

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

Е. В. Телеш, Я. А. Соловьев

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДУЛИ И УСТРОЙСТВА
ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности
1-39 02 02 «Проектирование и производство программно-управляемых
электронных средств»*

Минск БГУИР 2019

УДК 621.3.049.77(076.5)

ББК 32.844.1я73

Т31

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра конструирования и производства приборов
Белорусского национального технического университета
(протокол №5 от 18.12.2017);

профессор кафедры технологии металлов учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»
доктор физико-математических наук, профессор Н. К. Толочко

Телеш, Е. В.

Т31 Технологические модули и устройства программно-управляемого оборудования для производства изделий электроники. Лабораторный практикум : пособие / Е. В. Телеш, Я. А. Соловьев. – Минск : БГУИР, 2019. – 75 с. : ил.

ISBN 978-958-543-442-0.

Включает лабораторные работы по изучению различных преобразователей для измерения давления в вакуумных системах, современного оборудования для быстрого термического отжига, технологических модулей и устройств для нанесения тонких пленок в вакууме и ионного травления, торцевого холловского ускорителя для модификации поверхности полимеров.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний студентов по учебной дисциплине «Программно-управляемое технологическое оборудование», получения практических навыков при работе с измерительным и исследовательским оборудованием.

УДК 621.3.049.77(076.5)

ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-543-442-0

© Телеш Е. В., Соловьев Я. А., 2019
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ.....4

Лабораторная работа №2

УСТАНОВКА БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА МИГ-2С20

Лабораторная работа №3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ТРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ33

Лабораторная работа №4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДУЛИ И УСТРОЙСТВА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ.....48

Лабораторная работа №5

ТОРЦЕВОЙ ХОЛЛОВСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ.....63

Библиотека БГУИР

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Цель работы: ознакомление с устройством и конструкцией различных преобразователей для измерения низкого и среднего вакуума, освоение методики измерения вакуума с помощью вакуумметра ВИТ-2.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Область давлений, используемая в современной вакуумной технике, 10^5 – 10^{-12} Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне не может быть обеспечено одним прибором. На практике при измерении давления разреженных газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называют вакуумметрами. Они обычно состоят из двух частей: манометрического преобразователя и измерительной установки. По методу измерения вакуумметры подразделяются на абсолютные и относительные (рис. 1.1). Показания абсолютных приборов не зависят от рода газа и могут быть заранее рассчитаны. В приборах для относительных измерений используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Вакуумметры измеряют общее давление газов, присутствующих в вакуумной системе.

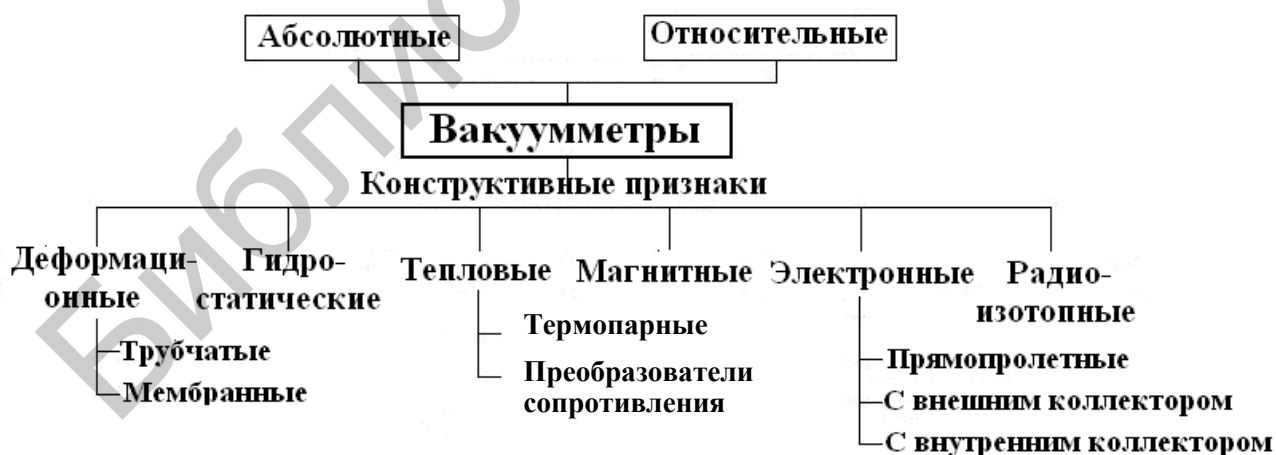


Рис. 1.1. Классификация вакуумметров для измерения общих давлений

На рис. 1.2 показаны диапазоны давлений, измеряемые тем или иным видом манометрического преобразователя.



Рис. 1.2. Диапазоны давлений, измеряемых различными манометрическими преобразователями

К деформационным преобразователям относятся трубчатые и мембранные преобразователи. Трубка Бурдона – простейший деформационный преобразователь в виде спиральной трубки, скручивающейся под действием атмосферного давления в случае откачки внутренней полости за счет разных радиусов кривизны, а следовательно, и площадей наружной и внутренней поверхности трубки. В основу мембранных преобразователей положено изменение величины прогиба мембраны под действием давления. Диапазон изменения мембранных преобразователей 10^5 – 10^{-1} Па, но т. к. линейность показаний сохраняется только при небольших деформациях мембраны, то один прибор может измерять давления в пределах 2–3 порядков [1].

Простейшими гидростатическими преобразователями являются жидкостные манометры с открытым или закрытым коленом. Манометры с открытым коленом удобны для измерения давлений, близких к атмосферному. Показания такого манометра зависят от атмосферного давления, в отличие от преобразователей с закрытым коленом.

Тепловые преобразователи

Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через разреженный газ от давления. Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити в окружающее пространство и к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока.

Уравнение теплового баланса в этом случае можно представить в виде

$$I_{\text{н}}^2 R = E_{\text{к}} + E_{\text{т}} + E_{\text{и}} + E_{\text{м}}, \quad (1.1)$$

где $I_{\text{н}}$ – ток нити;

R – сопротивление нити;

$E_{\text{к}}, E_{\text{т}}, E_{\text{и}}, E_{\text{м}}$ – потери теплоты за счет конвекции, теплопроводности газа, излучения нити и теплопроводности нити соответственно.

Конвективным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т. е. $E_{\text{к}} \approx 0$.

Потери теплоты за счет излучения можно выразить формулой

$$E_{\text{и}} = K_{\text{и}} (T_{\text{н}}^4 - T_{\text{б}}^4) S, \quad (1.2)$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент излучения материала нити;

$T_{\text{н}}$ и $T_{\text{б}}$ – температура нити и баллона соответственно;

S – площадь поверхности нити.

Тепловые потери нити за счет передачи теплоты по материалу нити и электродов, соединяющих нить с корпусом преобразователя, равны

$$E_{\text{м}} = K_{\text{т.н}} (T_{\text{н}} - T_{\text{б}}) \delta, \quad (1.3)$$

где $K_{\text{т.н}}$ – коэффициент теплопроводности материала нити;

δ – площадь сечения нити.

Потери теплоты через газовый промежуток рассчитываются по формуле

$$E_{\text{м}} = \lambda (T_{\text{н}} - T_{\text{б}}) A, \quad (1.4)$$

где $\lambda = -Ap/(p+B)$ – коэффициент теплопроводности газа, A и B – постоянные, зависящие от рода газа.

В области низкого вакуума $p \gg B$, а коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Давление $p \approx B$, соответствующее переходу от среднего в низкий вакуум, является верхним пределом измерения теплового преобразователя. В области высокого вакуума, когда $p \ll B$, коэффициент теплопроводности пропорционален давлению:

$$\lambda = K_{\text{т}} p. \quad (1.5)$$

С учетом приведенных выражений можно записать

$$P = \frac{I_{\text{н}}^2 \cdot R \cdot (E_{\text{и}} - E_{\text{н}})}{K_{\text{т}} \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{б}})}. \quad (1.6)$$

Из уравнения (1.6) видно, что давление является функцией двух переменных – тока накала нити I_H и температуры нити T_H . Существует два метода работы тепловых преобразователей: постоянной температуры нити и постоянного тока накала. Градуировочные кривые теплового преобразователя, показанные на рис. 1.3 для обоих методов работы, представляют собой в средней части параболу и гиперболу.

