

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Застосування технології ALD для покращення емісійних властивостей  
елементів мікроканальних пластин

(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1  
Мохонько Л.В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна  
техніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Мікро та наноелектроніка»

(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. МЕЕПП Бендеберя Г. М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
 Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
 Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна техніка»  
(код і повна назва)  
 Тип програми освітньо-професійна  
 Освітня програма «Мікро та наноелектроніка»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Мохоньку Леоніду Віталійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування технології ALD для покращення емісійних властивостей елементів мікроканальних пластин

затверджена наказом університету від 26 травня 2025 р. № 414Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Призначення, сучасний стан МКП, 2. Загальні принципи методу ALD. 3. Метод ALD у технології МКП

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Призначення, сучасний стан

МКП

2 Загальні принципи методу ALD

3 . Метод ALD у технології МКП

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

1. Презентація – 11 слайдів.

---

---

---

---

---

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	26.05.2025	
2	Призначення, сучасний стан МКП	27.06.2025	
3	Загальні принципи методу ALD	30.05.2025	
4	Метод ALD у технології МКП	03.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	06.06.2025	5
6	Рецензування, нормоконтроль	09.06.2025	
7	Захист роботи	16.06.2025	

Дата видачі завдання 26 травня 2025 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ст. викладач Бендеберя Г.М. \_\_\_\_\_  
(підпис) (посада, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 45 сторінок, 14 рисунків, 6 джерел посилання, 2 додатки.

ВТОРИННА ЕМІСИЯ, ЕМІСІЙНИЙ ШАР, МКП, ТЕХНОЛОГІЯ, ALD, ПНБ

Мета роботи – дослідження розвитку технологічних рішень щодо створення пристроїв на основі мікроканальних пластин (МКП) для , на яких базуються пристрої для детектування слабких сигналів випромінювання, або часток (електронів, іонів).

Об'єкт дослідження – сучасні технології створення МКП

Метод дослідження – аналіз літературних джерел та інтернет ресурсів.

Актуальність роботи пов'язана з активним застосуванням приладів на основі МКП у науковому приладобудуванні для дослідження космосу потоків випромінювання слабкої інтенсивності, у військовій справі у приладах нічного бачення. (ПНБ). Необхідність покращення характеристик МКП є важливим технологічним завданням.

В представленій роботі зроблено огляд технологій виготовлення самих МКП, принципів їх конструювання. Основною технологічною проблемою забезпечення високої однорідності функціональних шарів каналів МКП є їх значне аспектне відношення. В роботі розглянута технологія ALD, застосування якої дає можливість подолати цю проблему

Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 45 pages, 14 figures, 6 references, 2 appendices.

SECONDARY EMISSION, EMISSION SHEET, MCP, TECHNOLOGY, ALD, PNB

The purpose of the work is to study the development of technological solutions for creating devices based on microchannel plates (MCPs) for, on which devices for detecting weak radiation signals or particles (electrons, ions) are based.

The object of research is modern technologies for creating MCP

The research method is the analysis of literary sources and Internet resources.

The relevance of the work is associated with the active use of devices based on MCP in scientific instrument-making and space research and low-intensity radiation flows, in military affairs in night vision devices. (NVD). The need to improve the characteristics of MCP is an important technological task.

The presented work reviews the technologies of manufacturing MCPs and the principles of their design. The main technological problem of ensuring high homogeneity of the functional layers of MCP channels is their significant aspect ratio. The work considers the technology ALD, the use of which makes it possible to overcome this problem

The results of the work can be used in the educational process.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ВТОРИНА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ.....	9
2 МКП, СТРУКТУРА, ПРИЗНАЧЕННЯ, СУЧАСНИЙ СТАН.....	12
3 МЕТОД ОСАДЖЕННЯ ПЛІВОК МАТЕРІАЛІВ ALD.....	22
3.1 Основні положення методу ALD.....	22
3.2 Умови самозавершення реакцій ALD.....	26
3.3 Адсорбційна кінетика та фактори, що впливають на насичення.....	27
3.4 Вплив температури на швидкість зростання плівки.....	39
3.5 Застосування методу ALD.....	31
4 ALD У ТЕХНОЛОГІЇ МКП.....	34
ВИСНОВКИ.....	40
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	42
ДОДАТОК А Відомість кваліфікаційної роботи бакалавра.....	44
ДОДАТОК Б Ілюстрації.....	45

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

BE – вторинна електронна емісія;

ЕОП - електронно-оптичний перетворювач;

МКП – мікроканальна пластина;

МН – молекулярне нашаровування;

ПНБ – прилад нічного бачення;

ALD (Atomic layer deposition) – шарове осадження атомів;

CVD (Chemical vapor deposition) – хімічне осадження з парової фази;

МОСVD) – хімічне осадження з парової фази з метал-органічних сполук.

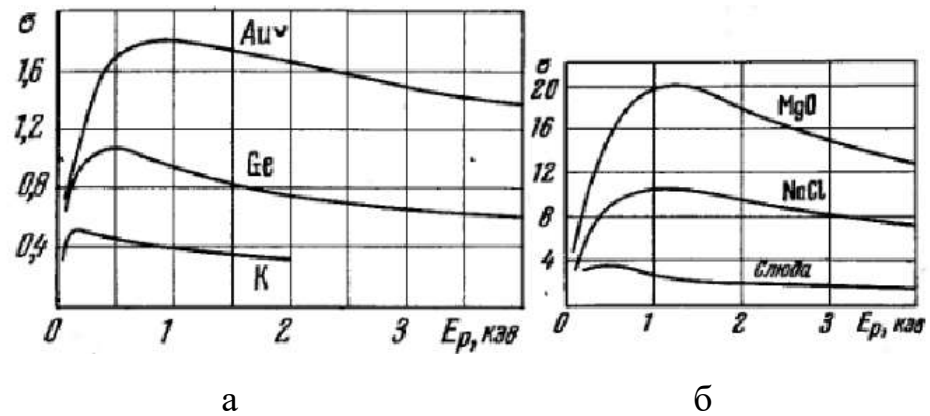
## ВСТУП

Мікроканальні пластини (МКП) є своєрідною компактною матрицею електронних помножувачів. З моменту створення протягом тривалого періоду технологія їх створення спиралася на структури мікроканальних пластин на основі свинцево-силікатного скла і з часом можливість вдосконалення їх характеристик досягла своєї межі. У зв'язку з цим з'явилася потреба застосування нових матеріалів та технологій виготовлення для підвищення коефіцієнта посилення потоку електронів та роздільної здатності матриць. Основним їх застосуванням є посилення або перетворення слабких оптичних сигналів або зображень, створених у різних спектральних діапазонах в оптичний сигнал у видимому діапазоні. наприклад, у приладах нічного бачення. Особливості структури МКП є скляні диски з кількома мільйонами наскрізних отворів і мають розвинену поверхневу структуру ускладнюють застосування звичайних технологій поліпшення їх характеристик. З розвитком технологій мікроелектроніки увагу низки дослідників привернув метод ALD розробки нової технології виготовлення МКП. Було запропоновано розділити функції емісійного шару всередині каналів МКП та резистивних шарів створенням багат шарових покриттів усередині скляної матриці. Метод ALD має унікальну можливість покривати рівномірним тонким шаром поверхню структур, що містять канали, пори і т.д. Такий підхід дозволяє замінити неорганічні стекла на інші матеріали, навіть на полімерні матриці.

## 1 ВТОРИНА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ

Вторинно-електронна емісія (ВЕ) – вихід електронів із поверхні матеріалів під час бомбардування їх потоком електронів (первинними електронами). Вторинний електронний потік складається з електронів, що відбиті поверхнею (пружно і непружно), і власне вторинних електронів – електронів, вибитих з металу, напівпровідника або діелектрика первинними електронами. У досить тонких вторинно-електронних емітерах довжина пробігу первинних електронів може перевищувати товщину емітера. У цьому випадку вторинна електронна емісія спостерігається як з поверхні бомбардування (вторинна електронна емісія на відбиття), так і з протилежної поверхні (вторинна електронна емісія на простріл). Вторинні електрони мають безперервний енергетичний спектр від 0 до енергії первинних електронів. Основною характеристикою вторинно-емісійних властивостей речовини є залежність коефіцієнта ВЕ від енергії  $E_p$  монокінетичного пучка первинних електронів.

Коефіцієнт ВЕ визначається як співвідношення кількості  $N_2$  всіх електронів, що залишають матеріал за час  $t$ , до  $N_1$  первинних електронів, що потрапляють за цей час на поверхню матеріалу, або, що теж саме, співвідношення вторинного струму  $I_2 = eN_2/t$ , де  $e$  – заряд електрона, до первинного струму  $I_1 = eN_1/t$ . Тобто  $\sigma = N_2/N_1 = I_2/I_1$  Коефіцієнт ВЕ – це середня величина результату взаємодії первинного потоку електронів із матеріалом. Приклади залежності  $\sigma(E_p)$  наведено на рис. 1.1 [1]. Для всіх однорідних по глибині плівок матеріалів залежність має один максимум, розташований в області енергій від 0.2 кеВ до 2.5 кеВ. Якщо плівка матеріалу-емітера не однорідна по глибині і складається з шарів з різними вторинно-емісійними властивостями, залежність ( $E_p$ ) може мати ще один максимум (рис. 1.2).



