

В.Б. Лобода

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВАКУУМНОЇ ТЕХНІКИ

Частина друга

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів



Суми
Університетська книга
2012

УДК 621.52
ББК 31.77я73
Л 68

Рекомендовано до друку вченою радою Сумського державного педагогічного університету ім. А.С. Макаренка. Протокол № 5 від 25.10.2010

Рецензенти:

В.І. Мірошніченко, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи ІПФ НАН України;
О.С. Кузема, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри енергетики в АПК Сумського національного аграрного університету;
В.І. Перекрестов, доктор технічних наук, професор кафедри наноелектроніки Сумського державного університету

Гриф надано Міністерством освіти і науки України.
Лист №1/11-10733.1 від 23.11.2010 р.

Лобода В. Б.

Л 68 **Фізичні основи вакуумної техніки. Частина 2 : навчальний посібник / В. Б. Лобода. – Суми : Університетська книга, 2012. – 296 с.**

ISBN 978-966-680-629-4

Посібник (у двох частинах) охоплює практично всі основні розділи вакуумної техніки. Значне місце відведене аналізу фізичних явищ і процесів, на яких базується робота як класичних, так і сучасних вакуумних пристроїв. У другій частині розглядаються сучасні електрофізичні (гетерні, випарні, іонно-гетерні, магніторозрядні) вакуумні насоси, сучасні методи вимірювання вакууму, мас-спектрометричні методи вимірювання парціального тиску газів у складі залишкової атмосфери та методи течешукання. Описані також основні типи вакуумних систем.

Для студентів фізичних та фізико-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.52
ББК 31.77я73

ISBN 978-966-680-629-4

© Лобода В.Б., 2012
© ТОВ «ВТД «Університетська книга», 2012

ЗМІСТ

<i>Передмова</i>	6
Розділ 1 Фізико-хімічні методи одержання вакууму	7
1.1. Загальна характеристика фізико-хімічних методів одержання вакууму	7
1.2. Адсорбційно-дифузійні вакуумні насоси (насоси з нерозпилим гетером)	11
1.3. Особливості відкачування різних газів та їх сумішей	20
1.4. Сучасні конструкції адсорбційно-дифузійних вакуумних насосів	22
1.5. Особливості відкачування повітря адсорбційно-дифузійними насосами з титановим гетером	35
<i>Контрольні запитання</i>	38
Розділ 2 Випарні вакуумні насоси	39
2.1. Принципи роботи випарних вакуумних насосів	39
2.2. Випаровувачі титану	40
2.3. Сублімаційні титанові насоси	46
2.4. Гетерні насоси з плазмовими випаровувачами	59
<i>Контрольні запитання</i>	63
Розділ 3	64
Випарні іонно-гетерні насоси	64
3.1. Насоси серії ГІН	64
3.2. Насоси орбітронного типу	71
3.3. Конструктивні особливості та основні характеристики орбітронних насосів	75
<i>Контрольні запитання</i>	80
Розділ 4 Магнітні електророзрядні насоси	81
4.1. Механізм відкачування магніторозрядного насоса	81
4.2. Конструктивні особливості магніторозрядних насосів	88
4.3. Електричне живлення магніторозрядних насосів	98
4.4. Особливості експлуатації магніторозрядних насосів	101

4.5. Комбіновані іонно-гетерні насоси	103
4.6. Нетрадиційні електрофізичні насоси	108
<i>Контрольні запитання</i>	113
Розділ 5 Вимірювання повних низьких тисків газів	114
5.1. Класифікація вакуумметрів	114
5.2. Деформаційні вакуумметри	120
5.3. Рідинні (гідростатичні) вакуумметри	127
5.4. Компресійні манометри	129
5.5. Радіометричні та в'язкісні вакуумметри	134
5.6. Теплові вакуумметри	140
5.7. Іонізаційні вакуумметри	151
5.8. Радіоізотопні вакуумметри	175
5.9. Сучасний стан та тенденції розвитку вакуумметричного обладнання	179
<i>Контрольні запитання</i>	185
Розділ 6 Вимірювання парціальних тисків газів	187
6.1. Вступ	187
6.2. Основні принципи мас-спектрометричного аналізу	189
6.3. Особливості конструкцій мас-спектрометрів для аналізу складу залишкової атмосфери	217
6.4. Особливості розшифровки мас-спектрів залишкових газів	225
6.5. Типові мас-спектри залишкових газів	233
<i>Контрольні запитання</i>	238
Розділ 7 Течешукання	239
7.1. Герметичність вакуумної системи та її кількісна оцінка	239
7.2. Пошуки теч	244
<i>Контрольні запитання</i>	257
Розділ 8 Вакуумні системи та їх елементи	258
8.1. Основні елементи конструкцій сучасних вакуумних систем	258
8.2. Особливості конструювання вакуумних систем	271
<i>Контрольні запитання</i>	292
Список літератури	294

*Присвячую
моїм рідним –
мамі Олександрі Михайлівні,
дружині Валентині Олександрівні,
донькам Світлані та Марії*

ПЕРЕДМОВА

Друга частина посібника містить матеріал, який охоплює сучасні засоби й методи одержання вакууму (адсорбційно-дифузійні, випарні, випарні іонно-гетерні та магніторозрядні насоси), сучасні засоби й методи вимірювання повних низьких тисків газів (вакуумметрія), сучасні мас-спектрометричні методи визначення парціальних тисків та складу залишкових газів, а також методи пошуків теч вакуумних установок.