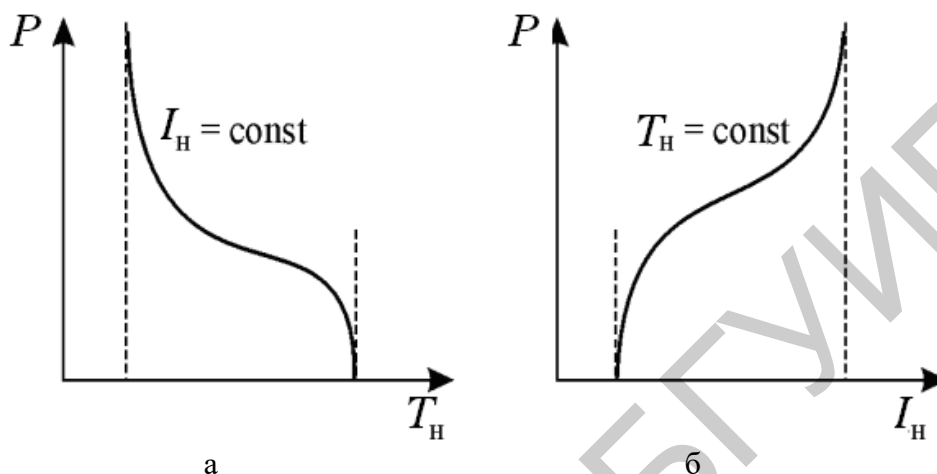


Рис. 1.3. Градуировочные кривые теплового преобразователя

Тепловые преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на термопарные и преобразователи сопротивления.

В термопарном преобразователе температура нити 1 измеряется термопарой 2 (рис. 1.4). Электроды расположены в стеклянном или металлическом баллоне 3, имеющем патрубок для подсоединения к вакуумной системе.

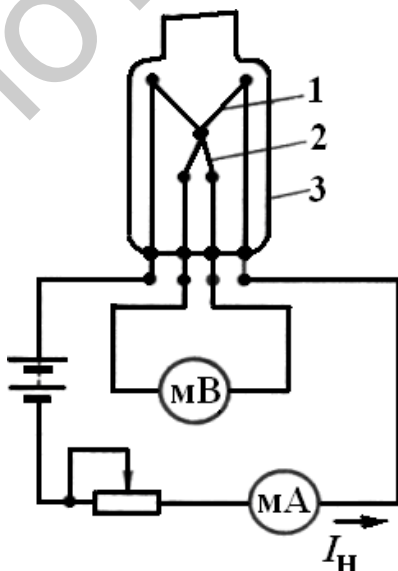


Рис. 1.4. Схема термопарного преобразователя

ТермоЭДС термопары зависит от температуры нити. Если в преобразователе ток накала поддерживается постоянным, то термоЭДС будет зависеть от давления окружающего остаточного газа, т. к. температура нагревателя зависит

от его теплопроводности. Следовательно, при понижении давления теплопроводность газа уменьшится, температура нагревателя увеличится, возрастет и термоЭДС термопары. По зависимости термоЭДС от давления определяется давление в системе (рис. 1.5).

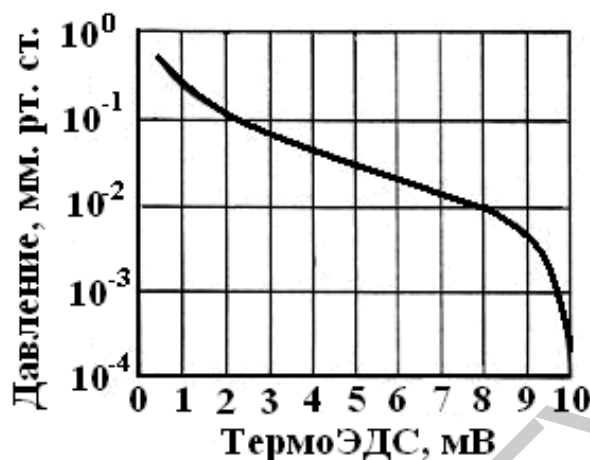


Рис. 1.5. Зависимость термоЭДС термопарного преобразователя от давления

Термопарные преобразователи конструктивно могут изготавливаться как в стеклянном (ПМТ-2), так и в металлическом (ПМТ-4М) баллонах (рис. 1.6).



а



б

Рис. 1.6. Термопарные преобразователи ПМТ-2 (а) и ПМТ-4М (б)

В преобразователе сопротивления для измерения давления используется температурная зависимость сопротивления материала нити. Он включается в плечо моста постоянного тока (рис. 1.7). Ток накала нити измеряется миллиамперметром, включенным в то же плечо моста, что и преобразователь, а температура нити – по току гальванометра в измерительной диагонали моста. Ток накала регулируется реостатом. Изменение давления газа в объеме преобразователя приводит к изменению температуры нити и, следовательно, ее сопротивлению. Это обстоятельство ведет к разбалансированию моста постоянного

тока, и ток через измерительную диагональ моста будет пропорционален давлению.

Преобразователь сопротивления типа ПМТ-6-3 конструктивно представляет собой корпус 2 в виде металлического тонкостенного цилиндра, который изготавливается из нержавеющей стали, нить накала 1 из платиновой проволоки диаметром 10 мкм и длиной 80 мм. Одним концом преобразователь присоединяется к вакуумному объему, на другом конце имеются прижимные (рис. 1.8, а) или стержневые (рис. 1.8, б) электрические контакты.

Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити.

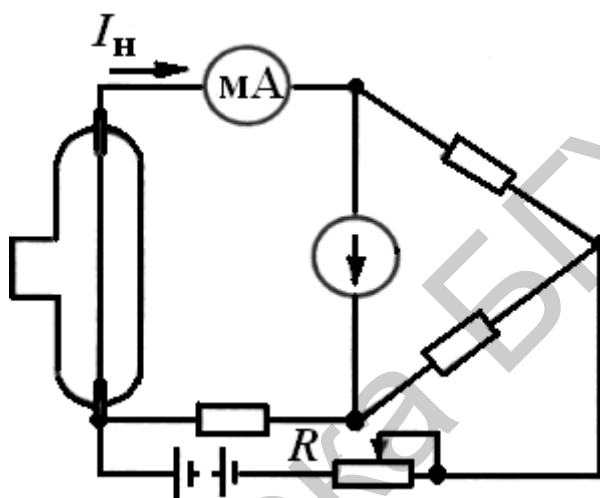


Рис. 1.7. Схема включения преобразователя сопротивления

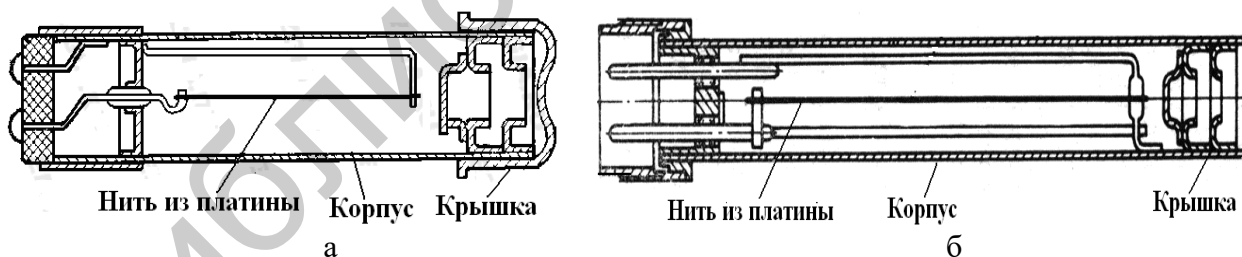


Рис. 1.8. Преобразователи сопротивления ПМТ-2 (а) и ПМТ-6-3 (б)

Преимуществом тепловых преобразователей является то, что они измеряют общее давление всех газов и паров, присутствующих в вакуумной системе, и обеспечивают непрерывность измерений давлений. Инерционность, связанная с тепловой инерцией нити, измеряется от нескольких секунд при низких давлениях до нескольких миллисекунд при высоких давлениях.

При использовании в программно-управляемом оборудовании тепловые преобразователи подключаются к измерительным устройствам с выводом информации на дисплей (рис. 1.9).



а б
Рис. 1.9. Термопарный преобразователь (а) и преобразователь сопротивления с измерительными устройствами (б)

Электронные преобразователи

Принцип действия электронных преобразователей основан на пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

Существуют три схемы электронных преобразователей – прямопролетный, с внешним коллектором и с внутренним коллектором. Прямопролетный преобразователь применяется только для измерения низкого вакуума.

Схема с внутренним коллектором аналогична обычной триоде. Коллектором ионов является сетка, на которую относительно катода подается отрицательное напряжение в несколько десятков вольт, а на анод – положительное напряжение 100–200 В. Электроны на пути от катода к аноду соударяются с молекулами остаточных газов, и образовавшиеся положительные ионы попадают на сетку, создавая ионный ток, измеряемый гальванометром. Недостаток такой схемы – низкая чувствительность при высоком вакууме.

В третьей схеме с внешним коллектором потенциалы сетки и анода меняются местами, и коллектором становится анод. Электроны, летящие от катода к сетке, совершают вокруг ее витков ряд колебаний, что увеличивает траекторию электронов и повышает степень ионизации молекул остаточных газов. Это делает схему более чувствительной.

Схематично конструкция электронного преобразователя с внешним коллектором приведена на рис. 1.10.