а - матеріал із низьким коефіцієнтом ВЕ; б - матеріал з високим коефіцієнтом ВЕ

Рисунок 1.1 – Залежність  $\sigma(E_p)$  [1]

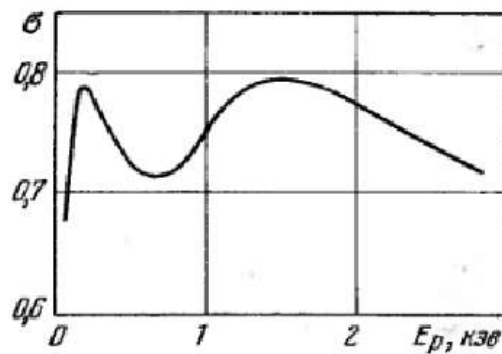
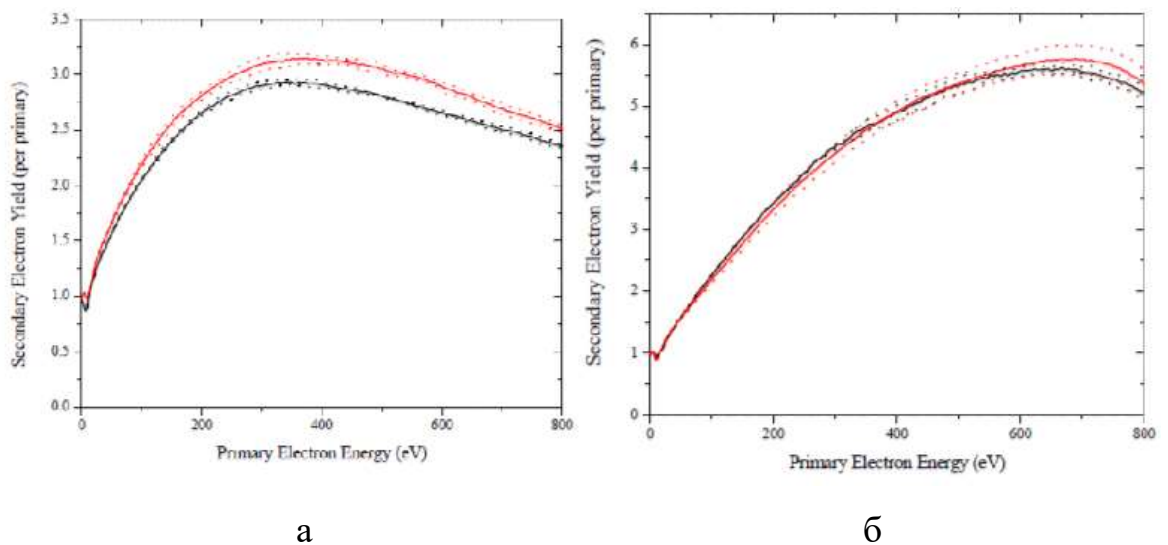


Рисунок 1.2 – Залежність  $\sigma(E_p)$  для емітера, що складається приблизно з 30 атомних шарів берилію на платиновій підкладці [1]

Коефіцієнт ВЕ залежить від природи матеріалу поверхні, енергії часток, що бомбардують, і кута їх падіння на поверхню. У напівпровідниках та діелектриках  $\sigma$  більше, ніж у металів. Це тому, що у металах велика концентрація електронів провідності, тому вторинні електрони, взаємодіють із ними, втрачають енергію і вже неспроможні вийти з металу. У напівпровідниках та діелектриках внаслідок малої концентрації електронів провідності зіткнення вторинних електронів із ними відбуваються суттєво рідше, і можливість виходу вторинних електронів з емітера багаторазово зростає. Механізм пружного відбиття електронів суттєво відрізняється в області малих (від 0 до 100 еВ),

середніх (від  $10^2$  eВ до  $10^3$  eВ) та великих (від  $10^3$  keВ до  $10^5$  keВ) енергій первинних електронів. В діапазоні малих енергій  $E_p$  спостерігається немонотонний перебіг залежності  $\sigma(E_p)$ . Взаємодія електронів з твердим тілом при малих енергіях характеризується іншими закономірностями, ніж в областях середніх енергій. Залежно від матеріалу емітера максимальне значення коефіцієнта ВЕ може бути як менше, так і більше одиниці. Використання явища ВЕ у техніці ґрунтується на застосуванні емітерів, в котрих  $\sigma \gg 1$ . Однак стосовно багатьох приладів ВЕ – явище небажане, і в таких випадках використовують матеріали з  $\sigma < 1$ . У роботі [2] досліджуються діелектричні плівки оксиду алюмінію та магнію на поверхні кремнієвої підкладки щодо коефіцієнта ВЕ. На рис. 1.3 наведено залежність коефіцієнта ВЕ для різних товщин оксиду алюмінію та оксиду магнію.



а - оксиду алюмінію (червона лінія відповідає товщині 11,3 нм, чорна 5,5 нм); б - оксид магнію (червона лінія відповідає товщині 14,4 нм, чорна 7,2 нм)

Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта ВЕ від енергії первинних електронів [2]

Таким чином, при енергіях близьких до 500 еВ вторинна електронна емісія для плівок оксиду магнію приблизно в 2 рази перевищує емісію для плівок оксиду алюмінію, отриманих одним і тим же способом на однакових підкладках.

## 2 МКП, ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЯГНЕННЯ СТРУКТУРА, ПРИЗНАЧЕННЯ

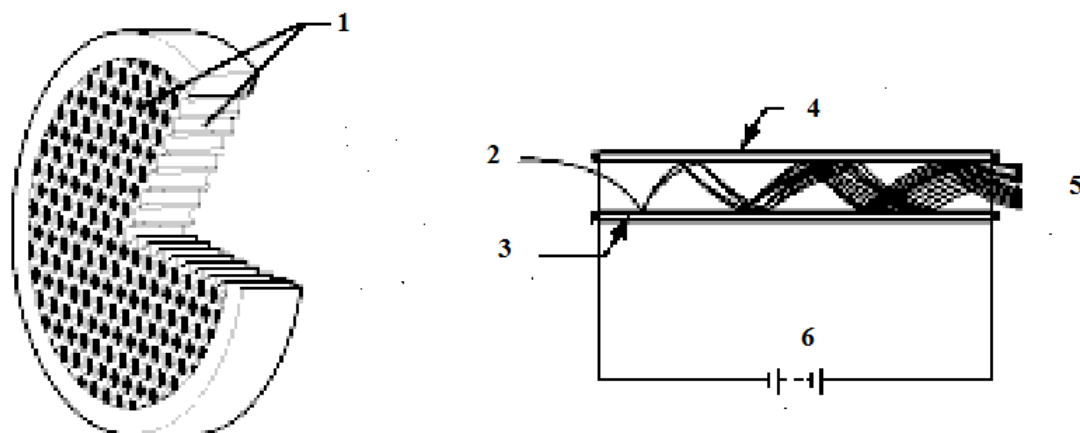
Мікроканальні пластини (МКП) - це вакуумні багатоканальні вторинно-електронні перетворювачі та підсилювачі організованих у просторі потоків заряджених частинок та випромінювань. МКП характеризуються рядом унікальних властивостей: компактність, високе підсилення і просторовий дозвіл, висока швидкодія, самонасичення посилення, мале споживання потужності, тому вони знаходять застосування у різних галузях науки і техніки, особливо в електроніці. [1] Традиційні МКП є гексагонально упаковані структури, утворені великою кількістю спечених скляних трубок (каналів) з внутрішнім діаметром діаметром від одиниць до десятків мікрометрів з внутрішньою провідною поверхнею, що має опір уздовж каналу від 20 до  $10^3$  МОм. МКП є складання великого (кілька мільйонів) кількості каналних електронних помножувачів. Коли електрон, що налітає, потрапляє в канал, з його стінки вибиваються вторинні електрони, які прискорюються електричним полем, створеним напругою прикладеною до кінців резистивного шару каналу. Вторинні електрони летять своїми параболічними траєкторіями, поки не потраплять на стінку, у свою чергу, вибиваючи ще більшу кількість вторинних електронів. Цей процес у міру прольоту вздовж каналу повторюється багаторазово його виході формується електронна лавина. [2] Коефіцієнт посилення МКП  $g$  визначається співвідношенням:

$$g = \exp(\sigma L/d) \quad (2.1)$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт вторинної емісії, який залежить від властивостей матеріалу стінок каналу та прикладеної напруги;

$L$  та  $d$  - відповідно довжина та діаметр каналу.

Аспектне співвідношення  $L/d$  може змінюватись від десяти до сотень. Конструкція та принцип дії МКП представлені на рисунку 2.1.



