

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

***С. В. Соколов***

## **ОСНОВИ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ**

**РЕКОМЕНДОВАНО МІНІСТЕРСТВОМ ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ ЯК НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ  
СТУДЕНТІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ, ЯКІ  
НАВЧАЮТЬСЯ ЗА НАПРЯМОМ “ЕЛЕКТРОНІКА”**

**СУМИ  
ВИД-ВО СУМДУ  
2003**

## **ПЕРЕДМОВА**

Поверхня обумовлює багато властивостей твердих тіл, починаючи від їх зовнішнього вигляду і закінчуючи міцністю. Не викликає сумніву значення структури і властивостей поверхні і поверхневих шарів твердих тіл для науки і техніки. Можна навести численні приклади з таких галузей знань, як каталіз, одержання напівпровідників, металургія. Каталітичні властивості обумовлюються складом поверхні і її структурою. У напівпровідниках електричні властивості залежать від складу і структури поверхневого шару товщиною  $\sim 1$  мкм. Зносостійкість і корозійна стійкість металів також обумовлюються складом і структурою поверхневих шарів. Тому важливе значення має обробка матеріалів, що приводить до зміни (поліпшення) властивостей поверхневих шарів [1, 2].

Метою вивчення дисципліни “Основи модифікації поверхні” є ознайомлення студентів з методами впливу концентрованими потоками енергії на поверхню твердих тіл та фізичними основами взаємодії випромінювання з речовиною. Докладно розглянуті процеси, які відбуваються у речовині під впливом лазерного випромінювання, потоків іонів, електронів, плазми.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні засвоїти основні відомості про фізичні механізми зміни властивостей матеріалів під впливом на них потоків енергії та про принципи дії обладнання для модифікації поверхні.

Викладення дисципліни базується на знаннях, які придбані студентами в ході вивчення таких дисциплін: загальна фізика, фізика твердого тіла, фізичне матеріалознавство, методи нанесення та контролю якості покриттів.

## **РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ**

1.1 Методи обробки поверхневих шарів.

1.2 Загальна схема процесу модифікації.

### **1.1 МЕТОДИ ОБРОБКИ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ**

Основою будь-якої модифікації властивостей твердих тіл є створення певних структурно-фазових перетворень, що обумовлюють зміну практично всіх його характеристик: механічних, теплових, електричних, магнітних, оптичних та ін.

*Традиційними методами* модифікації властивостей матеріалів є:

- механічна обробка;
- термічна обробка;
- хімічна обробка та ін.;
- поєднання різних видів обробок.

Механічна обробка – кування, наклеп. Зміна властивостей у цьому випадку відбувається за рахунок збільшення густини дислокацій, утворення мартенситних фаз внаслідок деформації кристалічних ґраток.

Термічна обробка – швидкісне нагрівання, загартовування, відпускання, старіння, відпалювання.

Хімічний вплив (легування) полягає у введенні інших елементів у поверхню оброблюваного матеріалу. При цьому відбувається утворення нових фаз або фаз твердих розчинів, що значною мірою впливає на властивості матеріалу. Фізичні процеси, які відбуваються при цьому, можуть привести до утворення сплавів з особливими властивостями. Наприклад, додавання нікелю в титан приводить до формування сплаву Ti-Ni, у якому проявляється ефект пам'яті форми (тобто відтворення заданої форми після зняття зовнішнього навантаження). Розмір відновлюваної деформації становить до 10%.

У зв'язку з новими вимогами, що виникають, до властивостей сучасних матеріалів способи модифікації, які вже існують, практично вичерпали свої можливості.

Для модифікації поверхневих шарів останніми десятиріччями застосовують лазерну і плазмову технології, обробку іонними й електронними пучками, нанесення захисних покриттів і плівок, а також комбінацію перелічених вище методів.

Використання зазначених методів дає можливість замінити дорогі і рідкісні метали, сплави менш дефіцитними і більш дешевими матеріалами з нанесеними на них покриттями або з модифікованими поверхнями. Процеси, які відбуваються при цьому, дозволяють значною мірою вплинути на фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу.

Різновидом плазмових технологій є *плазмово-детонаційна обробка* (ПДО) [3, 4], що базується на теорії магніто-газодинамічної течії горючої газової суміші в електромагнітному полі. ПДО можна здійснювати у повітрі (без вакууму). Вона поєднує у собі механічну обробку (тиск ударної хвилі чи удар), термічну обробку (температура плазмового струменя 8000-30000 К) і легування (насичення твердих тіл елементами, які складають плазму).

Існує два режими ПДО:

- 1 – режим без оплавлення поверхні;
- 2 – режим з оплавленням поверхні.

Переваги ПДО:

1 Висока густина енергії в зоні обробки. Це приводить до великих швидкостей нагрівання поверхні внаслідок чого можна викликати істотні структурно-фазові зміни поверхневого шару.

2 Короткочасність ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  с), локальність впливу й обмеження зони термічного впливу, тобто відбувається легування поверхневих шарів без нагрівання усього виробу.

Товщина модифікованої зони становить до 50 мкм, а іноді - до 100 мкм.

3 Використання азотно-вуглецевої плазми дозволяє насичувати поверхню зразків киснем, вуглецем, азотом.

4 Порівняно з традиційними методами нанесення покриттів метод ПДО є ресурсозберігаючим (низька витрата легуючих елементів і електричної енергії).

5 Високий ККД плазмового струменя (до 80%).

6 Простота керування плазмовими струменями і можливість проведення безконтактної обробки криволінійних поверхонь.

7 Можливість автоматизації процесу обробки і встановлення технологічного устаткування у виробничі лінії і ділянки.

Методи *лазерної обробки* [1, 5] ґрунтуються на нагріванні, плавленні й ударному навантаженні матеріалу залежно від густини випромінювання лазера і часу його впливу.

Переваги лазерної обробки (ЛЮ) порівняно з класичними методами:

1 Зміцнення локальних за глибиною та площею об'ємів деталей у місцях їх зносу зі збереженням вихідних властивостей матеріалів в основному об'ємі.

2 Твердість при лазерній обробці (ЛЮ) перевищує на 15-20% твердість матеріалу після термообробки (загартування) і хіміко-термічної обробки.

3 Зміцнення поверхонь важкодоступних порожнин, заглиблень, куди промінь лазера може бути введений за допомогою оптичних засобів.

4 Створення "плямистого" поверхневого зміцнення значних площ, при якому не утвориться суцільний крихкий шар (кірка), схильний до розтріскування, деформування і відшаровування.

5 Одержання заданих властивостей (механічних, хімічних та ін.) оброблених поверхонь деталей легуванням різними елементами за допомогою лазерного випромінювання.

6 Одержання за необхідності мікрошорсткості, пружних поверхонь деталей.

7 Відсутність деформацій оброблених деталей, яка обумовлена локальністю обробки, що дозволяє цілком виключити фінішну обробку.

8 Відсутність механічного впливу на оброблюваний матеріал, що разом з безконтактністю лазерного нагрівання обумовлює простоту автоматизації процесу термообробки за контуром, у тому числі деталей складної форми та ін.

Основний недолік лазерної обробки - низький ККД (~15%).

Лазерна імплантація металевих матеріалів реалізується в основному у двох різновидах [5]:

- лазерним випромінюванням впливають на систему “плівка легуючої речовини – матриця”;

- у розплавлений шар матеріалу матриці, ініційований поглинанням випромінювання, інжектуються дрібні частинки легуючого матеріалу.

В основу обробки *іонними пучками* [6, 7] закладено два процеси, що взаємно доповнюють один одного та обумовлюють властивості обробленої поверхні, - це легування і зміна структурно-фазового стану поверхневого шару матеріалу (утворення виділень і метастабільних фаз, аморфізація й утворення радіаційних дефектів).

Технологічні можливості обробки іонними пучками або іонно-променевої обробки (ІПО):

- 1 Можливість легування поверхневого шару деталі практично будь-якими елементами.

- 2 Можливість формування в поверхневому шарі метастабільних станів, у тому числі й аморфного.

3 Очищення від забруднень і активування поверхні оброблюваного матеріалу.

4 Формування необхідного рельєфу поверхні.

5 Нанесення покриттів.

6 Проведення поверхневої термообробки.

Прикладні дослідження з модифікації властивостей іонними пучками проводяться у двох напрямках:

- іонна імплантація у матеріали (II);

- вплив на матеріал потужними іонними пучками (ПП).

Іонна імплантація (implantation – проникнення) – це проникнення іонів у поверхневий шар оброблюваного матеріалу.

Переваги іонної імплантації (II):

1 Незалежність від межі розчинності компонентів у твердій фазі.

2 Легування не пов'язане з дифузією.

3 Дозволяє швидко класифікувати дефекти, пов'язані зі зміною складу сплаву.

4 Не погіршуються об'ємні властивості матеріалу.

5 Немає помітної зміни розмірів.

6 Адгезія не відіграє істотної ролі, тому що немає чіткої межі поділу фаз.

7 Контрольована глибина обробки.

8 Вакуумно-чистий процес.

9 Процес добре контролюється і відтворюється.

Недоліки іонної імплантації:

1 Мала глибина проникнення пучка іонів.

2 Не можна використовувати для обробки деталей зі складною геометрією поверхні, тому що II є процесом обробки в зоні розповсюдження пучка.

3 Відносно висока вартість устаткування для II.

Потужні іонні пучки (ПП) генеруються імпульсними іонними джерелами. Типові параметри ПП: енергія іонів  $E=10^4-10^6$  еВ, густина струму  $j=10-250$  А/см<sup>2</sup> (для модифікації

поверхні) і  $j \approx 1000 \text{ A/cm}^2$  (для випаровування поверхні), тривалість імпульсу 50-1000 нс.

Основна особливість опромінення ППП – дуже швидке нагрівання поверхневого шару деталі до високих температур, аж до плавлення.

*Електронні пучки* (ЕП) застосовуються для [8, 9]:

- модифікації властивостей виробів;
- видалення окислених і ушкоджених при експлуатації поверхневих шарів;
- підготовки поверхні для нанесення захисних покриттів;
- видалення з поверхні деталей покриттів, що відпрацювали свій ресурс (очищення поверхні);
- осадження тонких плівок і покриттів на зовнішні і внутрішні поверхні;
- зварювання, відпалювання, фрезерування, свердління, плавлення, паяння та ін.

При цьому на стадіях опромінення і високошвидкісного охолодження зразків відбуваються такі процеси:

- видалення з поверхні легколетких адсорбованих домішок на основі вуглеводнів;
- плавлення матеріалу поверхневого шару;
- утворення газоплазмового факела;
- нагрівання приповерхневих шарів за рахунок теплопровідності;
- фазоутворення в умовах високошвидкісної кристалізації;
- перерозподіл елементів у перекристалізованій зоні;
- утворення і поширення ударних хвиль;
- кратероутворення, обумовлене неоднорідністю фізико-хімічного стану матеріалу в поверхневих шарах мішеней.

Опромінення матеріалу ЕП завжди супроводжується термічними процесами, тобто процесами, пов'язаними з нагріванням, плавленням і випарюванням матеріалу під дією потоку електронів.



Переваги обробки поверхні електронними пучками порівняно з традиційними методами: можливість концентрації енергії ( $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>); проведення процесу у вакуумі, що забезпечує чистоту оброблюваного матеріалу, а також можливість повної автоматизації процесу.

### ***1.2 ЗАГАЛЬНА СХЕМА ПРОЦЕСУ МОДИФІКАЦІЇ [1, 10]***

Зовнішніми факторами, які характеризують вплив, є вид опромінення, його режими і характеристики зовнішнього середовища, у якому здійснюється обробка. Модифікувати можна будь-яку властивість. Оптимізація процесу полягає у визначенні таких значень зовнішніх факторів і послідовності їх впливу, які забезпечують найкращі бажані показники цієї властивості (параметри оптимізації).

Загальна схема процесу модифікації подана на рисунку 1.1.

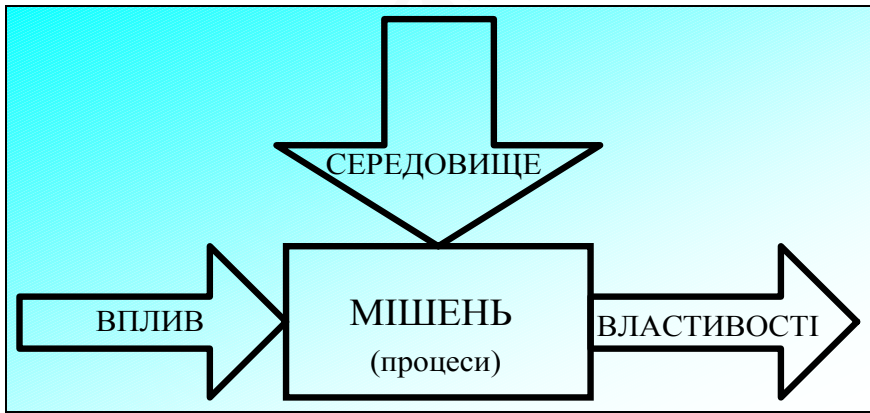


Рисунок 1.1 – Загальна схема процесу модифікації

Принципово можливі такі шляхи вирішення цього завдання:

1 Об'єкт, у даному випадку матеріал, розглядається як "чорна скринька". Варіюванням зовнішніх факторів досягають одержання оптимальних значень параметрів оптимізації. Порядок і послідовність проведення дослідів у цьому випадку досить добре вивчені і відображені в спеціально розроблених статистичних методах планування експерименту.

2 Експериментально досліджуються фізико-хімічні процеси в матеріалі при радіаційному впливі, робиться їх теоретичний опис і встановлюється їх взаємозв'язок зі зміною певних властивостей.

Розглянемо характеристику основних етапів модифікації.

1 *Опромінення*. Його основні параметри:

- а) вид опромінення: лазерне, електронне, іонне, плазмове;
- б) склад частинок;
- в) їх зарядженість;
- г) вміст у пучку (густина);
- г) енергетичні спектри;
- д) тимчасові характеристики напруги, що прискорює, і струму пучка;
- е) розподіл частинок за розміром імпульсів та їх напрямком.

Ці параметри обумовлюють режим опромінення: повний струм і загальну енергію в імпульсі, густину струму і її радіальний розподіл, інтегральну питому енергію за 1 імпульс, періодичність проходження імпульсів.

2 *Мішень*. Вона має такі характеристики:

- а) матеріал: його клас, вихідний хімічний і структурно-фазовий склад, початкова дефектність;
- б) вид попередньої обробки: шліфування, полірування, термічна і хімічна обробка;
- в) форма і геометричні розміри зразків: плівки, пластинки, для багаточарових систем – товщина шарів, їх склад, умови приготування;

г) орієнтація мішені щодо пучка (нормальне падіння, під кутом, уздовж кристалічних напрямків);

г) умови закріплення мішені: на підкладці або ні, наявність на мішені апаратури, що реєструє, наприклад датчиків.

Характеристики мішені надійно визначаються лише до початку опромінення і після нього. Вони дуже змінюються вже на початку імпульсу опромінення. Це значно ускладнює проведення теоретичного опису радіаційних процесів, наприклад побудова фазових діаграм не завжди можлива.

