

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ №5

ПЛАЗМОХІМІЧНЕ ТРАВЛЕННЯ

**3 КУРСУ
«ПЛАЗМОВА ТА ІМПУЛЬСНА ЕЛЕКТРОНІКА»
Для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої»**

Київ 2012

Мета роботи: ознайомитися із принципом роботи установок плазмохімічного травлення, їхніх конструкцій, вивчити технологію плазмохімічного травлення та методи контролю очистки поверхні від органічних забруднень.

Короткі теоретичні відомості

Іонно-плазмове травлення широко використовується з метою попереднього очищення поверхонь підкладок та підшарів перед нанесенням металічних шарів. Тобто в усіх сучасних установках для нанесення металічних шарів передбачені системи очищення підкладок за допомогою іонно-плазмового травлення. Процеси іонно-плазмового травлення є конкурентноздатними і переважними для травлення шарів міді та нікелю у друкованих платах великих розмірів.

Лабораторні установки плазмохімічного травлення призначені для плазмохімічного видалення фоторезисту та перед дифузійного очищення поверхонь пластин від органічних забруднень. Установки відносяться до високочастотних установок промислового призначення, призначені для експлуатації на промислових та інших підприємствах. Принцип роботи установок плазмохімічного травлення заснований на застосуванні низькотемпературної плазми для видалення фоторезисту та перед дифузійного очищення поверхні пластин. Плазма утворюється в камері при розрідженні порядку 133 Па (1 мм. рт. ст.), коли до індуктора установки плазмохімічного травлення з індуктивним збудженням розряду (установка ПХТ з ІЗР) або до обкладок установки плазмохімічного травлення з ємністним збудженням розряду (установка ПХТ з ЄЗР), розташованим навколо камери, подається високочастотна напруга. До установок подаються такі гази: кисень газоподібний, фреон 14, елгез, азот газоподібний або повітря, очищене від пилу та масла.

1. Плазмохімічні процеси в мікроелектроніці

1.1 Фізико-хімічні процеси у низькотемпературній газорозрядній плазмі.

Низькотемпературна газорозрядна плазма (НГП) – це слабо іонізований газ, тиск якого складає $13 \cdot 10^{-2} - 13 \cdot 10^2$ Па, зі ступенем іонізації порядку $10^{-6} - 10^{-4}$ (концентрація електронів $10^{15} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$), в якому електрони мають середню енергію 1 – 10 еВ (температуру порядку $10^4 - 10^5$ К), а середня енергія важких часток газу (іонів, атомів, молекул) на два порядки менше (температура $(3 - 5) \cdot 10^2$ К). Такий стан, коли $T_e \gg T_i = T_g$, підтримується при невеликій потужності виділення джоулевої теплоти внаслідок відносно великої теплоємності газу важких часток та швидкого виносу теплоти з розряду.

НГП може генеруватися у розрядах, що збуджуються постійним електричним полем, а також до прилеглих розрядів на низькій частоті ($10^2 - 10^3$ Гц) в ВЧ - ($10^5 - 10^8$ Гц), та НВЧ - ($10^9 - 10^{11}$) та в електромагнітних полях оптичного діапазону частот ($10^{13} - 10^{15}$ Гц) (див. рис. 1.)



Рис. 1. Класифікація плазми за основними параметрами

НГП інертних газів містить атоми, електрони, іони та збуджені атоми, а НГП молекулярних газів, крім того, ще й вільні атоми та радикали, які утворилися в результаті дисоціації молекул. Вільні атоми та радикали мають неспарений електрон на зовнішній валентній орбіті і тому проявляють високу хімічну активність, внаслідок чого їх часто називають *хімічно активними частками (ХАЧ)*. Кількісно стан дисоціації характеризується ступенем дисоціації:

$$\alpha_d = n_{\text{ХАЧ}} / n_{00},$$

де $n_{\text{ХАЧ}}$ – концентрація ХАЧ у плазмі.

Низький ступінь іонізації НГП (концентрації електронів) $\alpha_i = 10^{-6} \div 10^{-4}$ знаходиться в невідповідності з відносно високою електронною температурою (1 – 10 еВ). Це пов'язано з тим, що процес рекомбінації при потрібному зіткненні за участі двох електронів не врівноважує швидкість іонізації електронним ударом. Існує інший на декілька порядків більш швидкий процес розпаду електронів (дифузія до стінок з подальшою рекомбінацією на поверхні), що попереджає наростання ступеню іонізації до рівноважного значення. У молекулярних газах процес розпаду може також відбуватись також внаслідок дисоціативної рекомбінації у парних зіткненнях.

Що до ступеня дисоціації (концентрація ХАЧ в НГП), то він в рівноважному стані повинен відповідати низькому значенню T_e , але через наявність високо енергетичних в порівнянні з частками газу електронів у стаціонарному стані концентрація ХАЧ (а також продуктів їх реакцій) у плазмі може суттєво відрізнятись від термодинамічно-рівноважної, або може значно перевищувати останню.

В утворенні іонів та ХАЧ в НГП окрім електронів можуть приймати участь збуджені атоми та молекули, що знаходяться головним чином у метастабільному стані (рис. 2.)

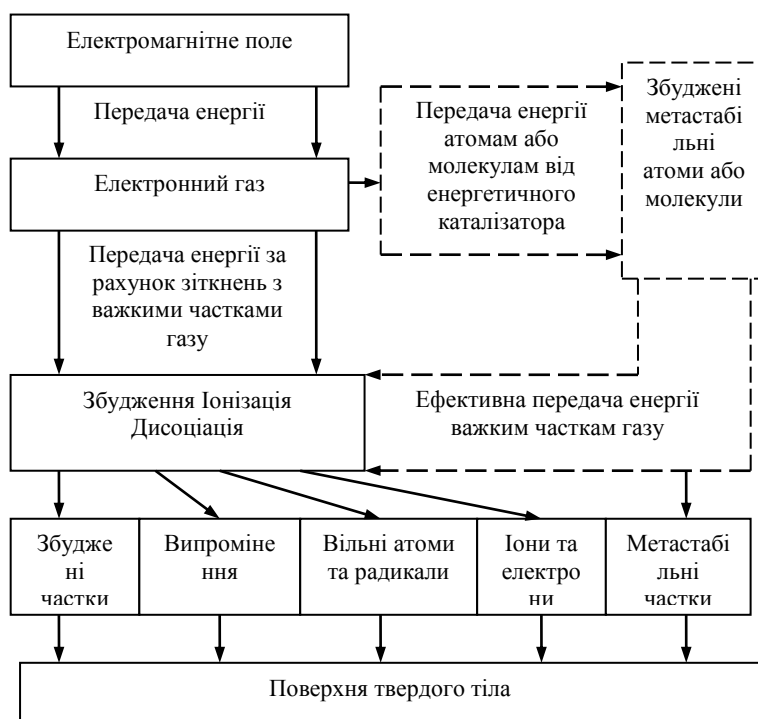


Рис. 2. Схема передачі енергії електромагнітного поля в НГП та фізико-хімічні процеси, які при цьому відбуваються

Збуджені атоми та молекули слугують передавачами енергії від електронного газу плазми до атомів та молекул, що активуються, полегшуючи таким чином процеси іонізації та дисоціації. Збуджені атоми та молекули виконують функцію енергетичного каталізатора, пришвидшуючи передачу енергії від електронного газу до часток газу, та порівняно з іншими каталізаторами дозволяють отримати більш високі стаціонарні концентрації іонів, ХАЧ та продуктів їх реакції. Роль енергетичного каталізатора найчастіше грають збуджені атоми чи молекули домішок в основному газі, але можливі випадки коли ними є і збуджені молекули основного газу.

Рекомбінація заряджених часток та ХАЧ може відбуватися всередині плазми (гомогенна рекомбінація) та на обмежуючих її поверхнях (гетерогенна рекомбінація).

З рис. 2. видно, що у плазмі в загальному випадку молекулярного газу виникають заряджені частки (електрони, позитивні та негативні іони), ХАЧ (вільні атоми та радикали), збуджені частки (атоми та молекули), в тому числі і у метастабільному стані, а також генерується випромінювання у діапазоні від інфрачервоного до ультрафіолетового. Розглядаючи можливості НГП для проведення гетерогенних фізико-хімічних процесів обробки на розмежуванні газ (газова плазма) – тверде тіло, можна виділити три випадки:

- 1) НГП є одночасно середовищем проведення, джерелом часток, що приймають участь у процесі, та стимулятором (активатором) процесу;
- 2) НГП є лише джерелом часток, що приймають участь у процесі;
- 3) НГП використовується тільки для активації часток та поверхонь, що приймають участь у процесі, та для стимуляції самого процесу.

У першому випадку поверхня твердого тіла, що обробляється, знаходиться у контакті з плазмою, в другому – по за плазмою, а в третьому можливі обидва варіанти.



Рис. 3. Процеси, які реалізуються за допомогою НГП.

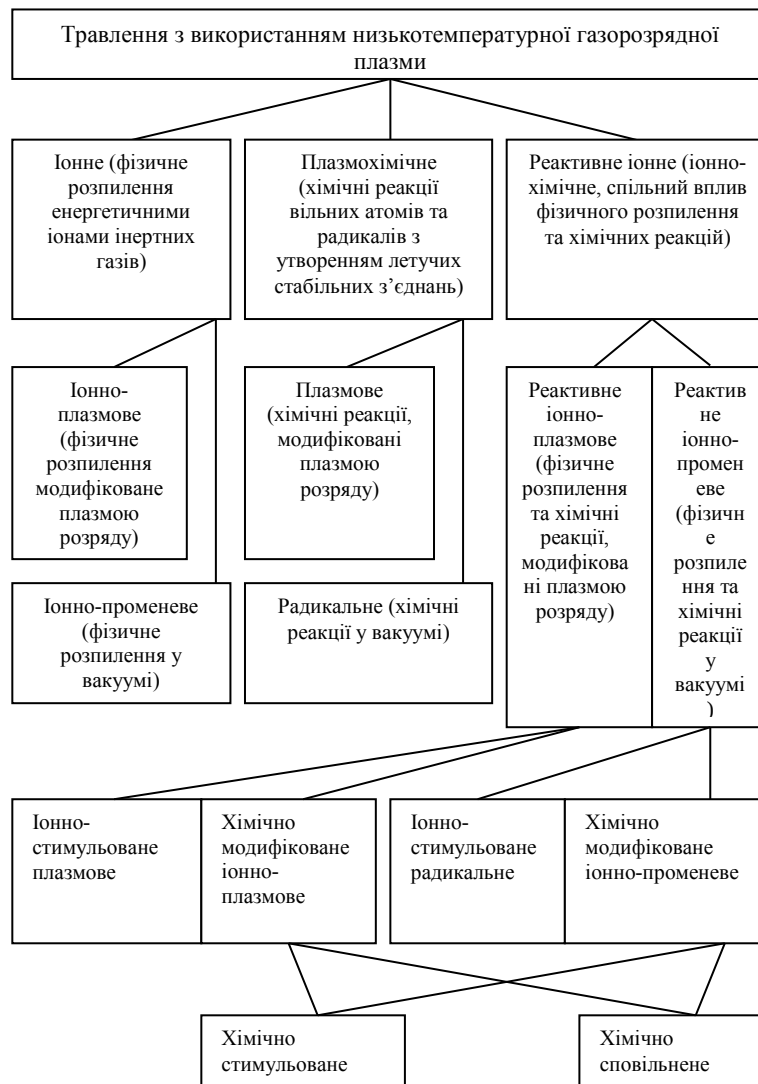


Рис. 4. Класифікація процесів травлення з використанням НГП.

В залежності від виду плазмоутворюючого газу та природи поверхні твердого тіла у кожному з трьох перерахованих випадків за допомогою НГП можуть бути реалізовані різні процеси обробки (рис. 3.).

Ці процеси можна об'єднати у три великі групи:

- видалення матеріалу з поверхні твердого тіла (всі види розпилення, травлення та очищення);
- нанесення матеріалу на поверхню твердого тіла (хімічне з газової фази, хімічне з матеріалу мішені, фізико-хімічне з матеріалу мішені, змінного в газовій фазі);
- модифікація поверхневого шару твердого тіла (окислення, анодування, нітридизація, легування іншими елементами, текстуровання, віджиг).

1.2 Класифікація процесів травлення та очистки матеріалів з використанням низькотемпературної газорозрядної плазми

Процес очищення матеріалів – це видалення з його поверхні сторонніх атомів та молекул.

Травлення – це видалення поверхневих атомів та молекул самого матеріалу.

По фізико-хімічному механізмі взаємодії часток НГП з поверхнею матеріалу, що обробляється, процеси травлення можна розділити на три великі групи, що перераховані нижче (рис. 4.).

1. *Іонне травлення (ІТ)* – під час якого поверхневі шари матеріалів видаляються лише у випадку фізичного розпилення. Розпилення відбувається енергетичними іонами газів, які не реагують хімічно з матеріалом, що обробляється (зазвичай іонами інертних газів). Якщо поверхня

матеріалу, який піддається обробці, знаходиться у контакті з плазмою, то травлення називають *іонно-плазмовим (ІПТ)*. Якщо поверхня зразка не контактує з плазмою, яка використовується лише як джерело іонів, що реалізують травлення, то травлення називають *іонно-променевим (ІПТ)*.

2. *Плазмохімічне травлення (ПХТ)* – під час якого поверхневі шари матеріалів видаляються в результаті хімічних реакцій. Хімічні реакції відбуваються між ХАЧ та поверхневими атомами з утворенням летучих продуктів. Якщо поверхня матеріалу, що обробляється, знаходиться у контакті з плазмою, то травлення називають *плазмовим (ПТ)*. Під час ПТ хімічні реакції стимулюються низько-енергетичними електронним та іонним бомбардуваннями, а також впливом випромінювання. Якщо поверхня зразка не контактує з плазмою, яка використовується лише як джерело ХАЧ, то таке травлення називають травленням вільними атомами та радикалами або *радикальним травленням (РТ)*. РТ відбувається спонтанно без стимуляції електронним та іонним бомбардуваннями, а в деяких випадках і за відсутності впливу випромінювання.

3. *Реактивне іонне та іонно-хімічне травлення (ІХТ)* – під час якого поверхневі шари матеріалів видаляються як у випадку фізичного розпилення енергетичними іонами, так і хімічних реакцій між ХАЧ та поверхневими атомами. Якщо поверхня матеріалу, який піддається обробці, знаходиться у контакті з плазмою, то травлення називають реактивним іонно-плазмовим (РІПТ). Під час РІПТ на поверхню зразка діють енергетичні іони, атоми та радикали, електрони та випромінювання. При цьому процес фізичного розпилення матеріалу може як прискорюватись, так і уповільнюватись хімічними реакціями, які в свою чергу можуть бути активовані іонним та електронним бомбардуваннями, а також випромінюванням. Якщо поверхня зразка не контактує з плазмою, яка використовується лише як джерело енергетичних хімічних активних іонів, таке травлення називають реактивним іонно-променевим (РІПТ). Під час РІПТ поверхня зразка піддається впливу молекулярних та атомарних іонів, які окрім розпилення у випадку ударної дисоціації та нейтралізації утворюють ХАЧ, що вступають в хімічні реакції з матеріалом, який обробляється. Хімічні реакції можуть як прискорювати, так і сповільнювати процес фізичного розпилення.