1 – канали; 2 – електрон на вході каналу; 3 – резистивний шар; 4 – стінка каналу; 5 – лавина електронів на виході каналу; джерело для створення напруженості поля вздовж каналу

Рисунок 2.1 – Конструкція МКП

Матеріалом МКП є свинцево-силікатне скло. В результаті спеціальної термоводневої обробки поверхня скла відновлюється і стінки каналів стають електропровідними. Торці МКП металізують (хромом, ніхромом) термовакуумним випаровуванням для створення контактних електродів для підключення джерела живлення. Товщина контактного покриття становить від 0,2мкм до 0,4 мкм. Покриття заходить на певну глибину на вході та виході каналів для контакту з шаром резистивного шару – вторинно-емісійного емітера. Прозорість пластин (відношення загальної площі отворів каналів до загальної площі пластини) близько 50%, таким чином на площу 1 см<sup>2</sup> припадає понад 10<sup>5</sup> окремих, паралельно включених електронних помножувачів. Такі МКП зі свинцево-силікатного скла мають коефіцієнт посилення трохи більше 10<sup>4</sup>. Для отримання коефіцієнта посилення від 10<sup>6</sup> до 10<sup>7</sup> достатнього для реєстрації одного електрона, включають два каскади МКП послідовно. Їх орієнтують щодо один до одного за «шеvronною» схемою, з протилежно нахиленими каналами для усунення зворотного іонного зв'язку. При підборі величини зазору між МКП

та електричного поля в зазорі так, щоб пакет електронів з каналу першої МКП, розподілився на досить велику поверхню другої МКП, в ній вдається задіяти від  $10^2$  до  $10^3$  каналів, кожен з яких у свою чергу генерує пакет з близько  $10^4$  електронів, тобто. всього від  $10^6$  до  $10^7$ . Шуми такого складання не перевищують 1 імпульсу в секунду, а напруга живлення становить близько 1.5 кВ. Канали МКП зазвичай нахилені на кут від  $5^\circ$  до  $15^\circ$  щодо нормалі до поверхні МКП. Жорсткі вимоги існують до гладкості та чистоти поверхонь торців та каналів. Круглі отвори каналів торцями гексагонально упаковані. Зображення розташування отворів каналів у РЕМ представлена на рисунку 2.2.

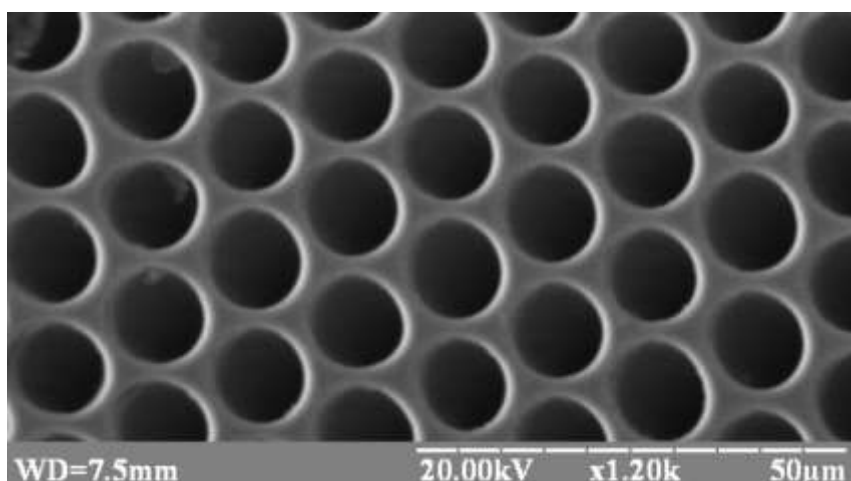


Рисунок 2.2 – РЕМ зображення розташування отворів каналів діаметром 10 мкм у площині МКП

МКП призначені головним чином для реєстрації електронів, але можуть використовуватися і для реєстрації світла в області далекого ультрафіолету та інших видів випромінювань. Енергія кванта має бути більшою за роботу виходу електрона з поверхні МКП, яка становить близько 5 еВ, що відповідає довжині хвилі  $\lambda=250$  нм (діапазон УФС). Квант світла при падінні на зовнішню поверхню першої МКП вибиває фотоелектрон. Процес множення розпочнеться лише в тому випадку, якщо фотоелектрон буде затягнуто до одного з каналів. Ймовірність цієї події становить 0.5 при прозорості МКП  $\sim 50\%$ . Щоб втягнути в канал МКП навіть фотоелектрони, вибиті із зовнішньої поверхні МКП між

отворами каналів. між потоком випромінювання і МКП встановлюють додаткову сітку для створення відштовхуючого поля з величиною  $10^3$  В/см. На виході МКП пакет електронів виникне у тому каналі, куди було зтягнуто фотоелектрон.

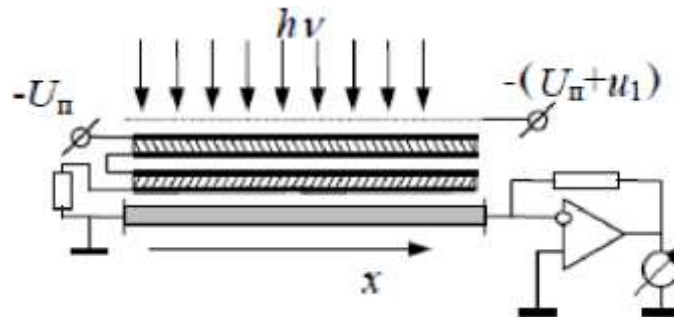


Рисунок 2.3 – Складання з двох каскадів МКП з резистивним позиційно чутливим датчиком

Помилка позиціонування дорівнює відстані між сусідніми каналами з врахуванням величини можливої асиметрії від розширення пучка на виході з першої та другої пластин. Зазвичай це перевищує величини від 30 до 50 мкм.

Таким чином, якщо зареєструвати факт виявлення фотона та зафіксувати координату  $x$ , то така схема може бути використана як позиційно чутливий детектор (ПЧД) у спектральних приладах відповідного діапазону. На рисунку 2.3 наведено схематичне зображення резистивного ПЧД. Принцип дії заснований на тому, що електронний імпульс від МКП розподіляється по двох каналах: від точки падіння на резистор: вліво на землю і праворуч на детектор. У такій схемі при однорідному лінійному резисторі підсилювач зареєструє імпульс з відносною амплітудою:

$$A/A_0 = x/L, \quad (2.2)$$

де  $A_0$  - повна амплітуда струму електронного пакета МКП на опорі навантажувального підсилювача;

$L$  - Довжина резистора;

$x$  - координата, від лівого краю резистора.

МКП стали основою розвитку нових типів і поколінь різних вакуумних електронних приладів та апаратури, що застосовуються у різних галузях науки, техніки, космічних дослідженнях медицині, екології.

Одним із застосувань МКП є прилади нічного бачення (ПНБ). МКП стали основою створення нових поколінь електронно-оптичних перетворювачів (ЕОП) та ПНБ на ЕОП. Характеристики ЕОП і ПНБ (чутливість, роздільна здатність) безпосередньо залежить від можливостей МКП. Тому актуальними є завдання поліпшення характеристик перетворення МКП, оскільки це покращує якість зображення ПНБ в умовах спостереження об'єктів при природній нічній освітленості [3]. У статті [4], наводяться результати досліджень з детектування однієї частки або одного фотона при великій поверхні матриці і точного часу детектування частинки. Висока швидкість збору даних дозволяє виявити та візуалізувати частку за час близько однієї мікросекунди. Враховуючи недоліки серійних ПЗЗ матриці та схем обробки інформації, що отримується від МКП, була розроблена система візуалізації, що складається з МКП зчитувача зі меандроподібною лінією затримки, селективного підсилювача і контролера зчитування. Розроблена система дозволяє реєструвати положення та час появи однієї частки із частотою 1 МГц.

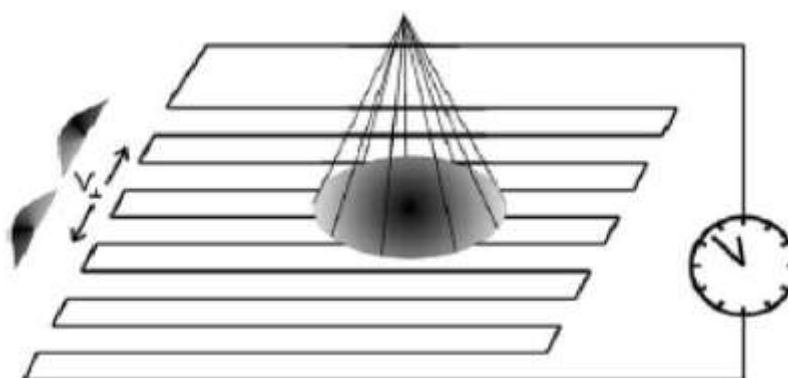


Рисунок 2.4 – Схема меандра зчитувача визначення положення частки

У роботі [4] наводяться докладний аналіз переваг різних фотокатодів для МКП при реєстрації УФ сигналів. З низькоомним виходом; зазначені переваги,

що дозволяють удосконалювати астрономічні прилади. У роботі використовувалися МКП діаметром 25 мм і діаметром пор близько 7 мкм.

У роботі [5] використовувався позиційно-чутливий детектор на МКП для виявлення гамма випромінювання. Там також було запропоновано використовувати детектор жорсткого рентгенівського випромінювання, заснований на МКП.

У статті [6] пропонується використовувати МКП в електроосмотичних насосах. Вони використовують МКП як мембрану, яка є розділовим бар'єром для частинок. В експерименті використовувалися МКП діаметром 18 мм з діаметром пор 5 мкм.

Дослідження проводилися з деіонізованою водою. Максимальний тиск створюваний насосом становив  $\sim 80$  Па/В, а швидкість прокачування  $\sim 0,5$  мл/хв·В. Для ефективного режиму напруга збільшувалася до 11В.