3 *Середовище*. Це одна з комплексних характеристик умов опромінення, що містить в собі таку інформацію:

а) де проводиться опромінення: вакуум, повітря, спеціальні середовища (інертні гази), їх склад і хімічна активність з матеріалом мішені, наявність контрольованих і неконтрольованих домішок, їх склад;

б) температура, тиск і вологість;

в) умови охолодження (примусовий обдув, тепловіддача через підкладку та ін.).

4 *Процеси, що відбуваються під час і після модифікації*:

а) збудження електронної підсистеми. Енергія при опроміненні твердих тіл іде на створення колективних плазмових коливань (плазмонів), тобто на збудження електронної підсистеми, що впливає, наприклад, на крихке руйнування кристалів;

б) збудження ядерної підсистеми;

в) балістичне перемішування, являє собою процес прямої трансформації енергії опромінення в ядерній підсистемі і полягає в механічному перемішуванні частинок пучка, що рухаються, при їх зіткненнях з атомами матриці (процес дуже швидкий,  $\sim 10^{-13}$  с);

г) нагрівання ґратки, виникає область теплового впливу;

г) абляція, розглядається як високошвидкісний інтенсивний процес викидання матеріалу під дією

концентрованих потоків енергії, таких, як потужні лазерні, електронні й іонні пучки. Причинами абляції є:

- надщільне збудження електронної підсистеми й утворення плазми;

- різкий перегрів матеріалу, що викликає його вибухове скипання і викидання;

- д) механічні напруги;

- е) втрати енергії і тепловіддача середовищу. Енергія витрачається на

- механічні коливання атомів мішені;

- випромінювання;

- абляцію;

- є) структурно-фазові перетворення, утворення стабільної структури, модифікування властивостей.

### **Контрольні запитання**

1 Поясніть вплив поверхні на властивості матеріалів.

2 Які традиційні методи обробки матеріалів ви знаєте?

Поясніть їх.

3 Чим обумовлено використання обробки зарядженими частинками та лазером?

4 Які види впливу поєднує у собі плазмодетонаційна обробка? Які її види та переваги ви знаєте?

5 Назвіть переваги та недоліки обробки поверхні лазерним променем. Які різновиди такої обробки ви знаєте?

6 Які можливості та напрямки обробки поверхні іонними пучками?

7 Що таке іонна імплантація? Її переваги та недоліки.

8 Наведіть типові параметри та особливості обробки поверхні потужними іонними пучками.

9 Для чого застосовується обробка електронними пучками?

10 Які процеси відбуваються при електронній обробці? Які її переваги?

11 У чому полягає оптимізація процесу модифікації? Наведіть схему модифікації та шляхи оптимізації.

12 Поясніть основні параметри опромінення.

13 Які характеристики мішені та середовища?

14 Назвіть та поясніть процеси, які відбуваються в результаті модифікації.

## ***РОЗДІЛ 2 ОБРОБКА ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ***

2.1 Фізичні основи взаємодії прискорених електронів з речовиною.

2.2 Електронно-променева обробка (ЕПО).

### ***2.1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ПРИСКОРЕНИХ ЕЛЕКТРОНІВ З РЕЧОВИНОЮ [7, 9, 11]***

*2.1.1 Пружні і непружні зіткнення електронів з атомами*

Рух прискорених електронів у речовині супроводжується їх розсіюванням, у результаті чого змінюються траєкторії руху і відбувається гальмування електронів. При взаємодії електронів малих енергій ( $E \sim 100$  кеВ) має місце пружне і непружне розсіювання.

*Пружне* розсіювання відбувається при зіткненні електронів з ядрами атомів. Внаслідок пружних зіткнень електронів з атомами речовини в основному змінюється їх імпульс, тобто відбувається відхилення електрона від напрямку первісного руху. При розсіюванні швидких електронів на атомах, тобто таких електронів, швидкість яких більша за орбітальну швидкість електронів атома, розсіювання в основному відбувається на малі кути.

Залежність диференціального перерізу пружного розсіювання  $\sigma$  від кута розсіювання  $\theta$  у цьому випадку

описується резерфордівською функцією диференціального перерізу з екрануванням

$$\sigma(\theta, v) = \frac{z^2 e^4}{64\pi^2 \varepsilon_0^2 m^2 v^4} \frac{1}{\left( \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + \alpha \right)^2}, \quad (2.1)$$

де  $\alpha = 0.137 \frac{z^{2/3} e^4}{\hbar^2 v^2}$  - параметр екранування;

$Z$  - порядковий номер елемента;

$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  Ф/м - діелектрична проникність вакууму;

$m = 9.1091 \times 10^{-31}$  кг,  $e = 1.60210 \times 10^{-19}$  Кл - відповідно маса і заряд електрона;

$\hbar = h/(2\pi) = 1.054 \times 10^{-34}$  Дж×с - стала Планка;

$v$  - швидкість руху електронів;

$\theta$  - кут розсіювання.

Залежність диференціального перерізу розсіювання електронів від кута розсіювання показана на рисунку 2.1.

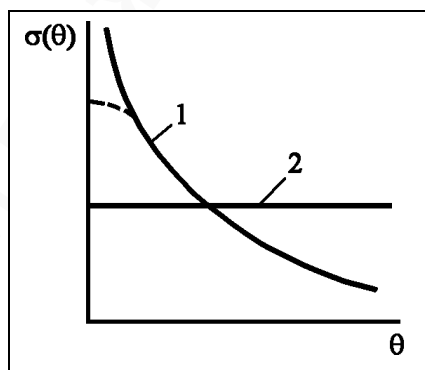


Рисунок 2.1 - Диференціальний переріз пружного розсіювання швидких (крива 1) і повільних (крива 2) електронів

Енергія, передана при пружному зіткненні швидких електронів з атомами, має порядок  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  еВ, тому втратами енергії при пружному розсіюванні швидких електронів, як правило, нехтують.

Якщо енергія електронів, що зіштовхуються з атомами, мала, тобто їх швидкість менша за швидкість орбітальних електронів, то диференціальний переріз пружного розсіювання електронів практично не залежить від кута розсіювання, тобто  $\sigma(\theta, \nu) = \text{const}$  (пряма 2 на рис. 2.1). У цьому випадку говорять про ізотропне, або *дифузне*, розсіювання. Втрати енергії електронами в основному пов'язані з *непружними* зіткненнями електронів з атомами, молекулами речовини, а також з вільними електронами (електронами провідності). Внаслідок непружних зіткнень відбуваються збудження й іонізація атомів, дисоціація молекул або утворення нових зв'язків, збудження колективних коливань в електронній плазмі, утвореної вільними електронами (збудження плазмонів). Незважаючи на те, що втрати енергії електронів, які рухаються, відбуваються дискретно, при переході від одного атома до іншого внаслідок високої густини атомів ( $N \sim 10^{28}$ - $10^{29}$  м<sup>-3</sup> і середня відстань між атомами в речовині дорівнює 0.3-0.4 нм) можна розглядати передачу енергії від електронів речовині неперервною. Тому вводиться поняття *питомих енергетичних втрат* електрона в даній речовині. Ця величина позначається  $(dE/ds)$  і дорівнює переданій електроном енергії  $dE$  на шляху  $ds$ .

Найчастіше для опису енергетичних втрат використовується рівняння Бете

$$\frac{dE}{ds} = \frac{Ne^4Z}{2\varepsilon_0 E} \ln \frac{2E}{I(Z)}, \quad (2.2)$$

де  $N$  - концентрація атомів речовини;

$E$  - кінетична енергія електрона;

$I(Z) \approx 13.5 \times Z$  - середня “енергія іонізації” атома, виражена в електрон-вольтах.

Формула (2.2) справедлива лише для швидких електронів. Для повільних електронів рівняння (2.2) переходить у співвідношення

$$\left| \frac{dE}{dS} \right| = 0.0783 \frac{Z}{AE} \ln \frac{E}{I(Z)} \sqrt{\frac{e}{2}}, \quad (2.3)$$

де  $A$  – атомна маса.

Для практики становить інтерес просторовий розподіл траєкторій пробігів електронів і глибина пробігу електронів. Траєкторний пробіг електрона  $R_s$  визначається за формулою

$$R_s \approx \frac{32 \varepsilon_0 E_0^2}{Ne^4 z}, \quad (2.4)$$

а глибина проникнення електрона  $R$  - за формулою

$$R = \frac{E_0^2}{\rho b_1}, \quad (2.5)$$

де  $E_0$  – початкова енергія електрона, кеВ;

$\rho$  - густина речовини, г/см<sup>3</sup>;

$b_1$  - константа гальмування, яка слабо залежить від величини  $Z$ . Величина  $1/b_1$  змінюється в інтервалі  $(2.1-2.54) \times 10^{-6}$  (кеВ $\times$ см<sup>2</sup>)/г при зміні  $Z$  від 13 до 80.

Під час руху електрона у твердому тілі за випадковим законом змінюються прицільна відстань, значення потенціалу взаємодії, кількість зіткнень та ін. Зі збільшенням кількості зіткнень електронів з атомами зменшується енергія електронів і починає змінюватися характер пружного розсіювання - від



резерфордівського розсіювання до дифузного. Найбільш точним методом розрахунку індивідуальних траєкторій електронів у речовині є статистичний метод Монте-Карло, який ґрунтується на моделюванні на ЕОМ реального випадкового процесу із застосуванням генератора випадкових чисел.

### 2.1.2 Модель дифузного проникнення електронів у речовину (модель Арчарда)

У моделі Арчарда (рисунок 2.2) передбачається, що електрони спочатку проходять деякий шлях  $x$  без розсіювання, а потім ізотропно (дифузно) розсіюються. Якщо вважати, що діаметр електронного променя  $d_0$  малий ( $d_0 \ll R$ ), то поглинання енергії відбувається в сфері радіусом  $r_D = (R - x_D)$  з центром сфери, який розміщений на глибині

$$x_D = \frac{1 - 2\eta}{2(1 - \eta)} R \approx \frac{12}{Z + 8} R, \quad (2.6)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт непружного відбиття електронів від поверхні речовини.

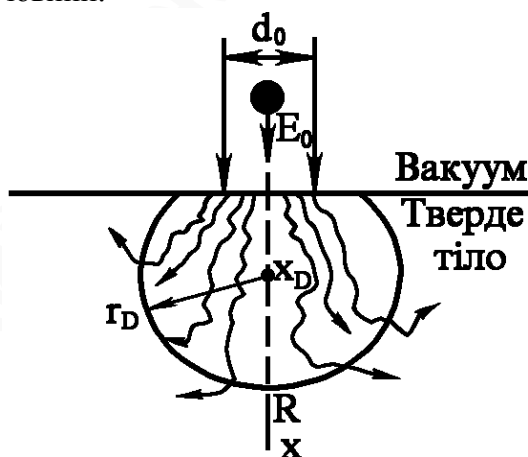


Рисунок 2.2 – Просторовий розподіл траєкторій електронів у речовині

Із формули (2.6) випливає, що

$$r_D \cong \frac{z-4}{z+8} R. \quad (2.7)$$

Для вирішення практичних завдань важливо знати не область розподілу траєкторій електронів, тому що після кінцевого гальмування електрони будуть невідрізнявані від електронів речовини, а область *розподілу виділеної електронами енергії* (рис. 2.3).

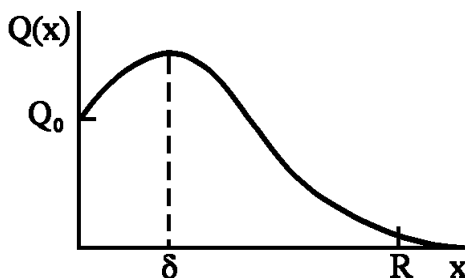


Рисунок 2.3 - Розподіл густини поглиненої енергії електронів у речовині за глибиною

Ефективні енергетичні втрати електрона, які враховують дифузний характер розлітання електрона, визначаються за формулою

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_e = \frac{E_0}{R} \left(1 - \frac{x}{R}\right)^{5/4} \left(3 - 2 \exp\left(-\frac{z+8}{4} \frac{x}{R}\right)\right). \quad (2.8)$$

З рисунку 2.3 бачимо, що максимум енерговиділення спостерігається на глибині  $x=\delta$ . Глибина максимального енерговиділення  $\delta$  визначається з виразу

$$\frac{\delta}{R} = -\frac{-z+13}{z+8} + \frac{8}{z+8} \exp\left(\frac{z+8}{4} \frac{\delta}{R}\right). \quad (2.9)$$

При аналізі руху електронів у багатокомпонентних речовинах, наприклад сплавах, завдання гальмування і розсіювання електронів вирішують, розглядаючи деяке однокомпонентне середовище, еквівалентне даному сплаву. У цьому випадку вводять *ефективний атомний номер*

$$Z_{\text{еф}} = \sum_{i=1}^N a_i M_i \sum_{i=1}^N Z_i \frac{c_i}{M_i} = M_x \sum_{i=1}^N Z_i \frac{c_i}{M_i}, \quad (2.10)$$

де  $M_x = \sum_{i=1}^N a_i M_i$  - масове число матриці;

$N$  - кількість компонентів сплаву;

$a_i$  - атомна концентрація  $i$ -го елемента в сплаві;

$M_i$  - атомна маса  $i$ -го елемента;

$Z_i$  - атомний номер  $i$ -го елемента;

$c_i$  - масова концентрація  $i$ -го елемента, причому  $\sum_{i=1}^N c_i = 1$ .

Зв'язок між атомною  $a_1$  і масовою  $c_1$  концентраціями елементів у сплаві:

$$a_1 = \frac{\frac{c_1}{M_1}}{\frac{c_1}{M_1} + \frac{c_2}{M_2}}, \quad c_1 = \frac{a_1 M_1}{a_1 M_1 + a_2 M_2}. \quad (2.11)$$

### 2.1.3 Теплові ефекти при електронно-променевому нагріванні

При непружному розсіюванні електронів електрони передають свою енергію речовині. На першій стадії відбувається іонізація або збудження атомів речовини, pojawiaються високоенергетичні нерівноважні електрони в зоні провідності. Внаслідок електрон-електронних зіткнень відбувається вирівнювання енергії вільних електронів; електронний газ нагрівається за час  $\tau \sim 10^{-13}$  с до температури  $T_e$ , яка набагато вища за температуру ґратки  $T_i$ . Протягом ряду непружних зіткнень електронів з іонами ґратки (електрон-фононна взаємодія) за час  $\tau \sim 10^{-11}$  с електрони передадуть надлишкову енергію ґраткам, внаслідок чого температури електронного газу і ґратки зрівнюються ( $T_e = T_i$ ). Речовина при цьому нагрівається.

На наступній стадії відбудеться релаксація атомів речовини, при якій надлишкова енергія частково перейде в теплову, інша її частина буде витрачена на генерацію електромагнітного випромінювання. Через те що час життя атомів у збудженому стані  $\tau \sim 10^{-9}$  с, то після закінчення цього часу після проникнення електронів променя в речовину можна говорити про єдину фізичну температуру  $T$  системи “електрон - ґратка” і користуватися для розрахунку нагрівання речовини феноменологічним рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a^2 \nabla^2 T = \frac{Q_v(x, y, z, t)}{\rho C_v}, \quad (2.12)$$

де  $a$ ,  $C_v$  - відповідно температуропровідність і питома теплоємність речовини;

$Q_v$  - об'ємна густина потужності джерела теплоти;

$\rho$  - густина речовини.