1.3 Вимоги до робочих газів

До робочих газів, які використовуються в процесах ПХТ та ІХТ висуваються наступні вимоги:

- забезпечення при розкладі у плазмі газового розряду максимального виходу енергетично та хімічно активних часток, що здатні утворювати або стабільні летучі з'єднання, або такі що легко розпилюються при взаємодії з матеріалом, який обробляється;
- забезпечення потрібних швидкості, селективності та анізотропії процесу травлення;
- відсутність токсичності та вибухонебезпечності, корозійного впливу та забруднення стінок реактора, пристроїв, що знаходяться всередині камер та відкачних магістралей та деградуючого впливу на масла вакуумних насосів.

Зріджений газ займає перше місце серед потенційно небезпечних хімічних речовин та матеріалів, які використовуються у виробництві інтегральних схем (ІС). Подібно іншим хімічним речовинам гази можна розділити на шість категорій за *основною небезпечністю*:

- корозійні;
- вогненебезпечні;
- інертні (душать за рахунок заміщення кисню);
- окиснюючі;
- пірофорні (здатні самозагорятися при температурі вище 54°C);
- токсичні (отруйні).

Забезпечення безпеки персоналу та захист цінного виробничого обладнання потребують постійної уваги з питань збереження, транспортування, використання та видалення зріджених газів.

Найбільшою загрозою є гази, що самозагораються та окислюються, оскільки вони можуть викликати вибухи та пожежі з великим людськими втратами.

Корозійні гази спричиняють тяжкі, а іноді і смертельні опіки при потраплянні на шкіру, навіть за дуже малий проміжок часу.

Високотоксичні гази такі, як арсин, мають властивості отрут гемолітичної дії, тобто спричиняють заміщення кисню у крові; інші, наприклад фосфин, впливають на систему дихання. Також важливу увагу треба приділяти впливу другорядних компонентів з точки зору їх концентрації суміші. Наприклад, газ, який складається з 1% H_2 та 99% N_2 , не є вогненебезпечним, але якщо H_2 складає 5 %, а N_2 – 95% , то утворюється вогненебезпечна суміш, Крім того, навіть 1% домішок H_2 до N_2 вже має удушуючі властивості.

Окрім газів для ВПТ використовують пари токсичних рідин: $SiHCl_3$, $SiCl_4$, CCl_4 , а також суміші HF , H_2S , NO , NF_3 та інші.

Використання газів, що містять хлор, для травлення алюмінію потребують особливої уваги. Слід уникати застосування CCl_4 через те, що цей газ має канцерогенні властивості, тобто може викликати ракові захворювання. Тому перевагу надають BCl_3 , $SiCl_4$ та Cl_2 . Проте у газах, що містять хлор, якщо вони не достатньо очищені може бути присутня велика кількість токсичних домішок.

Більшість токсичних речовин потрапляє до організму людини через дихальні шляхи та шкіру, тому перед виробництвом постає завдання безпечного збереження та використання цих газів та рідин, попередження можливості їх витікання та забруднення іншими газами.

Вибір робочого газу чи складу газової суміші базується на певних вимогах, таких як:

- швидкість v_{mp} ;
- селективність s ;
- показник анізотропії A .

Селективність травлення одного матеріалу відносно іншого характеризується відношенням швидкостей травлення цих матеріалів в однакових умовах. *Анізотропія* визначається як відношення швидкості травлення до нормалі та дотичної до поверхні матеріалу, який піддається травленню. Швидкість та селективність травлення суттєво залежать від виду або складу газової суміші. Якщо реакція травлення є екзотермічною, то підвищення температури матеріалу чи газу буде сприяти зменшенню швидкості, а зниження температури – збільшенню швидкості протікання реакцій. Якщо реакції травлення мають різні екзотермічності, то для збільшення швидкості ПХТ матеріалу, взаємодія якого з ХАЧ дуже екзотермічна, потрібно збільшити концентрацію ХАЧ та послабити іонне бомбардування чи застосовувати РТ. Відповідно для матеріалів, взаємодія яких з ХАЧ слабо екзотермічна, можна збільшувати селективність травлення, зменшуючи концентрацію ХАЧ та підсилюючи іонне бомбардування. При ІХТ на швидкість та селективність травлення суттєво може впливати енергія іонів. Вплив енергії іонів тим більше, чим більш ефективним є процес осадження вуглецевих та органічних плівок на поверхні матеріалу, який піддається травленню, тобто чим біль в молекулі робочого газу міститься атомів вуглецю порівняно з атомами галогенів.

Склад робочого газу впливає не лише на швидкість та селективність, а іноді й на анізотропію. Так при зменшенні тиску газу довжина вільного пробігу та напрямок впливу заряджених часток зростають, а концентрація ХАЧ зменшується, що збільшує анізотропію, одночасно зменшуючи швидкість травлення, і все навпаки при збільшенні тиску.

В деяких випадках застосовують багатокомпонентні суміші газів, наприклад $C_2F_6 + CHF_3 + O_2 + He$. Перший компонент суміші забезпечує високу швидкість травлення (1,4 мкм/мин), другий гарантує значну селективність (5:1 відносно кремнія та фоторезисту), третій забезпечує анізотропний профіль травлення, четвертий дозволяє ефективно розсіювати потужність, що виділяється на пластині, оскільки гелій має високу теплопровідність.

Склад робочого газу та як наслідок параметри процесу можуть змінюватись за рахунок різних парціальних тисків залишкових газів реакторі від циклу до циклу, фізичного розпилення матеріалу електродів, а також хімічних реакцій ХАЧ з матеріалами стінок реактора та приладів всередині камер.

1.4 Механізм ПТ

При ІТ видалення поверхневих шарів матеріалу здійснюється за рахунок фізичного розпилення енергетичними іонами інертних газів чи іонів, які хімічно не реагують з матеріалом, що піддається обробці. Основним механізмом взаємодії між іонами, що бомбардують, та атомами матеріалу є процес передачі імпульсу, тобто розпилення здійснюється за рахунок жорстких зіткнень, що призводять до прямого вибиття атомів з рівноважних положень. Можна виділити три різних випадки:

- режим первинного вибиття атомів з рівноважних положень;
- режим лінійних каскадів;
- режим теплових піків.

В режимі первинного вибиття іон, що бомбардує, передає енергію атомам мішені, які можуть вийти через поверхню, або одразу, або після невеликої кількості жорстких зіткнень з приповерхневими атомами, що необхідні для повороту вектора імпульсу. В двох інших режимах атоми, які вибиваються з рівноважних станів, отримують енергію, достатню для вибиття вторинних, третинних і т.д. атомів, частина яких може дістатися до поверхні матеріалу та здолати поверхневий бар'єр.

Фізичне розпилення матеріалів кількісно характеризується *коефіцієнтом розпилення (КР)*, який визначається як середнє число атомів, які видаляються з поверхні матеріалу однією падаючою часткою. Падаючими частками можуть бути атомарні та молекулярні іони, нейтральні атоми, нейтрони, електрони та фотони з великою енергією. В даному випадку, згідно визначенню КР, атом/іон:

$$Y_p = N_a/N_i,$$

де N_a – кількість вибитих (розпилених) атомів матеріалу; N_i – число іонів, які бомбардують матеріал.

Для іонного очищення поверхні матеріалів використовують іони з енергією в діапазоні від 20 до 100 еВ, а для ІТ – від 100 до 1000 еВ. В першому діапазоні розпилення відбувається в режимі первинного прямого вибиття, а в другому – як в режимі первинного вибиття, так і в режимі лінійних каскадів.

ІТ матеріалу починається тоді, коли енергія іонів E_i перевищує деяке значення $E_{пор}$, яке називається *пороговою енергією*. При $E_i < E_{пор}$ розпилення матеріалу не відбувається, та при взаємодії та при взаємодії з атомно-чистою поверхнею відбувається відбиття іонів, адсорбція з подальшою десорбцією та нейтралізацією, що здійснюється електронами, які емітують з матеріалу під дією електричного поля іонів. Якщо на поверхні матеріалу присутні адсорбовані сторонні частки та хімічні з'єднання, то внаслідок іонного бомбардування відбувається десорбція та хімічне перетворення.

На десорбуючій дії іонного бомбардування базується процес очищення поверхні матеріалів. Десорбція при іонному бомбардуванні може здійснюватись прямим вибиванням адсорбованого атома падаючим іоном, його вибиттям відображеним від поверхні матеріалу іоном та вибиттям розпиленим атомом матеріалу. При іонному бомбардуванні поверхневі шари монокристалів перетворюються спочатку на полікристалічні, а потім на аморфні. *Доза іонного опромінення D_i* , Кл/см², визначається:

$$D_i = j_i t,$$

або в іон/см² :

$$D_i = j_i t / Ze,$$

де j_i – щільність іонного струму на поверхні матеріалу, А/см²; t – час опромінення (травлення), с; e – заряд електрона, Кл; Z – кратність заряду іона.

Середня відстань, яку проходить іон, який проник до матеріалу, до зупинки, залежить від енергії та атомного номера іона, а також атомного номера та кристалічної структури матеріалу. В більшості випадків потрібно знати не середній пробіг іонів у матеріалі, а середню глибину їх проникнення. Товщина порушеного шару приблизно рівна подвійній середній глибині проникнення іонів в матеріал та збільшується з підвищенням дози іонного опромінення.

Основна доля енергії іонів (70 – 90%) вивільнюється в матеріалі у вигляді тепла, менше 10% її витрачається на розпилення, а частина що залишилась витрачається на радіаційне руйнування

матеріалу, проникнення іонів, вторинну електронну емісію та електромагнітне випромінювання у широкому спектрі частот.

Для вибору технологічних режимів ІТ та очищення матеріалів потрібні такі характеристики часток, які розпилюються:

- кутове розподілення по енергіям;
- середня швидкість;
- середня енергія.

Енергетична ефективність процесу іонного розпилення $\eta_{ен}$ визначається масою матеріалу m , який розпилюється в одиницю часу з одиниці поверхні, що віднесена до щільності потужності $\omega = j_i U_i$ (j_i – щільність іонного струму та U_i – прискорююча іонна напруга), яка витрачається на реалізацію процесу розпилення:

$$\eta_{ен} = Y_p(E_i) A_m / E_i N_a,$$

де A_m – атомна маса матеріалу, який розпилюється; N_a – число Авогадро.

Коефіцієнт розпилення залежить не лише від енергії іонів, а й від наступних характеристик:

- маса бомбардуючих іонів m_i ;
- атомний номер матеріалу, який розпилюється Z_a ;
- кут падіння іонів на поверхню матеріалу α ;
- чистота обробки поверхні;
- температура матеріалу, який розпилюється $T_{рм}$.

1.5. Плазмохімічне травлення неорганічних матеріалів.

Механізми травлення деяких неорганічних матеріалів, що широко використовуються у виробництві електронних приладів, приведені в табл.1

Табл. 1

№	Матеріал	Механізм травлення
1.	Кремній	Основні частинки, активні в травленні кремнію - атоми фтору і радикали SF_5 (внесок останніх у швидкість травлення складає близько 30%). Швидкість травлення за всіх умов і складах плазми прямо пропорційна концентрації атомів фтору при інших рівних умовах і збільшується зі зростанням потоку іонів і різниці потенціалів поверхні і плазми при однакових концентраціях атомів. Основний продукт травлення в газовій фазі SiF_4 (насичений фторид), що випаровується з поверхні, і SiF_2, що має підвищені енергії та десорбується внаслідок іонного бомбардування. Пасивація поверхні за рахунок перерахованих вище часток, а також атомів хлору в хлорвміщуючій плазмі, забезпечує анізотропію травлення внаслідок іонного бомбардування, збільшується в міру збільшення енергії іонів (низький тиск, низька частота поля, накладення додаткового зміщення потенціалів від незалежного джерела або самозміщення). У хлорвміщуючій плазмі, як і при іонно-стимульованому травленні, травлення відбувається тільки за рахунок іонного бомбардування і спостерігається висока анізотропія при низьких швидкостях травлення. При використанні фтор-хлорвміщуючої плазми анізотропія за рахунок пасивації хлором зберігається, а швидкість травлення збільшується за рахунок бомбардування атомарним фтором.
2.	Вольфрам	Закономірності травлення вольфраму аналогічні описаним вище для кремнію, що зумовлено високою летючістю насиченого

		фториду (WF_6) при кімнатних температурах.
3.	Молібден	Механізми травлення молібдену також, в основному, аналогічні механізмам травлення кремнію. Відмінності пов'язані з більш високою температурою кипіння насиченого фториду, що призводить до більш низьких ймовірностей при кімнатній температурі.
4.	Тантал	Насичений фторид танталу плавиться і кипить при температурах значно вище кімнатної. На поверхні утворюється досить товста плівка фториду, а швидкість травлення сильно залежить від температури і іонного потоку
5.	Титан	Плазмохімічне травлення титану спостерігається в хлорвміщуючій плазмі внаслідок більш високої летючості тетрахлориду титану (низька температура травлення). Активними частками в травленні є не тільки атоми, але і молекули хлору, і можливо, інтергалогена FCl . При високих температурах ($> 450\text{ K}$) іонне бомбардування не прискорює травлення, при низьких ($T < 325\text{ K}$) спостерігається явне стимулювання травлення іонами, а електрони прискорюють ріст фторидної плівки. При високих температурах це проявляється в підвищенні швидкості травлення.
6.	Сплав WTi (5:1)	Механізм травлення цього сплаву цікавий тим, що один з його компонентів має нелеткі фториди або хлориди при низьких температурах. В фторвміщуючій плазмі активними частинками в травленні є радикали SF_5 і атоми фтору. Внаслідок різної швидкості травлення фтором компонентів сплаву на Арреніусовських залежностях швидкості травлення від температури спостерігається злам при температурах близько 350 K . Ця температура нижче температури плавлення фториду титану, але вище відповідної температури плавлення фториду вольфраму. Але фторид переважаючого компонента - вольфраму залучає до травлення і титан, оскільки вище цієї температури сплав травиться як єдиний матеріал і збагачення титаном на поверхні після травлення не відбувається. У той же час при $T < 350\text{ K}$ на поверхні спостерігається збагачення титаном і збільшується енергія активації і відповідно знижується швидкість травлення.
7.	Алюміній	Не має летючих галогенідів при кімнатній температурі, за винятком димеру Al_2Cl_6 , температура сублімації якого становить 297 K . Тому травлення плівок алюмінію здійснюють у плазмі хлорвмісних газів та їх сумішей: Cl_2 , CCl_4 , BCl_3 , Cl_2/CCl_4 ; Cl_2/BCl_3 . Активними частинками, що взаємодіють з чистою поверхнею алюмінію, є атоми і молекули хлору. Ймовірності їх реакцій при кімнатній температурі однакові і іонна бомбардування їх не прискорює. Швидкість травлення не залежить від різниці потенціалів між плазмою і поверхнею, потужності розряду. Основний продукт - Al_2Cl_6 . Травлення ізотропно. Анізотропія травлення досягається за рахунок добавок газів (CCl_4 , BCl_3), що генерують в плазмі хлорвуглецеві і бор-хлорні радикали (CCl_x , $x = 1-3$; BCl_x , $x = 1-2$). Вони осідають на поверхні, пасивують її, і видаляються, так само як і окислені шари, за рахунок іонного