У роботі [7] було запропоновано технологію МКП на основі анодного окислення алюмінію. Такий процес дозволяє отримувати в алюмінієвій фользі матрицю наскрізних пір. Діаметр каналів був у діапазоні від 0,002 до 8 мкм, товщина МКП досягала 150 мкм. Авторами застосовувалося два методи нанесення резистивних та емісійних плівок у середині каналів МКП: плазмове розпилення та рідкофазне нанесення з використанням металоорганічних прекурсорів. Алюмінієві МКП мають великі переваги перед традиційними свинцевими МКП: вони дешевші, простіше виробляти МКП великої площі (величиною в сотні см<sup>2</sup>), просторова роздільна здатність може бути набагато кращою. На рис. 2.5 представлений знімок анодованого алюмінію, отриманий у РЕМ.

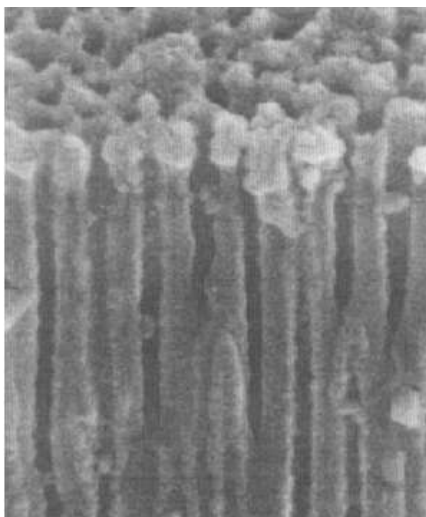
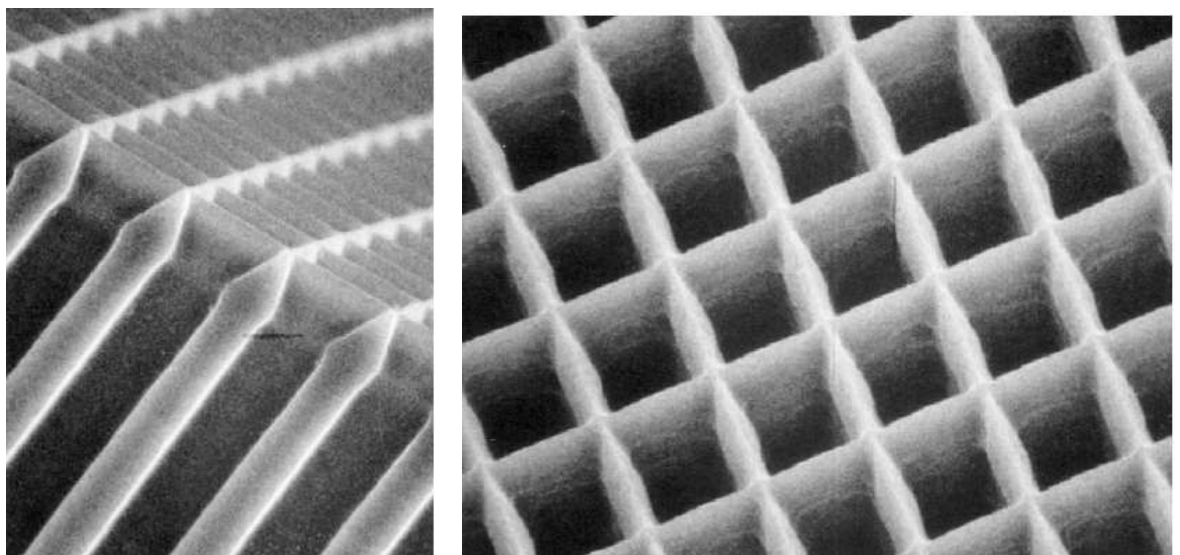


Рисунок 2.5 – РЕМ зображення зразка МКП з анодованого алюмінію [7]

Процес формування анодного оксиду алюмінію відбувався шляхом [7] електрохімічного окиснення алюмінію. Діаметр каналів залежить від умов проведення процесу: складу електроліту, його температури та концентрації, щільності струму. Оскільки анодований алюміній це діелектрик, необхідно було створити резистивне та емісійне покриття на стінках каналів. Це завдання вирішувалося осадженням відповідних оксидних плівок. Використовувалися два найбільш підходящі: іонно-плазмове розпилення та рідкофазне осадження, для якого як прекурсори використовувалися метал-органічні сполуки (ацетати металів). У процесі відпалу органічні фрагменти прекурсора (ліганди) випаровувалися, але на внутрішній поверхні каналів створювалися однорідні оксидні плівки з гарною адгезією. Найкращі результати показували нікель-магнієві покриття. Шар оксиду нікелю виконував роль резистивного, а оксид магнію – емісійного шару. Іонно-плазмовий метод використовувався для розпилення берилієвої бронзи, яка повністю окислювалася при нагріванні в повітряному середовищі. резистивні шари такої МКП виявляли більшу стабільність у порівнянні з оксидом нікелю, нанесеного в рідкофазному процесі, проте вторинно-емісійні властивості були гіршими, ніж у нікель-магнієвого покриття. Тому було запропоновано комбінувати процеси, коли плівки оксиду магнію осаджувалися рідкофазним синтезом, а оксид берилію бронзи наносився

іонно-плазмовим розпилюванням. Таким чином, досягалася стабільна електропровідність із високим коефіцієнтом вторинної електронної емісії.

Ще один варіант технології створення МКП запропоновано у дослідженні [8]. МКП виготовлялися у кремнієвих підкладках з використанням фотолітографії та анізотропного травлення. У МКП діаметром 30 мм і вільною поверхнею до 90% створювалися пори з розмірами від 0,5 до 25 мкм, з аспектним співвідношенням до 300. Перевагою такої основи МКП є висока термостійкість (можуть нагріватися до 1200 °С).



а

б

а – з цільовою формою каналів; б – з квадратним перерізом каналів

Рисунок 2.6 – Кремнієві МКП з різною формою каналів [8]

Оскільки кремнієві МКП більш термостійкі, всередині каналів можливе нанесення плівок при високих температурах, які необхідні деяких CVD процесах. Ще однією перевагою отриманих структур є велика відкрита площа у поєднанні з можливістю отримання каналів невеликого перерізу.

Одним з критеріїв якісної оцінки чистоти поверхні каналів МКП є відношення провідності МКП у вакуумі до провідності в повітряному середовищі. Чим ближче це співвідношення до одиниці, тим чистіше поверхня

МКП. Процеси, що протікають на поверхні та в приповерхневому шарі каналів, роблять істотний внесок у зміну провідності МКП в повітряному середовищі, яка залежить від його відносної вологості, хімічної стійкості матеріалу та структури його поверхні

Різні технологічні впливи, як на заготівлі, так і на саму МКП призводять до утворення на поверхні резистивного електропровідного шару суцільних плівок та острівців поверхневих забруднень, які за достатньої товщини впливають на коефіцієнт емісії поверхні каналів. Стан поверхні у кілька атомних шарів вглиб емісійного шару істотно визначає всі характеристики вторинної електронної емісії в каналах МКП, тому в технології виготовлення МКП застосовується способи модифікації поверхні і оптимізації вторинної емісії каналів. Для цього застосовуються такі технологічні операції:

- відпал на повітрі та інших середовищах;
- термовакuumне знегажування;
- вплив на поверхню потоком часток: електронна, фотонна та іонна обробки та їх комбінація;
- тренування темновим струмом.

Відпал на повітрі доокислює кремній-кисневий каркас емісійного шару. робить його більш досконалим та стійким до впливу навколишнього середовища, знижує електропровідність поверхні МКП у повітрі. Відпали у повітрі заготовок на різних стадіях виготовлення, зазвичай, не суттєво впливають на електричні параметри МКП. При відпалі у повітрі МКП з нанесеними на неї контактними електродами, зокрема, при відпалі при температурі понад 400°C через додаткове окислення резистивного шару відбувається зростання його опору в кілька разів.

Відпал МКП в азоті значно підвищує хімічну стійкість, механічну міцність, ущільнює поверхневий шар і призводить до значно меншої інтенсивності нальоту на контактні електроди, знижує провідність поверхні МКП у повітрі.

Термовакuumне знегажування є ефективним методом видалення фізично адсорбованих газів, при однакових з відпалом температурних режимах не надає помітного впливу на параметри МКП і при збільшенні температур до 500°C, не

призводить до достатньо ефективного термічного розкладання і випаровування поверхневих забруднень, збільшує провідність поверхні МКП на збільшенні нерівності поверхні каналів МКП.

Оскільки наявність поверхневих забруднень на стінках каналів МКП значно впливає характеристики МКП, були досліджені різні методи видалення таких шарів, серед яких фотонна, фотоелектронна, електронна обробки, тренування МКП темновим струмом, іонна обробка торців МКП в газовому розряді, електролітичне очищення каналів МКП у повітрі. У дослідженнях з'ясовано, що для очищення поверхні каналів достатньо пропустити через канали заряд величиною від  $0,05 \text{ Кл/см}^2$  після чого посилення МКП стабілізується. Фотонна обробка за впливом на параметри аналогічна електронній обробці.