З урахуванням рівняння (2.8) вираз для об'ємної густини потужності буде мати вигляд

$$Q_v = Q_{v0} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \left(1 - \frac{x}{R}\right)^{5/4} \left(3 - 2 \exp\left(-\frac{z + 8}{4} \frac{x}{R}\right)\right), \quad (2.13)$$

де  $Q_{v0}$  – об’ємна густина потужності на поверхні зразка по осі променя;

$r$  і  $r_0$  – радіус та ефективний радіус променя, які показані на рисунку 2.4.

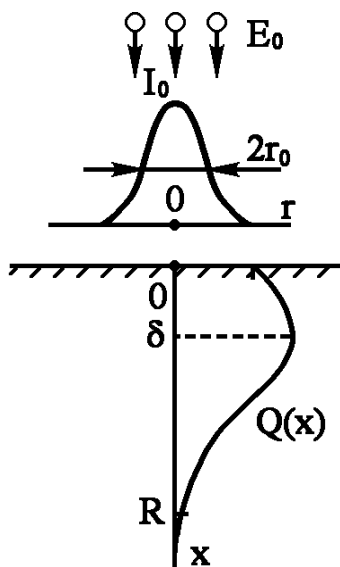


Рисунок 2.4 - Розподіл виділеної електронами енергії за об’ємом речовини

Зменшення температури на поверхні пояснюється тим, що джерело теплоти з максимальною температурою розміщене на глибині  $\delta$ . При збільшенні енергії у 5 разів глибина  $\delta$  збільшується в  $E^2=25$  разів.

Для матеріалів з високою теплопровідністю (мідь) температура поверхні слабо залежить від енергії електронів; для матеріалів приблизно з тією самою густиною, але зі значно низькою теплопровідністю (нержавіюча сталь) температура поверхні різко знижується, у той час як максимальна температура на глибині  $\delta$  може перевищувати температуру кипіння. Вольфрам має значно більшу густину, тому теплове джерело локалізується поблизу поверхні, а відносно висока теплопровідність дозволяє зрівняти температуру за глибиною.

При досить великій густині потужності електронного променя відбувається випаровування речовини без переходу в рідкий стан (сублімація). Втратами на теплопровідність і променисте тепловипромінювання можна знехтувати. Енергетичний баланс можна записати в такий спосіб:

$$\rho L_{\text{вип}} S \Delta h = P \Delta t, \quad (2.14)$$

де  $\rho$  - густина матеріалу;

$L_{\text{вип}}$  - теплота випаровування;

$S$  - площа енерговиділення променя;

$\Delta h$  - глибина матеріалу, що випаровується за час  $\Delta t$ ;

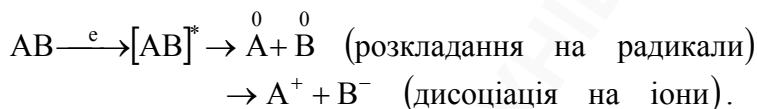
$P$  - теплова потужність, виділена електронами.

#### 2.1.4 Фізичні перетворення в речовині при опроміненні її електронами [8]

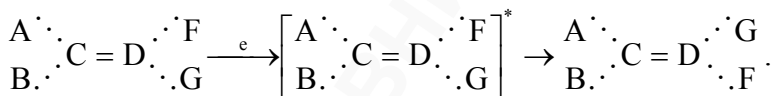
Рух прискорених електронів у речовині супроводжується їх гальмуванням. Електрони втрачають свою енергію внаслідок непружних зіткнень з атомами і молекулами речовини. В атомарних кристалах збудження й іонізація атомів унаслідок непружного зіткнення зі швидкими електронами призводить до виникнення дефектів ґратки: утворення пари вакансія - міжвузловий атом, нагрівання ґратки; збудження електромагнітних випромінювань, так званих гальмового і характеристичного рентгенівських випромінювань.

При взаємодії швидких електронів з речовиною, яка складається з багатоатомних молекул, відбуваються більш складні процеси, що приводять до радіаційно-хімічних перетворень. За умови впливу на молекули речовини швидкими електронами можливий цілий цикл первинних хімічних перетворень.

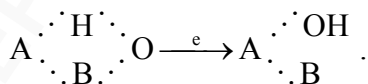
1 Збудження молекули з подальшою дисоціацією її на активні частинки:



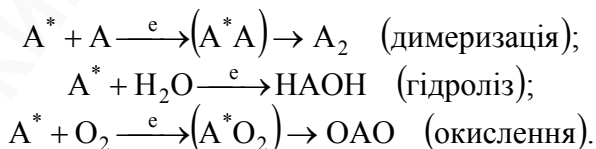
2 Перегрупування атомів у структурі молекули під впливом електронного удару:



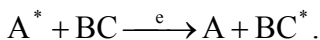
3 Переміщення (аутомеризація) окремих атомів з однієї частини конфігурації молекули в іншу:



4 Приєднання до збудженої молекули іншої молекули:

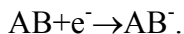


5 Передавання електронної енергії збудження від однієї молекули до іншої чи від однієї частини молекули до іншої:

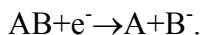


У процесі радіаційно-хімічних перетворень, після того як відбулися первинні хімічні перетворення, виникають вторинні, або “темнові”, реакції різних хімічних сполук.

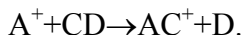
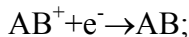
1 Захоплення “теплових” електронів:



2 Дисоціативне захоплення електрона:



3 Рекомбінація іона з електроном або іона з молекулою:



## **2.2 ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ОБРОБКА (ЕПО) [8, 11]**

У технологічних процесах нагрівання електронним променем забезпечується густина потужності  $q=10\text{-}10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. При цьому нагрівання матеріалу без плавлення, як правило, здійснюють при  $q < 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, плавлення - при  $q=10^4\text{-}10^6$  Вт/см<sup>2</sup> і випарювання – при  $q=10^6\text{-}10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Вибір конкретного значення густини потужності обумовлюється фізичними характеристиками матеріалу і видом обробки. Наприклад, використовуючи електронний потік з  $q=10^4$  Вт/см<sup>2</sup> для плавлення металу, потрібно мати на увазі, що на плавлення витрачається приблизно 35% енергії променя; 60% її виділяється в об’ємі металу і 5% виноситься з частинками, що випаровуються.

Обробку можна проводити як несфокусованим, так і сфокусованим (променевим) електронним потоком.



### 2.2.1 Обробка несфокусованим пучком

*Нагрівання* несфокусованими потоками електронів використовується в основному для знегажування матеріалу деталей, рекристалізації плівкових композицій перед механічною обробкою у вакуумі або дифузійним зварюванням. Ці процеси доцільно здійснювати у вакуумних пристроях великих об'ємів. Нагрівання електронним бомбардуванням здійснюється при напругах, що прискорюють, до 10 кеВ.

*Переплавлення матеріалу* використовується в технології особливо чистих матеріалів, а також матеріалів, які мають підвищену хімічну активність і термічну стійкість. Metalli внаслідок вакуумного переплавлення очищаються від легколетких домішок, у них знижується концентрація розчинених газів, а пластичність підвищується.

На відміну від високочастотного переплавлення при електронному переплавленні зменшується імовірність забруднення домішками. В установках з декількома гарматами можна переплавити кілька металів одночасно, одержуючи сплав необхідного складу.

Електронне плавлення використовується також для *виращування монокристалів* за методами Чохральського і Вернейля. За першим методом з розплаву з певною температурою, підтримуваною бомбардуванням електронами, вгору за допомогою попередньо орієнтованого запалу витягають монокристалічний злиток. У методі Вернейля матеріал у вигляді порошку подається на поверхню розплаву. Ця поверхня безперервно розігрівається електронним бомбардуванням. Монокристал витягається вниз зі строго контрольованою швидкістю.

### 2.2.2 Обробка сфокусованим пучком

*Зварювання електронним пучком.* Процес можна проводити при низькій прискорюючій напрузі (до 30 кВ),

середній (до 60 - 80 кВ) і високій (до 200 кВ). Електронний пучок на поверхні стику матеріалів фокусується у пляму діаметром від 0.1 мм до декількох міліметрів. Густина потужності при цьому складає  $q=10^5 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Змінюючи параметри процесу, можна одержувати різні співвідношення глибини проплавлення  $h$  до ширини шва  $d$ . За величиною цього співвідношення розрізняють такі режими зварювання:

- м'який ( $h \ll d$ );
- перехідний ( $h \approx d$ );
- твердий ( $h > d$ );
- з "кинджальним" проплавленням ( $h \gg d$ ).

Простота керування параметрами пучка в часі і просторі дозволяє реалізувати як безперервну, так і імпульсну обробку; виконувати шви складної конфігурації. Вибір режиму зварювання залежить від теплофізичних властивостей матеріалів, конструкції зварного з'єднання і необхідної геометрії зони проплавлення.

Особливий інтерес становить проведення зварювання з глибоким, так званим "кинджальним", проплавленням, коли можна досягти відношення  $h/d=40$ . Цей режим характеризується великими прискорюючими напругами і густиною потужності  $q > 10^7 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Максимальна глибина проникнення залежить від питомої потужності електронного променя і від часу обробки і на кілька порядків перевищує траєкторний пробіг електронів у твердій фазі. Через те що глибина проникнення електронів у матеріал пропорційна  $U_{\text{приск}}^2$ , основне виділення енергії відбувається під поверхневим шаром. Перегрівання у глибині матеріалу не компенсується відведенням теплоти за рахунок теплопровідності. Тому виникає пароплазмовий канал з високим тиском пари. Тиск пари обумовлюється температурою і може досягати значень від декількох сотень до тисяч паскалів залежно від виду матеріалу.

Канал з радіусом  $R_k$  періодично перекривається рідкою плівкою, крізь яку електрони пучка проходять з малими втратами (рис. 2.5), тому енергія потоку електронів витрачається в основному на випаровування матеріалу в основі каналу. Внаслідок цього в ньому ще більше зростає тиск парів.

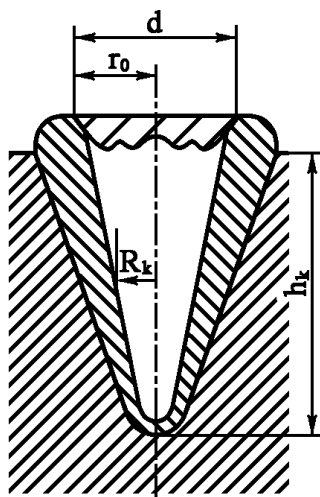


Рисунок 2.5 – Утворення пароплазмового каналу при глибокому проплавленні

Паралельно розвивається процес вибухового кипіння речовини, у каналі, що утворився, виникає ударна хвиля, яка виносить рідку фазу з порожнини каналу назовні. За наявності пароподібного стану в каналі відбувається збільшення довжини пробігу електронів  $i$ , отже, додатковий розігрів дна каналу від електронного бомбардування. Можливе також посилення нагрівання через додаткове фокусування електронного пучка позитивними іонами парів металу в каналі. Процес утворення каналу під впливом великої кількості сил нестійкий.

Безпосередньо після кипіння матеріалу концентрація частинок пари зростає до  $10^{16}$ - $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Вона досягає

критичного значення, призводячи до розриву плівки, коли частина парового потоку іонізується і стають можливими електронно-плазмові взаємодії. Результатом цих взаємодій, як і багаторазових пружних взаємодій електронів, є розмиття потоку і розсіювання електронів на бічні стінки. При розсіюванні їх до 90-95% від загального потоку енергія пучка витрачається на утворення рідкої фази. Рідка фаза витісняється нагору реактивною силою пари і знову замикає канал у його верхній частині. Весь процес утворення глибокого каналу має пульсуючий характер. Унаслідок періодичності процесів усередині каналу спостерігається хвилеподібний характер його перерізу за глибиною. При критичному тиску пари перед розривом плівки пучок віддає в речовину найбільшу енергію, зона теплового впливу розширюється.

На певному етапі розглянутого процесу може виявлятися ефект іонного фокусування електронного пучка, коли іонізована парова компонента діє як електростатична лінза.

Радіус каналу можна визначити за формулою

$$R_k = \frac{2\sigma}{v_g \sqrt{\frac{2kT}{M} - \rho h_k}}, \quad (2.15)$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу;

$v_g$  – швидкість випаровування матеріалу при температурі  $T$ ;

$\rho$  - густина рідкого металу;

$M$  – молярна маса матеріалу розплаву;

$h_k$  – глибина кратера;

$k$  – стала Больцмана.

*Розмірна обробка* проводиться за допомогою гостросфокусованих потоків електронів із густиною потужності  $q \geq 5 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Вона ґрунтується на інтенсивному випаровуванні матеріалів із зони впливу пучка з мінімальним

утворенням рідкої фази. Цей вид обробки використовується для формування планарних зображень, припасування електричних номіналів елементів тонкоплівкових схем, обробки виробів з таких матеріалів, як кремній, германій, кераміка, ферити, кермети та ін. Потужність установок для цієї мети у безперервному режимі, як правило, не перевищує 1 кВт, а в імпульсному - 15 кВт. Тривалість імпульсів вибирають у діапазоні  $\tau_{imp}=10^{-7}-10^{-3}$  с, реалізуючи моноімпульсний або багатоімпульсний режим.

*Напилювання плівок електронно-променевим випаровуванням матеріалу* широко застосовується в промисловості. Через те що процес проводиться у вакуумі, а випаровування матеріалу відбувається з розплаву, що міститься, як правило, у водоохолоджуваному тиглі, то одержані плівки характеризуються малим вмістом небажаних домішок. Крім того, висока температура поверхні, що напилюється, яка підтримується прямим розігрівом електронним бомбардуванням, стимулює процеси термічного розкладання забруднень і глибоке знегажування матеріалу.

Особливо широко застосовується електронно-променеве нанесення плівок у мікроелектроніці, де використовується велика номенклатура різних матеріалів. Густина потужності на поверхні розплаву вибирають у діапазоні  $10^4-10^7$  Вт/см<sup>2</sup> при швидкості випаровування  $10^{-5}-10^{-2}$  г/(см<sup>2</sup>×с).

Для одержання рівномірних покриттів підкладки розміщують на поверхнях з рівною густиною осадження частинок пари, переміщують підкладки щодо парового потоку, наприклад, закріплюючи їх на плоскому або сфероїдальному тримачі, нахиленому до осі випарника й устаткованому приводом із планетарним механізмом. Доцільно застосовувати джерела пари з великою площею випарювання.

Збільшити швидкість нанесення плівок можна, підвищуючи потужність електронного потоку, тому що пружність пари залежить від температури поверхні випарника

приблизно експоненціально. Однак з певного значення потужності збільшення швидкості припиняється внаслідок значних витрат енергії на розсіювання, збудження й іонізацію парів.

### Контрольні запитання

1 Опишіть пружні зіткнення для швидких та повільних електронів.

2 Як впливають непружні зіткнення електронів з атомами, молекулами та електронами?

3 Що називається питомими енергетичними втратами?

4 У чому полягає суть модель Арчарда?

5 Який розподіл густини поглиненої енергії електронів? За якою формулою визначається глибина максимального енерговиділення?

6 Які процеси відбуваються при непружному розсіюванні електронів?

7 Поясніть вплив температуропроводності матеріалу на температуру поверхні.

8 Наведіть первинні хімічні перетворення у матеріалі при опроміненні електронами.