Ионизационный преобразователь с внешним коллектором ПМИ-2 действует следующим образом. Накаленный прямым пропусканием тока термокатод испускает электроны. Электроны ускоряются в пространстве между термокатодом и сеткой-анодом, на которую подается напряжение ~100 В. Большинство электронов пролетает сетку, попадая в замедляющее электрическое поле. Затем, приобретая скорость в направлении к аноду, электроны вновь пролетают

сетку-анод, тормозятся около катода и вновь направляются к аноду. Таким образом, электроны совершают колебательные движения около анода. На своем пути электроны производят ионизацию газа. Положительные ионы, образовавшиеся в пространстве между анодом и коллектором ионов, притягиваются последним. Коллектор находится под нулевым или небольшим отрицательным потенциалом (~ 50 В). При постоянном токе электронной эмиссии (50 мкА) количество образующихся ионов будет пропорциональным концентрации молекул газа в пространстве, т. е. давлению. Таким образом, ионный ток коллектора служит мерой давления газа.

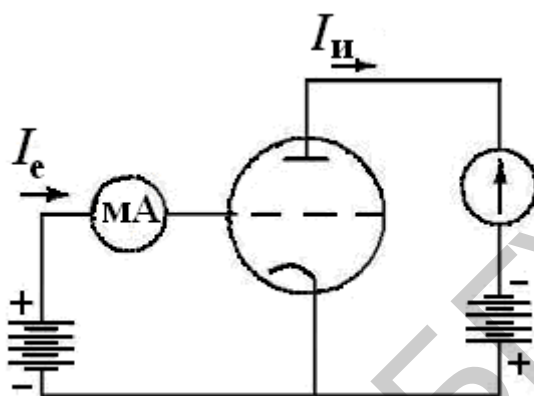


Рис. 1.10. Схема электронного преобразователя с внешним коллектором

Коллектор ионов 1 имеет форму цилиндра с электрическим вводом 5 в верхней части баллона 4 и отверстием 6 для подсоединения к вакуумной системе, сетка 2 – форму двойной спирали с двумя выводами для обезгаживания путем пропускания электрического тока (рис. 1.11).

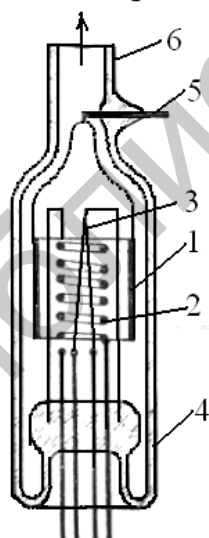


Рис. 1.11. Конструкция и внешний вид ионизационного преобразователя ПМИ-2

Термокотод 3 изготовлен из вольфрама. Часто катод изготавливают из оксидов редкоземельных металлов, чтобы он не сгорел при высоких давлениях. В этом случае верхний предел составляет 10 Па, по сравнению с 1 Па у вольфра-

мового. Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора, возникающими из-за эмиссии фотоэлектронов в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки и ультрафиолетового излучения накаливаемого катода. Для уменьшения фоновых токов предложен преобразователь с осевым коллектором, в котором катод и коллектор поменялись местами.

Для снижения фонового тока уменьшают поверхность коллектора. Отличие этого преобразователя от предыдущего состоит в том, что термокатод и коллектор поменялись местами: одна или две катодные нити (одна запасная) помещены вне сетки, коллектор же ионов в виде тонкой проволоки расположен по оси лампы внутри сетки. В этом случае поверхность коллектора становится очень малой и на нее попадает лишь незначительная часть рентгеновского излучения, посылаемого сеткой. В результате фоновый ток значительно снижается. На рис. 1.12 приведена конструкция датчика ПМИ-12 для измерения давления до 10^{-8} Па.

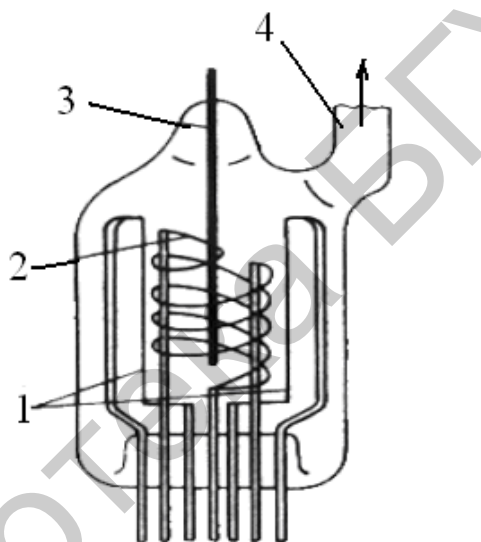


Рис. 1.12. Конструкция датчика ПМИ-12:

1 – термокатоды; 2 – сетка-анод; 3 – коллектор; 4 – откачной патрубок

Современные датчики высокого вакуума, как правило, совмещают преобразователи для высокого и низкого давления (рис. 1.13). Контроль вакуума обеспечивается преобразователем сопротивления и ионизационным преобразователем. Такой прибор работает в диапазоне 10^5 – $5 \cdot 10^{-7}$ Па. Корпус вакуумметра – нержавеющая сталь, что дополнительно защищает вакуумметр от внешних воздействий. В вакуумметре установлены две нити накаливания, при сгорании одной автоматически начинает работать вторая. В случае перегорания обеих нитей накаливания нужно заменить всего лишь «сенсорную» часть вакуумметра, которая составляет ~30 % от стоимости вакуумметра. Вакуумметр имеет съемную электронную часть и может выдержать прогрев до 180 °С. Управление вакуумметром и индикация уровня вакуума осуществляются с помощью контроллера вакуумметра. Контроллер и вакуумметр имеют интерфейс RS485, что позволяет легко интегрировать их в систему автоматизации [2].



Рис. 1.13. Внешний вид широкодиапазонного манометрического преобразователя

Магнитные преобразователи

Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях от давления. Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов.

Ячейка Пеннинга состоит из двух дисковых катодов 1 и цилиндрического анода 2 (рис. 1.14, а). Электроны движутся по спиральным траекториям между катодными пластинами (рис. 1.14, б).

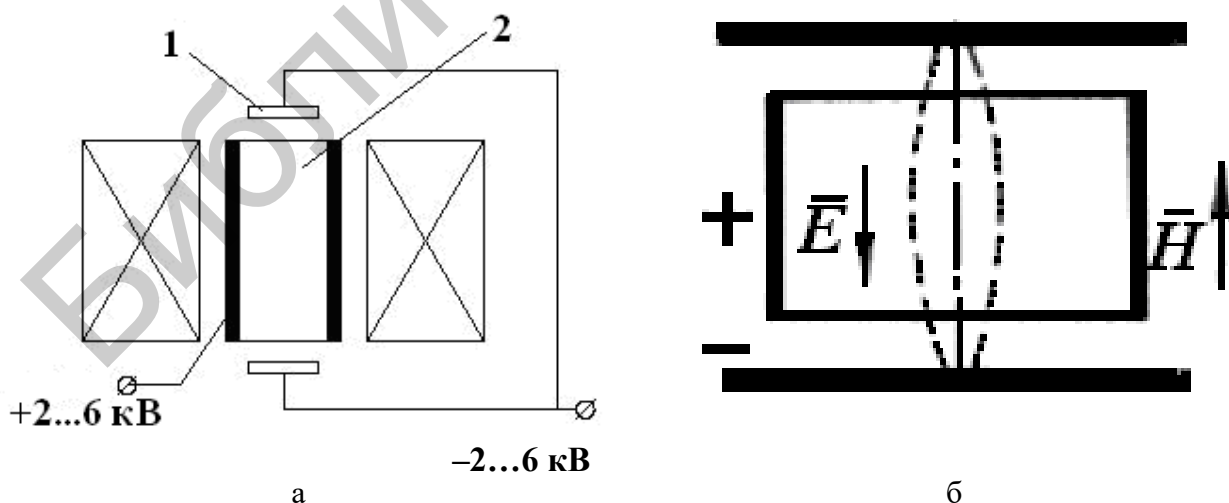


Рис. 1.14. Ячейка Пеннинга

В магнетронном преобразователе (рис. 1.15, а) в отличие от ячейки Пеннинга катоды соединены между собой центральным стержнем.