Останній розділ книги знайомить з елементами конструкцій сучасних високо- та надвисоковакуумних систем. Оскільки метою посібника в цілому є знайомство з основами сучасної вакуумної техніки майбутніх фахівців у галузі фізико-технічних наук, то інженерні розрахунки та детальне конструювання вакуумних систем не є предметом розгляду.

Як і в першій частині, усі наведені в посібнику визначення понять та термінологія, по можливості, відповідають ДСТУ 2758-94, а фізичні величини подані в одиницях системи СІ або ж в одиницях, які широко використовуються як у вітчизняній, так і в зарубіжній літературі з вакуумної техніки. Для більш глибокого засвоєння матеріалу до всіх розділів запропоновані контрольні запитання.

З огляду на те, що книга є першим україномовним навчальним посібником з фізичних основ вакуумної техніки, автор буде вдячний за всі зауваження та побажання, спрямовані на покращення змісту книги.

Автор

Фізико-хімічні методи одержання вакууму

1.1. Загальна характеристика фізико-хімічних методів одержання вакууму

Відкачна дія фізико-хімічних насосів полягає у фізико-хімічному зв'язуванні газів тонкою плівкою або товстим шаром гетерного матеріалу (робочого тіла насоса). *Гетер* (англ. *getter*) — речовина (метал) з великою поглинальною здатністю щодо активних (неінертних) газів (кисень, водень, азот та ін.). Відкачування відбувається в результаті хемосорбції цих газів як на поверхні гетера, так і в його об'ємі. У цьому плані фізико-хімічні насоси належать, як і криогенні та адсорбційні, до поглинальних.

Для активізації відкачування газів у таких насосах використовують впливи, що сприяють інтенсифікації газопоглинання, спрямовані як на сам гетерний матеріал, так і на газове середовище, яке його оточує. До найважливіших з них належать:

- пряме або непряме (резистивне) теплове нагрівання робочого тіла насоса для його активації, сублимації або випаровування (насоси з гетерами без розпилення, сублимаційні й випарні гетерні насоси);
- нагрівання, розпилення або випаровування робочого тіла електронними або іонними пучками (сублимаційні та випарні гетерні насоси, магніторозрядні насоси);
- ерозія поверхонь електродів у вакуумі при збудженні дугового розряду в газі (випарні дугові насоси);
- дисоціація, іонізація, спрямоване перенесення та імплантація газових молекул у плівку чи шар гетерного матеріалу в електричному розряді в газі (іонно-гетерні насоси, магніторозрядні насоси).

Отже, у сучасних фізико-хімічних вакуумних насосах з одного боку безпосередньо гетерний матеріал зазнає впливу різноманітних чинників (теплові, електронні, іонні потоки), у результаті чого відбувається його активація, випаровування, сублимація або розпилення, з другого — і саме газове середовище в насосі певним чином змінюється, у результаті чого відбуваються іонізація та імплантація газових молекул у робоче тіло (гетер) насоса, а також покращується їх адсорбція та хемосорбція. Усі ці явища в більшості насосів відбуваються під дією спеціально створених в них електричних та магнітних полів певних просторових конфігурацій та супроводжуються протіканням електричного струму через газове середовище в насосі. Тому такі насоси протягом останніх 20–30 років одержали назву *електрофізичних* (хоча їх можна було б назвати й електрохімічними).

Існує досить багато варіантів побудови фізико-хімічних насосів з використанням різних комбінацій перерахованих вище фізичних ефектів. Зважаючи на це, назви конкретних їх типів (різновидів) відображають головну особливість (або кілька особливостей), на яких базується робота насоса. Нині серійно виготовляються електрофізичні насоси таких типів:

- насоси з використанням гетерів без їх розпилення з термічною активацією матеріалу гетера шляхом пропускання електричного струму через металеву підкладку, на яку нанесено шар гетера, або з нагріванням гетерного матеріалу за допомогою теплового випромінювання окремого електронагрівника;
- випарні (сублимаційні) насоси з термічним випаровуванням гетерного матеріалу з твердої фази, яке здійснюється резистивним нагріванням випаровувача;
- випарні (сублимаційні) насоси з термічним випаровуванням гетерного матеріалу з твердої фази, яке здійснюється електронним пучком, супутньою іонізацією ним газових атомів та їх імплантацією в плівку гетера (орбітронні насоси);
- засоби відкачування з термічним випаровуванням гетерного матеріалу з рідкої фази, яке здійснюється сфокусованим в електричному і магнітному полях пучком електронів (такі випаровувачі є автономними і можуть вмонтовуватися безпосередньо у відкачувані об'єкти);
- випарні насоси з термічним випаровуванням, іонізацією і прискоренням атомів гетера, яке здійснюється збудженням дугового розряду змінного або постійного струму в парах гетерного матеріалу;

- насоси з іонним розпиленням гетерного матеріалу при збудженні газового розряду у схрещених електричних та магнітних полях (магнітні електророзрядні насоси, які часто називають магніторозрядними);
- комбіновані насоси, у конструкції яких в одному корпусі розташовані відкачні блоки різних типів (магніторозрядні і з термічним випаровуванням гетерного матеріалу тощо).