9 Наведіть та поясніть вторинні хімічні перетворення.

10 Яким чином впливає густина потужності електронного пучка, характеристики матеріалу на вид обробки?

11 Опишіть види обробки несфокусованим електронним пучком.

12 Які параметри електронного пучка та режими зварювання електронним пучком ви знаєте?

13 Опишіть зварювання з “кінджальним” проплавленням.

14 Яке інше застосування сфокусованого електронного пучка вам відоме?

## **РОЗДІЛ 3 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІОННОГО ЛЕГУВАННЯ**

3.1 Іонна імплантація в метали.

3.2 Опромінення потужними іонними пучками (ПП).

### **3.1 ІОННА ІМПЛАНТАЦІЯ В МЕТАЛИ**

3.1.1 *Фізичні процеси в металах при іонній імплантації* [2, 7, 12]

Іонно-імплантовані сплави формуються внаслідок проникнення прискорених іонів легуючої речовини у вихідну металеву матрицю.

Проходження іонів крізь тверді тіла супроводжується розсіюванням, зіткненнями з частинками середовища, що приводить до гальмування і зміни напрямку руху іонів, зміщення атомів кристала з вузлів ґратки, накопичення домішок в мішені, розпилення поверхні матеріалу, атомного перемішування, формування профілю розподілу імплантованих елементів, утворення нових фаз.

Для опису руху іона у твердому тілі використовується кілька спрощених припущень.

По-перше, розглядаються парні зіткнення іон - атом, і в першому наближенні впливом кристалічних ґраток на процес зіткнення нехтують. Справедливість цього припущення підтверджується тим, що передана іоном атому речовини енергія порядку тисячі електрон-вольт набагато більша за енергію зміщення атома з вузла ґратки  $E_{zm} \sim 30$  еВ.

По-друге, вважають, що, незважаючи на дискретний характер передачі енергії під час свого руху у твердому тілі, іон втрачає енергію безперервно. Тому вводяться поняття енергетичних втрат іона у твердому тілі  $dE/dR$ , які чисельно дорівнюють втратами енергії іона на одиниці довжини його пробігу.

По-третє, передача енергії від іона атому здійснюється в результаті пружних і непружних зіткнень.

### 3.1.2 Формування профілю розподілу імплантованих елементів [7, 12-14]

*Механізми втрат енергії. Переріз гальмування.* При проникненні прискореного іона (енергія іонів 1-10000 кеВ) у металеву матрицю основними механізмами втрат енергії є такі:

- втрати внаслідок ядерних пружних зіткнень  $E_n$ . Це головний механізм втрат енергії при низьких швидкостях іонів. Частинка, яка налітає, передає свою енергію ядрам (атомам) мішені в пружних зіткненнях, що призводить до утворення зміщених з рівноважних положень атомів - атомів віддачі;

- збудження електронів і іонізація гальмуючого середовища  $E_e$ . Це домінуючий механізм втрат енергії для швидких іонів. Гальмування частинок при іонізації і збудженні електронів середовища називають електронними або непружними втратами енергії;

- випромінювання фотонів. Гальмування за рахунок генерації фотонів стає істотним тільки при релятивістських швидкостях (гальмівне, перехідне випромінювання, випромінювання Вавилова-Черенкова);

- ядерні реакції. Ядерні реакції при близьких іон-атомних зіткненнях характерні тільки певним комбінаціям іон-атом і енергіям частинок.

При зіткненні іона, що проникає, з атомами матриці він може передати цьому атому енергію, яка значно перевищує граничну енергію зміщення атома з місця його розміщення в кристалічних ґратках матриці  $E_{зм}$ . Тому первинно вибитий атом віддачі, маючи досить велику енергію, може ініціювати розвиток цілого каскаду зіткнень, що супроводжується зміщенням значної кількості атомів матриці. Фаза каскаду зіткнень відбувається протягом  $\sim 10^{-13}$  с, при цьому в матриці



утворюється велика кількість дефектів типу вакансій і міжвузлових атомів.

Для опису гальмування частинок з енергією  $E$  вводиться поняття втрат енергії  $E$  на шляху  $x$  у мішені. Основною характеристикою гальмування іонів є переріз гальмування (чи питомі втрати енергії на одиницю шляху)

$$S = \frac{1}{N_x} \left[ - \left( \frac{dE}{dx} \right) \right], \quad (3.1)$$

де  $S$  – переріз гальмування;

$N_x$  – концентрація атомів у матеріалі, яка дорівнює

$$N_x = N_0 \rho / M_2, \quad (3.2)$$

де  $N_0 = 6.0248 \times 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> - число Авогадро;

$\rho$  - масова густина речовини;

$M_2$  - масове число для атомів мішені.

У випадку ядерних втрат енергії іонів найбільш точним виразом для перерізу ядерного гальмування  $S_n(\varepsilon)$  в одиницях  $\varepsilon$

$$S_n(\varepsilon) = \frac{0.5 \ln(1 + 1.3833\varepsilon)}{\varepsilon + 0.013218\varepsilon^{0.21226} + 0.19594\varepsilon^{0.5}}, \quad (3.3)$$

де  $\varepsilon$  - зведена енергія.

$$\varepsilon = \frac{a E_{\text{відн}}}{Z_1 Z_2 e^2}, \quad (3.4)$$

де  $a$  - параметр екранування Томаса - Фермі;

$E_{\text{відн}}$  - відносна енергія;

$Z_1$  і  $Z_2$  - заряди іона й атома мішені відповідно;  
 $e$  - заряд електрона.

Відносна енергія  $E_{\text{відн}}$  обчислюється за формулою

$$E_{\text{відн}} = \frac{\mu v^2}{2}, \quad (3.5)$$

де  $v$  - швидкість руху іона;

$\mu$  - зведена маса, яка визначається за формулою

$$\mu = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}, \quad (3.6)$$

де  $M_1$  і  $M_2$  - масове число іона і матриці відповідно.

Параметр екранування Томаса - Фермі

$$a \approx \frac{0.885 a_0}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_x^{2/3}}}, \quad (3.7)$$

де  $a_0 = 5.3 \times 10^{-9}$  см - перший борівський радіус атома водню.

Вираз (3.3) є справедливим при  $\varepsilon < 30$ . При  $\varepsilon > 30$  він переходить у формулу

$$S_n(\varepsilon) = \frac{1}{2\varepsilon} \ln(1.29\varepsilon). \quad (3.8)$$

Для розрахунку перерізу ядерного гальмування в одиницях зведеної енергії при  $0.01 \leq \varepsilon \leq 10$  можна користуватися виразом, виведеним Юдіним:

$$S_n(\varepsilon) = \frac{g\varepsilon^{1/2}}{b + \varepsilon}, \quad (3.9)$$

де  $g=0.45$ ;  
 $b=0.3$ .

У випадку електронних втрат енергії вираз для перерізу непружного гальмування обумовлюється або залежністю  $S_e \sim v$  (для низьких швидкостей) або  $S_e \sim \ln(\text{const} \times v^2)/v^2$  (у випадку великих швидкостей). Найбільш важкою для визначення  $S_e$  є область середніх швидкостей, де необхідно враховувати кулонівську іонізацію і збудження електронів гальмуючого середовища.

Інформації про  $S_n$  і  $S_e$  достатньо для розрахунку повного пробігу іонів  $R$  у речовині:  $R = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_e(E) + S_n(E)}$ . За рахунок

різниці траєкторій окремих іонів, що рухаються у твердому тілі, їх індивідуальні пробіги можуть бути істотно різними.

Симетричні профілі розподілу імплантованої домішки за глибиною мішені досить добре описуються середнім проективним пробігом  $R_p$  (глибина залягання максимальної концентрації домішки) і поздовжнім розкидом пробігів  $\Delta R_p$  (поздовжній страглінг). Як функцію розподілу іонів за глибиною  $x$  мішені вибирають розподіл Гауса

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp\left\{-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right\}, \quad (3.10)$$

де  $D$  - інтегральна доза опромінення (флюенс) на одиницю площі мішені.

Для такої функції розподілу значення  $x=R_p$  відповідає максимальній концентрації домішки

$$N_{\max} = \frac{D}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p}. \quad (3.11)$$

*3.1.3 Процеси, які відбуваються в матеріалі при іонній імплантації [2, 6, 12, 15]*

*3.1.3.1 Радіаційно-стимульована дифузія, радіаційно-стимульована сегрегація*

На профілі розподілу імплантованих елементів впливає як термічна дифузія, що виявляється під час проведення відпалення або в процесі імплантації, якщо зразок дуже розігрівається за рахунок потужності іонного пучка, так і радіаційно-стимульована дифузія (РСД), що є результатом впливу високоенергетичних частинок. З фізичної точки зору РСД виявляється в тому випадку, якщо імплантацією створюється більша за рівноважну кількість дефектів.

Радіаційно-стимульована сегрегація (РСС) – істотне збільшення локальної концентрації елементів у деяких областях.

РСД і РСС залежать від кількості вільно мігруючих дефектів, які утворюються внаслідок опромінення, тобто вони обумовлюються інтенсивністю іонного пучка. Температурний інтервал, у якому впливають на перерозподіл елементів на великих відстанях РСД і РСС, приблизно дорівнює  $(0.3-0.6) T_{пл}$ , де  $T_{пл}$  – температура плавлення.

*3.1.3.2 Розпилення [2, 12, 13, 16]*

Іонна імплантація практично завжди супроводжується розпиленням поверхневих шарів.

Розпилення – це явище, при якому атоми у твердому тілі, які лежать близько до поверхні, одержують від іона, що налітає, енергію, достатню для виходу в навколишнє середовище (вакуум). Інтенсивність розпилення

характеризують коефіцієнтом розпилення  $Y$ , що визначається

$$\text{так: } Y = \frac{\text{середня кількість розпиленних атомів}}{\text{кількість частинок, що налітають}}$$

Вимірювані значення  $Y$  охоплюють діапазон у 7 порядків. Для іонів середньої маси з енергією декілька кілоелектрон-вольт значення  $Y$  розміщуються між 0.5 і 20. Вихід розпилення у випадку легких іонів з енергією декілька мегаелектрон-вольт складає  $\sim 10^{-3}$  для більшості речовин.

При нормальному падінні пучка іонів, які мають енергію (20-40) еВ, розпилення відсутнє. Вище цієї межі коефіцієнти розпилення збільшуються зі збільшенням енергії первинних частинок і проходять через широкий максимум в інтервалі енергій від 5 до 50 кеВ. Зменшення коефіцієнта розпилення при більш високих енергіях пов'язано з більшою глибиною проникнення іонів у тверде тіло і меншим виділенням енергії у поверхневих шарах.

Коефіцієнт розпилення залежить від таких характеристик:

1) кількості атомів у мішені. При бомбардуванні іонізованими молекулами, які складаються з однакових атомів, кожен первинний атом враховують окремо. У молекулах, які містять різні атоми, як правило, визначають коефіцієнт розпилення із розрахунку на одну первинну молекулу;

2) наявності на поверхні вуглецевих і оксидних шарів, які виникають внаслідок імплантації. Якщо на поверхні при іонній імплантації утворюються карбіди або оксиди, то коефіцієнт розпилення зменшується. Це особливо характерно для випадку, коли молекули орієнтуються так, що на поверхню виходять атоми одного елемента, такого, як кисень або вуглець;

3) відмінності структури в приповерхневому шарі від структури в об'ємі твердого тіла;

4) типу матеріалу, що розпилюється, його стану й особливо від детальної структури і складу поверхні (чистий

матеріал або сплав). У випадку сплаву відбувається селективне розпилення одного компонента з меншою енергією зв'язку і сегрегація іншого;

5) геометрії експерименту (нормальне падіння або під кутом);

6) кристалічного стану. Коефіцієнт розпилення монокристалів нижчий, ніж аморфних або полікристалічних матеріалів;

7) температури і рельєфу поверхні, що опромінюється. При кімнатних температурах вплив температури мішені на розпилення незначний. При наближенні температури до температури плавлення коефіцієнт розпилення різко зростає;

8) наявності каналування первинного пучка. Каналування зменшує коефіцієнт розпилення;

9) зміни енергії сублимації, пов'язаної з фазовими переходами;

10) сорту, енергії і дози домішки, що проникає.

*Механізм розпилення* при енергіях частинок, що налітають,  $\geq 1$  кеВ такий: падаюча частинка зіштовхується з атомами твердого тіла і передає їм свою енергію. Якщо передана енергія більша за енергію зв'язку атома в кристалічних ґратках, то він вибивається зі свого рівноважного положення. Первинні вибиті з рівноважних положень атоми зіштовхуються з іншими атомами мішені, втрачаючи свою енергію в процесі цілого каскаду зіткнень. Атом поверхні є розпиленим, якщо переданий йому імпульс має складову вздовж нормалі до поверхні, достатню для подолання поверхневої енергії зв'язку. Ця енергія приблизно дорівнює теплоті сублимації.

Глибина, з якої вилітають атоми при розпиленні,

$$\Delta x_0 \approx \frac{1-m}{1-2m} \frac{E_{x0}^{2m}}{N_x C_m}, \quad (3.12)$$

де  $m$  – безрозмірний параметр у ступеневих атомних потенціалах, який повільно змінюється від  $m=1$  при високих енергіях до  $m=0$  при дуже низьких енергіях;

$E_{x0}$  – енергія, одержана атомом мішені від іона, що налітає;

$N_x$  – концентрація атомів у матеріалі;

$C_m$  – константа поперечного перерізу в ступеневих потенціалах. Вона дорівнює

$$C_m = \frac{\pi}{2} \lambda_m a^2 \left( \frac{M_1}{M_x} \right)^m \left( \frac{2Z_1 Z_x e^2}{a} \right)^{2m}, \quad (3.13)$$

де  $\pi=3.14$ ;

$\lambda_m$  – безрозмірна функція параметра  $m$ , який змінюється від 0.5 при високих енергіях до 24 при низьких енергіях;

$a$  – параметр екранування Томаса-Фермі (3.7);

$M_1$  і  $M_x$  – масове число іона і матриці відповідно;

$Z_1$  і  $Z_x$  – заряди іона й атома мішені відповідно.

У випадку перпендикулярного опромінення мішені коефіцієнт розпилення має вигляд

$$Y = \frac{0.042\alpha(M_2/M_1)S_n(E)}{U_0}, \quad (3.14)$$

де  $S_n(E)$  – переріз ядерного гальмування;

$U_0$  – середня поверхнева енергія зв'язку;

$\alpha(M_2/M_1)$  - функція відношення мас атомів мішені ( $M_2$ ) і первинних частинок ( $M_1$ ) (рис. 3.1), яка не залежить від енергії.

Для розрахунку  $S_n(E)$  можна використати формулу (3.1),

де

$$\left| \frac{dE}{dx} \right| = 4\pi a N Z_1 Z_2 e^2 \frac{M_1}{M_1 + M_2} S_n(\varepsilon), \quad (3.15)$$

де  $S_n(\varepsilon)$  – переріз ядерного гальмування в одиницях зведеної енергії  $\varepsilon$ .