		бомбардування. Присутність парів води внаслідок гігроскопічності хлоридів алюмінію адсорбуються, вступаючи з ними в реакцію з утворенням гідроксиду алюмінію. Це призводить до невідтворюваних результатів і зміни властивостей виробів аж до повного стравлення ділянок плівки, що залишилися в ВІС і НВІС під час зберігання на атмосфері навіть під захисним покриттям. Тому необхідний строгий контроль за домішкою парів води.
8.	Мідь	Мідні плівки травлять в хлорвміщуючій плазмі, оскільки хлориди більш летучі, ніж фториди. Частинками, що активно взаємодіють з поверхнею Cu (100) є атоми і молекули хлору, причому ймовірність взаємодії обох частинок практично однакова навіть при кімнатних температурах. Іонна бомбардування не впливає на швидкість процесу. Можливі два варіанти організації процесу: – Експозиція поверхні при кімнатній температурі з наступним нагріванням до температури вище початку сублімації тримера до повного видалення хлорованого шару; – Експозиція поверхні при температурі, вищій за температуру сублімації. У цьому випадку швидкість травлення може змінюватися в широких межах за рахунок варіації температури. В обох варіантах травлення ізотропно.
9.	Індій, галій	Інші метали III групи періодичної системи - індій, галій та їх сполуки з елементами V групи - фосфором, миш'яком також травлять в хлорвміщуючій плазмі. Набір плазмоутворюючих газів в цьому випадку істотно більше Cl_2 , CCl_4 , BCl_3 , $\text{Cl}_2 / \text{BCl}_3$, Br_2 , COCl_2 , CCl_2F_2 , PCl_3 , HCl , $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$, CCl_4/O_2 . Анізотропія травлення досягається за рахунок використання фтору і кисню, оскільки фториди і оксиди цих елементів нелеткі і видаляються іонним розпиленням.
10.	Хром	Плазмохімічне травлення плівок хрому здійснюється в плазмі сумішей хлорвмісних газів з киснем.
11.	Оксиди металів	Плазмохімічне травлення оксидів металів здійснюється тільки в тих випадках, коли утворюються летючі оксифториди або оксихлориди. Травлення інших оксидів у плазмі відбувається за рахунок іонного розпилення (ІТ або РІТ), тому здійснюється при низьких тисках ($P < 10\text{Па}$) і великих потенціалах поверхні відносно плазми.
12.	Оксиди кремнію	Травлення двоокису кремнію (SiO_2) здійснюється у фторвміщуючій плазмі атомами фтору і фторвмісними радикалами (CF_x , SF_5 та ін.). Моноксид кремнію і кристалічний кварц можна травити, в основному, шляхом переважно іонного бомбардування - при великих потоках і енергіях падаючих іонів у режимі РІТ.
13.	Нітрид кремнію	Травляться у фторвміщуючій плазмі атомами, фторвмісними радикалами з виділенням SiF_4 і N_2 в газову фазу. Позитивний вплив на швидкість травлення нітриду надають добавки в

		плазмоутворюючий газ (CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8) водню та вуглеводнів (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4), що призводять до прискореного утворення легколетючого продукту NH_3 .
--	--	---

1.6. Плазмохімічне травлення органічних матеріалів.

Полімерні плівки широко використовуються у виробництві виробів у мікроелектроніці в якості фоторезистів і резистивних шарів для електронної і рентгенівської літографії, для захисних покриттів готових мікросхем, а також в якості допоміжних шарів - планаризації рельєфної поверхні перед нанесенням металевих шарів та ін.. Тому сухе або плазмохімічне травлення полімерних плівок представляє дуже важливий елемент технології.

Як правило, органічні матеріали травляться в кисневмісній плазмі. Основними активними частинками є атоми кисню, а продуктами деструкції, що десорбуються, є оксиди вуглецю - CO , CO_2 , водень - H_2 , H_2O і радикали OH (при кімнатній температурі), які, взаємодіючи з воднем в об'ємі плазми або поблизу поверхні, перетворюються на пари води. Для широкого кола полімерних фоторезистів швидкість травлення у кисневій плазмі при однакових умовах змінюється в невеликих межах - кілька десятків відсотків. Фторвміщуючі та повністю фторовані полімери травляться зі швидкостями на порядок меншими, ніж вуглеводневі, і використовуються для підвищення стійкості масок. Попередня термообробка або іонне бомбардування полімерних резистів може призводити до зшивок полімерних ланцюгів, що збільшує стійкість полімерів в кисневмісній плазмі. Цей ефект використовується для створення негативних фоторезистів. У деяких випадках попереднє опромінення полімерів може призводити до структурних змін (обривів ланцюгів, бічних груп, утворення зшивок і т.п.), що збільшує швидкість травлення, і використовується для створення позитивних резистів.

Швидкості травлення майже всіх досліджених полімерів збільшуються при добавках у кисневмісну плазму фторвуглецевих газів в першу чергу за рахунок підвищення швидкості генерації атомів кисню. З іншого боку, генерація атомарного фтору і фторування вуглецевих атомів, особливо бічних груп, призводять до додаткового їх відриву. Вільні зв'язки, що залишаються на поверхні швидше взаємодіють з атомарним киснем.

1.7. Плазмохімічна полімеризація та її роль в плазмохімічному травленні матеріалів.

Як було показано вище, плазмохімічна полімеризація на поверхні експонованих зразків грає важливу роль у створенні високоселективних і високо анізотропних процесів травлення.

У всіх випадках травлення матеріалів в плазмі фтор- і хлорвуглецевих газів та їх сумішей з вуглеводнями закономірності і механізми полімеризації можна використовувати для оптимізації процесів травлення, зокрема, в досягненні анізотропії травлення.

Перш за все, склад плазми повинен вибиратися з тих міркувань, щоб швидкості осадження полімерних плівок на матеріалах, що травляться перевищували швидкості їх травлення в умовах плазми при відсутності іонного бомбардування, але були менше швидкості іонно-стимульованого травлення полімеру, що осаджується. У цьому випадку на бокових поверхнях рельєфу, не схильних до іонного бомбардування, буде осідати полімерна плівка, пасивуючих поверхню і блокуючи травлення матеріалу підкладки. На поверхнях, що бомбардуються іонами (дно рельєфу), що падають по лініях електричного поля - перпендикулярно поверхні зразків, плівка осідати не буде і швидкість травлення буде відповідно вище. Таким чином, буде здійснюватися спрямоване травлення поверхні в напрямку, перпендикулярному їй при відсутності бокового підтраву матеріалу під маску, тобто високоанізотропного травлення.

Після досягнення необхідної геометрії рельєфу у випадках анізотропного плазмохімічного травлення в плазмі, що полімеризується, необхідно вводити операцію ізотропного травлення

полімерної плівки з метою видалення її з бічних поверхонь і точного відтворення розмірів і поверхневих властивостей матеріалів.

Необхідно зазначити, що спільною особливістю протікання процесів травлення неорганічних сполук у плазмі є утворення на поверхні матеріалів, що травляться шарів нелетких продуктів (пасивація) в результаті взаємодії з вуглецевміщуючими радикалами (полімеризація) і з киснем, а також у результаті переосадження на поверхні матеріалів, що травляться, продуктів розпилення матеріалів стінок та електродів іонним бомбардуванням. Ці нелеткі продукти видаляються тільки за рахунок подальшого іонного бомбардування пасивованої поверхні, що і складає основу для розробки анізотропних (спрямованих) процесів травлення для створення елементів рельєфу з прямовисними стінками. Використовується той факт, що потоки іонів падають на поверхню по силових лініях електромагнітних полів і при бомбардуванні видаляють пасивуючі шари з горизонтальних ділянок поверхні, залишаючи їх там, куди іони, що бомбардують, не потрапляють. Крім того, виявлено, що різні матеріали травляться неоднаково різними частками, що складає основу для зміни селективності травлення різних верств матеріалів по відношенню один до одного з метою спрямованого формування необхідних структур на поверхні. Іонне бомбардування робить різносторонній вплив на поверхню, прискорюючи дифузію галогенів і кисню вглиб матеріалу, розриваючи зв'язки і прискорюючи реакції в тілі, розпорошуючи нелеткі продукти. Результат істотно залежить від конкретної системи.

Тому в більшості випадків травлення неорганічних матеріалів у плазмі, особливо у випадках анізотропного і селективного травлення, потрібні додаткові операції очищення поверхні, видалення дефектів структури, що вносяться в матеріали в результаті бомбардування різними частками плазми (в тому числі вбудований заряд, утворення порушених шарів, внесення домішок і т.д.). Ці операції здійснюються різними способами, наприклад, шляхом відпалу матеріалів нагріванням аж до високих температур (до 1000°C) у вакуумі та в атмосферах різних газів.

Відзначимо, що плазмохімічні методи травлення різних матеріалів в поєднанні зі стимульованими плазмою процесами осадження різних шарів дозволили створити повністю замкнуті сухі методи створення складних виробів мікроелектроніки - НВІС і надшвидкодійні схеми.

Цей комплекс методів вже використовується і в інших областях техніки - при створенні мініатюрних сенсорів - чутливих приладів виявлення домішок у газах і інших середовищах, датчиків, мікродвигунів, в електроніці, електротехніці, мікроінженерії. Області застосування їх безперервно розширюються і цей процес найближчим часом буде протікати з прискоренням.

2. Класифікація установок іонно-плазмового травлення

За способом збудження та підтримки електричного розряду системи ПТТ розділяються на системи:

- з самостійними розрядами постійного струму (ПТ - системи);
- з самостійними ВЧ-розрядами (ВЧ-системи);
- ПТ- та ВЧ- системи зі штучною підтримкою розряду (який підтримується за допомогою допоміжних засобів: термоелектронної емісії, ВЧ- та магнітних полів).

В магнетронних ПТ та ВЧ-системах магнітне поле використовується для збільшення щільності плазми. Системи ПТТ можна розділити за *кількістю електродів* на:

- двоелектродні (діодні);
- трьохелектродні (тріодні);
- багатоелектродні (чотири та більше електродів).

За формою та розташуванням електродів системи ПТТ можуть бути:

- горизонтальні з плоскими електродами (планарні);
- вертикальні з електродами у вигляді циліндрів та багатограних призм.

Найбільш поширеними варіантами конструкцій ПТТ є наведені на рис. 5..

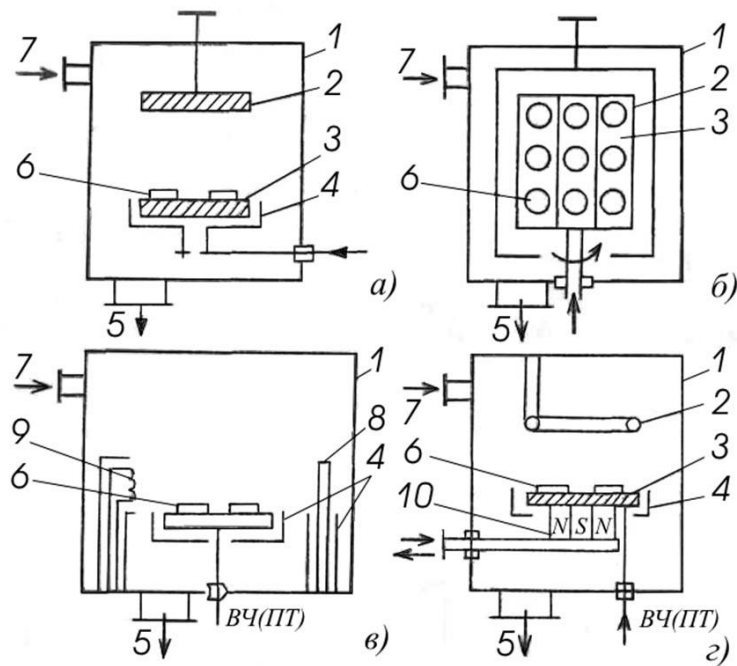


Рис. 5. Системи ПІТ

а – планарна ВЧ(ПТ)-діодна; *б* – вертикальна ВЧ(ПТ)-діодна з багатограним електродом; *в* – тріодна; *г* – планарна магнетронна;
 1 – камера; 2 – заземлений електрод; 3 – ВЧ(ПТ)-електрод; 4 – заземлений екран; 5 – відкачка; 6 – пластини, які піддаються обробці; 7 – напуск газу; 8 – анод; 9 – термокатод; 10 – магнітна система

2.1 Планарна ВЧ(ПТ)-діодна система

Планарна діодна ВЧ-система (рис. 5., *а*) містить два дискових електроди: заземлений (анод) і ВЧ-електрод (або мішень), на який подається напруга від ВЧ-генератора. У діодній ВЧ-системі можливість ПІТ будь-яких матеріалів (металів, напівпровідників, діелектриків, органічних сполук та ін.) поєднується з простотою конструкції і великою площею ВЧ-електрода, на якій забезпечується рівномірне іонне бомбардування. Основні параметри діодної ВЧ-системи та їх типові значення:

- тиск робочого газу p , $p = 0,66 \square - 6,6$ Па;
- міжелектродна відстань $d_{м.е.}$, $d_{м.е.} = 4 \square - 8$ см;
- радіус ВЧ-електрода (мішені) $R_м$, $R_м = 10 \square - 30$ см;
- потужність $W_{вч}$ ВЧ-розряду, $W_{вч} = 1 \square - 4$ кВт;
- частота f ВЧ-розряду, $f = 440$ кГц; 1,76; 5,28; 13,56 та 27,12 МГц.