Іонне очищення заготовок МКП застосовується з використанням тліючого розряду в інертних газах. При досить низькому тиску газу та напрузі на МКП понад 2000 В, зниження провідності МКП у повітрі дає тренування темновими електронами, що генеруються в каналах МКП. При пропусканні струму через МКП у повітрі відбувається електролітичне очищення каналів від лужних катіонів, які накопичуються на вході каналів (катодній ділянці). У цьому провідність МКП у повітрі знижується і прагне до провідності у вакуумі.

Поліпшення показників МКП є актуальним завданням. Одним із можливих рішень є створення композитних шаруватих структур, у яких кожен окремий шар впливає на свою характеристику МКП. Особливістю завдання є велике аспектне відношення форми каналів і для нанесення на їх внутрішню поверхню тонких плівок необхідна спеціальна технологія, що дозволяє створювати контрольовані за товщиною та однорідні за структурою та товщиною плівки. Технологія ALD дозволяє наносити тонкі плівки на об'єкти складної форми, зокрема у пори, тонкі канали, капіляри.

### 3 МЕТОД СИНТЕЗУ ПЛІВОК МАТЕРІАЛІВ ALD

#### 3.1 Основні положення методу ALD

Основні положення методу ALD полягають у наступному.

По-перше, відтворюваний синтез або хімічне складання твердих речовин певного складу та регулярної хімічної структури ґрунтується на застосуванні незворотних в умовах синтезу реакцій функціональних груп на поверхні твердого тіла з молекулами низькомолекулярної речовини, які не повинні реагувати між собою. Це виключає можливість протікання паралельних реакцій у газовій або рідкій фазах поза поверхнею твердого тіла, які важко контролювати.

По-друге, хімічна збірка певної речовини здійснюється шляхом багаторазового чергування двох або кількох реакцій, які у певній заданій послідовності відбуваються на поверхні твердого тіла. В результаті кожної з цих реакцій до поверхні має приєднатися лише один моношар нових функціональних груп, хімічний склад та будова яких визначається природою молекул використаної на даній стадії низькомолекулярної речовини. Останні, реагуючи з функціональними групами твердої речовини, утворюють з нижчим шаром хімічні зв'язки і тим самим входять до складу твердого тіла у вигляді одного шару нових структурних елементів. Ці структурні елементи, що є частиною молекули низькомолекулярної речовини, повинні містити активні атоми або групи атомів, які могли б хімічно приєднувати в ході наступної незворотної реакції з іншою низькомолекулярною речовиною відповідні нові функціональні групи, що також здатні реагувати на наступній стадії синтезу. Кожна наступна реакція здійснюється лише після завершення попередньої. На кожній стадії такого процесу утворюються відповідні структурні елементи, з яких поступово складається тверда плівка, що синтезується.

По-третє, придатність поверхні твердого тіла для хімічного збирання речовини з певних "будівельних" елементів визначається деякою їх структурною відповідністю. Головним чином, це стосується наявності на поверхні достатньої кількості функціональних груп необхідної хімічної природи і визначає роль поверхні в якості матриці на кожній стадії ALD, а також визначають можливість

виникнення поперечних зав'язків між атомами, що приєдналися, для утворення тривимірної ґратки синтезованого шару [9].

З цих основних положень випливають практично важливі наслідки умов методу ALD.

По-перше, при проведенні необхідного числа циклів реакцій ALD, можна синтезувати шар матеріалу заданої товщини з точністю одного моношару.

По-друге, при використанні на різних стадіях ALD різних низькомолекулярних сполук можна наносити на поверхню один або кілька моношарів структурних елементів одного роду в заданій послідовності з моношарами структурних елементів іншої хімічної природи. Це забезпечує розташування за заданою програмою хімічно пов'язаних між собою верств різних атомів. Зростання плівки за методом ALD складається з повторення чотирьох характерних ступенів:

а) реакція, самозавершується, першого реагенту (реагент А) з функціональними групами підкладки;

б) очищення поверхні від надмірної кількості прекурсора та побічних продуктів реакції;

в) реакція, самозавершується, другого реагенту (реагент В), щоб активізувати поверхню до реакції з першим реагентом;

г) Очищення поверхні від надмірної кількості прекурсора та побічних продуктів реакції.

Пункти а-г становлять цикл ALD. Кроки а і в іноді називають напівреакціями циклу ALD [9].

Перед початком процесу осадження поверхню підготовлюють, наприклад, термообробкою в атмосфері певного прекурсора. Використання реакцій, що самозавершуються, призводить до того, що метод ALD є поверхнево-контрольованим процесом, де параметри процесу крім реагентів, підкладки і температури мають другорядне значення. Оскільки відбувається керування поверхневими реакціями, вирощені методом ALD плівки є однорідними і однаковими за товщиною [9].

Метод ALD удосконалювався для отримання різних плівок неорганічних матеріалів, наприклад оксидів, нітридів, сульфідів, селенідів, телуридів, чистих елементів.

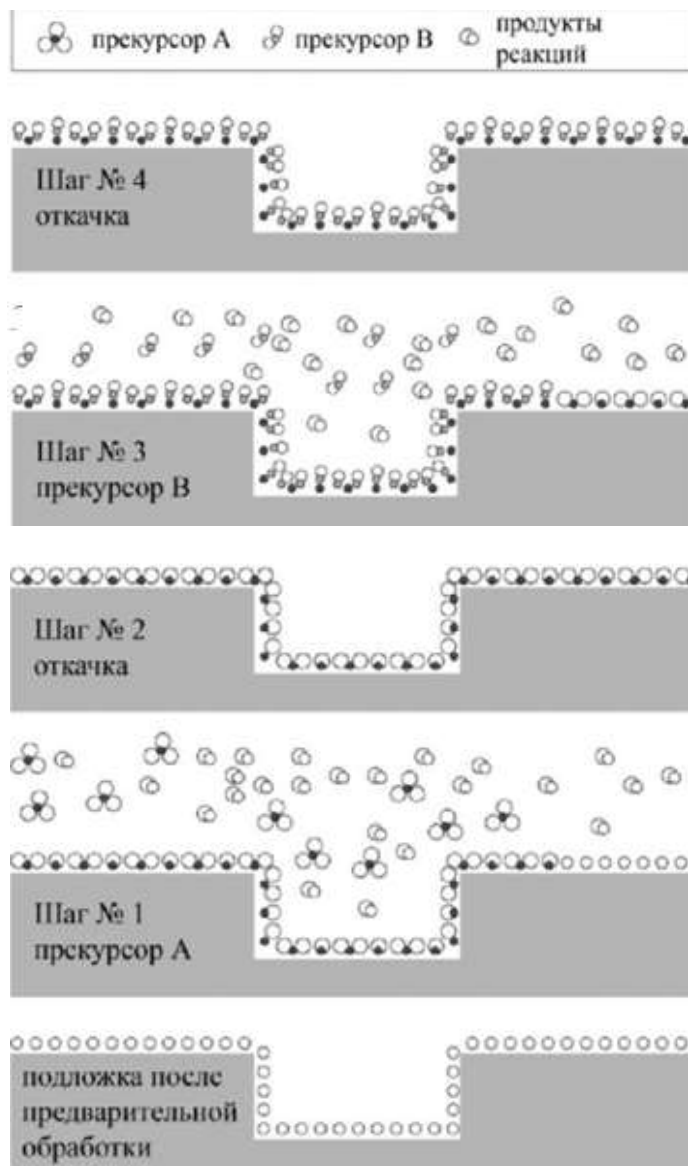


Рисунок 3.1 – Схематична ілюстрація одного циклу ALD

Загальними вимогами реагентів у методі ALD є:

- вони повинні бути леткими при кімнатній температурі або її підвищенні;
- не повинні термічно розкладатися в процесі синтезу при робочій температурі поверхні;
- реакції в системі газ – тверде тіло повинні бути самозавершальними.

Реагенти можна розділити на дві групи: неорганічні та металоорганічні. У свою чергу останні поділяються на ті, що містять прямий зв'язок метал - вуглець, і ті, які не містять прямого зв'язку. Зазвичай з неорганічних реагентів використовують галогеніди, з металоорганічних – алкіли та циклопентадієніли, а також алкоксиди,  $\beta$ -дикетони, амідні.

### 3.2 Умови самозавершення реакцій ALD

Метод ALD полягає у послідовному використанні самозавершальних реакцій газ – тверде тіло. Елементи, що включені у вирощену плівку методом ALD, є частиною газоподібних сполук (прекурсорів), що адсорбуються на поверхні. Одночасно атоми, які не мають бути включені в плівку, видаляються як побічні газоподібні продукти.

Адсорбція поділяється на два типи, засновані на силі взаємодії між адсорбованою молекулою (адсорбатом) та твердою поверхнею (адсорбентом): фізичну адсорбцію та хімічну адсорбцію (хемосорбцію). За низьких температур можуть відбуватися слабкі взаємодії з поверхнею у вигляді фізичної адсорбції, що призводить до багат шарової адсорбції. Хемосорбція, у свою чергу, призводить до створення хімічних зв'язків. Хімічні зв'язки формуються між адсорбованою молекулою та поверхнею, тому з поверхнею зв'язується лише один шар адсорбату. Шар адсорбованих часток відрізняється від шару молекули реагенту і від шару матеріалу, вирощеного за методом ALD.