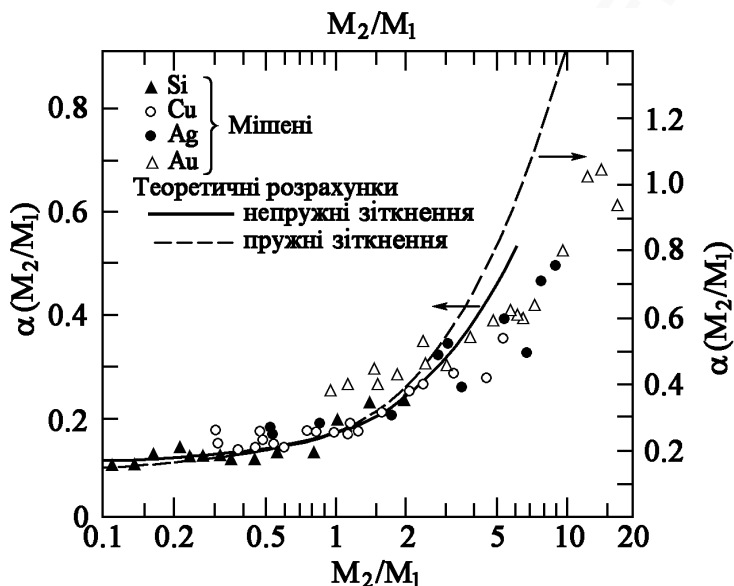


Рисунок 3.1 – Залежність  $\alpha(M_2/M_1)$

*Застосування розпилення.* Розпилення довгий час розглядалося як небажаний побічний ефект. Розпилення призводить до руйнування катодів і сіток у газорозрядних трубках та іонних джерелах, а також до забруднення плазми і навколишніх стінок у термоядерних дослідженнях. Видаленням поверхневих атомів унаслідок розпилення іонами обмежується максимально досягнута концентрація в шарі матеріалу, що імплантується, при іонній імплантації.

За умови грубого наближення максимальну



концентрацію імплантованих елементів  $N_{max}$  можна визначити як

$$N_{max} \approx 1/Y, \quad (3.16)$$

де  $Y$  - коефіцієнт розпилення.

Розпилення іонами застосовується:

- у розпилюючих іонних джерелах;
- для одержання атомно-чистих поверхонь;
- для мікрообробки;
- для дослідження концентраційного профілю тонких плівок. Аналізуючи атоми, що видаляються, мас-спектрометрично можна одержувати інформацію про поверхневу концентрацію і (при безперервному бомбардуванні) про розподіл концентрації за глибиною.

Розпилення дозволяє видаляти навіть дуже сильно зв'язані поверхневі шари, здійснюючи контроль практично на атомному рівні.

Одним із важливих використань розпилення є нанесення тонких плівок на різні підкладки. Підкладки можуть мати великі площі, які досягають кількох квадратних метрів, але можуть бути і вкрай малими, як у мікроелектроніці.

Залежно від густини каскаду зіткнень можна виділити три типи процесів розпилення:

- 1) просте (первинне) вибивання атомів;
- 2) режим лінійного каскаду;
- 3) режим піка зміщень.

У режимі первинного вибивання іон, що бомбардує, передає енергію атомам мішені, які можуть після невеликої кількості подальших зіткнень вийти крізь поверхню, якщо їх швидкість достатня для подолання поверхневих сил зв'язку. У двох інших випадках атоми, що вибиваються, одержують енергію, достатню для вибивання вторинних, третинних та ін. атомів, частина яких може досягти поверхні та подолати поверхневий бар'єр. У режимі лінійних каскадів просторова

густина атомів, що рухаються, мала, а в режимі теплових піків велика (рис. 3.2).

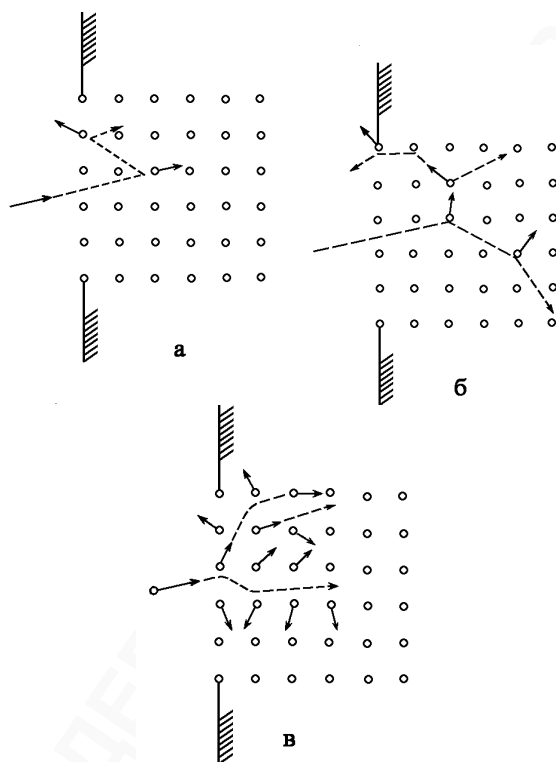


Рисунок 3.2 - Три режими розпилення в моделі пружних зіткнень [5]:

а - режим первинного прямого вибивання. Атоми, вибиті з рівноважних положень внаслідок іон-атомних зіткнень, одержують енергію, достатню для того, щоб бути розпиєними, але занадто малу для того, щоб створити каскад вибитих атомів;

б - режим лінійних каскадів. Атоми, вибиті внаслідок іон-атомних зіткнень із рівноважних положень, одержують

енергію, достатню для того, щоб створити цілий каскад вибитих атомів. Густина розподілу вибитих атомів невелика, так що переважають зіткнення атомів, що рухаються, з нерухомими, а зіткнення двох атомів, що рухаються, відбуваються рідко;

в - режим теплових піків. Густина розподілу атомів віддачі висока настільки, що більшість атомів усередині деякого об'єму (об'єму теплового піка) перебуває у русі

Розпилення в режимі простого вибивання атомів відбувається при енергіях порядку одиниць і десятків кілоелектрон-вольт для всіх іонів, крім дуже легких, для яких ця область розширюється до енергій порядку кількох сотень кілоелектрон-вольт. Лінійні каскади утворюються при енергіях від одиниць кілоелектрон-вольт до мегаелектрон-вольт для всіх іонів, крім найважчих з масою  $M > 100$  а.о.м., для яких характерне утворення піків.

### 3.1.3.3 Атомне перемішування [5, 6, 12]

Взаємодія іонів з атомами твердого тіла приводить до їх зміщення із займаних положень, а послідовне зміщення – до порушення мікроструктури і транспортування матеріалу. Останній ефект одержав назву “іонного” або “атомного перемішування”. При атомному перемішуванні відбуваються такі процеси (таблиця 3.1):

- балістичне перемішування;
- термолізаційне перемішування;
- дифузійні процеси.

Таблиця 3.1 - Класифікація процесів іонного перемішування

Процес	Характеристика
1	2
1 Балістичне	Швидкі процеси, термічно не

перемішування	активуються, високі енергії
1.1 Перемішування первинно вибитими атомами ( $\sim 10^{-13}$ с)	Зіткнення між частинками, що рухаються і перебувають у стані спокою, не залежать від температури, низька густина, незалежні зміщення
1.2 Перемішування в лінійних каскадах ( $\sim 10^{-12}$ с)	Зіткнення між частинками, що рухаються і перебувають у стані спокою, незалежні зміщення, послідовні зіткнення, виділена енергія пропорційна кількості зміщень, ізотропне й анізотропне перемішування, висока густина
2 Термолізаційне перемішування ( $\sim 10^{-11}$ с)	
2.1 Перемішування в енергетичному піку	Зіткнення між частинками, що рухаються, зміщення, що переक्रиваються, нелінійні явища, всі атоми в об'ємі піка можуть мати енергію, яка відповідає теплоті плавлення
2.2 Перемішування на стадії охолодження	Дисипація енергії на навколишніх ґратках, виявляються хімічні ефекти
3 Дифузійні процеси	Запізнілі процеси, низькі енергії, термічно активуються, залежать від термодинамічних характеристик системи
3.1 Перемішування радіаційно-стимульованою дифузиею (протягом опромінення)	Перенесення речовини здійснюється за допомогою радіаційно-стимульованої дифузії

3.2. Радіаційно-стимульована сегрегація (протягом опромінення)	Перенесення речовини здійснюється за допомогою потоку дефектів, які генеруються при опроміненні
3.3. Дифузія, що модифікується опроміненням (1 година після опромінення і більше)	Післядіючі дифузійні ефекти, термічно активуються

Внесок того або іншого механізму залежить від багатьох факторів: енергії і дози іонів, співвідношення маси іона й атома мішені, умов опромінення і самої системи, що опромінюється.

Балістичне перемішування (перемішування за допомогою пружних зіткнень) може бути індуковано імплантацією первинно вибитих атомів і каскадом зіткнень. Природа цього механізму полягає в передачі значної кінетичної енергії від іона, що налітає, атомам підкладки, що дозволяє їм зміститися зі свого місця в напрямку одержаного імпульсу.

Іонне перемішування можна розглядати як фізичний процес, що відбувається при іонній імплантації, так і самостійний метод модифікації поверхні.

Іонне перемішування успішно використовують у тонкоплівкових системах метал-напівпровідник і метал-метал для утворення нових матеріалів, рівноважних і метастабільних сплавів. У типових експериментах з перемішування використовують або шар-мітку (товщиною  $\sim 1$  нм), створену всередині гомогенного матеріалу, або шаруваті матеріали (2 і більше шарів різних матеріалів, кожен товщиною в кілька десятків нанометрів), приготвлені методом вакуумного напилювання. За бомбардуючі частинки, як правило,

вибирають іони інертних газів з енергією  $E=10-1000$  кеВ. Опромінення складної структури з метою модифікації властивостей матеріалів найчастіше виконують при кімнатних температурах.

Перевага іонного перемішування порівняно з іонною імплантацією - більш низькі дози опромінення ( $10^{15}-10^{17}$  см<sup>-2</sup>).

Недолік – великі витрати енергії і часу, потрібна попередня обробка.

### **3.2 ОПРОМІНЕННЯ ПОТУЖНИМИ ІОННИМИ ПУЧКАМИ (ППП)**

Основні явища при опроміненні ППП такі [10]:

- 1) абляція матеріалу з боку опроміненої поверхні;
- 2) генерація звукових і ударних хвиль, викликаних надшвидким ( $10^8-10^{10}$  К/с) нагріванням і охолодженням ( $10^8-10^9$  К/с) у поєднанні з високими просторовими градієнтами температур ( $10^6-10^8$  К/см).

При опроміненні ППП відбувається нагрівання ґраток, яке розглядається як енергія теплового поля, що може трансформуватися у двох напрямках, які відповідають повільній і швидкій стадіям:

- 1) через виникнення просторових градієнтів температур відбувається термодифузія і проходить повільна стадія релаксації температурно-деформаційного поля, що, як правило, супроводжується незворотними процесами, такими, як пластична деформація, зародження і зростання мікротріщин та ін. Термодифузія сприяє масоперенесенню і формуванню зони теплового впливу, у якій відбуваються структурно-фазові перетворення. Ця зона, як правило, розміщена на невеликій глибині від опроміненої поверхні;

- 2) швидка стадія виявляється як термоудар – практично миттєве підвищення температури викликає термопружні напруження, які залежно від амплітуди генерують ударну хвилю (УХ) або пружну (звукову) хвилю. Ці хвилі

взаємозалежні: попереду ударної хвилі у твердих тілах завжди біжить пружний “провісник” малої амплітуди, а сама вона при поширенні в мішені втрачає свою енергію – її амплітуда зменшується і вона переходить у пружну. Іншою можливою причиною генерації ударних хвиль є абляція.

Застосування ППП:

- 1) поверхневе легування;
- 2) переплавлення плівки, нанесеної на вихідний матеріал;
- 3) нанесення плівок.

### Контрольні запитання

1 Які процеси відбуваються при проходженні іонів крізь тверде тіло?

2 Які припущення використовуються для опису руху електронів у твердому тілі?

3 Які механізми втрат енергії при проникненні іона у матрицю?

4 Що відбувається при зіткненні іона з атомами матриці? Що таке переріз гальмування?

5 У чому полягає радіаційно-стимульована дифузія та радіаційно-стимульована сегрегація?

6 Що таке розпилення? Чим воно характеризується?

7 Від чого залежить коефіцієнт розпилення?

8 Який механізм розпилення?

9 Де застосовується розпилення? Які його переваги та недоліки?

10 Які режими розпилення ви знаєте? Поясніть їх.

11 Що таке іонне перемішування? Дайте класифікацію процесів та їх характеристики при іонному перемішуванні.

12 Які явища відбуваються при опроміненні потужними іонними пучками? Як трансформується енергія теплового поля? Для чого використовуються потужні іонні пучки?

## ***РОЗДІЛ 4 ЛАЗЕРНА ІМПЛАНТАЦІЯ***

4.1 Фізичні основи взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.

4.2 Способи лазерної імплантації.

4.3 Ефективність взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.

4.4 Принцип дії лазера.

4.5 ККД лазера.

4.6 Застосування лазера.

### ***4.1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ [1, 5, 9]***

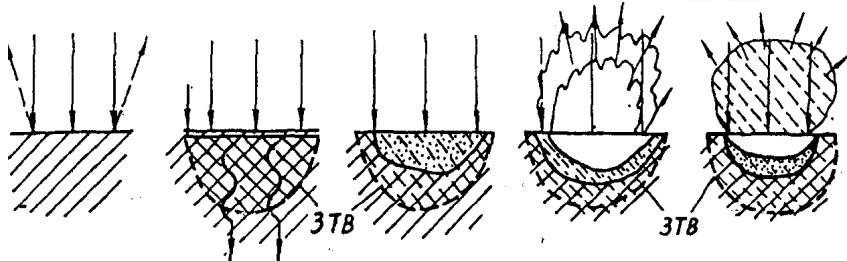
Можливості використання лазерного випромінювання як універсального інструмента для обробки матеріалів обумовлюються закономірностями проходження таких процесів і явищ, як поглинання випромінювання поверхнею матеріалу, нагрівання, плавлення матеріалу, його ерозія, утворення зон термічного впливу (ЗТВ), зміна напружено-деформованого стану, дифузія в умовах теплових впливів на матеріал та ін.

Залежно від густини потужності випромінювання і тривалості його впливу на матеріал у процесі взаємодії лазерного випромінювання з речовиною можна виділити п'ять стадій (рисунок 4.1).

Подана схема (рис. 4.1) взаємодії випромінювання з речовиною певною мірою умовна. Параметри лазерного випромінювання, властивості матеріалу, навколишнє середовище вносять корективи в явища, які відбуваються в зоні лазерного впливу. Тому для розробки технології лазерної обробки матеріалів і відповідного устаткування необхідно ознайомитися з цими явищами, оцінити ступінь їх впливу на різні процеси обробки матеріалів лазерним випромінюванням.



Для зручності аналізу теплофізичних явищ у зоні впливу розглянемо такі стадії процесу: поглинання і передача енергії матеріалу; нагрівання і плавлення матеріалу; випаровування і викидання розплаву (лазерна ерозія); остигання матеріалу.