Цей перелік є далеко не повним і охоплює лише основні, найбільш поширені фізико-хімічні насоси. Необхідно зазначити, що через невеликий (близько 40 років) проміжок часу з моменту їх появи в літературі ще не склалася загальноприйнята термінологія їх класифікації. Більш широко з особливостями класифікації фізико-хімічних насосів можна познайомитися в літературі [9–11, 21, 23–27].

У цілому назва «електрофізичні насоси» стосується багатьох різновидів вакуумних насосів, у яких основним елементом відкачування газів є гетерний матеріал. Унаслідок цього такі насоси часто ще називають гетерними, до яких належать насоси з компактним гетером (гетером, що не розпилюється), насоси з гетером, що розпилюється, а також насоси, ефективність використання розпиленого гетера в яких підвищується внаслідок іонізації газових молекул і їх спрямованого руху до поверхні гетерного матеріалу (іонно-гетерні насоси).

У насосах, у яких гетерний матеріал розпилюється (сублімаційні та випарні гетерні насоси), основну роль у поглинанні газових молекул відіграє тонка плівка гетерного матеріалу, яка покриває або внутрішню поверхню корпусу насоса, або внутрішню поверхню стінок вакуумної камери. Хаотично рухаючись, молекули активних газів, зіштовхнувшись з такою поверхнею, хемосорбуються на ній. Плівка неперервно або періодично відновлюється внаслідок випаровування нової порції гетерного матеріалу і в такий спосіб зберігає свою сорбційну здатність. Цілком зрозуміло, що такі насоси непридатні для відкачування інертних газів, атоми яких утримуються плівкою гетера лише завдяки вандерваальсовим силам (фізична сорбція). Оскільки теплота сорбції таких атомів невелика ($DQ_{\phi} < 10$ кДж/моль, табл. 5.1, ФОВТ, ч. 1), то й утримання атомів інертних газів на поверхні гетера є короткочасним (формула (5.1), ФОВТ, ч. 1) і для кімнатних температур не перевищує 10^{-10} с (рис. 5.3, ФОВТ, ч. 1).

Цього принципового недоліку не мають випарні іонно-гетерні насоси, у яких за допомогою спеціальних конструктивних елементів здійснюється іонізація та прискорений спрямований рух іонів до

плівки гетерного матеріалу. Таким чином, в іонно-гетерних насосах з'являється ще один механізм відкачування газів, незалежний від їх хімічної природи, – імплантація прискорених газових іонів у гетерну плівку з подальшим їх „замуровуванням” свіжими шарами гетерного матеріалу.

Особливу групу іонно-гетерних насосів складають магнітні електророзрядні (магніторозрядні) насоси. У цих насосах задіяні три механізми відкачування газів – іонізація газових молекул; імплантація утворених газових іонів у поверхню гетерного матеріалу з подальшою їх хемосорбцією; розпилення частини матеріалу гетера з утворенням плівки, що також хемосорбує активні гази.

Здатність напилисти металевих плівок зв'язувати газові молекули відома вже більше ніж 100 років (досліди Фітцджеральда з плівками Mg, 1883 р.). У 1907 р. Содді виявив відкачні властивості парів і плівок лужних металів, аналогічні результати одержав Ленгмюр у 1915 р. для плівок W. У 1919 році був навіть запатентований метод покращення вакууму при розпиленні порошоків Zr та Ti. Але поява в 1913–1915 рр. дифузійних насосів, економних і простих у виготовленні, надійних і простих в експлуатації, надовго загальмувала розвиток гетерних насосів. До середини 50-х років минулого століття не було створено жодного промислового електрофізичного насоса, який би міг конкурувати з дифузійними насосами. Відродження інтересу до цих насосів і подальший швидкий прогрес у їхньому розвитку з другої половини минулого століття пов'язаний, у першу чергу, з потребами експериментальної техніки для ядерної фізики, фізики елементарних частинок та плазми, дослідження космосу.

Сучасні електрофізичні насоси широко використовуються для створення повністю безмасляного вакууму як у невеликих вакуумних установках (установки для одержання і дослідження тонких плівок та поверхонь металів, мас-спектрометри, електронні та атомні силові мікроскопи), так і у велетенських імітаторах космічного простору, прискорювачах елементарних частинок та установках керованого термоядерного синтезу.

Швидкість дії сучасних електрофізичних насосів становить величину від кількох л/с до сотень тисяч л/с, а граничний вакуум – краще за 10^{-10} Па.

У своїй переважній більшості електрофізичні насоси досить прості в конструктивному вирішенні (відсутність мікронних точностей виготовлення деталей) та експлуатації, вони безшумні, надійні, довговічні, не потребують неперервного форвакуумного відкачування.