Сучасне поняття «шар» допускає різні тлумачення:

- шар для хемосорбції визначають як кількість частинок адсорбату, що необхідна для заповнення всіх адсорбційних місць, визначених структурою поверхні адсорбенту та хімічною природою реагенту.;

- шар для фізичної адсорбції визначають як кількість часток, необхідних для покриття поверхні суцільним шаром молекул з щільною упаковкою;

- моношар для вирощених за методом ALD матеріалів визначається як одиничний шар часток монокристалі в об'ємному матеріалі у вибраному напрямку росту.

Як незворотня, так і оборотна адсорбція може самозупинятися. Для того щоб адсорбція була самозавершеною, адсорбований матеріал не повинен десорбуватися з поверхні протягом часу очищення або видалення прекурсора. Незворотність адсорбції – ще не достатня умова процесу ALD, оскільки вона може бути безперервною. Щоб скористатися перевагою процесів незворотної, насиченої реакції, що самозупиняються, необхідно дати можливість їй завершитися.

### 3.3 Адсорбційна кінетика фактори, що впливають на насичення

Хімічна кінетика характеризує вплив параметрів технологічного процесу, а саме: температури та концентрації складових речовин, – на швидкість реакції. Як приклад адсорбційну кінетику в методі ALD можна проілюструвати адсорбцією молекул газоподібної сполуки А на поверхні. У загальному випадку адсорбція може бути оборотною як показано в реакціях (1) та (2):



Швидкість адсорбції – це кількість молекул А, що приєдналися до поверхні за одиницю часу. Відповідно, швидкість десорбції – кількість молекул А, що від'єдналися від поверхні в одиницю часу. Основним параметром адсорбційного процесу є парціальний тиск газоподібного реагенту. Для пояснення впливу тиску було зроблено такі припущення [36]:

- максимальна кількість адсорбованих груп має бути рівним моношару (як при хемосорбції);
- всі адсорбційні місця на поверхні однакові;

- сусідні адсорбовані групи не повинні взаємодіяти між собою.

Покриття адсорбційними групами у такому разі називають хемосорбційним покриттям і позначають  $Q$ . Швидкість адсорбції  $r_a$  дорівнює добутку константи швидкості адсорбції  $k_a$  на парціальний тиск молекули  $A$  та частини незаповнених місць  $(1-Q)$  на поверхні.

Швидкість десорбції  $r_d$  дорівнює добутку константи швидкості  $k_d$  частини зайнятих місць  $Q$  на поверхні.

Швидкість зміни хемосорбційного покриття,  $dQ/dt$ , є різницею швидкості десорбції та швидкості адсорбції:

$$\frac{dQ}{dt} = r_a - r_d = k_a p (1 - Q) \quad (3.3)$$

Після насичення хемосорбційне покриття стабільне ( $dQ/dt = 0$ ) та з рівняння (3.3) можна перейти до ізотерми Ленгмюра, звідки отримуємо рівноважне хемосорбційне покриття  $Q^{eq}$  як функцію парціального тиску реагенту.

$$Q^{eq} = \frac{k_a p}{k_a p + k_d} = \frac{1}{1 + (Kp)^{-1}} \quad (3.4)$$

Права сторона рівняння (3.4) була отримана, враховуючи, що  $K = k_a/k_d$  це константа рівноваги адсорбції. і (3.4) описують частково незворотні реакції, якщо рівноважна константа  $Kp$  наближається до нескінченності, або  $k_d$  наближається до 0. Вирішуючи рівняння (3.4) з цими припущеннями, отримуємо:

$$\lim Q^{eq} = 1 \text{ при } K \rightarrow \infty \quad (3.5)$$

При незворотній хемосорбції покриття  $Q$  не збільшується з  $p$ , але прагне одиниці навіть при низьких парціальних тисках реагенту. Час також є одним із

основних параметрів у процесі адсорбції. Якщо проінтегрувати рівняння (3.3), у припущенні незмінності температури та тиску, можна отримати  $Q$  як функцію часу:

$$Q=Q^{eq}(1-e^{-(k_a p+k_d)t}) \quad (3.6)$$

Якщо хемосорбція необоротна, то рівняння (3.6) набуває вигляду:

$$Q=1-e^{-k_a p t} \quad (3.7)$$

В ході кроку 1 (реакції реагенту А) хемосорбційне покриття буде збільшуватися до тих пір, поки реакція не закінчиться. Чим вище тиск  $p$  і  $k_a$ , тим швидше закінчиться реакція.

При адекватному процесі всі частинки А мають прореагувати з В. Реагент доставляє на поверхню інший атом, і покриття ( $Q$ ) збільшується в ході реакції від нуля до одиниці. За крок кроку 4 (очищення і видалення), покриття залишається незмінним. У ході повторення циклів реакції (кроків від 1 до 4), хемосорбційне покриття перемикається між нулем та одиницею.

Як показано на рисунку 3.2, кількість нашарованих атомів  $c_m$  збільшується в ході кроку 1. Швидкість нашарування  $dc_m/dt$  змінюється з часом, коли перебуває в перехідному стані. Кількість нашарованого матеріалу  $c_m$  лінійно збільшується з числом циклів реакції та швидкість зростання  $\Delta c_m$  постійна.

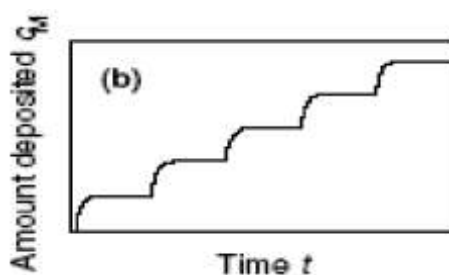


Рисунок 3.2 – Залежність часу від кількості нашарованого матеріалу

Залежність констант швидкостей зростання адсорбції та десорбції від температури зазвичай описують рівнянням Ареніуса:

$$K_i = A \exp(-E_i/RT) \quad (3.8)$$

У цьому рівнянні,  $A$  це – передекспоненційний множник,  $E_i$  – енергія активації,  $R$  – постійна газова і  $T$  – абсолютна температура. Чим більша температура, тим швидше завершиться реакція. Однак, незважаючи на те, що при великих температурах швидкість реакції вища, кількість адсорбованого матеріалу при насиченні визначається іншими факторами.

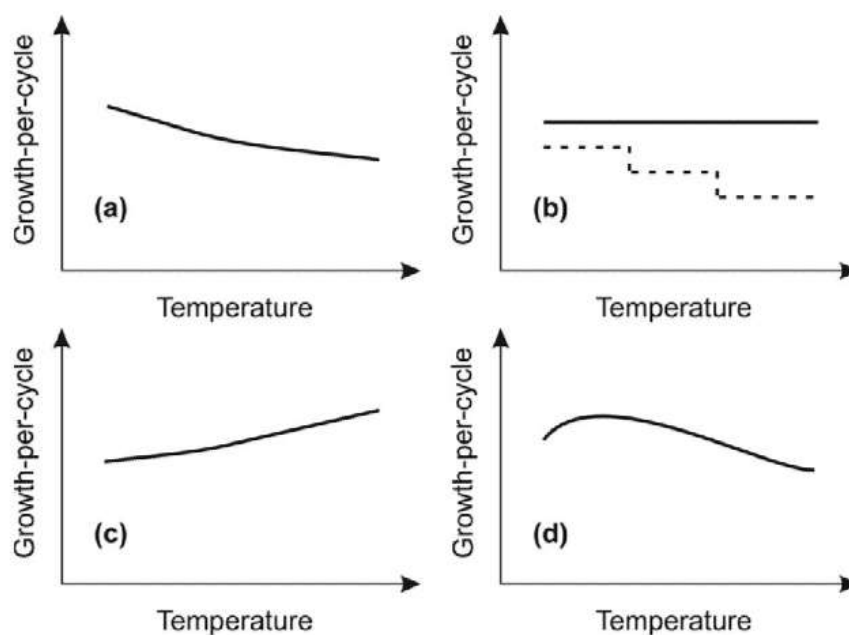
Існує два фактори, що впливають на насичення поверхні адсорбованими частинками у самозавершених реакціях газ – тверде тіло. Перший є наслідком просторових перешкод, коли фрагменти хемосорбованих частинок можуть перекрити частину поверхні і не допустити інший реагентів.

Другий фактор – це число центрів адсорбції на поверхні. Поверхня може розглядатися як “заповнена”.

### 3.4 Вплив температури на швидкість зростання плівки

Залежність швидкості росту шару від температури може бути пояснена, принаймні, впливом температури на число і тип хімічно активних місць, присутніх на поверхні до і після хемосорбції, а також впливом температури на механізми реакцій. У методі ALD існує чотири характерні типи поведінки швидкості зі зміною температури. реакцій.

По-перше, швидкість зростання може зменшуватися з температурою (рис. 3.3 а). Це зазвичай відбувається, коли активні місця на поверхні впливають на кількість або тип хімічно адсорбованих шарів і при збільшенні температури зменшується кількість активних місць на поверхні. При збільшенні температури може змінитися механізми реакції.



a) - зменшення швидкості зростання зі збільшенням температури; b) - постійна швидкість зростання зі збільшенням температури; c) - збільшення швидкості зростання з температурою; d) - швидкість зростання може спочатку збільшитися, а потім зменшитися зі збільшенням температури

Рисунок 3.3 – Залежність швидкості росту плівок у методі ALD від температури

По-друге, швидкість зростання може залишатися незмінною (рис. 3.3, b). Це може статися, наприклад, якщо насичення є наслідком просторових перешкод (затінення) та кількість активних місць не впливає на кількість адсорбованих рядів.