1 Падіння і часткове відбивання випромінювання

2 Поглинання і нагрівання  
 $q < 10^2 \text{ Вт/см}^2$

3 Плавлення  
 $q \approx 10^5 \text{ Вт/см}^2$

4 Ерозія  
 $q = 10^6 - 10^7 \text{ Вт/см}^2$

5 Утворення плазми  
 $q > 10^7 \text{ Вт/см}^2$

Рисунок 4.1 – Стадії впливу лазерного випромінювання на речовину

#### 4.1.1 Поглинання і передача енергії

Інтенсивність поглиненого випромінювання змінюється за експонентою з глибиною відповідно до закону Бугера

$$I(x) = I_0 A \exp(-\alpha x), \quad (4.1)$$

де  $I_0$  - інтенсивність лазерного випромінювання, яке підводиться до поверхні матеріалу;

$A$  - здатність матеріалу поглинати випромінювання;

$\alpha$  - коефіцієнт поглинання світла в даному середовищі.

Механізм поглинання лазерної енергії і переходу її у теплову енергію залежить від природи матеріалу.

Так, для металів, оптичні властивості яких можуть бути описані за допомогою моделі вільних електронів, характерно в основному поглинання квантів світла електронами провідності (вільні електрони). Внаслідок цього підвищується енергія електронів, яка передається кристалічним ґраткам та іншим електронам. Цей процес розвивається у глибині до  $10^{-10}$ - $10^{-9}$  м за дуже короткий проміжок часу  $\approx 10^{-11}$ - $10^{-10}$  с. Поступово відбувається вирівнювання температури електронного газу і кристалічних ґраток, тобто приблизно через  $10^{-9}$ - $10^{-8}$  с можна ввести поняття загальної температури металу  $T$ .

Передача енергії від тонкого поверхневого шару до об'єму матеріалу здійснюється за допомогою різних механізмів теплопровідності (електронної, фононної, променистої). Велике значення за цієї умови має температура поверхні.

Так, при низьких температурах істотну роль відіграє фононна теплопровідність. Однак при високих значеннях температури фононна теплопровідність мала порівняно з електронною. У найбільш розповсюдженому в практиці лазерної обробки температурному діапазоні від сотень до декількох тисяч градусів основний механізм передачі енергії від поверхні всередину матеріалу - електронна теплопровідність. Променистою теплопровідністю, як правило, нехтують, тому що вона характерна для температур поверхневого шару більших за  $10^4$  °С.

Для напівпровідників, які на відміну від металів мають незначну концентрацію вільних електронів при кімнатній температурі, поглинання світла в основному обумовлюється зв'язаними носіями.

За певних умов під дією лазерного випромінювання електрони валентної зони переходять у зону провідності (тобто спостерігається внутрішній фотоефект). У результаті

утворюються вільні фотоелектрони, концентрація яких згодом зростає до певної межі, обумовленої рядом обмежень.

Поки концентрація вільних електронів мала, а отже, і невелике поглинання випромінювання вільними електронами, передача поглиненої енергії ґраткам відбуваються зі значним зсувом у часі порівняно з металами.

Ступінь поглинання лазерного випромінювання напівпровідниками залежить від довжини хвилі випромінювання, енергетичних параметрів променя, виду напівпровідника, домішкових включень, стану поверхневого шару та ін.

Із збільшенням концентрації вільних фотоелектронів змінюються електричні й оптичні характеристики напівпровідників, їх відбивна здатність. Зокрема, при значній густині потужності випромінювання ( $q > 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) концентрація вільних електронів зростає до  $10^{20}$ - $10^{21}$  см<sup>-3</sup>, що практично наближає напівпровідник за його оптичними властивостями до металів.

Передача енергії від поверхневих шарів усередину напівпровідника здійснюється різними механізмами теплопровідності. У початковий період переважає фононна теплопровідність, тому що концентрація вільних фотоелектронів мала. Але зі збільшенням концентрації вільних фотоелектронів більш істотною стає електронна теплопровідність.

Для прозорих матеріалів основною відмінністю процесу поглинання від непрозорих матеріалів є об'ємний, а не поверхневий характер поглинання. У прозорих матеріалах (діелектриках) поглинання лазерного випромінювання може здійснюватися за допомогою безпосередньої взаємодії квантів випромінювання з ґратками. З урахуванням того, що коефіцієнт поглинання таких матеріалів невеликий, важлива роль у процесі поглинання лазерного випромінювання

належить різного роду домішкам, дефектам, неоднорідностям та ін.

#### *4.1.2 Нагрівання і плавлення*

Поглинання енергії лазерного випромінювання і перехід її в теплову енергію в поверхневому шарі, що відбувається практично миттєво, приводять до різкого зростання температури матеріалу в зоні лазерного впливу. Але одночасно відбувається і відтік тепла всередину матеріалу. Розподіл температури на поверхні матеріалу, як правило, відповідає просторовому розподілу лазерного випромінювання в поперечному перерізі.

#### *4.1.3 Лазерна ерозія*

Являє собою процес видалення матеріалу із зони лазерного впливу у вигляді розплаву і випаровуваної фази матеріалу. Такий механізм руйнування матеріалу спостерігається залежно від типу матеріалу в діапазоні густини потужності випромінювання  $q=10^5-10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Зі збільшенням густини потужності випромінювання спостерігається вибухове викидання продуктів лазерної ерозії.

Закономірності лазерної ерозії є цікавими при розробленні технологічних процесів розмірної обробки лазерним випромінюванням - прошиванні отворів, різанні, розкрої матеріалу, обробці щілин, пазів, виготовленні тонкоплівкових елементів електронної апаратури та ін.

#### *4.1.4 Остигання*

Після закінчення дії лазерного імпульсу або переміщення неперервного лазерного випромінювання вздовж оброблюваної поверхні відбувається остигання раніше нагрітого і розплавленого матеріалу. Висока локалізація теплового впливу при лазерному опроміненні приводить до того, що тепловідведення здійснюється в масив матеріалу. Ця

обставина відіграє дуже важливу роль при обробці металів і сплавів. Так, залежно від густини потужності лазерного променя і тривалості його впливу на матеріал можна одержати швидкості охолодження матеріалу від  $10^2$  до  $10^7$  К/с. А це дозволяє одержати в металевих сплавах гартівні структури високої твердості (навіть одержати аморфні сплави) і в такий спосіб реалізувати технологію лазерної термообробки.

Таким чином, аналіз теплових процесів, які відбуваються в матеріалах під впливом лазерного випромінювання, показує, що закономірності проходження фізичних явищ у зоні лазерного впливу обумовлюються температурою, а також швидкостями нагрівання й охолодження.

#### ***4.2 СПОСОБИ ЛАЗЕРНОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ [5]***

Лазерна імплантація металевих матеріалів, яка має за мету поліпшення механічних і фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів, у наш час реалізується в основному в двох різновидах. У першому з них лазерним випромінюванням впливають на систему “плівка легуючої речовини – матриця”. У другому - в розплавлений шар матеріалу матриці, що ініціюється поглинанням випромінювання, як правило, кіловатного CO<sub>2</sub>-лазера, інжектуються дрібні частинки легуючого матеріалу.

Технологічний процес лазерної імплантації металевих матеріалів за першим принципом містить у собі кілька стадій. Вони подані на рисунку 4.2.

Плівка (легуючого) матеріалу, що дифундує, наноситься на поверхню матриці. Нанесення плівки можна робити різними способами. Плівки товщиною меншою за 500 нм, які використовуються для лазерної імплантації із застосуванням імпульсних лазерів з модульованою добротністю, наносяться методами магнетронного, вакуумного термічного і лазерного напилювання, іонно- і електронно-променевого розпилення. Більш товсті плівки, як правило, наносяться методами

електролітичного осадження, напилюванням крізь тонкі форсунки або нанесенням шару за допомогою валика. Ідеально нанесена плівка повинна мати рівномірну товщину, високу суцільність і гарну адгезію, межа між плівкою і підкладкою повинна бути за можливістю чистою, а сама плівка повинна мати оптично чисту поверхню.

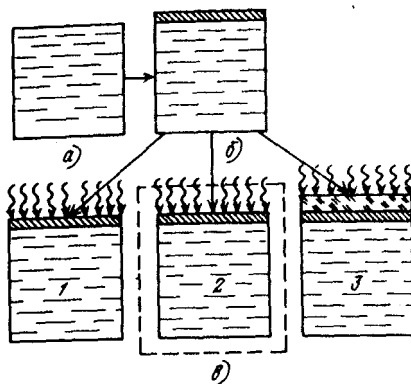


Рисунок 4.2 - Стадії процесу лазерної імплантації матеріалів:

а - матриця;

б - нанесення плівки легуючого елемента на матрицю;

в – опромінення: 1 - у повітрі; 2 - у вакуумній камері; 3 - крізь прозоре покриття

Опромінення системи “плівка-матриця” може відбуватися як у повітрі, так і у вакуумі. Це залежить від ступеня впливу залишкової атмосфери на тепло- і масоперенесення у матеріалі при лазерному опроміненні. Для підвищення ефективності лазерної імплантації металевих матеріалів опромінення можна проводити крізь прозоре для лазерного випромінювання покриття (вода, рідке скло та ін.).

Процес лазерної імплантації залежить від густини енергії лазерного випромінювання, довжини хвилі випромінювання,

тривалості імпульсу, товщини плівки легуючого матеріалу, термодинамічних властивостей матеріалів плівки і матриці.

Спрощену модель процесу лазерної імплантації металевих матеріалів ілюструє рисунок 4.3.

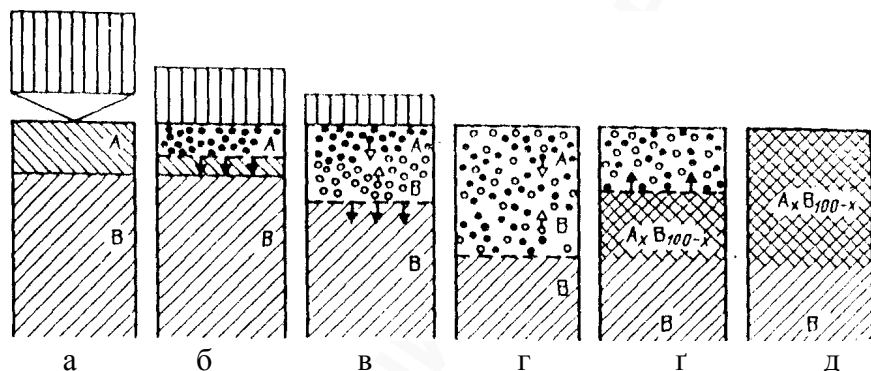


Рисунок 4.3 - Модель процесу лазерної імплантації у матеріалі:

- а) поглинання лазерного випромінювання в матеріалі;
- б) рух фронту плавлення в плівці дифузанта;
- в) рух фронту плавлення в матриці;
- г) взаємне перемішування атомів плівки і матриці в рідкій фазі;
- г) рух фронту кристалізації до поверхні;
- д) сформований сплав елементів А і В

Енергія лазерного випромінювання поглинається в скіншарі речовини плівки, що опромінюється, і практично миттєво (за час  $\sim 10^{-11}$  с) передається граткам поглинаючого матеріалу. Матеріал, що поглинув випромінювання, швидко (за час  $\sim 1$  нс) нагрівається до температури плавлення. За рахунок теплового контакту між плівкою і матрицею за механізмом

теплопровідності відбувається нагрівання матеріалу матриці. При відповідній товщині плівки і певній (граничній) густині енергії лазерного випромінювання можливе одночасне існування розплаву матеріалу плівки і матриці. Атоми плівки і матриці взаємно перемішуються в рідкій фазі протягом часу існування розплаву. У результаті дифузії формується певний розподіл атомів плівки в поверхневому шарі матриці.

Остигання матеріалу супроводжується рухом фронту затвердіння з характерними швидкостями  $10 \text{ мкс}^{-1}$  від межі розподілу рідина - тверде тіло до поверхні. Цей рух і “заморожує” концентраційний розподіл легуючих атомів у поверхневому шарі металеві матриці.

Необхідно відзначити, що тут не враховувалися такі ефекти, як випаровування, поглинання лазерного випромінювання в парі, плазмоутворення, взаємодія пари (плазми) з розплавленим шаром матриці. Ці ефекти можуть виявляти певний, а в деяких випадках і визначальний, вплив на процес лазерної імплантації металевих матеріалів.

### ***4.3 ЕФЕКТИВНІСТЬ ВЗАЄМОДІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ [17]***

При падінні лазерного випромінювання на поверхню матеріалу ефективність використання енергії лазерного променя залежить від співвідношення відбитого і поглиненого випромінювання. Відбита частина, як правило, втрачається, інша частина проникає на невелику глибину матеріалу і при поглинанні переходить у тепло. Взаємозв'язок цих частин визначається з виразу  $R=1-A$ , де  $R$ ,  $A$  - відбивна здатність матеріалу і здатність матеріалу поглинати випромінювання відповідно.

Коефіцієнт відбиття  $R_0$  являє собою відношення інтенсивності відбитої частини випромінювання до інтенсивності всього падаючого випромінювання. При нормальному падінні коефіцієнт відбиття



$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + n^2 \chi^2}{(n+1)^2 + n^2 \chi^2}, \quad (4.2)$$

де  $n$  - показник заломлення середовища;

$\chi$  - коефіцієнт загасання.

У металах сильне відбиття пов'язане зі значним поглинанням випромінювання у невеликому поверхневому шарі, так званому скін-шарі. Розмір скін-шару залежить від електропровідності матеріалу і вимірюється в нанометрах.

#### ***4.4 ПРИНЦИП РОБОТИ ЛАЗЕРА [9, 17]***

Принцип роботи лазера полягає у збудженні атомів робочої речовини зовнішнім опроміненням, при якому відбувається інверсія (перехід електронів на верхні рівні), а потім їх повернення, що супроводжується випромінюванням світла. З урахуванням стану і складу робочої речовини, методів його збудження і характеристик випромінювання створено багато типів лазерів.

У технології й обробці матеріалів широко застосовуються газові лазери, оскільки газові середовища прозорі в широкому спектральному інтервалі – від ультрафіолетового випромінювання до випромінювання надвисокочастотного діапазону. Порівняно з твердими і рідкими речовинами гази менш щільні та більш однорідні, що зменшує розсіювання і викривлення лазерного променя. Частинки газу можна збуджувати різними шляхами: в електричному розряді, хімічно, газодинамічно, фотодисоціацією, лазерним або електронним опроміненнями.

У газових середовищах при зіткненнях атомів енергія збудження передається шляхом резонансу. За робочу речовину за цих умов використовують атомарні нейтральні гази (Ne, Ar, He), молекулярні активні гази (вуглекислий, чадний, водень,

азот), пари металів (міді, кадмію) і їх суміші (He+Ne, N+He, He+кадмій та ін.).

#### **4.5 ККД ЛАЗЕРА [17]**

При одержанні лазерного променя енергія втрачається на збудження розряду, прокачування й охолодження газу, і лише мала її частка перетворюється у випромінювання. Так, в аргоновому лазері менше ніж 7% витраченої на збудження енергії перетворюється в енергію випромінювання. Це зумовлено тим, що ККД лазерів  $\eta$  залежить від ККД накачування  $\eta_n$ , енергії випромінювання  $h\nu$  і енергії рівня збудження  $E_3$ :

$$\eta = \frac{\eta_n h\nu}{E_3}. \quad (4.3)$$

#### **4.6 ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРА [9, 17]**

Лазерний промінь у ролі інструмента не поступається різцю, свердлу, електричній дузі та плазмі. Його вплив на матеріал різко відрізняється від теплового, механічного або плазмового. Завдяки нейтральності квантів світла лазерний промінь можна сфокусувати в плямі площею  $10^{-8}$  см<sup>2</sup>, що на 2-3 порядки менше, ніж електронний промінь. Завдяки великій швидкості світла вплив лазерного променя може бути імпульсним, тривалістю меншою за 1 мкс. Він може впливати на будь-які матеріали, проходити крізь прозорі середовища. Завдяки цим властивостям лазерний промінь може зварювати, різати, свердлити, термооброблювати, плавити і випаровувати метали і сплави, кераміку і дорогоцінні камені.