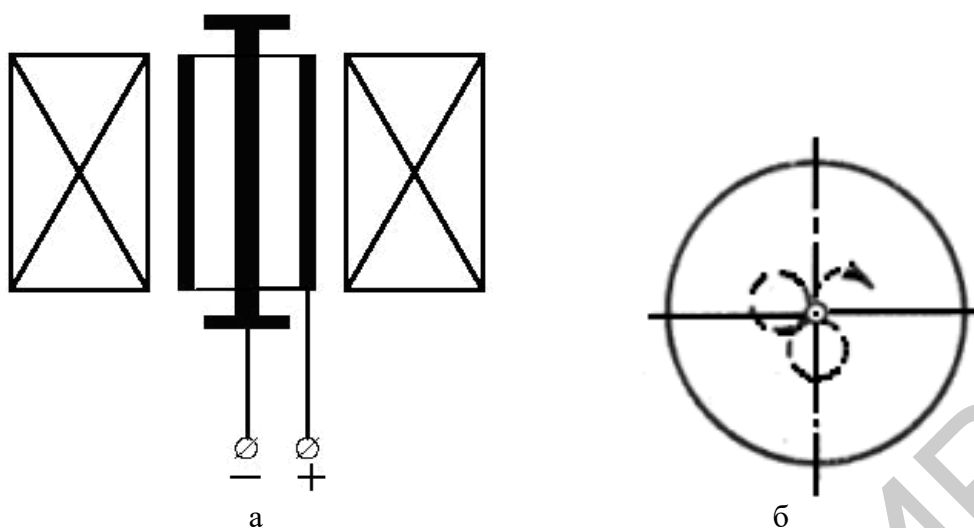


Рис. 1.15. Магнетронный преобразователь

В инверсно-магнетронном преобразователе (рис. 1.16, а) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом.

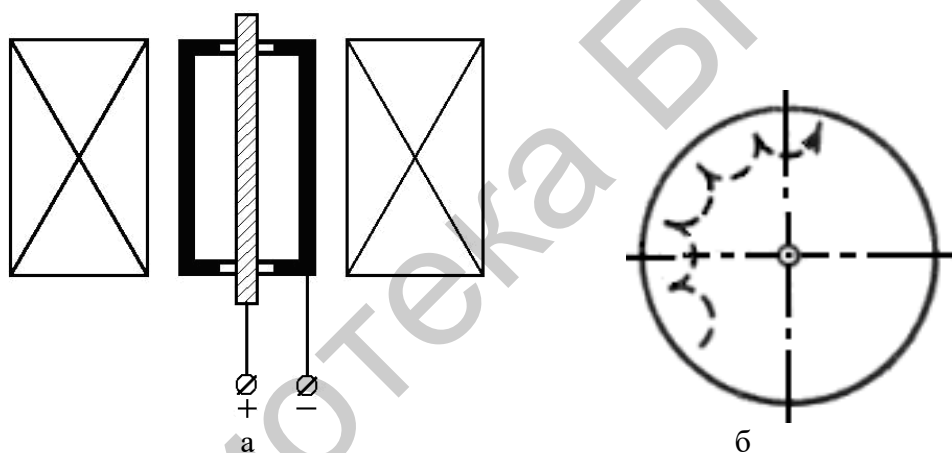


Рис. 1.16. Инверсно-магнетронный преобразователь

Все электроды находятся в постоянном магнитном поле, на анод подается положительное относительно катода напряжение 2–6 кВ, катод заземлен. Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, в магнетронном преобразователе движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоиде (рис. 1.15, б), а в инверсно-магнетронном преобразователе – по гипоциклоиде (рис. 1.16, б). При соударении с молекулой остаточного газа электрон теряет часть своей энергии на ее ионизацию и перемещается в радиальном направлении к аноду. Положительные ионы, образовавшиеся в результате столкновения с электронами, движутся к катоду. Так как их масса значительно больше массы электрона, то магнитное поле практически не влияет на траекторию движения ионов. Соударение положительных ионов с катодом приводит к появлению вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току. Инверсно-магнетронный преобразователь является более чувствительным, т. к. траектория движения электрона самая протяженная.

Таким образом, разрядный ток магнитного преобразователя равен

$$I_p = I_\phi + I_n + I_v, \quad (1.7)$$

где I_ϕ – фоновый ток, обусловленный автоэлектронной эмиссией;

I_n – ионный ток;

I_v – ток вторичной электронной эмиссии.

Ток автоэлектронной эмиссии не зависит от давления и им можно пренебречь. Тогда

$$I_n + I_v = ap^n, \quad (1.8)$$

где $a = 10^{-2} - 10^{-1}$ А/Па, $n = 1 - 1,4$.

Ток разряда магнитного преобразователя также можно выразить как

$$I_p = K_n p, \quad (1.9)$$

где K_n – чувствительность преобразователя (паспортная характеристика);

p – давление.

Верхний предел измерений 10–1000 Па ограничивается значением балластного сопротивления преобразователя, предотвращающего дуговой разряд. Нижняя граница измерений доходит до 10^{-11} Па [3].

Представителем инверсно-магнетронных типов преобразователей является преобразователь ПММ-32-1, схема и конструкция которого представлены на рис. 1.17.

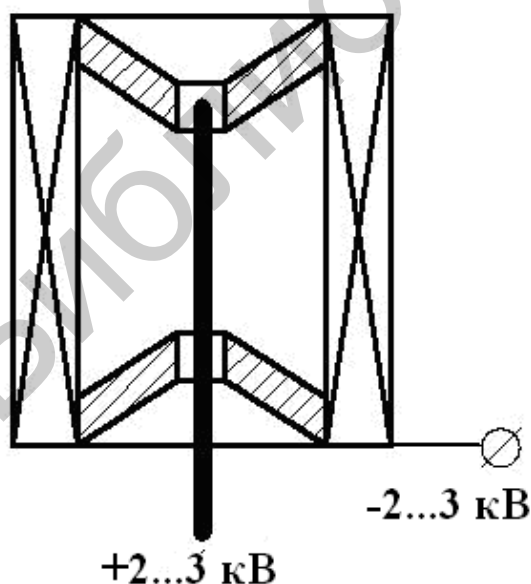


Рис. 1.17. Преобразователь ПММ-32-1

Широкодиапазонные вакуумные датчики Smartline фирмы Thyracont (датчик на основе преобразователя сопротивления и инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом) измеряют абсолютное давление от атмосферного давления до сверхвысокого вакуума (рис. 1.18). Они имеют интеллектуальное управление, переключение датчиков осуществляется с помощью встроенного высокопроизводительного микроконтроллера. Датчик имеет дискретный интерфейс RS485 и вспомогательный аналоговый выход 0–10 В. Цифровой выходной сигнал может передаваться на компьютер через порт USB. Величина вакуума отображается с помощью большого жидкокристаллического дисплея с фоновой подсветкой.

Преимуществом магнитных преобразователей перед электронными является более высокая надежность, т. к. нет накаливаемого катода. Недостатком являются нестабильности, связанные с колебаниями работы выхода при загрязнении катодов. Это особенно актуально в системах с масляной откачкой, когда пары масла при разрядке разлагаются на углеводороды и загрязняют твердыми продуктами распада электроды преобразователя. Во избежание этого явления необходимо применять самоочищающиеся магнитные преобразователи, работающие на переменном токе. В таких преобразователях анод с катодом периодически меняются местами и поверхности электродов очищаются ионной бомбардировкой.



Рис. 1.18. Широкодиапазонный вакуумный датчик фирмы Thyracont

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка УРМ 3.279.017 представляет собой вакуумную систему, оснащенную вакуумметром ВИТ-2 с преобразователями ПМТ-4М и ПМИ-2. Для проведения экспериментов стеклянные колбы преобразователей ПМТ-2 и ПМИ-2 должны быть запаянными.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Вакуумметр ВИТ-2.
2. Тепловые (ПМТ-2, ПМТ-4М), ионизационный (ПМИ-2) и магнитный (ПММ-32-1) преобразователи.
3. Цифровой таймер.
4. Отвертка.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определение рабочего тока термопарного преобразователя ПМТ-2.

Рабочий ток подогревателя определяется для каждого преобразователя ПМТ-2 в отдельности в связи с их конструктивными особенностями (различная длина нити подогревателя, ее сопротивление, диаметр преобразователя и т. д.). Для этого перед соединением преобразователя с вакуумной системой (до его вскрытия) проводится процесс измерения рабочего тока, исходя из условия, что давление в предварительно откачанном и запаянном преобразователе равно 10^{-4} мм рт.ст.

Измерение рабочего тока производится следующим образом:

- соединить преобразователь ПМТ-2 с соответствующим разъемом вакуумметра ВИТ-2;
- тумблер «Сеть» термопарной части вакуумметра перевести по направлению стрелки, при этом должна загореться сигнальная лампочка;
- установить переключатель «Измерение – Ток нагревателя» в положение «Измерение» и резистором «Ток нагревателя» установить стрелку измерительного прибора на конец шкалы;
- установить переключатель в положение «Ток нагревателя» и по нижней шкале измерительного прибора отсчитать ток в миллиамперах – рабочий ток испытуемого преобразователя.

2. Измерение давления термопарным преобразователем ПМТ-2:

- включить на вакуумной установке режим создания предварительного вакуума в камере установки;
- тумблер «Сеть 220 В» термопарной части вакуумметра ВИТ-2 установить по направлению стрелки, при этом должна загореться сигнальная лампа;
- установить по нижней шкале прибора (термопарной части) рабочий ток нагревателя, указанный на баллоне преобразователя;

– установить переключатель «Измерение – Ток нагревателя» в положение «Измерение» и произвести отсчет показаний по верхней шкале прибора (100 делений соответствует 10 мВ), измерения провести в течение 10 мин, показания отсчитывать через каждые 30 с;

– построить графическую зависимость показаний в милливольтгах от времени откачки камеры вакуумной установки.