По-третє, швидкість зростання може також збільшуватися зі збільшенням температури (рис. 3.3, c). При більш високих температурах відбуваються реакції, яких не буває при нижчих температурах.

По-четверте, швидкість зростання може спочатку збільшитися, а потім зменшитися (рис. 3.3, d). Це може відбуватися через те, що спочатку деякі реакції активуються зі збільшенням температури, а потім при зменшенні кількості активних місць швидкості зростання зменшується.

### 3.5 Застосування методу ALD

Висока контрольованість процесу осадження плівок різних матеріалів і відтворюваність їх структури призвело до розширення застосування методу ALD у технології мікроелектроніки, особливо під час переходу топологічної норми в нанометровий діапазон. У роботі [9] досліджується МДМ структура з металевими електродами та підзатворними діелектриками з оксиду рутенію та оксидом титану. Шар оксиду титану був вирощений трьома варіантами методу ALD. Проведено від 300 до 400 циклів ALD, де товщина плівки, отриманої за один цикл, становила 0.05 нм. Другий і третій варіант був пов'язаний з оксидом титану та оксидом титану, легованим алюмінієм. Оксид титану без легування був отриманий з використанням прекурсорів ізопропоксиду титану і озону, при температурі 250 °C з кількістю циклів від 400 до 650. Оксид титану легований алюмінієм був отриманий з різним числом суперциклів: від 4 до 7 циклів озonom та один цикл з триметилалюмінієм та озonom. Усі шари осаджувалися на електроди з оксиду рутенію, отриманим методом MOCVD. Застосування шару оксиду рутенію обумовлено великою роботою виходу електрона, а також завданням та стабілізацією рутилоподібної структури зростаючої плівки  $\text{TiO}_2$ . Після отримання структури зразки прогрівалися у кисневій атмосфері за підвищених температур. Ці дослідження були проведені для заміни шару  $\text{SiO}_2$  в структурах МДН для зменшення товщини підзатворного діелектрика.  $\text{TiO}_2$  має велику діелектричну проникність, що може бути використане для заміни підзатворного діелектрика  $\text{SiO}_2$  на інший оксид. Було встановлено, що найперспективнішим варіантом є плівка  $\text{TiO}_2$  із шарами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

У роботі ALD [10] також застосовувався для створення тонких плівок для high-k підзатворних діелектриків. У оксиду гафнію значення діелектричної проникності має величину близько 25, тому він застосовується для заміни  $\text{SiO}_2$ , до того ж співвідношення висоти енергетичних бар'єрів межі діелектрик – напівпровідник оптимальної. Ширина забороненої зони біля оксиду гафнію досить висока для створення необхідного бар'єру.

У роботі [11] розглядається застосування методу ALD для мемристорних структур, де використовуються матеріали, що змінюють фазовий склад при прикладанні напруги.

Таким чином, метод ALD є перспективним у сучасній мікро- та наноелектроніці. Він дає можливість наносити плівки на поверхню об'єктів складної форми та контролювати товщину з точністю до моношару матеріалу. Тому метод ALD ідеально підходить для створення функціональних шарів на внутрішній поверхні каналів МКП.



Спочатку наноситься резистивний шар на боросилікатне скло методом ALD для отримання необхідного електричного опору стінок каналу. На другому етапі відбувається нанесення вторинно-емісійного шару. Такий підхід дозволяє незалежно керувати опором та емісійними властивостями стінок каналів для діелектричних підкладок МКП. У роботі наведено деякі технологічні параметри процесу, що дозволяють оцінити застосованість цієї технології.

Відпрацювання технології проводилося на підкладках МКП, вироблених компанією Incom, діаметром 33 мм, товщиною 1,2 мм, з діаметром каналів 20 мкм, аспектним співвідношенням 60, кутом нахилу каналів  $8^\circ$  і вільною площею 60%.

Підкладки були очищені на протязі 5 хвилин з використанням ультразвуку в ацетоні з подальшим сушінням азотом протягом 30 секунд. В якості емісійних шарів використані наступні матеріал: оксид алюмінію та оксид магнію з товщиною кожного 6 та 8 нм відповідно, температурою синтезу від 200 до 300  $^\circ\text{C}$  та 200  $^\circ\text{C}$  відповідно. Прекурсорами для одержання плівок оксиду алюмінію служили ТМА і вода для отримання оксиду магнію. резистивні шари осаджувалися товщиною 65 і 80 нм. Загальними електродами з двох сторін МКП служили NiCr товщиною 200 нм, отримані термовакуумним випаровуванням при тиску  $10^{-7}$  Торр. Під час нанесення контактів МКП були нахилені під кутом в  $45^\circ$  до площини джерела матеріалу, що випаровувався.

У роботі [13] наводяться дослідження компанії Arradiance, в яких ALD технологія застосовується для нанесення тонких плівок на внутрішню поверхню каналів МКП діаметром від 6 до 20 мкм і довжиною більше 600 мкм. Унікальність роботи полягає в тому, що завдяки використанню методу ALD можна застосувати такий прилад для виявлення однієї частки в екстремальних умовах, таких як криогенні температури. Адгезія резистивних та емісійних плівок у каналах, їх механічна міцність були експериментально перевірені в діапазоні температур від 10 до 700 К. Деградацію плівок не було помічено.

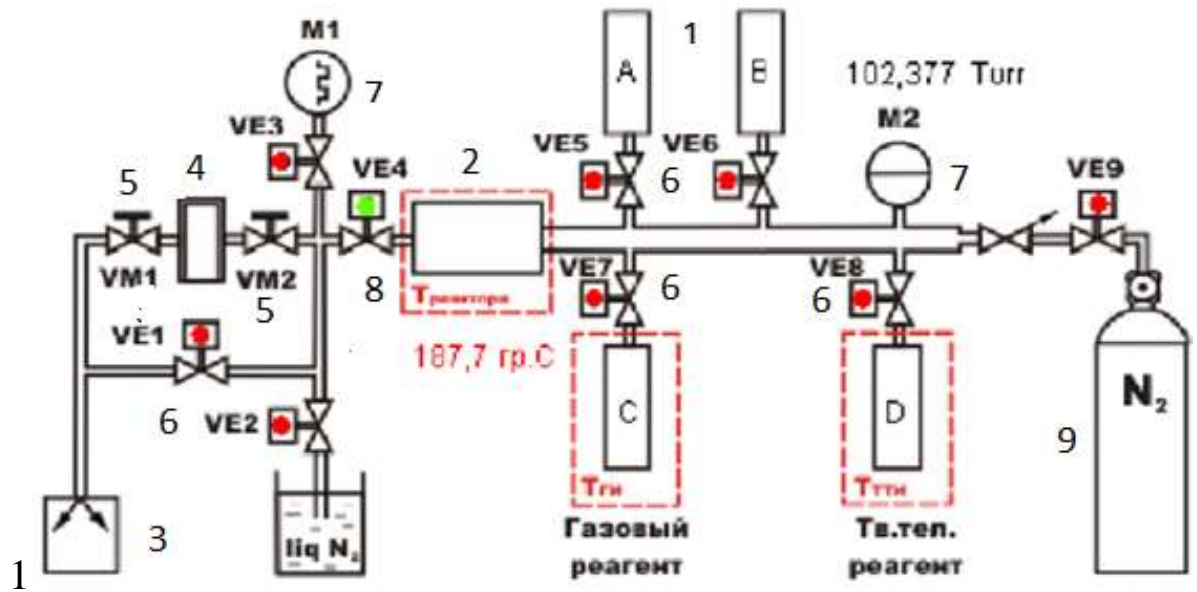
Для отримання резистивних плівок використовувався слаболетучий прекурсор, який нагрівався до температури 85  $^\circ\text{C}$ , у той час як для прекурсора

емісійного шару необхідно нагрівання та достатній тиск азоту через низьку летючість. Підкладки попередньо відпалювалися у вакуумі при температурі 400 °С протягом 4 годин, щоб переконатися, що поверхня очищена і в процесі синтезу не відбудеться десорбції забруднюючих молекул газів. Синтез відбувався за температури 250 °С. По завершенню процесу були нанесені ніхромові електроди товщиною близько 100 нм методом термовакuumного випаровування. Опір резистивного шару змінювалося від  $10^6$  Ом при температурі 15 К до  $10^9$  Ом при температурі 10 К. Багаторазове термоциклирування пластин в діапазоні температур від 10 К до 300 К не призвело до видимих змін характеристик.

На рис. 4.2 представлена схема установки синтезу плівок оксидів методом ALD.

Вакуум в установці забезпечується механічним роторним насосом на рівні не гірше 0,05 Торр. Цього невисокого розрідження достатньо щодо неможливості одночасного взаємодії молекул двох реагентів з поверхнею підкладки, що призводило б до "сумішового режиму", тобто. некерованого нерівномірного зростання плівки. Керування подачею реагентів здійснюється за допомогою швидкодіючих електромагнітних клапанів зі швидкістю спрацьовування менше ніж 0,01 с. Черговість відкриття клапанів, тривалість подачі прекурсорів та паузи між подачею реагентів регулюються комп'ютером. Напуск прекурсорів у реакційну зону здійснюється короткими імпульсами до заданого тиску. Установка має кілька джерел різних реагентів для можливості синтезу різних за складом шарів в єдиному циклі.