Характерною рисою систем із ВЧ-розрядами є необхідність узгодження ВЧ-генератора з камерою розпилення, повний опір (імпеданс) якої може змінюватись в широких межах залежно від розмірів електродів, тиску та складу робочого газу, магнітного поля, а також у результаті покриття конструкцій, які знаходяться в середині камер, плівками розпилених матеріалів. Тому в системах ПІТ з ВЧ-розрядами мають бути передбачені пристрій стабілізації робочого тиску при різних витратах робочого газу та пристрій узгодження, що забезпечує певне значення опору між ВЧ-генератором і камерою розпилення, яка виконує роль навантаження.

Параметром, істотно обмежуючим як частоту напруги, що збуджує розряд, так і потужність, яка розсіюється на ВЧ-електроді, є ширина зазору між ВЧ-електродом і заземленим екраном. З одного боку, цей зазор повинен бути принаймні в 2 рази вужче товщини іонної оболонки (темного простору), для того щоб у зазорі не виник розряд. З іншого боку, при надмірному зменшенні зазору збільшуються ємнісні втрати і виникає загроза виникнення пробою (особливо за наявності в

мішені гострих країв і забруднень). Коли тиск робочого газу 0,66-6,6 Па, ширина зазору між екраном і ВЧ- електродом становить кілька міліметрів. Ширину зазору можна збільшити, а ємнісні втрати зменшити, якщо використати герметичну конструкцію ВЧ-електрода з автономною відкачкою його внутрішньої порожнини до тиску 10^{-3} Па.

Схема планарної діодної ПТ- системи аналогічна схемі планарної ВЧ- системи (див. рис. 5., а), тільки замість ВЧ- генератора використовується джерело постійної напруги і немає необхідності в пристрої узгодження. Область застосування діодних ПТ- систем обмежена ПТ провідних матеріалів, робочий тиск лежить у діапазоні 1,33-13,3 Па, а розміри електродів і міжелектродні відстані такі, як у діодних ВЧ- системах. Травлення матеріалів у діодних ПТ-системах здійснюється в аномальному тліючому розряді при напрузі на катоді 1-2 кВ. Швидкості ПТ органічних масок у кілька разів нижче, ніж у ВЧ- системах, що дозволяє проводити травлення провідних шарів на більшу глибину.

2.2. Вертикальна ВЧ(ПТ)- діодна система з багатогранним електродом

Для збільшення продуктивності за рахунок завантаження великої кількості пластин (підкладок) на ВЧ-електрод, а також зменшення ступеня забруднення поверхні пластин плівками, які відшаровуються від заземленого електрода, і частками застосовують вертикальну діодну ВЧ-систему з багатогранним ВЧ- електродом (рис. 5., б). В такій системі з метою збільшення рівномірності травлення може бути використане обертання ВЧ-електрода.

2.3 Тріодна система

Тріодна система ПТ складається з трьох незалежно керованих електродів: термокатада, анода та мішені, на якій розміщуються пластини, що оброблюються (рис. 5., в). Після відкачки робочої камери до тиску 10^{-4} Па катод розігрівається до температури, достатньої для досягнення високої щільності струму термоелектронної емісії. Потім у камеру напускається інертний газ до тиску $(6,6 \div 66)10^{-2}$ Па та між термокатодом і анодом подається напруга близько 50 В, що приводить до запалювання дугового розряду. На мішень може подаватися як постійна негативна напруга при травленні провідних матеріалів, так і ВЧ- напруга при травленні діелектриків. У тріодній системі процеси утворення плазми та травлення розділені, що дозволяє керувати енергією іонів за допомогою напруги на мішені. Крім того, якщо в діодній системі щільність іонного струму j_i становить 1-2 мА/см², то в тріодній системі вона може досягати 10-15 мА/см², забезпечуючи високі швидкості травлення матеріалів. До недоліків тріодної системи можна віднести труднощі одержання однорідної плазми через малий розмір термокатада в порівнянні з холодним катодом діодної системи, що призводить до нерівномірності травлення зразків по поверхні мішені. Наявність термокатада також обмежує ресурс роботи тріодної системи до його зміни.

2.4 Планарна магнетронна система

У планарній магнетронній системі ПТ (рис. 5., г) під плоским ВЧ- електродом (мішенню) розміщені постійні магніти, форма полюсів яких визначає геометрію замкнутої зони в поверхні мішені у вигляді витягнутої букви "О". Наявність у мішені замкнутого магнітного поля дає можливість локалізувати плазму в безпосередній близькості до мішені і підвищити щільність іонного струму на мішень. Для забезпечення рівномірності ПТ в системі передбачене сканування магнітного поля по діаметру мішені за допомогою переміщення магнітної системи. Наявність магнітного поля з індукцією 0,10-0,12 Тл дозволяє проводити ПТ при тиску 1-10 Па, забезпечуючи енергію іонів 250 еВ при щільності іонного струму $j_i = 6$ мА/см². Таким чином, у планарній магнетронній системі при високих швидкостях травлення матеріалів різко зменшується можливість їхнього радіаційного uszkodження внаслідок низьких енергій іонів.

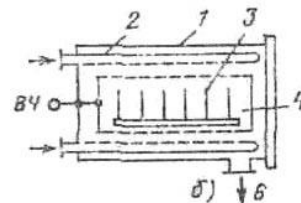
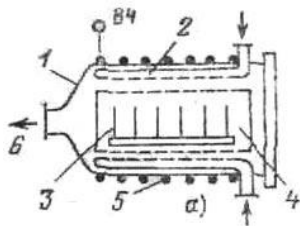
2.5. Типи реакторів

Травлення може здійснюватися в реакторах двох типів (рис. 6., а - г і рис. 6., д - с відповідно). До першого типу відносяться циліндричні реактори з перфорованим циліндром-вкладишем (реактори тунельного типу). В таких реакторах зона плазми оточує зону реакцій і

доставка ХАЧ до підкладок відбувається за рахунок дифузії. Другий тип - реактори, у яких плазмова зона не охоплює реакційну. В цих реакторах можна використати потік газу із зони плазми в реакційну область до підкладок, що оброблюються, і потім проводити відкачку відпрацьованого газу вакуумною системою. В таких реакторах обидві зони звичайно конструктивно виділені в окремі камери. Відмінність між реакторами всередині кожного типу полягає у розташуванні елементів, способах завантаження підкладок, введення та відкачки газу, збудження плазми.

У циліндричних реакторах з перфорованим циліндром використовується збудження плазми за допомогою індуктора (рис. 6., а) і конденсаторних пластин (рис. 6., б - г). В обох випадках розряд є безелектродним. При цьому застосовується ВЧ- (рис. 6., а, б) або НВЧ- (рис. 6., г) напруга. Відмінність між тунельними реакторами складається також в тому, що перфорований циліндр може бути заземлений (рис. 6., г), слугувати ВЧ-електродом (рис. 6., б, в) або знаходитись під плаваючим потенціалом (рис. 6., а). Перфорований циліндр частіше виготовляється з вуглецевої сталі, нікелю або алюмінію, має прозорість не менш 25 % і діаметр отворів більше 3 мм (він повинен бути більше довжини вільного пробігу часток, щоб не перешкоджати їхньому проникненню всередину циліндра). Найбільш широко застосовуються циліндричні реактори з горизонтальним розташуванням осі, що є зручним для касетного завантаження підкладок. Існують також установки з вертикальним розташуванням осі реактора (рис. 6., в), що забезпечує зручність обертання підкладкотримача. Циліндричні реактори з перфорованим циліндром широко використовуються в промисловості, у той час як реактори з поділом реакційної та розрядної камер (або зон) і касетним завантаженням (рис. 6., д, ж), що з'явилися наприкінці 60-х років, не одержали широкого поширення. Досвід їхнього використання показав, що основний недолік таких реакторів - велика нерівномірність травлення по підкладці та в партії внаслідок неоднорідності розподілу активних часток по діаметру і довжині реакційної камери. Особливо велика нерівномірність (50-100%) спостерігається в реакторі, зображеному на рис. 6., д, причиною чому є L-видна конфігурація реактора. Використання декількох розрядних камер (рис. 6., е) зменшує нерівномірність до 15-30%, але вимагає застосування потужного ВЧ-генератора і ускладнює систему узгодження.

Значне поліпшення рівномірності (нерівномірність до 0,5-1%) досягається при індивідуальній обробці підкладок з розташуванням їх перпендикулярно потоку газу, що протікає через реактор. При індивідуальній обробці розрядну камеру можна виконати у вигляді окремого пристрою, що пристиковується до реакційної камери. Підкладки можна послідовно вводити в потік газу з ХАЧ, який витікає з розрядної камери, а потім переміщувати на іншу позицію, де буде проводитись наступна операція травлення або нанесення шарів матеріалу за допомогою іншої розрядної камери. Таким чином, індивідуальна обробка підкладок дозволяє сполучити кілька операцій в одному вакуумному циклі і створити установки безперервної дії, що надзвичайно важко при касетному завантаженні підкладок. З'являється також можливість індивідуального контролю кожної підкладки і полегшується автоматизація процесу. Варіанти конструкцій реакторів для індивідуальної обробки підкладок, які дозволяють проводити операцію, наведені на рис. 6., ж - п.



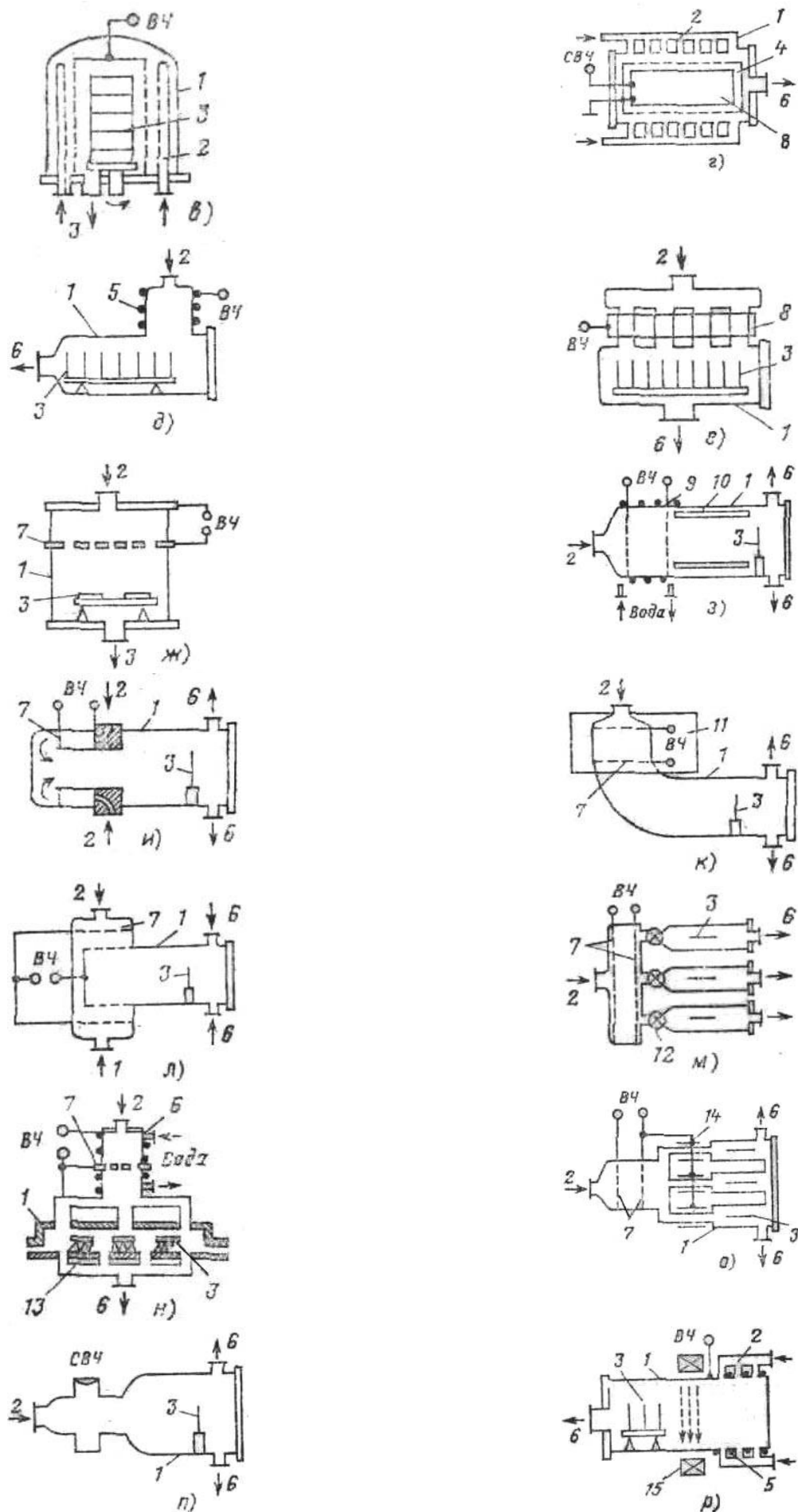


Рис. 6. Схеми конструкцій реакторів для РТ

1 — вакуумна камера; 2 — колектор (отвір) для подачі газу; 3 — підложки, що оброблюються; 4 — перфорований циліндр; 5 — індуктор; 6 — відкачні отвори; 7 — перфоровані електроди; 8 — конденсаторні обкладки; 9 — змійовик водяного охолодження; 10 — вкладиш; II — екран; 12 — регульований затвор; 13 — нагрівач; 14 — додаткові електроди; 15 — магніт.

На наведених схемах з метою спрощення зображення розрядна і реакційна камери об'єднані. Потік газу з розрядної камери може доставлятися також до декількох підкладок, які розташовані в одній (рис. 6., *ж, п, р*) і в декількох реакційних камерах (рис. 6., *м, о*) залежно від вимог конкретного процесу травлення. У більшості реакторів розряд у камері реакцій збуджується за допомогою електродних і безелектродних ВЧ- і НВЧ-розрядів. Електроди виконані у вигляді плоских пластин з отворами, через які протікає потік газу.

З метою більш повної доставки ХАЧ потоком газу із плазми до підкладок стінки розрядної камери охолоджують, а в реакційній зоні встановлюють вкладиш з оксиду алюмінію (рис. 6., *з*). Це зменшує втрати ХАЧ при взаємодії зі стінками реактора і дозволяє збільшити швидкість травлення вдвічі. Ефективне збереження ХАЧ відбувається при використанні додаткових електродів, з'єднаних з ВЧ-генератором. Ці електроди підтримують розряд у каналах, по яких транспортуються активні частки (рис. 6., *о*). Такий пристрій є особливо ефективним при розташуванні на значній відстані підкладок від розрядної зони. У реакторах розрядну зону можна розташувати так, що випромінювання плазми не буде потрапляти на підкладки (рис. 6., *і - л*) і, отже, полегшиться процес візуального контролю травлення. Можливе використання крана або вентиля між камерою реакцій і розрядною камерою (рис. 6., *м*). Ступінь відкриття крана (вентиля) дозволяє регулювати умови травлення. Поділ розрядної і реакційної зон може здійснюватися за допомогою магнітного поля, що перешкоджає проникненню заряджених часток до підкладок.