– построить зависимость давления в камере вакуумной установки от времени откачки, для перевода показаний в милливольтгах в показания в миллиметрах ртутного столба использовать график, приведенный на рис. 1.5.

3. Измерение давления ионизационным преобразователем ПМИ-2:

– подсоединить запаянный преобразователь ПМИ-2 к разъему вакуумметра ВИТ-2);

– установить тумблеры «Сеть 220 В» и «Накал» в положение, указанное стрелкой «Включено», при этом должна загореться сигнальная лампочка;

– через 3–5 мин, когда появится отсчет на приборе, ручкой «Установка нуля» перевести стрелку прибора на нуль;

– установить переключатель «Род работы» в положение «Установка эмиссии» и резистором «Установка эмиссии» по стрелочному прибору установить ток эмиссии катода 0,5 мА (50 делений);

– установить переключатель «Род работы» в положение «Прогрев», прогреть сетку-анод ионизационного преобразователя необходимо в течение 2–5 мин;

– установить переключатель «Род работы» в положение «Обезгаживание», обезгаживание производить в течение 5–10 мин;

– переключатель «Множитель шкалы» установить в положение, при котором отсчет по шкале прибора, измеряющего ионный ток преобразователя, будет достаточно приемлем и соизмерим со шкалой прибора.

Величина ионного тока в микроамперах определяется как произведение отсчета по прибору и соответствующего множителя переключателя «Множитель шкалы». Например, отсчет по прибору 25 делений, а переключатель «Множитель шкалы» находится в положении « 10^{-3} ». Давление в системе, соответствующее данному ионному току ионизационного преобразователя, определяется по формуле

$$P = I_i / K, \quad (1.10)$$

где P – давление, Па;

I_i – ионный ток преобразователя, А;

K – чувствительность преобразователя, А/Па (приводится в паспорте преобразователя при токе эмиссии катода 0,5 мА).

Ионный ток при этом составляет $2,5 \cdot 10^{-2}$ мкА. Чувствительность преобразователя ПМИ-2 при токе эмиссии 0,5 мА равна $1 \cdot 10^{-3}$ А/мм рт. ст. Следовательно, давление в системе составит $2,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

4. Изучить конструкцию манометрического магнитного преобразователя ПММ-32-1, для чего необходимо, используя отвертку, разобрать его на составные части.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Описание конструкции и принципа действия преобразователей.
3. Результаты измерений, расчета и графические зависимости.
4. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные типы манометров и диапазоны измеряемых ими давлений вы знаете?
2. В чем заключается принцип работы термоманометрического преобразователя?
3. В чем заключается принцип работы теплового манометрического преобразователя на основе преобразователя сопротивления?
4. В чем заключается принцип работы ионизационного манометрического преобразователя?
5. Чем ограничены нижний и верхний пределы измерений ионизационного манометра?
6. Почему чувствительность ионизационного манометра зависит от рода газа?
7. Какие виды магнитных преобразователей вы знаете?

ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. – М. : Высш. шк., 2007. – 391 с.
2. Вакуумные системы технологического оборудования : учебник / Л. В. Кожитов [и др.]. – М. : Изд. дом «Руда и металлы», 2002. – 455 с.
3. Вакуумная техника : справочник / К. Е. Демихов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2009. – 509 с.

УСТАНОВКА БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА МИГ-2С

Цель работы: изучение конструкции и принципа действия установок для быстрого термического отжига, проведение процесса вжигания алюминиевых контактов на установке МИГ-2С.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В последние 30 лет в микроэлектронной промышленности все шире применяется инфракрасный (ИК) нагрев. Реализация ИК-нагрева для высокотемпературных процессов потребовала создания нового класса термического оборудования – отражательных ИК-печей, которые обычно представляют собой устройства с высокотемпературными (2773–6273 К) ИК-излучателями – кварцевыми галогенными лампами накаливания (ГЛН) или дуговыми и ксеноновыми лампами с большой мощностью. Преимущества ИК-нагрева:

- низкая инерционность;
- стабильность режима нагрева;
- высокая удельная мощность (до 400 кВт/м²);
- возможность локального нагрева (1–1,5 мм²);
- высокая селективность;
- высокая прецизионность;
- высокая чистота процесса;
- возможность автоматизации и контроля.

К настоящему моменту с применением ИК-нагрева реализованы следующие технологические процессы при производстве изделий электроники [1, 2]:

- диффузия фосфора, бора, мышьяка, сурьмы;
- термическое окисление кремния;
- осаждение диоксида и нитрида кремния;
- газофазная эпитаксия кремния, германия, арсенида галлия;
- осаждение поликремния;
- газофазное осаждение металлических слоев;
- импульсный отжиг ионно-легированных структур;
- сушка и задубливание фоторезиста;
- герметизация корпусов интегральных схем и полупроводниковых приборов и т. п.

Оборудование для быстрого термического отжига (БТО) является разновидностью ИК-нагрева и бурно развивается в течение последних десятилетий благодаря своим преимуществам:

- индивидуальная обработка пластин;
- широкий диапазон термического цикла;
- высокая скорость нагрева (30–300 К/с);
- широкий диапазон рабочих температур (473–2273 К);

- высокая чистота процесса – реактор с «холодной» стенкой;
- воспроизводимость и равномерность обработки;
- малые габариты, вес, потребляемая мощность, стоимость;
- высокая производительность.

Перечень термических процессов, используемых в технологическом маршруте изготовления интегральных схем (ИС), достаточно широк, среди наиболее важных из них необходимо отметить отжиг ионно-легированных слоев, формирование пленок силицидов металлов, отжиг омических контактов и металлизации, формирование пленок термического оксида кремния, нитрида и оксинитрида кремния, формирование мелких *p-n*-переходов, оплавление боросиликатного и фосфоросиликатного стекол для планаризации рельефа. Постимплантационный отжиг используется для того, чтобы легирующие примеси, внесенные каким-либо методом в подложку, равномерно распределились по объему. Тем самым получается равномерное распределение примеси и одновременно происходит восстановление кристаллической решетки.

Отжиг контактов после осаждения металлов производят для снятия внутренних механических напряжений, а также для стимулирования запланированной твердофазной реакции между металлом и полупроводником. Благодаря этому процессу происходит улучшение структуры металла и тем самым достигается большая однородность, осуществляется снятие внутренних напряжений.

Быстрое термическое окисление – это процесс роста пленки оксида на поверхности подложки. Основным отличием от обычного термического окисления является высокая скорость достижения необходимой температуры и небольшое время ее удержания. Этот процесс используется в тех случаях, когда длительное воздействие высоких температур приводит к недопустимому перераспределению примесей в объеме полупроводника.

Еще совсем недавно большинство термических операций выполнялось в печи, представляющей собой кварцевую трубу, вокруг которой был расположен нагреватель, а кассета с пластинами вдвигалась в зону нагрева и после выдержки в течение нескольких минут – десятков минут извлекалась наружу. В связи с уменьшением топологической нормы применение печного отжига стало невозможным, т. к. при длительных высокотемпературных обработках происходит сильное перераспределение легирующей примеси.

Быстрый термический отжиг – это процесс поштучной термообработки полупроводниковых пластин, протекающий в диапазоне длительностей отжига от единиц до десятков секунд, при этом максимальная температура отжига задается в диапазоне от 573 до 1673 К, а скорость нагрева в пределах от 50 до 300 К/с. Характерной особенностью БТО является использование для нагрева мощного источника некогерентного электромагнитного излучения – обычно галогенных ламп накаливания.

На рис. 2.1 приведена типовая температурно-временная характеристика установок БТО.

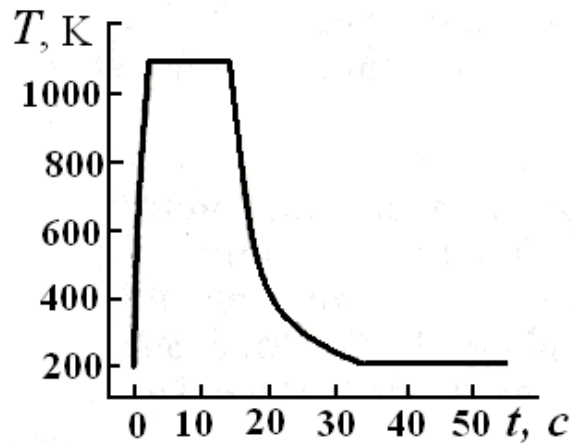


Рис. 2.1. Типовая температурно-временная характеристика установок БТО

Конструкции установок быстрого термического отжига

Конструкция большинства современных установок термической обработки имеет в своем составе нагревательный элемент на основе галогенных ламп накаливания. Подобные нагревательные элементы обладают низкой инерционностью и позволяют достичь скорости нагрева образца 40 К/с и более. Низкая инерционность таких источников излучения также позволяет реализовать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон для прецизионного управления процессом температурной обработки.

