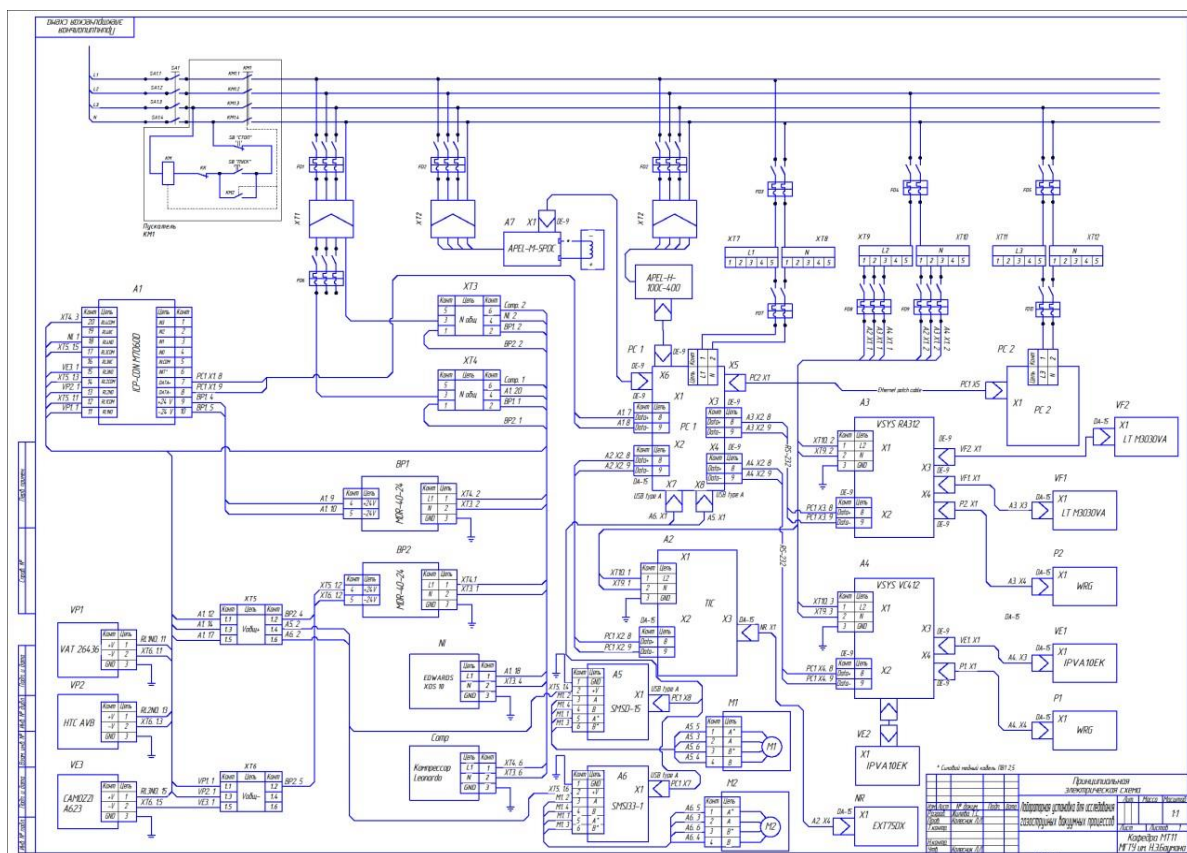
45. Технология тонких пленок (справочник) / Под. ред. Л. Майссела, Р. Гленга. Нью-Йорк. 1970. Пер. с англ. Под. ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М. : Советское радио. 1977. Т. 1. 664 с.
46. Технология тонких пленок (справочник) / Под. ред. Л. Майссела, Р. Гленга. Нью-Йорк. 1970. Пер. с англ. Под. ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М. : Советское радио. 1977. Т. 2. 768 с.
47. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов/ Известия вузов. Электроника. 2008. №5. С. 25–32.
48. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках// Известия вузов. Электроника. 2007. №6. С. 25–32.
49. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Изменение типа резонансного отражения электромагнитного излучения в структурах нанометровая металлическая плівка – диэлектрик// Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, Вып. 2, С. 13–22.
50. Устройства силовой электроники, развитие, применение, назначения // URL: <http://pue8.ru/silovaya-elektronika/92-silovaya-elektronika-vsovremennom-mire.html> (дата звернення:05.07.19)
51. Флоренцев С.. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // СТА. Научно-технический журнал – 2004. №2. – С. 20-30.
52. Хруничев Ю.А. Анализ производительности оборудования для производства электронных приборов // Электровакуумное машиностроение. 1978. Вып. 2. С. 46-71.
53. Целевые механизмы вакуумного технологического оборудования. Атлас типовых конструкций. Под ред. Ю.В. Панфилова; М, изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 1998. 36 с.

54. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M.Martin. - 3rd ed. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – xviii, 912 p.: ill. – Bibliogr. at the end of the chapters. – Ind.: P. 902-912.
55. High-Thermal Conductivity AlN Packages for High-Temperature Electronics., E.Savrun, QUEST Integrated, Inc., USA, 1995. 102 p.
56. Kolesnik L., Zhuleva T., Predtechenskiy P., Myo Kyaw Hlaing and Zaw Phyو Aung. Processing of metallization technology aluminum oxide ceramics for electro-vacuum devices elements and power electronics de-vices / Journal of Physics: Conference Series, Volume 872, conference 1 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/872/1/012018>(дата звернення:01.01.2019)
57. Kolesnik L., Myo Kyaw Hlaing and Zaw Phyо Aung. Influence of the technological development on the adhesion increment of metallic thin film coatings to ceramic substrates of aluminum oxide / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 387, conference 1 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/387/1/012037>(дата звернення:16.10.2018)
58. N. Singh, R. Kist, H. Thiemann. Experimental and numerical studies on potential distributions in a plasma. Pl. Phys., vol. 22, 1980, P. 695 – 707.
59. S. Maniv. Generalization of the model for I – V characteristics of dc sputtering discharges. J. Appl. Phys. vol. 59, n. 1, January 1986, P. 66 – 70.
60. W. D. Westwood, S. Maniv. The current – voltage characteristic of magnetron sputtering systems. J. Appl. Phys. vol. 54, n. 12, December 1983, P. 6841 – 6846. 45. J. G. Kirk, D. J. Galloway. The evolution of a test particle distribution in a strongly magnetized plasma. Pl. Phys., vol. 24. n. 4, 1982, P. 339 – 359.
61. Halpern B. L. Electron Jet Vapor Deposition System. US. Patent 5571332 1996.

62. Schmitt J. J. Method and apparatus for the deposition of solid films of a material from a jet stream entraining the gaseous phase of said material. U.S. Patent No. 4,788,082 (11/29/1988)
63. Halpern B. L. Fast flow deposition of metal atoms on liquid surfaces. J. Colloid Interface Sci. 86:337. 1982. P. 337-343.
64. Schmitt J. J. Jet vapour deposition of single and multicomponent thin films. U.S. Patent No. 4,788,082 (11/29/1988).
65. T Zhang, J. Z., and Di, Y., Proceedings of 35th Annual Technical Conference, Society of Vacuum Coaters (March 22-27, 1992). P. 881-900.
66. Halpern B. L., Schmitt, J. J., Di, Y., Golz, J. W., Johnson, D. L., McAvoy, D. T., Wang, D., and Zhang, J. Z., Metal Finishing, (December 1992). P. 37-41.
67. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій з курсу Розроблення стартап-проекту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Київ - 2016.
68. Касяненко В. В. Дипломний проект «Покращення тепловідводу від потужних мікроелектронних пристроїв» Київ -2019
69. Касяненко В. В., Кузьмичев А. І. Способи металізації кераміки, використовувані при виробництві силових електронних модулів і електровакуумних приладів <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.15.12.html> (дата звернення: 09.12.2020) DOI 10.36074/2663-4139.15.06.
70. Касяненко В. В., Кузьмичев А. І. « Адгезійна міцність двошарових металевих покриттів на підкладках оксиду алюмінію» East European Science Journal 11№63, 2020г. Дата виходу журналу 15.12.2020г.