Лазерний промінь як розкрійник працює краще за сталеві пилки, ножиці і різакі без заточувань і переточувань незалежно від роду матеріалу (скло, метал, гума, дерево чи тканина), що розрізається. Після лазерного різання тканин

немає необхідності в обробці крайок, тому що тканина не обсипається.

Одна з найбільш цінних властивостей лазерного променя – його чистота. Він не вносить в оброблюваний матеріал ніяких речовин, небажаних домішок або шкідливих домішок. Тому лікарі одні з перших застосували лазер для лікування таких складних захворювань, як відшаровування сітківки ока, пухлини, виразки, опіки, запальні процеси та ін.

### **Контрольні запитання**

1 Які процеси та стадії впливу лазерного випромінювання на речовину?

2 Як залежить поглинання та передача енергії від природи матеріалу? Поясніть особливості для металів, напівпровідників, діелектриків.

3 Як відбувається нагрівання, плавлення та ерозія матеріалу при опроміненні лазером?

4 Як впливає остигання на властивості матеріалів?

5 Які різновиди та стадії лазерної імплантації ви знаєте?

6 Які процеси відбуваються при лазерній імплантації?

7 Що таке коефіцієнт відбиття? Як він визначається? З чим пов'язане відбиття у металах?

8 Який принцип роботи лазера?

9 Як визначається ККД лазера?

10 Де застосовується лазерний промінь?

## ***РОЗДІЛ 5 ПЛАЗМОВІ ТЕХНОЛОГІЇ***

5.1 Загальні поняття.

5.2 Плазмові тарілки.

5.3 Параметри плазми.

5.4 Застосування плазмових технологій.

5.5 Плазмоводетонаційна обробка.

## 5.1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ [17]

Плазма - іонізований газ, у якому концентрації позитивних і негативних зарядів однакові. У стані плазми перебуває переважна частина речовини Всесвіту: зірки, галактичні туманності, міжзоряне середовище. Біля Землі плазма існує у вигляді сонячного вітру й іоносфери. Високотемпературна плазма ( $T \sim 10^6$ - $10^8$  К) із суміші дейтерію і тритію досліджується для здійснення керованого термоядерного синтезу. Низькотемпературна плазма ( $T < 10^5$  К) використовується в різних газорозрядних приладах (у газових лазерах, іонних приладах, МГД-генераторах, плазмотронах, плазмових двигунах та ін.).

Плазмова технологія – це сукупність методів одержання й обробки матеріалів з використанням нагрівання вихідних продуктів у плазмовому струмені або їх переведення в плазмовий стан.

Найбільш широко застосовуються атмосферні (при нормальному тиску) плазмові методи обробки й одержання матеріалів (різання, наплавлення, вирощування монокристалів, нанесення покриттів), а також проведення плазмохімічних процесів (одержання зв'язаного азоту). Ці процеси здійснюються за допомогою потоків плазми, які генеруються плазмотронами різних типів (електронними, високочастотними). Плазма в цих пристроях виконує функцію теплоносія і використовується в основному для нагрівання вихідних продуктів.

У 80-х рр. ХХ ст. одержали ефективний розвиток іонно-плазмові технологічні процеси, які реалізуються у вакуумі за допомогою плазмових прискорювачів. За робочі тіла можуть бути використані метали, гази, тверді та рідкі діелектрики. У цих умовах можливі такі процеси, як насичення поверхневих шарів матеріалу іншою речовиною із забезпеченням необхідної товщини насиченого шару або глибини його

залягання, високоефективне розпилення поверхні, конденсація речовини у вакуумі з плазмової фази при забезпеченні органічного зв'язку матеріалів основи та покриття і необхідних структурних особливостей плазмового конденсату.

Реалізація різних іонно-плазмових технологічних процесів, які здійснюються в умовах високої чистоти, принципово необхідної для одержання спеціальних матеріалів, обумовлюється широкими можливостями керування параметрами взаємодіючих плазмових потоків. Це дозволяє одержувати різні структури плазмових конденсатів – від аморфних до кристалічних, з різними розмірами і формою кристалітів.

Плазмова технологія містить у собі ряд надзвичайно важливих економічно високорентабельних процесів нанесення зносостійких, жароміцних, корозієстійких та інших плазмових покриттів. Завдяки цьому можлива заміна дорогих рідкісних металів і сплавів менш дефіцитними матеріалами з нанесеними на них покриттями.

При формуванні покриттів широко використовується переведення вихідних продуктів у плазмовий стан за допомогою плазмової дуги.

Термін “дуга” походить від форми, якої набуває плазмовий стовп між двома горизонтальними електродами під впливом піднімальних сил, викликаних меншою густиною гарячої плазми порівняно з густиною оточуючого її повітря.

Катодні мікроплями дугового розряду є джерелами високошвидкісних потоків плазми, яка містить продукти ерозії катода. У дугах, що горять у парах металу, можливі надзвукові швидкості до  $10^4$  м/с. Ступінь іонізації плазмового потоку, що утворюється, досить великий (від 20% до 90% залежно від матеріалу катода). Такі потоки називають плазмовими струменями. Вони, як правило, спрямовані уздовж осі каналу

провідності і зростають пропорційно току. Іонні струми дугового розряду аномально високі – до 10 А і більше.

Процес плазмового зварювання, різання або напилювання починається зі збудження слабкострумової дуги між катодом, що не плавиться, і мідним охолоджуваним соплом за допомогою високовольтного слабкострумового іскрового розряду.

Плазмовий струмінь утворюється в каналі плазмотрона і стабілізується його стінками і потоком газу, який відокремлює плазму від стінок. Газ, що додається у плазмотрон, призначений для захисту від окислювання й охолодження катода і сопла, одержання і стабілізації плазмового струменя з необхідними температурою і швидкістю, передачі теплової енергії плазми до виробу, перенесення матеріалу при напилюванні, видалення матеріалу в процесі різання.

## **5.2 Плазмові тарілки [17]**

Дуги в парах металів можуть мати зустрічні плазмові струмені, які виникають на протилежних електродах і розміщуються концентрично, причому анодні струмені (рисунок 5.1, а) часто рухаються швидше, ніж катодні (рисунок 5.1, б). Якщо одним електродом є пластина, а іншим - стрижень, то внутрішній струмінь іде від стрижня до пластини, а зовнішній - від пластини до стрижня.

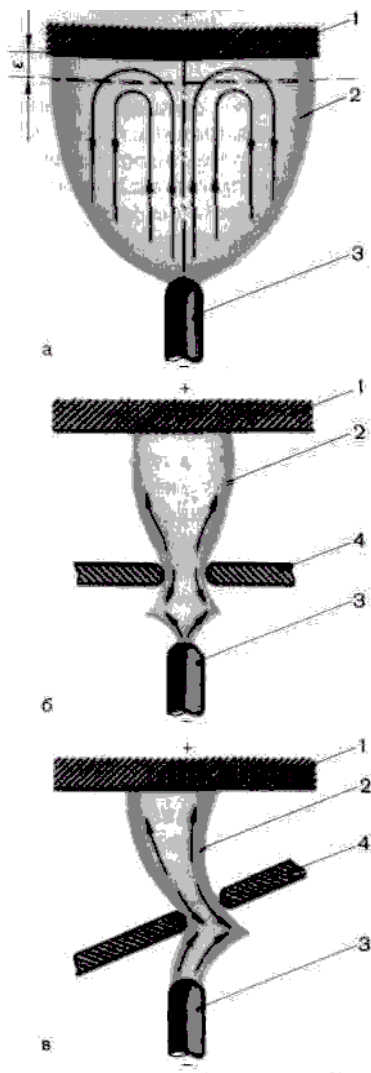


Рисунок 5.1 - Схеми виникнення плазмових струменів і тарілок:

1 - анод; 2 - світний стовп дуги; 3 - катод; 4 - мідна пластина з отвором

Поблизу плоского анода внаслідок охолодження газу в зоні  $\varepsilon$  дуга може стискатися, що супроводжується появою плазмових струменів, а при їх зіткненні - плазмових тарілок (рис. 5.1, б, в). Плазмовий струмінь виникає на катоді. При його звуженні в області мідної пластинки виникають зустрічні реактивні струмені, які формують плазмову тарілку (рис. 5.1, б). Якщо інжектувати струмінь гарячої пари або газу, які мають високу провідність, виникає “сердечник” стовпа, характерний для потужної дуги. Його також називають стрижнем або шнуром дисоціації (рис. 5.2). Плазмові струмені підвищують твердість дуги і являють собою один із проявів її саморегулювання. Така плазма може плавити, зварювати і різати будь-які матеріали.

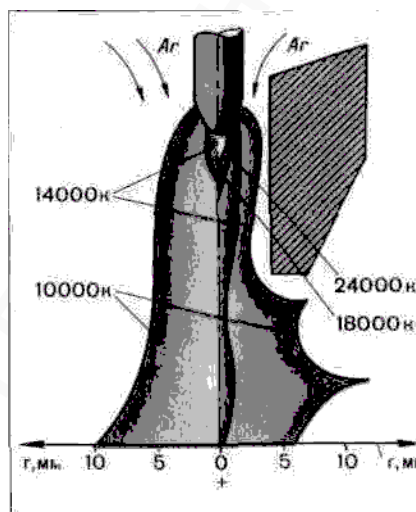


Рисунок 5.2 - Криві розподілу температур у вільнопалаючій (ліворуч) і стиснутій (праворуч) дугах по радіусу  $r$



Стискання дугового розряду супроводжується збільшенням температури плазмового стовпа понад  $(15-30) \times 10^3$  К. Здійснюється цей процес у спеціальних пальниках, які називають *плазмотронами*. За принципом включення в електричний ланцюг їх поділяють на дві групи (рисунок 5.3): прямої і непрямої дії. У першому випадку анодом є виріб (рис. 5.3, а), в іншому - сопло плазмотрона (рис. 5.3, б). А самі дуги називають відповідно проникаючою або стиснутою дугою прямої дії і плазмовою або стиснутою дугою непрямої дії.

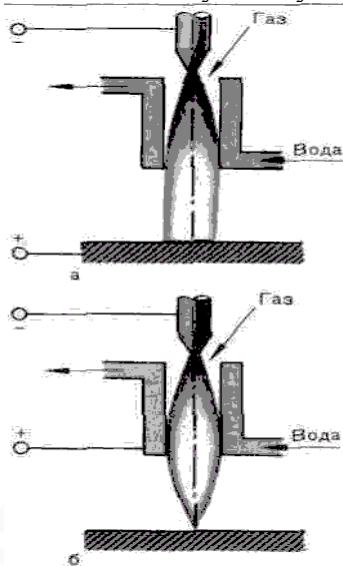


Рисунок 5.3 - Схеми плазмотронів:  
а - прямої дії; б - непрямої дії

Процеси, що здійснюються за допомогою таких стиснутих дуг, називають плазмоводуговими.

### **5.3 ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ [3, 18, 19]**

Основними параметрами при іонно-плазмових технологіях, які обумовлюють властивості покриття, що утворюється, є хімічний склад вихідного матеріалу (катода),

парціальний тиск реактивного газу, температура підкладки при нанесенні покриттів, енергія іонів, густина плазмового потоку. При підвищенні парціального тиску реактивного газу, наприклад азоту, в плазмі важких металів, таких як молібден, титан та інші, збільшується мікротвердість формованих покриттів, що обумовлено утворенням твердих розчинів азоту і нітридів з досить широкою областю гомогенності.

Гази поділяють на плазмоутворюючі і захисні. Для плазмоутворення використовують аргон, азот, гелій, водень, повітря, їх суміші. При водяній стабілізації температура плазми досягає  $50 \times 10^3$  К. Щоб захистити катод і плазмотрон від перегрівання й руйнування, використовують інертні гази. Найкращим є аргон, оскільки він має малу теплопровідність. Але через низьку напруженість електричного поля він малоефективний для перетворення електричної енергії в теплову. В аргону ентальпія (об'ємна теплоємність) також значно нижча за інші гази при одній і тій самій температурі.

Економічними для стабілізації і плазмоутворення є азот і повітря. Вони дешеві і мають високу ентальпію, але в них швидко руйнується вольфрамовий катод. Гелій і водень добре перетворюють електричну енергію в теплову, але при високих температурах проводять тепло, як мідь. Щоб внаслідок перегріву не руйнувався плазмотрон, застосовують суміші водню з аргоном. За цих умов підвищуються теплова потужність плазмового струменя і робоча напруга. Домішки молекулярних газів (азоту або водню) дозволяють підвищити теплову потужність дуги. При контакті із зовнішнім середовищем або виробом атоми дисоційованого газу, що складають плазмовий струмінь, знову об'єднуються в молекули з виділенням енергії дисоціації.

Залежність властивостей конденсатів, що утворюються, від тиску реактивного газу дозволяє формувати покриття із заданим градієнтом властивостей за товщиною, а також створювати багатошарові покриття. Збуджений стан

компонентів плазми забезпечує проходження плазмохімічних реакцій утворення нітридів тугоплавких металів або карбідів при використанні газів, які містять вуглець, при порівняно низьких температурах підкладки, що дозволяє наносити ці покриття на матеріали з низькою температурою відпускання; традиційні методи одержання нітридів і карбідів вимагають тривалого часу і високих температур.

При конденсації потоків вуглецевої плазми у вакуумі на поверхні охолоджуваних металевих підкладок можна одержати алмазоподібні покриття. Іонно-плазмовий метод синтезу дозволяє одержувати такі покриття товщиною до декількох десятків мікрометрів. Фізичні властивості алмазоподібних вуглецевих покриттів близькі за властивостями до алмазу. Плівки хімічно інертні до окислювачів, як і алмаз. Синтез у гранично нерівноважних умовах композиційного високодефектного вуглецевого матеріалу, що складається із суміші високодисперсних алмазних кристалітів, зміцнених виділенням вторинної фази (високодисперсний графіт), дозволяє сподіватися на одержання нових конструкційних матеріалів із ще кращими властивостями за властивості відомих форм алмазів.

### ***5.4 ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ [3, 18]***

Плазма стиснутої дуги застосовується для зварювання сталей, сплавів і тугоплавких матеріалів. Ефективне її застосування й для різання легованих сталей великої і малої товщини. Процес різання високоміцної сталі товщиною 6-40 мм проходить зі швидкістю 0.5-3.5 м/хв при ширині різання 2.5-5 мм. Висока теплоємність плазмового струменя дозволяє якісно і швидко різати навіть такі високотеплопровідні матеріали, як мідь, алюміній і сплави на їх основі.