Для реалізації процесів РТ при низьких тисках (менше 1 Па) використовуються також системи з іонними та плазовими джерелами. При цьому або зразки містяться на підкладкотримачі зворотною стороною до виходу джерела, або в просторі між джерелом і реакційною камерою встановлюються колекторні пластини, що виділяють з іонного або плазового пучків заряджені частки.

3. Контроль чистоти поверхні матеріалів методом флюоресценції та методом змочування

Методи флюоресценції і змочування застосовуються для контролю органічних забруднень змішаного роду, таких як мастила, залишки мастильно-охолоджуючих рідин, сліди рук, пилу тощо.

При люмінесцентному методі проводиться візуальний огляд виробів при його висвітленні газорозрядної лампою через ультрафіолетовий світлофільтр. Ступінь забруднення вимірюється методом порівняння інтенсивності люмінесцентного світіння, у видимому діапазоні спектра електромагнітного випромінювання (0,4-0,8 мкм), досліджуваної речовини з речовиною, прийнятою за еталон.

Метод змочування - якісний метод, використовується для контролю за жирності поверхні.

При контролі чистоти поверхні тестового зразка методом змочування виконується його плавне занурення і витяг в горизонтальному положенні у дистильовану воду при температурі води 25⁰С. Заміряється час руйнування водної плівки на поверхні зразка. Якість очищення поверхні тестового зразка від жирових забруднень визначається за ступенем змочування поверхні зразка водяною плівкою, та часом руйнування водяної плівки.

Призначення установок плазмохімічного травлення.

Установки ПХТ призначені для плазмохімічного видалення забруднень і переддифузійного очищення поверхні виробів.

Живлення установок ПХТ здійснюється від 4-провідної з нульовим проводом мережі змінного струму напругою 220/380 В, частотою 50 Гц. Норми якості електричної енергії за ГОСТ 13109-67

Для експлуатації установок ПХТ до них необхідно подавати:

- азот газоподібний сорт І ГОСТ 9.293-74;
- хладон 14 МРТУ 6-02-922-74;
- кисень газоподібний технічний сорт 1 ГОСТ 5583-68.

Під тиском $30 \times 10^4 \div 49 \times 10^4 \pm 4,9 \times 10^4$ Па ($3 \div 5 \pm 0,5$ кгс/см²).

Для експлуатації установок ПХТ вихлопний патрубок їх вакуумних насосів необхідно приєднати до системи витяжної вентиляції.

Технічні дані установок ПХТ

Табл. 2

№	Параметр	Установка ПХТ з ЄЗР	Установка ПХТ з ІЗР
1.	Габаритні й встановочні розміри установки ПХТ з ЄЗР відповідають вказаним на рис.	7	7
2.	Час відкачування вакуумної системи до тиску 2,7 Па (2×10^{-2} мм.рт.ст.) не більше, хв	2,5	2,5
3.	Анодний струм не більше, А	0,95	0,8
4.	Струм сітки генератора не більше, мА	90	80
5.	Вихідна потужність генератора не менше, кВт	0,4	0,6
6.	Робоча частота генератора, кГц	$13560 \pm 1\%$	$13560 \pm 1\%$
7.	Максимальна електрична потужність, споживана установкою не більше, кВт	3	2,5
8.	Витрата азоту не більше, л/г	10	5
9.	Витрата хладону 14 не більше, л/г	10	5
10.	Витрата кисню не більше, л/г	15	15

Склад обладнання

Установка ПХТ з ЄЗР (див.рис.7) складається з наступних блоків виробів:

- блоку обробки 2 – 1шт.
- блоку вакуумної відкачки 1 – 1шт.
- блоку керування 3 – 1шт.

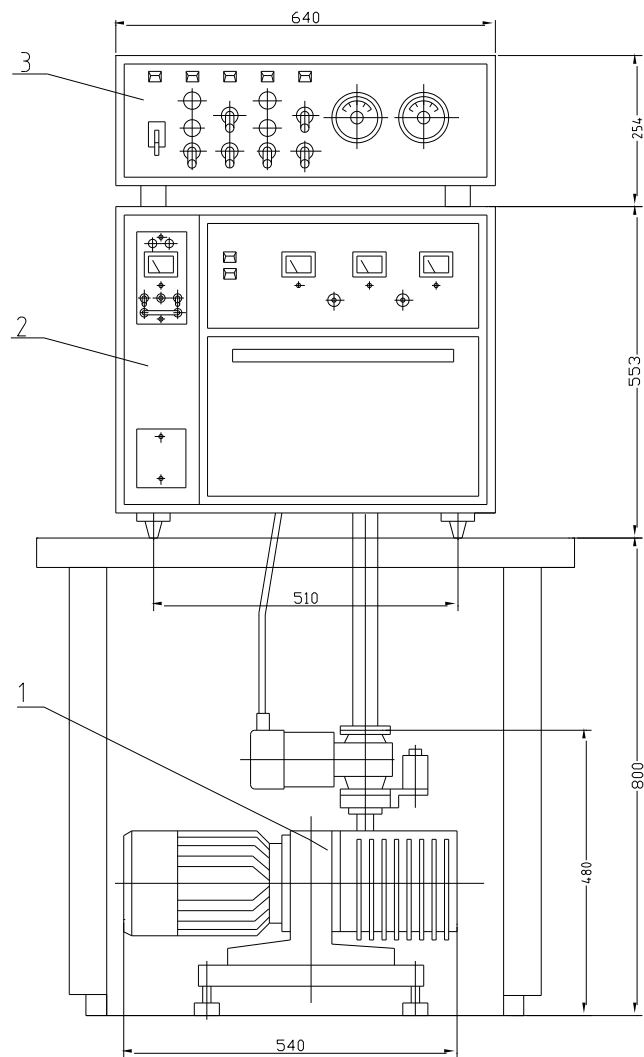


Рис.7(а). Схема установки плазмохімічної обробки (плазмової очистки), що включає плазмовий реактор з конденсаторним або індуктивним збудженням плазми і вакуумно-газову систему.
1 – блок вакуумної відкачки, 2 – блок обробки (плазмового реактора), 3 – блок керування.

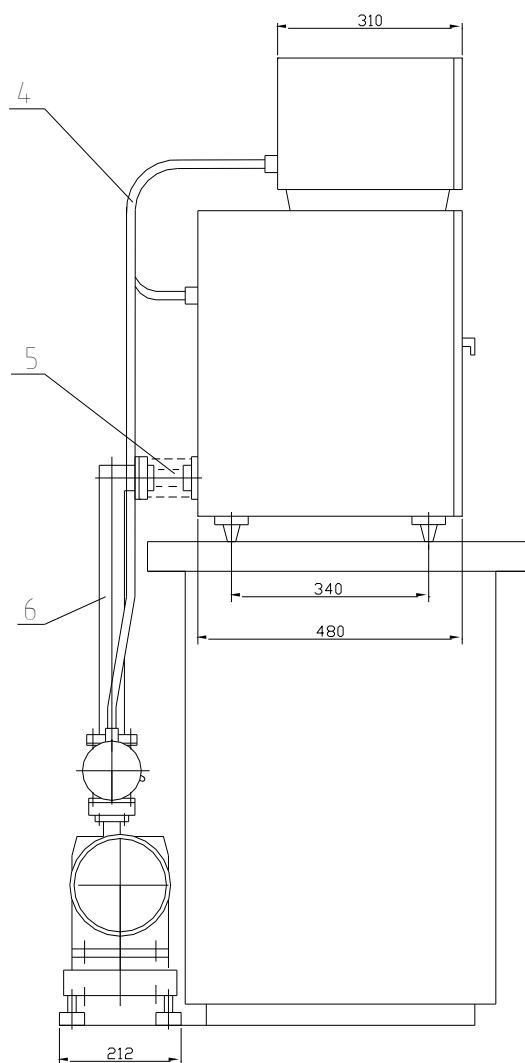


Рис.7(б). Схема установки плазмохімічної обробки (плазменної очистки), що включає плазменний реактор з конденсаторним або індуктивним збудженням плазми і вакуумно-газову систему
4 – електричні кабелі, 5 – сильфонний вузол, 6 – патрубок для відкачки.

Устрій і робота установок ПХТ з ємкісним збудженням розряду (ЄЗР) та індуктивним збудженням розряду (ІЗР).

Установка ПХТ складається з блоку керування 1 (рис.8), який здійснює керування технологічним процесом ПХТ, генератора ВЧ 2, що задає частоту для плазмохімічного реактора 3, та блока вакуумної відкачки 4. Генератор ВЧ та плазмохімічний реактор конструктивно об'єднані в один блок – блок обробки.

Зразок поміщається в плазмохімічний реактор. Після подачі напруги здійснюється відкачка плазмохімічного реактора 3 блоком 4. Вмикається на прогрів генератор ВЧ 2. Після прогріву генератора з блоку керування 1 вмикаються клапани подачі робочих газів до плазмового реактора. Після стабілізації тиску робочих газів в реакторі з блоку керування вмикається висока напруга і починається процес плазмохімічного травлення. По закінченню процесу плазмохімічного травлення вимикається висока напруга, на блоці керування вимикаються клапани подачі суміші газів у робочу камеру. Припиняється відкачування робочої камери відключенням блоку вакуумної

відкачки з блоку керування. Вмикається клапан подачі азоту в робочу камеру, коли тиск у камері досягне атмосферного тиску, припиняється подача азоту. По закінченню подачі азоту в камеру відчиняються дверці робочої камери і виймається зразок, що оброблювався.

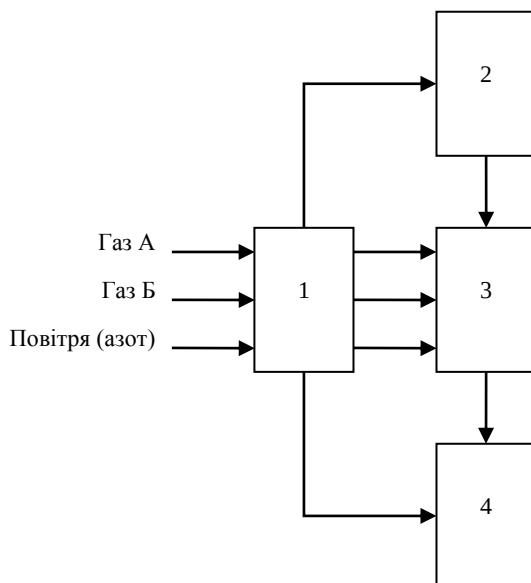


Рис.8 Схема установки ПХТ

1 – блок керування, 2 – генератор ВЧ, 3 – плазмохімічний реактор, 4 – блок вакуумної відкачки.

Розглянемо роботу установок ПХТ з ЄЗР та ІЗР більш детально.

Блок обробки установки ПХТ з ЄЗР (див.рис.7) з'єднується з блоком вакуумної відкачки 1, сильфонним вузлом 5 і патрубком 6. Електрозв'язок здійснюється джгутом 4.

Принцип роботи установки ПХТ з ЄЗР заснований на застосуванні низькотемпературної плазми для травлення діелектричних забруднень і видалення фоторезисту з поверхні виробів.

Плазма утворюється в камері при розрідженні порядку $40 \div 133$ Па ($0,3 \div 1,0$ мм рт.ст.), коли до обкладок ємностей, розташованих над камерою в установці ПХТ з ємкісним збудженням розряду, або до індуктора, розташованому навколо камери в установці ПХТ з індуктивним збудженням розряду, подається високочастотна напруга.

При напуску в камеру кисню до тиску $133 \div 195$ Па ($1 \div 1,5$ мм. рт. ст.) в камері утворюється атомарний кисень і іони кисню, що мають високу хімічну активність. Вони окислюють забруднення, утворюючи в результаті хімічних реакцій леткі сполуки, відкачувані з камер вакуумним насосом.

При напуску в камеру фреону 14 до тиску $40 \div 68$ Па ($0,3 \div 0,5$ мм. рт. ст.) утворюється атомарний фтор, який в результаті хімічної реакції очищає поверхню виробів від окислів і забруднень.

Також травлення діелектричних забруднень може здійснюватись за напуску в камеру суміші хладону 14 з киснем до тиску порядку $40 \div 70$ Па ($0,3 \div 0,5$ мм рт.ст.).

Блок вакуумної відкачки 1 складається з насоса вакуумного 1 (рис.9), закріпленого на рамі 4. До відкачного патрубка насоса приєднаний через перехідний фланець клапан вакуумний 2, при включенні якого відбувається відкачування камери насосом.

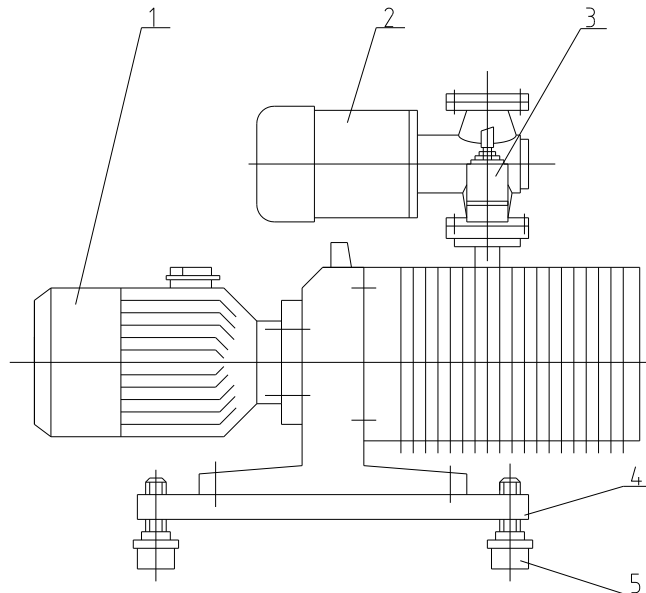


Рис.9. Блок вакуумної відкачки.

1 - механічний форвакуумний насос (2)НВР-5Д, 2 - клапан вакуумний, 3 – клапан вакуумний, 4 – рама, 5 – ніжка.

За допомогою ніжок 5 здійснюється регулювання блоку по висоті і гаситься вібрація. Клапан 3 служить для напуску повітря в насос після його зупинки.