ДОДАТКИ

Додаток А.



ABSTRACT

Power electronics modules are used in technical fields related to the need to transmit high-precision signals. Areas of application of these modules are navigation systems in aviation, elements of switching of power circuits and other highly loaded connections. The main unit of the module is a ceramic substrate, on which conductive tracks are formed and components of power electronics are mounted. The switchboard is a ready substrate.

The main functions performed by the switching board:

- dielectric basis of the printed circuit, which is formed on one or two sides;
- heat dissipation from crystals and circuit elements.

Non-hygroscopic and heat-resistant ceramics were used for the production of substrates, they are an insulating material with rather high mechanical and dielectric properties. Easy to manufacture and not expensive. For the manufacture of power modules you need to use ceramic substrates of aluminum oxide or nitride with a multilayer coating whose thickness is from a few microns to several tens of microns (depending on the application), which provides the desired quality of adhesion of the coating to ceramics and applied on one or both sides ceramic plate.

The main requirements for the finished product are the minimum size and low cost of materials and production process. In addition, high performance, environmental resistance and reliability are crucial factors. The design of the finished module must provide minimum values of transient thermal resistances, distributed inductance of power busbars, high insulation voltage.

The adhesion of the coating depends on several factors: coating technology, film materials and substrate; usually decreases during operation of the finished installation. During operation, the power modules are exposed to temperature and mechanical influences, including vibration. Subsequently, the components fail due to overheating and mechanical damage to the installation. The gaps occur in the structure of the substrate on which the coating is made. Usually the reason for

such destruction is the weak adhesive strength of the metal film with a ceramic base.

S. Flyurentsev (analysis of the current state and forecast of power electronics devices), Yu. Nepochatov (development of technology for manufacturing metallized substrates for power electronics products), V.K. Egorsha (formation of metal-ceramic compounds). Yu. V. Panfilov (studying the technology of forming thin-film coatings), V.V. Odinokov (vacuum metallization technologies), MK Marakhtanov (formation of thin-film coatings by magnetron sputtering). However, to date, the issues of using thin-film technologies on ceramic substrates in the production of high-power power modules remain unresolved.

Actuality of theme. At present, the production of power modules by the industry for metallization uses atmospheric thick-film technologies, such as annealing paste, Direct Bonding Coating (DBC), Direct Plated Coating (DPC), cold gas-dynamic application. The transition to thin-film technologies such as thermal evaporation and magnetron sputtering will allow to obtain stable quality coatings and reproducibility of results when obtaining them. Due to this, there is a need to obtain conductive coatings on ceramic substrates, which are used for the production of power modules, by methods of thin-film technology. However, for thin-film technologies, the issues of obtaining stable values of adhesive strength on ceramic substrates have not been resolved so far, which hinders their introduction into the production of power electronics and electrovacuum devices.

Connection of work with scientific programs, plans, topics. The master's dissertation is a continuation of the diploma project of the educational qualification level "Bachelor" on the topic: Improving heat dissipation from powerful microelectronic devices [68]. The dissertation was prepared in accordance with the research plan of the Department of Electronics of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky".

The purpose and objectives of research. Increasing the adhesive strength of coatings during metallization by thin-film technology of ceramic substrates used for the manufacture of power electronics devices and electrovacuum devices.

Research methods:

1. Based on the analysis of existing requirements for power electronics devices by electrovacuum devices, as well as methods of obtaining metal coatings, to determine the requirements for materials and technology of metallization of ceramic surfaces.

2. To develop a laboratory installation for research of coating processes on ceramic substrates.