Якість різання знижується із зменшенням товщини металу. Тонкі листи під час різання жолобляться, і тим більше,

чим менша теплопровідність металу. Щоб уникнути жолоблення, метал товщиною меншою за 5 мм поміщають у неглибоку ванну і ріжуть його під водою. Шар води товщиною близько 0.1 м забезпечує необхідне тепловідведення із зони різання і високу якість вирізаних деталей. Плазмовий струмінь дозволяє не тільки різати практично будь-які матеріали, але і напиляти їх на поверхні, поліпшуючи робочі характеристики виробів. Для цього в плазмотрон разом з газом подається порошок необхідного складу. У плазмі частинки порошку оплавляються і, розігнавшись до високих швидкостей, вдаряються об поверхню виробу, щільно приварюючись до неї. Плазмові покриття підвищують зносостійкість, в'язкість, хімічну стійкість, жаростійкість, міцність та інші експлуатаційні властивості металів і сплавів.

Синтезовані методами плазмової технології високотверді, міцні, стабільні покриття успішно використовуються за покриття, що зміцнюють, для різальних інструментів (швидкорізальні сталі і тверді сплави) і деталей машин. Це дозволяє істотно (у 2-8 разів) підвищити експлуатаційний ресурс зміцнювальних виробів. Плазмові процеси ремонту і зміцнення поверхні виробів широко застосовують в енергетиці та машинобудуванні.

### **5.5 ПЛАЗМОВОДЕТОНАЦІЙНА ОБРОБКА (ПДО) [3, 4, 18, 20]**

Для ПДО використовується плазмотрон (рисунок 5.4).

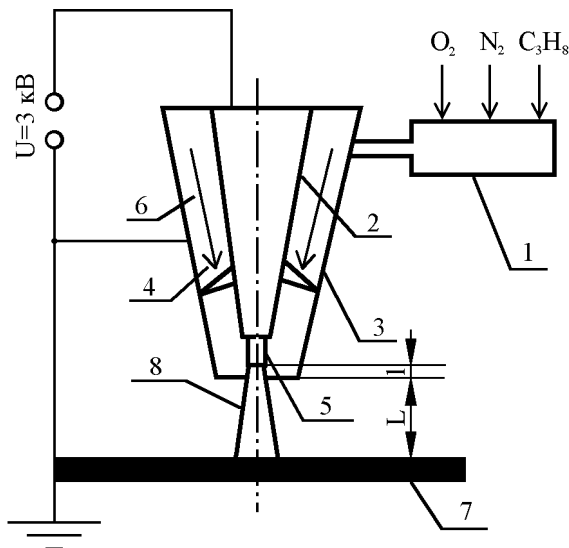


Рисунок 5.4 - Схема плазмотрона:

1 – камера горіння; 2 – охолоджуваний анод; 3 – охолоджуваний катод; 4 - плазмовий потік; 5 – витрачуваний стрижень; 6 - реакційна камера; 7 - виріб; 8 – плазмовий струмінь

У камері 1 відбувається детонаційне горіння пальної газової суміші. За компоненти пальної суміші використовують природний газ, пропан-бутан, кисень, повітря, азот. Внаслідок детонаційного горіння утворюється детонаційна хвиля, яка потрапляє в кільцевий міжелектродний зазор між коаксіальними охолоджуваними анодом 2 і катодом 3. У міжелектродному зазорі створюється зовнішнє радіальне електричне поле  $E$ . Шар продуктів згорання за фронтом детонаційної хвилі має підвищену провідність, що дозволяє пропускати крізь нього електричний струм.

Електромагнітна енергія, яка утворюється при цьому, дозволяє перестискати детонаційну хвилю й одержувати імпульсні потоки плазми з питомою потужністю  $10^5$ - $10^{10}$

Вт/см<sup>2</sup>, тобто відбувається перехід стаціонарного детонаційного режиму горіння в перестиснутий, а потім - у магнітогазодинамічний. При цьому в міжелектродному зазорі утворюється плазмовий згусток 4, який з реакційної камери 6 у вигляді плазмового струменя 8 потрапляє на поверхню оброблюваного виробу 7. Використання електрода 5, що випаровується та витрачається, дозволяє вводити в плазму пари металів. В основному використовуються для електрода, що випаровується, тугоплавкі метали (титан, вольфрам, молібден та ін.). Імпульсна взаємодія плазмових потоків із твердою підкладкою приводить до її легування компонентами плазми.

Залежно від довжини плазмотрона, кута конусності і розміру міжелектродного зазору можна змінювати температуру ( $2 \times 10^3$ - $3 \times 10^4$  К), швидкість (600-8000 м/с) і питому потужність плазмового струменя ( $10^3$ - $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>).

У процесі ПДО матеріал зазнає комплексного впливу: ударного, електромагнітного, термічного, що дозволяє значно інтенсифікувати процеси легування і збільшити товщину модифікованого шару. Коефіцієнт масоперенесення у твердому матеріалі при такому впливі на два порядки перевищує коефіцієнт дифузії при звичайному термодифузійному насиченні.

### Контрольні запитання

1 Дайте визначення терміна “плазма”. Де вона існує? Як поділяється плазма за температурою?

2 Що таке плазмова технологія? Де вона застосовується? Які процеси відбуваються при обробці плазмою? Які можливості плазмової обробки?

3 Що таке плазмова дуга, плазмовий струмінь?

4 Як утворюються плазмові тарілки?

5 Що таке плазмотрон? Які види його ви знаєте?

6 Які є параметри плазми? На які типи поділяються гази? Наведіть приклади.

7 Для чого застосовуються плазмові технології?

8 Наведіть та поясніть схему плазмотрона для плазмоводетонаційної обробки.

## **ДОДАТОК А**

(обов'язковий)

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ**

**Задача 1** Знайдіть глибину проникнення електронів з енергією  $E_1, E_2$  у матеріал.

Таблиця А.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Варіант	$E_1$ , кеВ	$E_2$ , кеВ	Матеріал
1	5	10	Титан
2	10	20	Ванадій
3	15	25	Алюміній
4	10	25	Мідь
5	5	30	Нікель
6	10	30	Гафній
7	20	30	Хром
8	15	30	Залізо
9	20	25	Цинк
10	5	20	Вольфрам
11	10	25	Молібден
12	20	40	Кобальт

#### **Методичні вказівки до розв'язання контрольної задачі 1**

1 Глибину проникнення визначити за формулою (2.5), де  $E$  взяти з таблиці А.1,  $\rho$  - з таблиці Б.1;

$$\frac{1}{b} = \frac{(2.54 - 2.1) \times 10^{-6}}{80 - 13} (z - 13) + 2.1 \times 10^6, \quad \left( \frac{e}{\text{кеВ} \times \text{см}^2} \right).$$



$$2 \text{ У випадку сплаву } \rho = \sum_{i=1}^n \rho_i C_i,$$

де  $n$  – кількість елементів сплаву.

**Задача 2** Знайдіть радіус та центр сфери дифузного розсіяння електронів з енергією  $E$  у матеріалі. Визначте ефективні енергетичні втрати електрона при  $x=kR$ .

Таблиця А.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Варіант	$E$ , кеВ	$k$	Матеріал
1	100	0.5	Мідь
2	50	0.33	Залізо
3	150	0.66	Хром
4	75	0.25	Цинк
5	80	0.2	Молибден
6	250	0.45	Вольфрам
7	120	0.35	Ti-41%V-18%Al
8	115	0.3	Ti-6%Al-4%V
9	120	0.9	Fe-18%Cr-10%Mn
10	180	0.7	Ti-10%Al-20%Mo
11	175	0.15	V-30%Ti-10%Mo
12	200	0.85	Fe-10%Co-5%Mg

### *Методичні вказівки до розв'язання контрольної задачі 2*

1 Радіус і центр сфери дифузного розсіяння електронів визначити за формулами (2.6) та (2.7) відповідно.

2 Ефективні енергетичні втрати електрона визначити за формулою (2.8).

3 У випадку сплаву вибирати  $z=z_{ef}$  (2.10), для чого використати формулу (2.11) та довідкові дані з таблиці Б.1.

**Задача 3** Знайдіть переріз ядерного гальмування  $S_n(E)$  при імплантації іонів з енергією  $E$  в матеріал матриці. Знайдіть коефіцієнт розпилення  $Y$ .

Таблиця А.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Варіант	Е, кеВ	Іон	Матеріал матриці
1	60	Cu	Титан
2	40	Ni	Ванадій
3	100	Cr	Залізо
4	80	Zn	Молібден
5	100	V	Вольфрам
6	150	Au	Срібло
7	120	Cu	Ti-41%V-18%Al
8	50	W	Ni-50%Ti
9	200	Cr	Fe-18%Ni-2%Mn
10	180	Ni	Ti-10%Al-5%Mo
11	140	Ta	Ti-15%Nb-10%W
12	200	Zn	Cu-20%Sn-10%Fe

### **Методичні вказівки до розв'язання контрольної задачі 3**

1 Визначити зведену енергію  $\varepsilon$  за формулою (3.4), для чого  $a$  знайти за формулою (3.7),  $E_{відн}$  - за формулою (3.5),  $\mu$  - за формулою (3.6),  $v$  - із формули  $E=(mv^2)/2$ ,  $e^2=14.4 \times 10^{-8}$  еВ $\times$ см.

2 Залежно від значення  $\varepsilon$  знайти  $S_n(\varepsilon)$  за формулами (3.3), (3.8) або (3.9).

3 Знайти  $S_n(E)$  за формулою (3.14). Для цього використати рисунок 3.1 та таблицю Б.1.

4  $U_0$  знайти за формулою 
$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^n L_s}{N_A e},$$

де  $L_s$  – питома теплота сублімації, кДж/(моль);  
 $n$  – кількість елементів сплаву.

**Задача 4** Знайдіть товщину розпиленого шару у випадку одинарної та подвійної імплантації іонів у матеріал матриці.

Таблиця А.4 – Варіанти завдань до задачі 4

№	$E_{x0}$ , кеВ	m	$\lambda_m$	Іон		Матеріал матриці
				Одинарн. імплант.	Подвійн. імплант.	
1	25	0	24	Cu	Cu+Ni	Залізо
2	10	0.55	15	Fe	Fe+Zr	Титан
3	5	0.19	2.9	Ti	Ti+V	Алюміній
4	40	0.33	13	Ni	Ni+Nb	Кобальт
5	50	0.21	6.3	Ta	Ta+W	Молібден
6	45	0.7	12	Ag	Ag+Cu	Золото
7	12	0.1	20	Al	Al+V	Fe-15%Ti-5%W
8	20	0.45	10	Mg	Mg+Zn	Ti-40%V-10%Mc
9	15	0.25	3	V	V+Ta	Ti-20%Ni-5%Cr
10	30	0.4	18	Ti	Ti+Hf	Al-15%Ni-10%C
11	60	0.5	16	Sn	Sn+Pb	Al-10%Ag-5%Cu
12	35	0.12	22	Pt	Pt+Sn	Ag-20%Au

*Методичні вказівки до розв'язання контрольної задачі 4*

Глибину, з якої вилітають атоми при розпиленні, визначити за формулою (3.12), де  $C_m$  можна знайти з формули (3.13),  $a$  – з формули (3.7),  $N_x$  - з формули (3.2).

## **ДОДАТОК Б**

(довідковий)

Довідкові дані про матеріали [21]

Таблиця Б.1 – Порядковий номер  $z$ , атомна маса  $M$ , густина  $\rho$  та питома теплота сублимації  $L_s$  металів

	Матеріал	$z$	$M$ , а.о.м.	$\rho$ , г/см <sup>2</sup>	$L_s$ , Дж/(моль)
1	Mg	12	24.3	1.74	149.1
2	Al	13	27.0	2.7	324.1
3	Ti	22	47.9	4.5	469.3
4	V	23	50.9	6.1	515.8
5	Cr	24	52.0	7.1	397.0
6	Mn	25	54.9	7.4	291.0
7	Fe	26	55.8	7.87	398.6
8	Co	27	58.9	8.9	425.0
9	Ni	28	58.7	8.9	429.6
10	Cu	29	63.5	8.96	341.2
11	Zn	30	65.4	7.14	131.9
12	Zr	40	91.2	6.49	612.1
13	Nb	41	92.9	8.6	722.2
14	Mo	42	95.9	10.2	664.5
15	Ag	47	107.8	10.5	274.7
16	Sn	50	118.7	7.3	302.3
17	Hf	72	178.5	13.1	611.3
18	Ta	73	180.9	16.6	782.5
19	W	74	183.8	19.3	847.8

20	Pt	78	195.1	21.45	556.8
21	Au	79	197.0	19.3	378.9
22	Pb	82	207.2	11.68	196.4

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж.М. Поута, Г. Фоти, Д.К. Джексона. – М.: Машиностроение, 1987. – 424с.
2. Гусева М.И. Ионная имплантация в неполупроводниковые материалы // Итоги науки и техники. - 1989. - Т.5. - С.5-51.
3. Борисов Ю.С., Тюрин Ю.Н. Упрочняющая обработка деталей высокоэнергетической плазмой: Препр. / АН Украины. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона; ИЭС-92-1. – К.: 1992. – 37с.
4. Соколов С.В. Модифікація властивостей поверхні матеріалів на основі сполук титану: Дис...канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07 – Сумы, 2000. - 187с.
5. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная имплантация и лазерная имплантация металлических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240с.
6. Ионная имплантация / Под ред. Дж.К. Хирвонена / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 392с.
7. Базиль О.О. Вплив іонної імплантації та електронного опромінення на кристалічну структуру та властивості сплаву Ti-V-Al: Дис...канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07 – Сумы, 2001. – 156с.
8. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. – М.: Высшая школа, 1988. – 255с.
9. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. и др. - М.: Машиностроение, 1985. – 495с.
10. Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Кишимото Н., Ладысев В.С. Модификация свойств материалов и синтез тонких плёнок при облучении интенсивными электронными и ионными пучками. - Усть-Каменогорск: ВКТУ, 2000. – 345с.

11. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1978. – 239с.
12. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. - М.: Металлургия, 1990. – 216с.
13. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 336с.
14. Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твёрдые тела. - Минск: УП “Технопринт”, 2001. - 392с.
15. Лаврентьев В.И., Погребняк А.Д. Прикладные аспекты высокодозовой ионной имплантации металлов // ФХОМ.- 1997. - №6. - С.5-15.
16. Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Плотников С.В. Радиационно-механические эффекты в твёрдых телах при облучении высокоинтенсивными импульсными электронными и ионными пучками. - Алматы: Гылым, 1998. - 267с.
17. Котельников Д.И. Сюрпризы плазмы. - К.: Техника, 1990. – 158с.
18. Тюрин Ю.Н. Основы технологии поверхностного упрочнения изделий плазмой электрического разряда: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.03.06 / Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. - К., 1997. - 44с.
19. Аксьонов І.І., Білоус В.А. Вакуумно-дугові іонно-плазмові методи поверхневого модифікування матеріалів // Труды III Междунар. симпозиума “Вакуумные технологии и оборудование” (ISVTE-3). - Харьков: ХТИ, 1999. - Том 1. - С.77-85.
20. Погребняк А.Д., Соколов С.В., Базыль Е.А., Тюрин Ю.Н., Свириденко Н.В., Кшнякин В.С. Модификация поверхностного слоя титановых сплавов импульсно-плазменной обработкой // ФХОМ. – 2001. - №.4. – С.49-55.



21. Смитлз К.Дж. Металлы: Справочник / Пер. с англ. - М.:  
Металлургия, 1980. - 447 с.