Блок керування

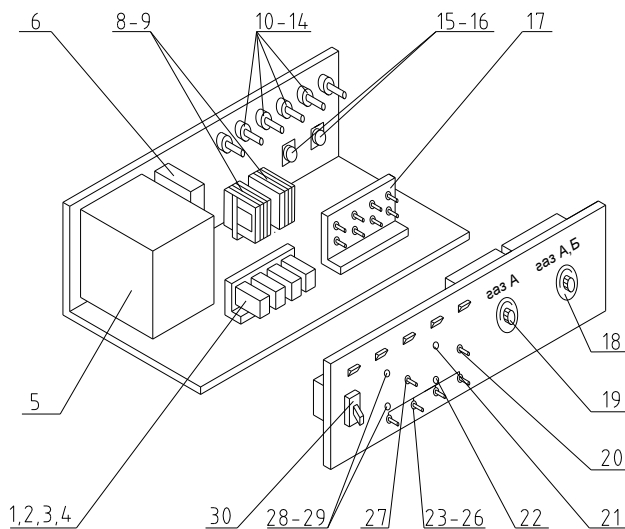


Рис. 10. Блок керування:

1, 2, 3, 4 – проміжне реле; 5 – програмне реле часу ВС-10; 6 – магнітний пускач; 8, 9 – понижуючі трансформатори; 10, 11, 12, 13, 14 – запобіжники; 15, 16 – роз'єми; 17 – випрямні мости; 18, 19 – реле часу; 20 – перемикач; 21, 22 – кнопки керування; 23, 24, 25, 26 – тумблери ручного керування клапанами; 27 – тумблер вмикання накали ламп; 28, 29 – кнопки керування насосом; 30 – автомат подачі мережевої напруги.

До складу установок ПХТ з ЄЗР та ІЗР входить блок керування. Блок керування (рис.10) являє собою пристрій, що складається з шасі з задньою стінкою і передньою панеллю, що забезпечує напівавтоматичний або ручний режим роботи установки ПХТ з ЄЗР по 2-м програмам:

1 - з одним газом (сумішшю хладону 14 з киснем) - для травлення діелектричних забруднень;

2 - з двома газами: спочатку суміш хладону 14 з киснем, а потім з одним киснем - для травлення діелектричних забруднень

На шасі розташовані:

- проміжні реле 1 ÷ 4 блокування і управління виконавчими механізмами;
- програмне реле часу ВС-10; 5;
- магнітний пускач 6;
- понижуючі трансформатори 8-9;
- випрямні мости 17;

На передній панелі змонтовані:

- реле часу 18-19 для встановлення часу відпрацювання з газом А і газом Б, перемикач 20 режимів роботи з газом А або з газами А, Б;
- кнопки «Пуск», «Стоп» управління процесом 21 - 22;
- тумблери 23 ÷ 26 ручного управління клапанами;
- тумблер 27 включення накалу ламп;
- кнопки 28 ÷ 29 «Пуск», «Стоп» управління насосом;
- автомат подачі напруги 30.

На задній стінці шасі розташовані:

- запобіжники 10 ÷ 14 для захисту двигуна і ланцюгів управління
- роз'єм 15 ÷ 16 для приєднання джгута.

Установка ПХТ з ЄЗР

В установці ПХТ з ЄЗР блок обробки 2 включає в себе корпус, в якому розміщуються: камера 3 (рис. 11.), Генератор ВЧ 2, вакуумметр 13ВТЗ-003, вентилятор 8 для охолодження камери і приладів генератора, узгоджуючий пристрій 5 для узгодження в резонанс коливального контуру генератора з коливальним контуром камери. Камера, генератор, узгоджуючий контур для зручності обслуговування, складання виконані окремими вузлами. У задній частині основи корпусу кріпляться панель розподільча 10, в яку входять 3 стабілізатора тиску і 3 манометра (для кисню, хладону 14 і азоту), змішувач 9 для змішування кисню і хладону 14; блок клапанів 1, регулятор температури РТ-049, 13.

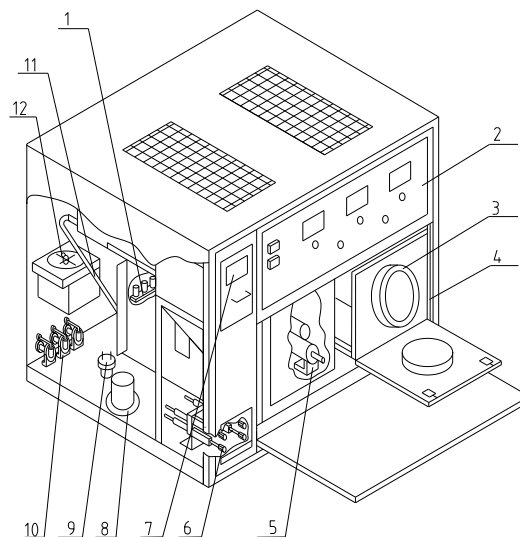


Рис.11. Блок обробки установки ПХТ з ЄЗР

1 – блок клапанів, 2 – джерело живлення плазмового реактора, 3 – плазмовий реактор, 4 – мікроперемикач блокування, 5 – пристрій підстройки електричного режиму реактора, 6 – натікач, 7 – вакуумметр, 8 – вентилятор. 9 – газовий змішувач, 10 – газорозподільча панель, 11 – кабель для електричного живлення реактора, 12 – пристрій для регулювання температури в реакторі.

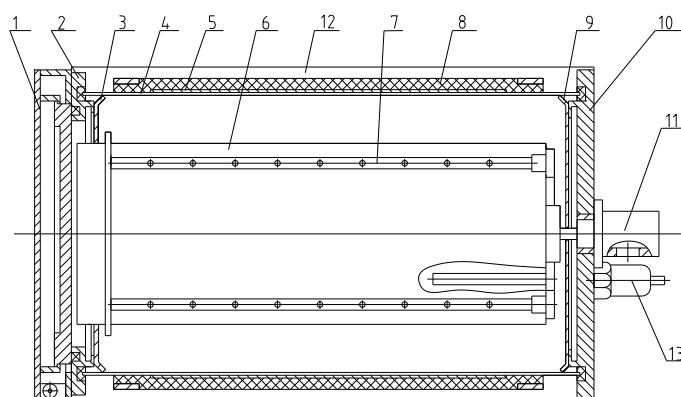


Рис. 12. Камера (плазмовий реактор з конденсаторним збудженням плазми).

1 – дверцята, 2 – фланець, 3 – екран, 4 – кварцова труба, 5 – планка, 6 – перфорований циліндр, 7 – колектор, 8 – обкладка конденсатора, 9 – екран, 10 – фланець, 11 – корпус, 12 – розпірка, 13 – термометр опору;

Камера 3 (рис. 12) установки ПХТ з ЄЗР складається з кварцової труби 4 $\varnothing$ 200мм, що спереду герметично ущільнюється дверцятами 1. Ззаду герметичне ущільнення створюється по торцю труби гумовою прокладкою у фланці 10. Камера приєднується за допомогою корпусу 11 через сильфонний вузол у вакуумній системі. Всередині камери розташований колектор газовий 7 і перфорований циліндр 6. Екрани 3 і 9 запобігають руйнівному впливу плазми на гумові прокладки. Високочастотна напруга від генератора підводиться до обкладок 8, які кріпляться до планок 5. Розпірки 12 здійснюють стягування і жорстке кріплення фланців 2 і 10 до торців кварцової труби. Розпірки служать одночасно і направляючими при установці камери в блок обробки. Термометр опору 13 видає сигнал при досягненні в камері заданої температури.

Плазмовий реактор з ємнісним збудженням плазми представляє з себе квадрупольну систему з ємнісним збудженням розряду з зовнішнім розташуванням електродів. На Рис. 13 представлено схематичне зображення цієї системи і розподіл електричного поля всередині неї. У ній силові лінії поля зосереджені головним чином поблизу внутрішньої поверхні стінок реактора завдяки специфічній формі електродів квадрупольного конденсатора. Оброблюваний металевий зразок не сильно заважає проходженню електричного струму в плазмі. Хімічно активні плазмові частинки (іони, збуджені молекули, радикала, фотони тощо) генеруються біля внутрішньої поверхні стінок реактора, звідки ці частинки дифундують у внутрішню область реактора до зразка, забезпечуючи більш-менш рівномірну обробку його поверхні.

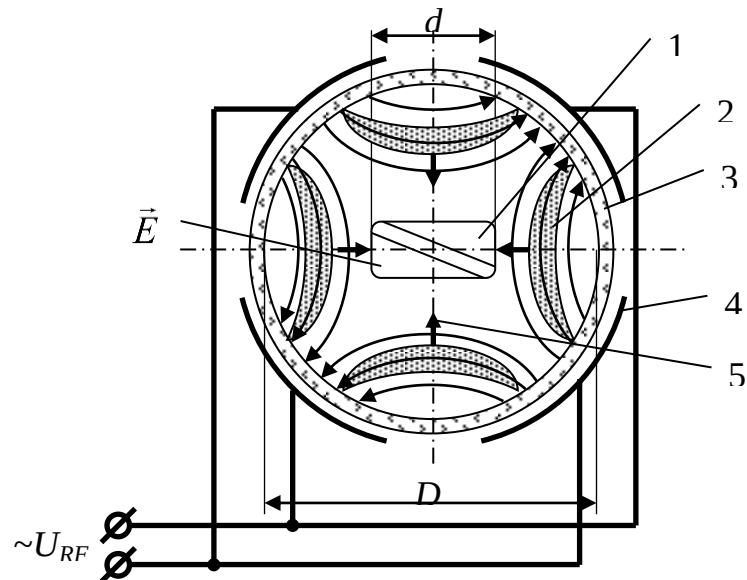


Рис. 13. Квадрупольні система з ємнісним збудженням розряду.

1 - оброблюваний зразок; 2 - область іонізації газу і генерації плазми; 3 - стінка реактора; 4 - електроди конденсатора (електроди для порушення ВЧ розряду); 5 - напрямок дифузії хімічно активних, нейтральних і заряджених частинок; D - внутрішній поперечний розмір реактора; d - максимальний поперечний розмір оброблюваного зразка; E - силові лінії електричного поля; U_{RF} - ВЧ напруга, що прикладається.

З метою забезпечення рівномірної обробки тестового зразка в ході плазмохімічного травлення та мінімізації спотворень в картину розподілу електричних полів всередині плазмового реактора, вона розміщується в центрі плазмового реактора на підставці, як показано на Рис. 14 і Рис. 15. Підставка виготовлена зі скла з метою зменшення спотворень, які вона може вносити в картину розподілу електричних і магнітних полів всередині плазмового реактора.

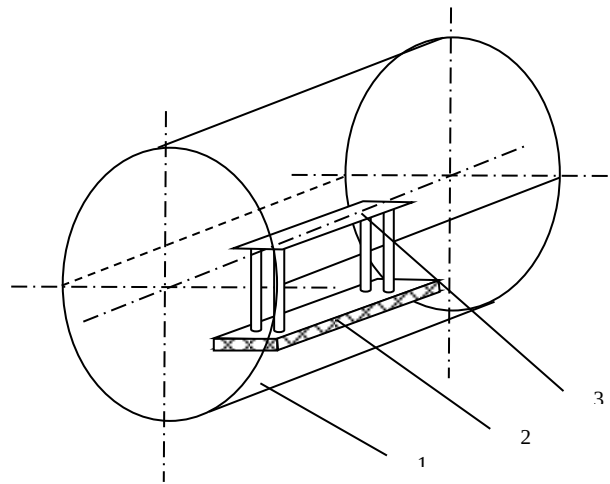


Рис. 14 Розміщення тестового зразка у плазмовому реакторі.
(1 - стінки плазмового реактора, 2 - скляна підставка для тестових зразків, 3 - тестовий зразок)

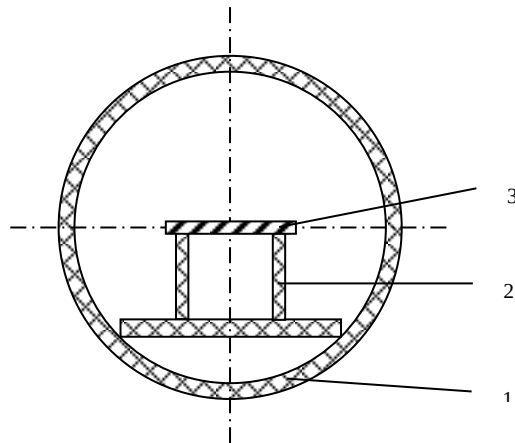


Рис. 15 Розміщення тестового зразка всередині плазмового реактора.
(1 - стінки плазмового реактора, 2 - скляна підставка для тестових зразків, 3 - тестовий зразок)

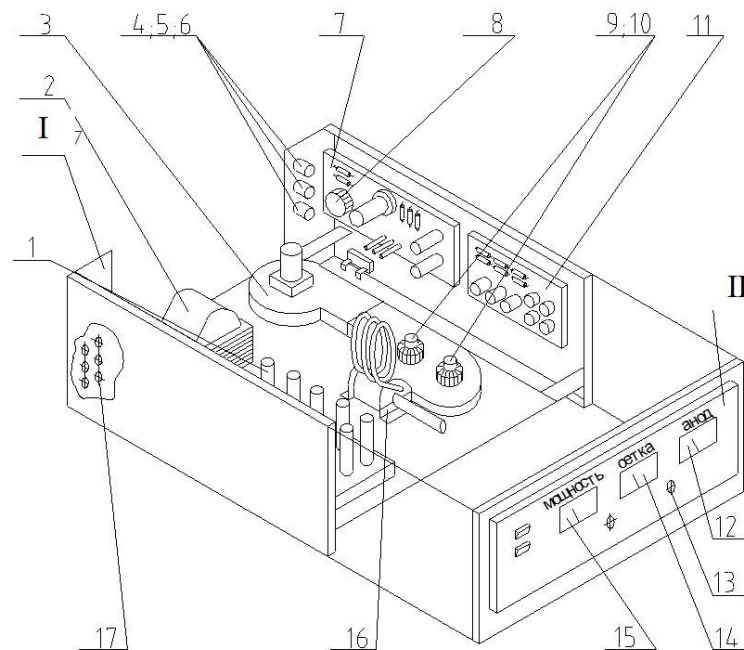


Рис. 16. Генератор ВЧ (джерело живлення плазмового реактора).

1 - плата помножувача випрямленої напруги мережі з виходом 1300 В, 2 – трансформатор живлення, 3, 11 - тетроди генераторні, 4, 5, 6 – запобіжники, 7 - плата низьковольтного джерела живлення, 8 – потенціометр, для стабілізації та регулювання, 9,10 – тетроди генераторні, 11 - плата генератора, що задає ВЧ, 12 - амперметр, що вимірює загальний анодний струм, 13 - змінний резистор для регулювання вхідної потужності, 14 - міліамперметр, що вимірює струм сітки, 15 – індикатор ВЧ потужності, 16 - змінний (підстроєчний) конденсатор, 17 – гнізда для вимірювання напруги та частоти.

Генератор 2 включає в себе всі необхідні елементи для самостійної роботи і налаштування (рис. 16), складається з каркаса I і передній панелі II.