Известны две основные конструкции реактора установок быстрого отжига. В первом варианте конструкции используются длинные цилиндрические галогенные лампы, расположенные рядами с обеих сторон полупроводниковой пластины таким образом, чтобы обеспечивать максимальную однородность нагрева (рис. 2.2) [3].

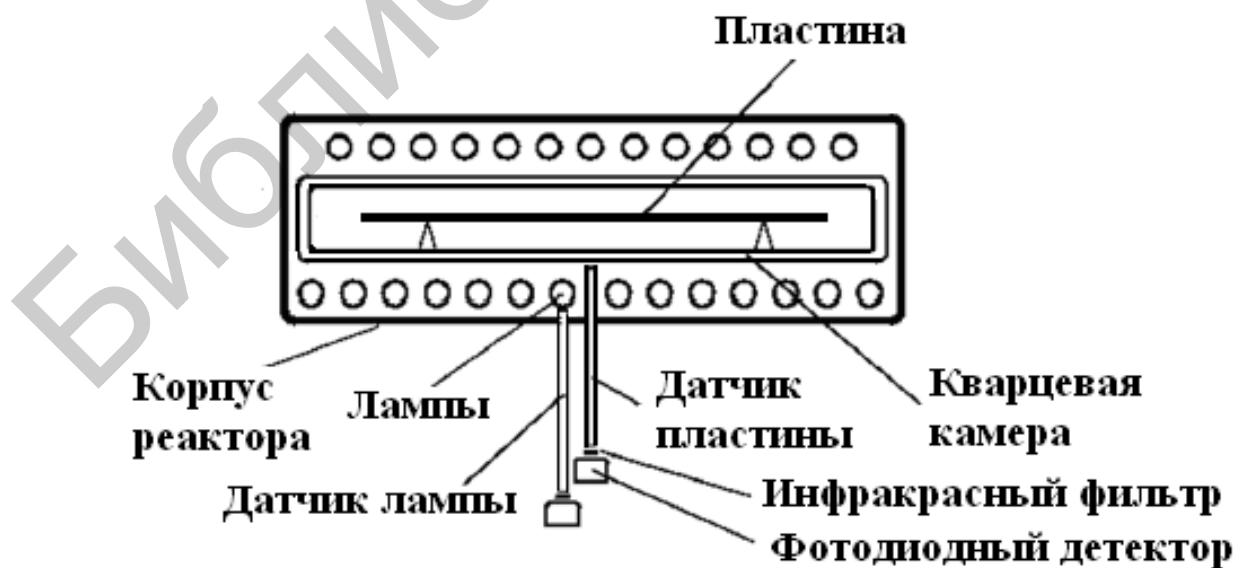


Рис. 2.2. Схема установки БТО с горизонтальным расположением галогенных ламп

Фокусировка излучения обычно производится с помощью отражателей (рефлекторов), имеющих поверхность второго рода (плоские, цилиндрические, эллиптические, параболические и т. д.). Отражательная способность зависит от материала рефлектора и его шероховатости. Поэтому поверхность рефлектора полируют и покрывают слоем металла, который хорошо отражает ИК-излучение (серебро, алюминий, медь, золото). В случае применения серебра и меди из-за их склонности к окислению поверхность этих металлов следует защищать слоем диэлектрика (обычно пленка SiO_2 толщиной 300–400 нм). Рефлектор также необходимо охлаждать, потому что в процессе термообработки при высоких температурах будет происходить его перегрев.

Однако подобный принцип организации установок имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является значительная неоднородность нагрева образцов, связанная с неоднородным поглощением оптического излучения по поверхности. Кроме того, принцип расположения ламп внутри нагревательного элемента также влияет на однородность нагрева образца за счет неоднородного распределения падающего на поверхность образца излучения. При температурах порядка 873–1073 К этот эффект проявляется в виде светлых и темных пятен на поверхности полупроводниковой пластины, соответствующих форме и расположению галогенных ламп накаливания в нагревательном элементе. Этот эффект возможно компенсировать, располагая несколько массивов ламп с разных сторон образца в различных геометрических конфигурациях, в том числе это могут быть два параллельных массива, образующих решетку [2].

Во втором случае лампы имеют меньшую длину и установлены вертикально с одной стороны от пластины (рис. 2.3). При этом лампы разбиты на группы, электропитание которых осуществляется от отдельных источников, а контроль температуры реализуется в нескольких зонах. Это позволяет более эффективно, чем в первом случае, управлять распределением температуры по площади пластины, добиваясь высокой однородности термообработки. В связи с этим в настоящее время установки второго типа нашли более широкое применение, чем установки первого типа.

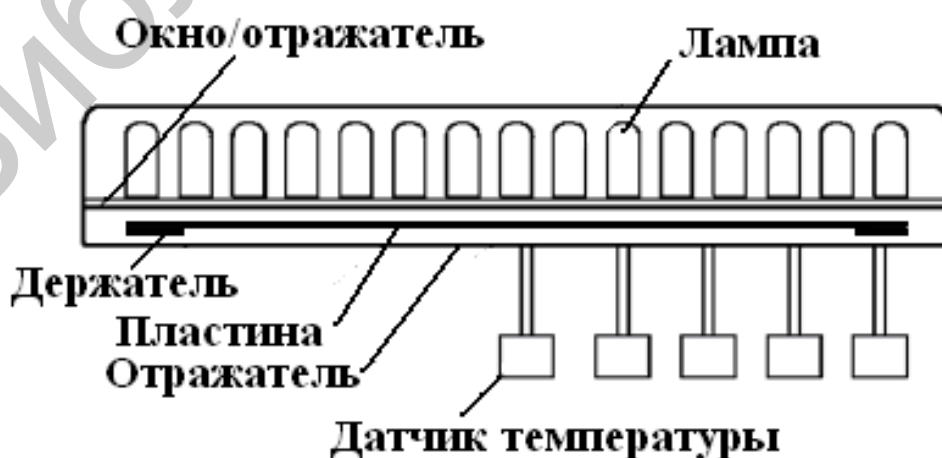


Рис. 2.3. Схема установки БТО с вертикальным расположением галогенных ламп

БТО проводится либо в атмосфере сверхчистых инертных газов, либо в вакууме. Поэтому реактор, в котором производится отжиг, выполняется герметично, а установка БТО имеет сложную газовую систему. Держатель пластины в реакторе выполнен таким образом, чтобы минимизировать теплоотвод и обеспечить однородный нагрев пластины. Подложки могут располагаться на тонких металлических нитях или на заостренных кварцевых штырях.

Наиболее перспективной является охлаждаемая камера для установок БТО (рис. 2.4). В ней блок излучателей из галогенных ламп накаливания (ГЛН) отделен от водоохлаждаемой камеры перегородкой из кварцевого стекла, что исключает загрязнение поверхности ГЛН. Обработываемая подложка располагается на острых кварцевых штырях.

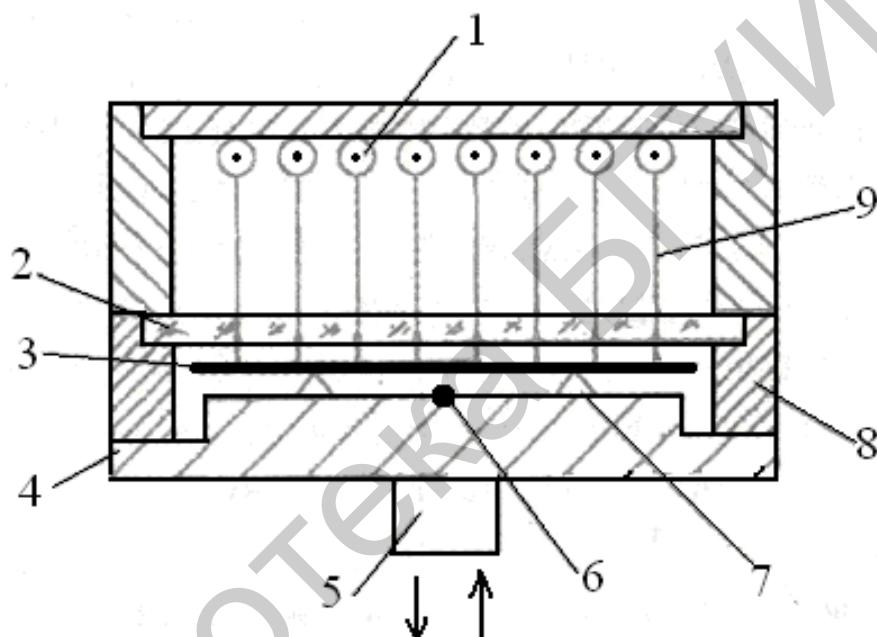


Рис. 2.4. Охлаждаемая камера установки БТО:

1 – ГЛН; 2 – кварцевое окно; 3 – полупроводниковая подложка; 4 – водоохлаждаемое основание; 5 – механизм загрузки; 6 – ИК-термометр; 7 – опорные кварцевые штыри; 8 – водоохлаждаемая камера; 9 – ИК-излучение

Основными параметрами процесса БТО являются:

- время отжига (t , с)
- время нагрева до максимальной температуры (t_1 , с);
- скорость нагрева до максимальной температуры (dT/dt , К/с);
- время выдержки при максимальной температуре (t_{\max} , с);
- максимальная температура (T_{\max} , К);
- скорость охлаждения (dT/dt , К/с);
- однородность распределения температуры по поверхности пластины;
- плотность мощности падающего излучения (W , Вт/см²).