Приклад процесу синтезу шару на поверхні плоскої підкладки відбувається в такий спосіб. Підготовлена очищена підкладка розміщується усередині реактора. У камеру реактора окремими трубопроводами подаються пари реагентів в необхідній послідовності, тривалості і парціальним тиском.



1 – ампули з прекурсорами; 2 – реакційна камера; 3 – вакуумний насос; 4 – пастка, що охолоджується; 5 - вакуумні запірні вентиля; 6 - електромагнітні клапани напуску парів; 7 – датчики тиску; 8 – регулятор температури підкладки; 9 - балон із азотом

Рисунок 4.2 – Схема установки для синтезу плівок матеріалів методом ALD

Реагенти подаються короткими імпульсами тривалістю від 0,1сек до 0,2 сек в потоці транспортного газу азоту при безперервному відкачуванні продуктів реакції. Пауза тривалістю від 0,5сек до 2,0 сек між імпульсами подачі реагентів необхідна для того, щоб уникнути змішування пари двох різних реагентів в камері реактора. Швидкість перебігу газового потоку визначається швидкістю насоса та пропускнуою здатністю вакуумної системи, розмірами реактора та трубопроводів, що забезпечують імпульсну подачу парів реагентів та відкачування продуктів реакції. З урахуванням нестационарності в часі процесу течії реагентів в камері реактора зміна концентрації молекул кожного реагенту над поверхнею підкладки в будь-якій її точці в даний момент часу будуть повністю визначати перехідні процеси.

Довжина вільного пробігу молекул газу залежить від тиску та температури. При кімнатній температурі та тиску подачі реагенту в імпульсі 3,0 Торр довжина вільного пробігу становить величину  $1,6 \cdot 10^{-2}$  мм, а число молекул в одиниці об'єму становить  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Якщо врахувати, що при такому тиску моношар адсорбату на підкладці при коефіцієнті акомодатії, що дорівнює одиниці утворюється за кілька мксек., можна скоротити тривалість подачі реагенту до мсек. без ризику порушити суцільність шару. Однак у проточному щілинному реакторі, що працює в імпульсному режимі, зміна концентрації реагенту після припинення його подачі визначається не тільки швидкістю насоса та пропускною здатністю трубопроводів та реактора, але й процесами адсорбції та десорбції на стінках всіх елементів вакуумної системи. Останній чинник багато в чому визначається хімічним складом молекул реагентів та його сорбційної активністю. Однак, круте експоненційне зниження концентрації реагентів над поверхнею підкладки після закінчення імпульсу подачі реагенту в реактор має кінцеву величину. Експериментально було встановлено, що за 1,0 сек. у разі типових реагентів (МО зєднань, води та інших гідридів, галогенідів металів) тиск над поверхнею підкладки зменшується у 50-100 разів залежно від розмірів реактора. Це означає, що довжина вільного пробігу молекул зростає до часток міліметра. Таким чином, можна отримати умови, за яких над поверхнею підкладок до моменту подачі наступного реагенту виявиться кількість молекул, принаймні, на два порядки менше, ніж необхідно для утворення суцільного моношару адсорбату на підкладці. Враховуючи, що коефіцієнт акомодатії в подібних реакціях рідко дорівнює одиниці, при подачі імпульсу другого реагенту на поверхні не протікатимуть реакції в "сумішовому режимі" і товщина чергового шару повністю визначатиметься кількістю міцно пов'язаних з підкладкою молекул.

Під час проведення синтезу технологічні умови (температура, склад реагентів) вибираються в такий спосіб, щоб під час подачі реагенту з поверхнею зв'язувався один моношар речовини. Цей режим називається "вікном процесу".

У таких умовах нерівномірність товщини шару по всій поверхні підкладки через вплив "сумішового режиму" не перевищує величини 1,0%.

Наведений аналіз має відношення до плоских підкладок з поверхнею для адсорбції, що можна порівняти з її геометричним розміром. У разі застосування об'єктів з високим аспектним співвідношенням, наприклад, каналів МКП, для отримання суцільних покриттів по всій їх внутрішній поверхні потрібні додаткові оцінки часових режимів синтезу.

## ВИСНОВКИ

В представленій роботі зроблено огляд технологій виготовлення самих МКП, принципів їх конструювання. Наведені області їх застосування; у приладах нічного бачення, детекторах потоків заряджених часток і випромінювання малої інтенсивності, перетворювачів зображення, що сформовано в рентгенівському або дальньому УФ діапазоні, у видиме

Основною технологічною проблемою забезпечення високої однорідності функціональних шарів каналів МКП є їх значне аспектне відношення. В роботі розглянута технологія ALD, застосування якої дає можливість подолати цю проблему.

За технологією ALD при проведенні синтезу технологічні умови (температура, склад реагентів) вибираються в такий спосіб, щоб під час подачі реагенту з поверхнею зв'язувався один моношар речовини. У таких умовах нерівномірність товщини шару по всій поверхні підкладки не перевищує величини 1,0%. До того ж застосування методу ALD надає можливість керувати властивостями резистивного та емісійного шарів окремо.

Наведений також аналіз процесу адсорбції реагентів стосовно плоских підкладок з поверхнею для адсорбції, що можна порівняти з її геометричним розміром. У разі застосування об'єктів з високим аспектним співвідношенням, наприклад, каналів МКП, для отримання суцільних покриттів по всій їх внутрішній поверхні потрібні додаткові оцінки часових режимів синтезу.

Наведений аналіз має відношення до плоских підкладок з поверхнею для адсорбції, що можна порівняти з її геометричним розміром. У разі застосування об'єктів з високим аспектним співвідношенням, наприклад, каналів МКП, для отримання суцільних покриттів по всій їх внутрішній поверхні потрібні додаткові оцінки часових режимів синтезу.

Результати виконаної роботи можуть бути використані у навчальному процесі для технологічних дисциплін.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Whetten N.R., Lapovsky A.B., Energy distribution of secondary electrons from MgO single crystals, Phys. Rev. 107, № 6, 1521  
URL:<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.107.1521>
2. S. Jokela, I. Veryovkin, A. Zinovev. Characterization of Secondary Emission Materials for Micro-Channel Plates, U.S. Department of Energy, June 2016.  
URL:[https://psec.uchicago.edu/collabMtg/second\\_mtg/talks/June\\_2010\\_Collaboration\\_Meeting.pdf](https://psec.uchicago.edu/collabMtg/second_mtg/talks/June_2010_Collaboration_Meeting.pdf).
3. Алкацева Т.Д. «Закономерности формирования и минимизация дефектов электронного изображения микроканальных пластин», автореферат диссертации, Владикавказ, 2000 г, с. 41-46. URL:<https://innova-science.ru/wp-content/uploads/2023/01/sbornik-nauchnyh-trudov-30.12.2022-pmn-36.pdf>.
4. Oswald H.W. Siegmund. High-performance microchannel plate detectors for UV/visible astronomy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, A (525), p. 12–16
5. Polad M. Shikhaliev. A novel gamma-ray imaging concept using edge-on microchannel plate detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, A (460), p. 465-468
6. Z. Cao, L. Yuan, Y.-F. Liu et al. Microchannel plate electro-osmotic pump. Microfluid Nanofluid, 2012, Vol. 13, p. 279–288
7. Charles P. Beetz, Robert Boerstler et al. Silicon-micromachined microchannel plates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, A (442), p. 443-451
8. Puurunen, R.L., Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum water process. J. Appl. Phys. – 2005. - V. 97. p. 121.
9. Hudec, B., Hušekova, K. et al. Electrical properties of TiO<sub>2</sub>-based MIM capacitors deposited by TiCl<sub>4</sub> and TTIP based atomic layer deposition processes. Microelectronic Engineering. - 2011. - V. 88. - p. 1514

10. Ali Javey, Jing Guo, Damon B. Farmer. et al. Carbon Nanotube FieldEffect Transistors with Integrated Ohmic Contacts and High-K Gate Dielectrics. Nano Letters. – 2004, Vol. 4, №3, p. 447-450

11. Omid Kavehei. Memristive devices and circuits for computing, memory, and neuromorphic applications. School of Electrical & Electronic Engineering Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences The University of Adelaide, Australia, December 2011

12. Anil U. Mane, Qing Peng, Jeffrey W. Elam et al. An atomic layer deposition method to fabricate economical and robust large area microchannel plates for photodetectors, Physics Procedia

13. Dmitry Gorelikov, Neal Sullivan. et al. Development of atomic layer deposition-activated microchannel plates for single particle detection at cryogenic temperatures. J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 32, No. 2, Mar/Apr 2014

14. ДСТУ 3582:2013. Інформація та документація. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила : чинний з 01.01.2014. – Київ. : Мінекономрозвитку України, 2014. – 15 с.

15. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилення. Загальні положення та правила складання. – Київ. : УкрНДНЦ, 2016. – 16 с.

ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання : чинний з 01.07.2007. – Київ. : УкрНДНЦ, 2016. – 26 с.