На каркасі розташовані такі елементи:

- плата помножувача 1 випрямленої напруги з виходом 1300В.
- плата низьковольтного стабілізованого і регульованого потенціометром 8 джерела напруги 7.
- плата задаючого генератора високої частоти 11;
- вентилятор 3 для охолодження тетродів генераторних 9, 10 підсилювача потужності
- пристрій узгоджувачий 16;
- трансформатор живлення 2;
- запобіжники 4, 5, 6.

На передній панелі розташовані:

- амперметр 12, вимірює загальний анодний струм;
- міліамперметр 14, вимірює сітковий струм;

- індикатор 15 потужності, що надходить в навантаження;
- змінний резистор 13 для регулювання вихідної потужності.

На задній панелі генератора розташовані гнізда 17 для вимірювання тиску і частоти.

Опис схеми пневмовакуумної принципової установки ПХТ з ЄЗР (рис. 17).

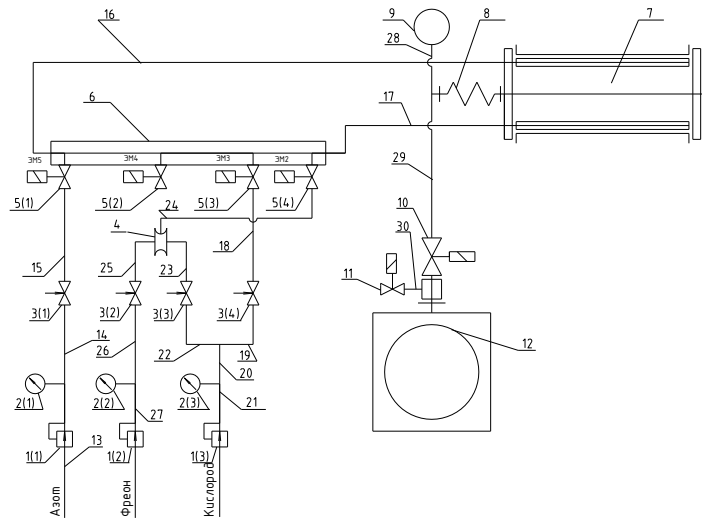


Рис. 17. Схема пневмовакуумна принципова.

1(1)...1(3) – стабілізатор тиску повітря СДІ-1,6;
 2(1)...2(3) – стрілочний манометр МТ-4; 3(1)...3(3) –
 натікач; 4 – змішувач; 5(1)...5(3) – клапан вакуумний; 6 –
 корпус; 7 – плазмовий реактор; 8 – вузол сильфонний;
 9 – перетворювач манометричний ПМТ-6-3; 10 –
 клапан магнітний; 11 – клапан вакуумний; 12 –
 механічний насос (2)НВР-5Д4 13-30 – трубопроводи та
 патрубки.

Подача газів в установку ПХТ з ЄЗР може здійснюватися як від індивідуальних джерел (балонів), так і з централізованої мережі тиском в межах від $30 \times 10^4 \div 49 \times 10^4$ Па ($0,3 \div 0,5$ кгс/см²).

Тиск газу, що надходить на вхід натікачів 3(1) ... 3(4) (азот, хладон, кисень), підтримується стабілізаторами тиску 1(1) ... 1(3) і контролюється за показаннями манометрів 2(1) ... 2(3).

Необхідна величина вакууму в камері в процесі обробки виробів підтримується натікачами 3(1) ... 3(4). За допомогою натікачів 3(2) і 3(3) також забезпечується необхідне процентне співвідношення кисню і фреону, що надходять в змішувач 4.

Тривалість і черговість напуску того чи іншого газу в камеру 7 здійснюється за допомогою клапанів вакуумних 5(1) ... 5(3), 5(4), розгерметизація камери відбувається за допомогою клапана 5(2), що включаються по команді від блоку керування (автоматично в заданому режимі або вручну при налаштуванні) і сполученими з камерою за допомогою корпусу 6.

Відкачування газів з камери здійснюється насосом 2НВР-5д 12 при включенні клапана 10. Насос сполучений з камерою через сильфонний вузол 8. Клапан 11 забезпечує подачу повітря в насос, клапан 10 при цьому закритий. Перетворювач ПМТ-6-3 9 служить для контролю величини вакууму.

Установка ПХТ з ІЗР

В установці ПХТ з ІЗР блок обробки (рис. 18) включає в себе камери 3, генератор ВЧ 2, вакуумметр ВТБ-14, систему вентиляції 5 для охолодження камер і приладів генератора.

Камери й генератор ВЧ виконані для зручності обслуговування і збірки окремими вузлами. Біля задньої панелі розміщуються: панель розподільча 6 з двома манометрами, двома регуляторами тиску і двома натікачами і блок клапанів 1.

Блок клапанів здійснює своєчасну подачу газів в камери, а ручками стабілізаторів і натікачів на розподільчій панелі регулюються тиск і величина потоку газів.

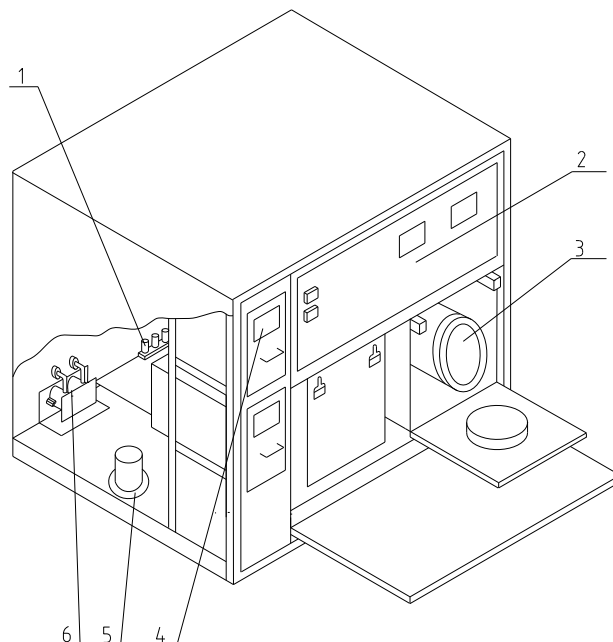


Рис. 18. Блок обробки установки ПХТ з ІЗР.

1 – блок клапанів, 2 – джерело живлення плазмового реактора (генератор ВЧ), 3 – плазмовий реактор (камери), 4 – вакуумметр, 5 – вентилятор, 6 – газорозподільча панель.

За допомогою блоку клапанів здійснюється своєчасна подача того чи іншого газу в камеру, а з допомогою натікачів 6 здійснюється необхідне підтримання тиску в камері в процесі обробки виробів, а також необхідне співвідношення кисню і хладону 14 при натіканні їх у суміші.

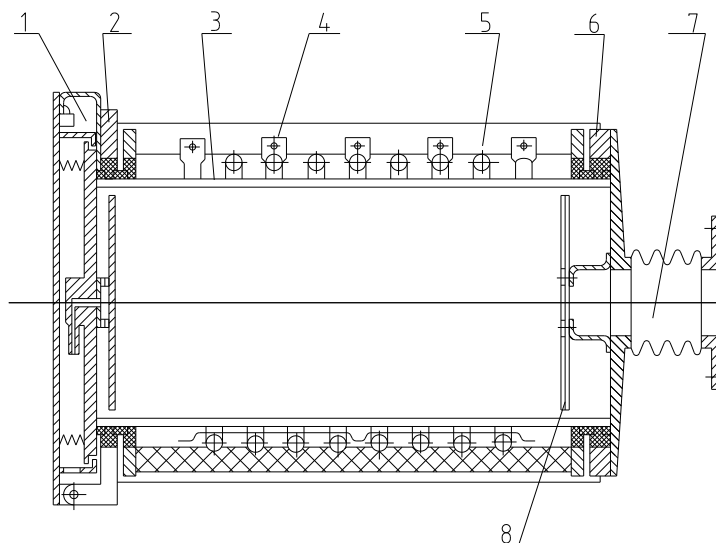


Рис. 13. Плазмовий реактор (камера) з індукційним збудженням

плазми;

1 – дверцята, 2, 6 – фланці, 3 – кварцова труба реактора, 4 – індуктор, 5 – розпорка, 7 – сільфонний вузол. 8 – екран.

Камера установки ПХТ з ІЗР (рис. 19) складається з кварцової труби 3, що спереду герметично ущільнюється дверцятами 1, а ззаду приєднаної через сільфонний вузол 7 до вакуумної системи.

Трубу оперізують витки індуктора ВЧ 4. Фланці 2 і 6 з розпірками 5 пов'язують всі складові частини в єдиний закінчений вузол. Контакт плазми з фланцем сільфонного вузла усунутий екраном В.

Таким чином, плазмовий реактор з індуктивним збудженням плазми являє собою систему з індуктивним збудженням розряду і зовнішнім розташуванням котушки індуктора. На рис. 20 представлено схематичне зображення системи з індуктивним збудженням розряду і зовнішнім розташуванням індуктора, а також розподіл електричних полів всередині неї. Силкові лінії поля зосереджені головним чином поблизу внутрішньої поверхні стінок реактора через скін-ефекту, де зразок не заважає проходженню електричного струму в плазмі. Тут же генеруються хімічно активні плазмові частинки (іони, збуджені молекули, радикали, фотони тощо). Ці частинки дифундують у внутрішню область реактора до зразка, забезпечуючи більш-менш рівномірну обробку його поверхні.

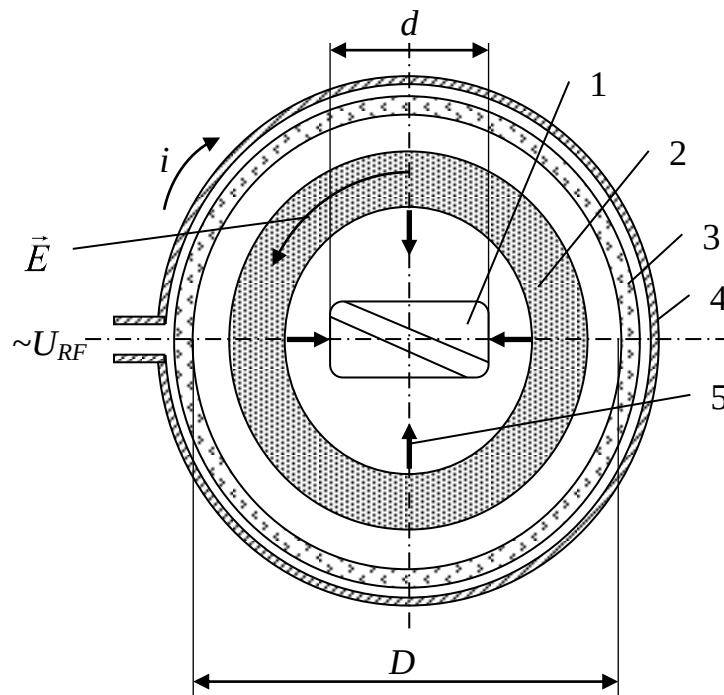


Рис. 20. Система з індуктивним збудженням розряду.

1 - оброблюваний зразок; 2 - область іонізації газу і генерації реакційної плазми; 3 - діелектрична стінка реактора; 4 - виток зовнішнього індуктора; 5 - напрямок дифузії плазмових частинок до зразка; D - внутрішній поперечний розмір реактора; d - максимальний поперечний розмір оброблюваного зразка; E - силкові лінії електричного поля; U_{RF} - ВЧ напруга, що прикладається; i - струм в індукторі.

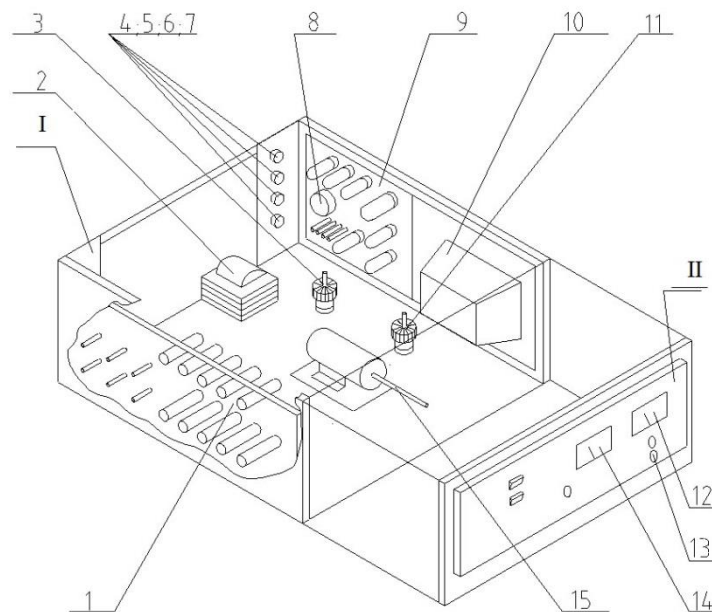


Рис. 21. Генератор ВЧ (джерело живлення плазмового реактора).

1 - плата помножувача випрямленої мережевої напруги з виходом 1300 В, 2 – трансформатор живлення, 3, 11 - тетроди генераторні, 4, 5, 6, 7 – запобіжники, 8 – потенціометр, 9 - плата низьковольтного джерела напруги, що стабілізується та регулюється, 10 - плата генератора, що задає ВЧ, 12 - амперметр, що вимірює загальний анодний струм, 13 - змінний резистор для регулювання вхідної потужності, 14 - міліамперметр, що вимірює струм сітки, 15 – змінний (підстроєчний) конденсатор.

Генератор включає в себе всі необхідні елементи для самостійної роботи і налаштування (рис. 21), складається з каркаса I і передньої панелі II.

На каркасі розташовані такі елементи:

- Плата помножувача 1 випрямленої мережевої напруги з виходом 1300В.
- Плата низьковольтного стабілізованого і регульованого потенціометром 8 джерела напруги 9.
- Плата задаючого генератора високої частоти 10
- тетроди генераторні 3, 11 підсилювача потужності
- Змінний (підстроєчний) конденсатор 15
- Трансформатор живлення 2
- Запобіжники 4, 5, 6, 7.

На передній панелі розташовані:

- Амперметр 12, вимірює загальний– анодний струм;
- Міліамперметр 14, вимірює– сітковий струм;
- Змінний резистор 13 для– регулювання вхідної потужності.

Опис схеми пневмо-вакуумної принципової.