Для быстрого отжига используются два режима нагрева пластины. Первый режим характеризуется постоянной величиной плотности мощности пада-

ющего излучения W в течение всего времени отжига и прост с точки зрения его реализации. Значение T_{\max} определяется только величиной плотности мощности падающего излучения (рис. 2.5). В результате величина t_1 и скорость нагрева до максимальной температуры изменяются при вариации величины T_{\max} , что не всегда удобно с технологической точки зрения.

Второй режим нагрева более сложен при его аппаратной реализации, однако дает большие технологические возможности, что обусловило его широкое применение. Метод характеризуется тем, что независимо задается как скорость нагрева до максимальной температуры, так и сама максимальная температура. В этом случае управление величиной W в каждый момент времени осуществляется компьютером по сигналу обратной связи с системы термопар или пирометра. Охлаждение пластин происходит самопроизвольно при выключении источника нагрева за счет излучения и передачи тепла рабочему газу. Последний механизм охлаждения позволяет в некоторых пределах регулировать его скорость за счет правильного выбора типа охлаждающего газа (теплопроводности газа), а также изменения скорости продувки газа через реактор.

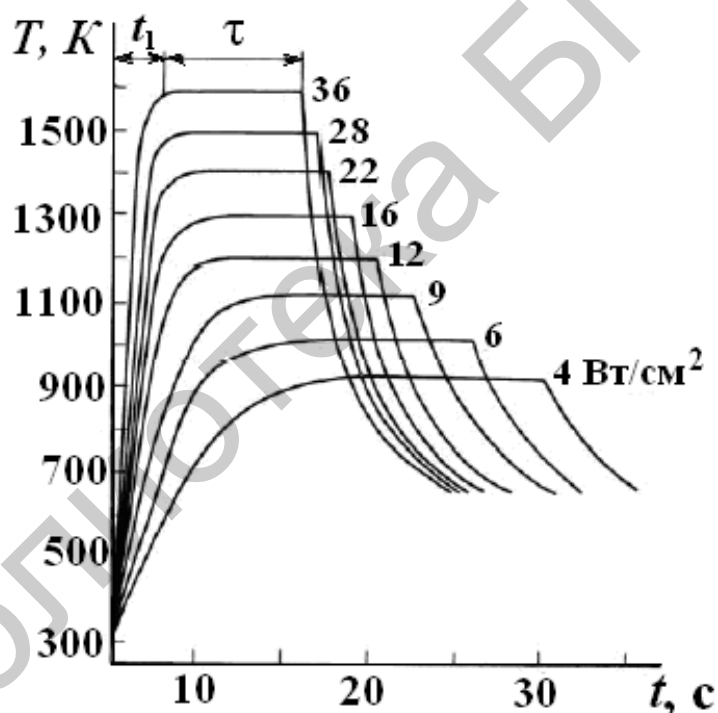


Рис. 2.5. Температурно-временные характеристики при разных значениях плотности мощности падающего излучения

Рассмотрим конструкции и технические характеристики современных программно-управляемых установок для БТО.

На рис. 2.6 приведен внешний вид установки БТО RTP 100, а в табл. 2.1 — ее эксплуатационные характеристики. Она предназначена для термообработки полупроводниковых подложек диаметром 100 мм.



Рис. 2.6. Печь быстрого термического отжига RTP 100

Таблица 2.1

Технические характеристики установки RTP 100

Максимальный размер подложки	Диаметр 100 мм (4 дюйма), рабочая область 100×100 мм
Материал реактора	Кварцевое стекло (водоохлаждаемая камера)
Высота реактора	10 мм
Система загрузки подложек	Поддон из кварцевого стекла. Держатель из пирографита или графита, покрытого SiC
Уровень вакуума	До 10^{-3} Па
Максимальная температура	До +1473 К
Тип нагревателя	ИК-лампы (общая мощность 18 кВт)
Зоны нагрева	Верхняя и нижняя (программируемые)
Скорость нагрева	До 150 К/с
Скорость охлаждения	От +1473 до +673 К: 200 К/мин. От +673 до +373 К: 30 К /мин. Подложка охлаждается азотом
Температурный контроллер	Встроенный
Используемые газы	Азот, кислород, форминг-газ
Электропитание	3×32 А, 380 В, 3 фазы
Размер установки (Ш×Д×В)	505×504×420 мм (настольное размещение)
Вес	55 кг

Установка БТО Jipelec JetClip разработана для процессов в производстве подложек диаметром до 200 мм (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Установка БТО Jipelec JetClip

Охлаждаемая водой, полностью герметичная камера из нержавеющей стали с настроенными вакуумными и газовыми системами обеспечивает высокочистую окружающую среду для большого диапазона температур. Многоламповый кварцевый нагреватель контролируется и управляется с помощью источника питания, оснащенного входом от цифрового пирометра, что обеспечивает оптимальный контроль над температурой в рабочей области и повторяемость результатов процесса обработки. Температурный диапазон – от комнатной до 1473 К, скорость нагрева – от 1 до 400 К/с.

В качестве опций система может быть оснащена автоматическим загрузчиком и загрузочным шлюзом. Типичный процесс отжига протекает полностью в автоматическом режиме и выглядит следующим образом. Подложка из загрузочной кассеты с помощью робота-загрузчика перемещается в шлюзовую камеру, из которой откачивается или вытесняется инертным газом воздух. Затем подложка передается в реактор, где располагается на специальном держателе. Реактор продувается газом, после чего выставляется рабочий расход процессного газа и производится нагрев подложки по предварительно выбранной программе. После этого подложка в течение некоторого времени охлаждается в реакторе, а затем через шлюзовую камеру передается в приемную кассету, а процесс полностью повторяется со следующей подложкой [4].

Описание лабораторной установки МИГ-2С

Установка импульсной термической обработки ИК-излучением МИГ-2С предназначена для индивидуальной термообработки полупроводниковых подложек при изготовлении различных изделий электронной техники. Внешний вид установки представлен на рис. 2.8.

Установка состоит из технологического блока и блока питания и управления, электрически связанных между собой. Технологический блок состоит из водоохлаждаемых плоских отражателей (рис. 2.9). На нижнем отражателе закреплены галогенные лампы. Блок снабжен устройством загрузки обрабатываемых изделий со смонтированной на нем термопарой хромель-алюмель. Для подачи рабочего газа в камеру имеется штуцер «ГАЗ» на задней панели блока. Система охлаждения снабжена реле водяного давления, которое не позволяет включить установку без подачи воды.

Для формирования теплового поля применена схема с отдельным электропитанием трех групп галогенных ламп накаливания от трех фаз переменного тока. Питание ламп осуществляется тиристорным регулятором мощности. Мощность источника нагрева автоматически устанавливается при помощи пропорционально-интегрально-дифференциальной схемы регулирования.



Рис. 2.8. Внешний вид установки МИГ-2С

Длительность процесса задается с помощью счетчика времени (таймера). Начало длительности процесса отсчитывается с момента нажатия кнопки «ПУСК».

Блок питания и управления содержит непосредственно блок питания, состоящий из магнитного пускателя и трех пар тиристоров Т15-100-7, расположенных на радиаторах, и кассеты с платами милливольтметра, стабилизаторов напряжения, компаратора, таймера и регулятора мощности.