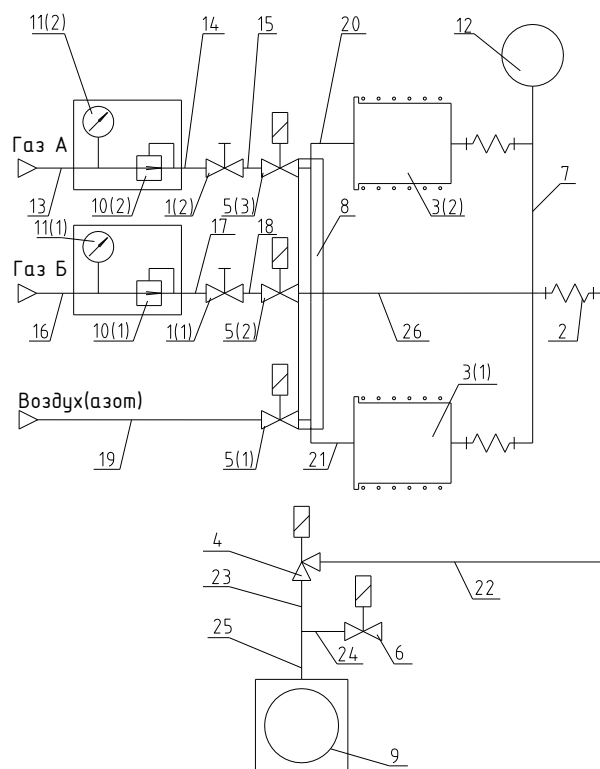


Рис.22. Схема пневмовакuumна принципова.

1(1)...1(2) – натікач; 2 – вузол сильфонний; 3(1)...3(2) – камера; 4 – клапан; 5(1)...5(3) – клапан вакуумний; 6 – клапан вакуумний; 7 – трійник; 8 – корпус; 9 – насос 2НВД-5Д ГОСТ14707-69; 10(1)...10(2) – стабілізатор тиску повітря СДВ-1,6 ГОСТ 14267-69; 11(1)...11(2) – манометр, що показує МТ-4 в корпусі без фланця та осьовим розташуванням штуцера, верхня межа вимірювання 1,6 кгс/см²; 12 – перетворювач манометричний теплоелектричний ПМТ-Б-3 13-26 – лінії зв'язку.

Подача газів в установку ПХТ з ІЗР може здійснюватися як від індивідуальних джерел (балонів), так і з централізованої мережі тиском в межах від $4,9 \times 10^4 \div 59 \times 10^4$ Па ($0,5 \div 6$ кгс/см²). Необхідний для процесу тиск задається по манометрам 11 (1), 11 (2) і підтримується стабілізаторами тиску 10 (1), 10 (2) (див рис. 22).

Величина напусків газів в камері 3 (1), 3 (2) регулюється натікачами 1 (1), 1 (2), а час і черговість напуску забезпечується клапанами електропневматичними 5 (1), 5 (2), 5 (3), що спрацьовують по команді з блоку керування (автоматично в заданому режимі або вручну - при налаштуванні) і сполученими з камерами за допомогою колектора 8 і трійника 7.

Необхідне для роботи розрідження створюється насосом вакуумним 9, що відсікається від камер клапаном 4 по команді з блоку керування. При виключенні насоса 9 спрацьовує клапан 6, відкриваючи доступ повітря в насос, клапан 4 в цей момент закритий.

Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися із змістом методичних вказівок. Рекомендується додатково вивчити науково-технічну літературу по плазмохімічному травленню і його застосуванню в технології.

До лабораторної роботи допускаються студенти, що заздалегідь вивчили матеріал по плазмохімічному травленню, пройшли співбесіду з викладачем по темі роботи і підготували заготовку звіту.

2. Провести контроль чистоти поверхні тестового зразка методами змочування та флюоресценції до проведення ПХТ.

Процедура контролю методом змочування до процесу ПХТ проводиться за 1 годину до обробки на установці ПХТ для того, що б зразок встиг висохнути до початку плазмохімічної обробки.

Контроль чистоти поверхні зразка в ультрафіолеті виконується, опромінюючи його за допомогою ультрафіолетової лампи SYLVANIA H44G6-100/MDSK, до обробки на установках ПХТ не більше ніж за 5 хвилин до початку процесу плазмохімічного травлення. Якість очищення поверхні тестового зразка визначається за ступенем люмінесцентного світіння на поверхні зразка.

3. Підготувати установку до проведення роботи. Для цього перевірити підключення до корпусу установки захисного заземлення і цілісність ізоляції мережевого шнура живлення, а також елементів на передній панелі. А також, провести зовнішній огляд блоків та виробів установки ПХТ з ЄЗР. Відкрити двері блоку обробки, дверцята камери. Переконалися у відсутності на камері тріщин, сколів. Закрити дверцята камери, двері блоку.

Лабораторну роботу виконувати тільки у присутності викладача або лаборанта після проведення інструктажу по техніці безпеки.

4. Встановіть ручки тумблерів у вихідне положення згідно рис. 10

5. Подайте напругу на установку ПХТ з ЄЗР (ІЗР) за допомогою автомата на панелі блоку керування, повинна засвітитися лампочка «Мережа».

6. Увімкніть вакуумний насос кнопкою «Пуск».

7. Включити вакуумметр кнопкою «Мережа» - повинна спалахнути лампочка «Мережа» на вакуумметри ВТ13-003 і дати йому прогрітись протягом 15 хв., Відповідно до технічного опису і інструкції з експлуатації вакуумметра ВТ13-003.

8. Увімкніть тумблер «Накал», повинна спалахнути лампочка «Накал» і прогріти установку ПХТ з ЄЗР (ІЗР) протягом 15 хв.

9. Включити витратомір (O_2) і витратомір (CF_4) і дати їм прогрітись протягом 15хв., Відповідно до технічного опису і інструкції з експлуатації витратомірів типу FMA.

10. Відкрити крани газових балонів з киснем, фреоном і азотом.

11. За допомогою газових редукторів, встановленими на газових балонах, виставити тиск у газових системах рівним 2 атм.

12. Відкрити кульові крани подачі газів «КИСЕНЬ», «ФРЕОН» і «АЗОТ» розташовані на газорозподільній системі.

13. Відкрийте дверцята блоку обробки і камери, поставте зразок встановлений в утримувач в камеру. Зачиніть двері камери і блоку.

14. Відкачати об'єм робочої камери, включивши тумблер «7», групи тумблерів «Ручне управління клапанами», до залишкового тиску не більше 20 Па.

15. Включити тумблер «4», клапана подачі суміші газів кисню і фреону, групи тумблерів «Ручне управління клапанами» і здійснити подачу суміші газів у робочу камеру.

16. Витратоміром (O_2) виставити швидкість потоку газу рівним 8 sccm.

17. Витратоміром (CF_4) виставити швидкість потоку фреону рівним 42 sccm.

18. Переконавшись, що тиск в робочій камері стабілізувався і дорівнює 65 Па (3,8 В за шкалою приладу Вакуумметри ВТ13-003).

19. Включити тумблер «Висока напруга».

20. Для установки ПХТ з ЄЗР ручкою підстроювання добротності контуру добитися максимальної потужності падаючої хвилі.

21. Провести плазмохімічне травлення протягом 15 хв.

22. Вимкнути тумблер «Висока напруга».

23. Вимкнути тумблер «4», клапана подачі суміші газів кисню і фреону, групи тумблерів «Ручне управління клапанами» і припинити подачу суміші газів у робочу камеру.

24. Припинити відкачування робочої камери, вимкнувши тумблер «7», групи тумблерів «Ручне управління клапанами».

25. Включити тумблер «6», клапана подачі азоту, групи тумблерів «Ручне управління клапанами» і здійснити подачу азоту в робочу камеру.

26. Коли тиск у камері досягне атмосферного тиску, припинити подачу азоту, вимкнувши тумблер «6», клапана подачі азоту, групи тумблерів «Ручне управління клапанами».

27. Відкрити дверцята блоку і камери, вийняти зразок встановлений в утримувач.

28. Провести контроль чистоти поверхні зразка методом флюоресценції та методом змочування.

Після обробки на установках ПХТ контроль методом змочування проводиться не пізніше ніж через 10 хв. після закінчення процесу плазмохімічного очищення, але після контролю чистоти поверхні тестового зразка методом люмінесценції. Контроль чистоти поверхні зразка в ультрафіолеті виконується, після обробки на установках ПХТ не пізніше ніж через 5 хв. після закінчення процесу плазмохімічного травлення.

29. Після завершення технологічного процесу витратоміром (O_2) і витратоміром (CF_4) перекрити потік газів згідно TO / I - FMA - OMEGA - Mass Flow Controller.

30. Перекрити кульові крани подачі газів «КИСЕНЬ», «ФРЕОН» і «АЗОТ», розташовані на газорозподільній системі.

31. Перекрити газові редуктори, встановлені на газових балонах.

32. Перекрити крани газових балонів з киснем, фреоном і азотом.

33. Вимкнути після закінчення роботи тумблер «Накал» - погасне лампочка «Накал».

34. Вимкнути вакуумметр кнопкою «Мережа» - погасне лампочка «Мережа» на вакуумметрі.

35. Зупинити механічний вакуумний насос кнопкою «Стоп» - погасне лампочка «Насос».

36. Зніміть напругу з установки ПХТ з ЄЗР автоматом «Мережа» - погасне лампочка «Мережа».

37. Порівняти результати контролю чистоти поверхні до та після проведення ПХТ. Одержані дані занести в звіт.

Вимоги до звіту

(Увага! Перед початком роботи кожен студент повинен мати протокол та бути теоретично підготовленим.)

Звіт повинен вміщувати:

1. Ціль роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Рисунки базових схем та структурної схеми лабораторної установки.
4. Виконані розрахунки.
5. Таблиці з результатами вимірювань контролю чистоти поверхні зразку виконані методом змочування та методом флюоресценції до та після процесу ПХТ..
6. Висновки по роботі.

(Увага! Табличні данні, розрахунки, рисунки графіків, осцилограм, висновки повинні бути представлені в рукописному вигляді, без використання комп'ютерної та розмножувальної техніки.)

Контрольні питання

1. Дайте визначення низькотемпературній плазмі.
2. Класифікація плазми
3. Наведіть приклади процесів які реалізуються за допомогою низькотемпературної газорозрядної плазми.
4. Класифікуйте процеси травлення з використанням низькотемпературної газорозрядної плазми.
5. Яким вимогам повинні відповідати гази, що використовуються в процесах плазмохімічного травлення.
6. Механізм іонно-плазмового травлення.
7. Від чого залежить коефіцієнт розпилення.
8. Класифікуйте установки іонно-плазмового травлення.
9. Які типи реакторів ви знаєте?
10. Контроль чистоти поверхні матеріалів методом флюоресценції.
11. Контроль чистоти поверхні матеріалів методом змочування.
12. Які фактори підвищують швидкість травлення в плазмі?
13. Як впливає на травлення для різних матеріалів одночасне бомбардування поверхні зарядженими і різними нейтральними частками?
14. Як впливає на швидкість травлення матеріал з якого виготовлено електроди?
15. За яких умов можливе забезпечення високої анізотропії?
16. Як впливає на швидкість травлення вольфраму і анізотропію збільшення концентрації кисню?
17. В якій плазмі спостерігається найкраще плазмохімічне травлення титану?
18. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення алюмінію?
19. Чому необхідний строгий контроль за домішкою парів води, а також заходи з очищення та пасивування поверхні після травлення алюмінію?
20. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення міді? В чому проявляється особливість плазмохімічного травлення міді?

14. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення металів III групи? За рахунок чого досягається анізотропія при плазмохімічному травленні цих металів?
15. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення хрому?
16. В чому особливість плазмохімічного травлення оксидів металів?
17. Як підвищити селективність травлення діоксиду кремнію до кремнію?
18. В якій плазмі здійснюється плазмохімічне травлення органічних матеріалів?
19. Як збільшити стійкість полімерів в кисневмісній плазмі?
20. Від чого залежить швидкість полімеризації?
21. Виходячи з яких міркувань повинен вибиратись склад плазми щоб досягти високої анізотропії плазмохімічного травлення органічних матеріалів?
22. Навіщо у випадках анізотропного плазмохімічного травлення в плазмі, що полімеризується, необхідно вводити операцію ізотропного травлення полімерної плівки?
23. Чому в більшості випадків травлення неорганічних матеріалів у плазмі, особливо у випадках анізотропного і селективного травлення, потрібні додаткові операції очищення поверхні та видалення дефектів структури?
24. Основні області застосування плазмохімічного травлення в технології.
25. Перечисліть відомі вам якісні методи контролю чистоти поверхні. Коротко опишіть процедуру контролю чистоти поверхні одним з цих методів.
26. З яких основних блоків складається установка плазмохімічного травлення?
27. Опишіть роботу плазмохімічного реактора з індуктивним збудженням розряду.
28. Опишіть роботу плазмохімічного реактора з ємкісним збудженням розряду.
29. Приведіть спрощену схему установки ПХТ та коротко опишіть її роботу.
30. Чому в плазмохімічній реактор по завершенню процесу травлення напускається азот, а не повітря?

Література

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – Москва : Энергоатомиздат, 1989.
2. Данилин Б.С., Киреев В.Ю., Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов, – М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. И., Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур, – Москва : Радио и связь, 1983.
4. Шехтер А.Б. Химические реакции в электрическом разряде. Л-М.: ОНТИ: Главная редакция общетехнической литературы, 1935;
5. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме. Под ред. Л.С.Полака, М.: Наука, 1965;
6. Очерки физики и химии плазмы. Под ред. Л.С.Полака. М.: Наука, 1971;
7. Полак Л.С., Овсянников А.А., Словецкий Д.И., Вурзель Ф.Б. Теоретическая и прикладная плазмохимия. М.: Наука, 1975;
8. Химия плазмы. Под ред. Б.М. Смирнова, вып. 1, 1975 - вып. 17, 1993. М.: Энергоатомиздат;

9. Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. Получение связанного азота в плазме. Киев: "Вища школа", 1976;
10. Плазмохимические реакции и процессы. Под ред. Л.С. Полака. М.: Наука, 1977;
11. Компаниец В.З., Овсянников А.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Химические реакции в турбулентных потоках газа и плазмы. М.: Наука, 1978;
12. Полак Л.С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение. М.: Наука, 1979;
13. Пархоменко В.Д., Полак Л.С., Сорока П.И. и др. Процессы и аппараты плазмохимической технологии. Киев: "Вища школа", 1979;
14. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980;
15. Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981;
16. Високов Г.П. Приложна Плазмохимия. Част 1,2. Държавно издателство "Техника", София, 1984;
17. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984; Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985, 216с;
18. Туманов Ю.Н. Низкотемпературная плазма и высокочастотные электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1989, 279 с;
19. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990, 200 с;
20. Химия плазмы. Под ред. Л.С.Полака и Ю.А.Лебедева Новосибирск: Наука, 1991;
21. Овсянников А.А., Энгельшт В.С., Лебедев Ю.А. и др. Диагностика низкотемпературной плазмы. Новосибирск,: Наука, 1994;