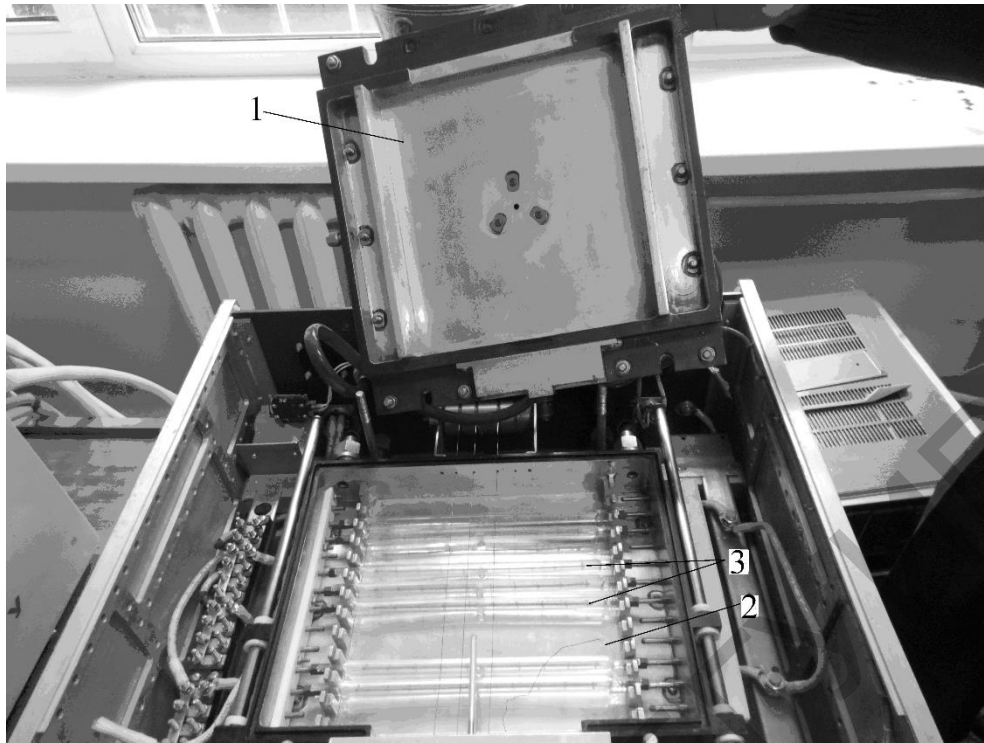


Рис. 2.9. Конструкция охлаждаемой камеры установки МИГ-2С:
1 – верхний рефлектор; 2 – нижний рефлектор; 3 – ГЛН

Структурная схема установки МИГ-2С представлена на рис. 2.10.

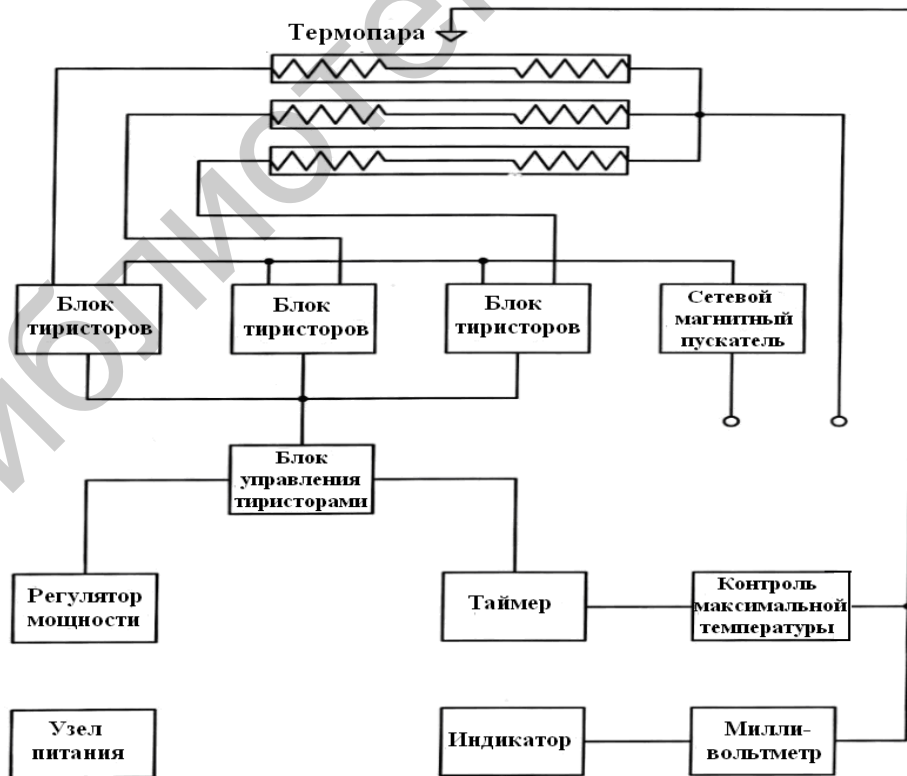


Рис. 2.10. Структурная схема установки МИГ-2С

Технические характеристики установки МИГ-2С

Установка предназначена для эксплуатации в отапливаемых помещениях при температуре окружающей среды от +5 до +30 °С и относительной влажности 98 %.

Максимальный размер обрабатываемых подложек 125×125 мм в поле равномерного нагрева.

Напряжение сети 380/220 В ± 10 % частотой 50 ± 0,5 Гц.

Максимальная потребляемая мощность 6 кВт.

Регулируемый рабочий интервал температур до 570 °С.

Точность поддержания температуры ±15 °С.

Рабочий временной интервал 1–99 с.

Нагревательный элемент – галогенные лампы КГ 220–2000.

Трехфазная регулировка подаваемой мощности – 9 ступеней.

Рабочая атмосфера в камере отжига – воздух, аргон, азот и другие неагрессивные газы.

Контроль температуры осуществляется с помощью хромель-алюмелевой термопары, расположенной непосредственно в камере нагрева и соединенной с милливольтметром.

Габаритные размеры установки: длина 480 мм; ширина 480 мм; высота 450 мм.

В данной работе необходимо провести процесс вжигания алюминиевых контактов, нанесенных на кремниевую подложку. Технологический процесс формирования омического контакта состоит из двух основных этапов – нанесение контактной металлизации и ее дальнейшая термическая обработка. Полученный после термической обработки контакт должен иметь как можно более высокую электропроводность и теплопроводность, вносить как можно меньшие механические напряжения, иметь хорошую адгезию к поверхности эпитаксиальной структуры, низкую шероховатость, быть технологичным и воспроизводимым.

Термическая обработка контактной металлизации после ее физического осаждения определяет такие ключевые параметры контакта, как морфология, омическое сопротивление. Важнейшими технологическими параметрами процесса термической обработки являются температура процесса, однородность и скорость нагрева образца. Допустимая неоднородность нагрева при этом не должна превышать 5–7 % на диаметре образца 100 мм. Относительно низкая температура плавления алюминия диктует необходимость в высоких скоростях нагрева образца для исключения влияния расплавленного алюминия на структуру контакта во избежание его деградации.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед включением установки необходимо внимательно изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации установки МИГ-2С.

2. Изучить стенд «ИК-нагрев в технологии РЭА».
3. С помощью зондового устройства и цифрового вольтметра измерить сопротивление между соседними алюминиевыми контактами на образце из кремния.
4. С помощью микроскопа МИИ-4 изучить морфологию поверхности контакта.
5. Поместить образец на держатель установки МИГ-2С.
6. Провести процесс вжигания контактов в течение 99 с.
7. В процессе отжига фиксировать показания термопары через каждые 10 с. После выключения нагрева фиксировать показания термопары через каждые 20 с.
8. Извлечь образец из камеры, поместить на держатель другой образец и провести его термообработку в течение 60 с. Зафиксировать максимальное значение термопары.
9. Извлечь образец из камеры.
10. Измерить сопротивление между соседними алюминиевыми контактами на двух отожженных образцах.
11. Изучить морфологию поверхности образцов.
12. Построить график зависимости температуры образца от времени нагрева и охлаждения, используя данные табл. 2.2.
13. Сделать соответствующие выводы по полученным экспериментальным данным.

Таблица 2.2

Градуировка термопары хромель-алюмель

$T, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,20	14,71	15,13	15,55	15,97
400	16,39	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,02
500	20,65	21,08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,62	24,06	24,48
600	24,90	25,32	25,75	26,18	26,60	27,03	27,44	27,87	28,29	28,72
700	29,13	29,55	29,97	30,39	30,81	31,22	31,64	32,06	32,47	32,88
800	33,29	33,69	34,10	34,51	34,92	35,33	35,73	36,14	36,53	36,93
900	37,36	37,76	38,16	38,56	38,96	39,35	39,75	40,14	40,53	40,92
1000	41,31	41,70	42,08	42,47	42,86	43,24	43,62	44,00	44,38	44,76

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения по теме лабораторной работы.

3. Результаты экспериментальных исследований.
4. График зависимости температуры от времени нагрева и охлаждения.
5. Выводы по результатам проведенных экспериментов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы преимущества ИК-нагрева и области его применения в технологии микроэлектроники?
2. Каковы преимущества БТО и области его применения?
3. Какие основные конструкционные типы установок БТО вы знаете? Кратко охарактеризуйте их.
4. Каковы основные конструктивные элементы установок БТО?
5. Какие виды рефлекторов ИК-излучения вы знаете?
6. Из каких конструктивных элементов состоит охлаждаемая камера БТО?
7. Какие блоки входят в установку МИГ-2С ?
8. Как происходит регулирование температуры в установке МИГ-2С?
9. Каковы особенности современных программно-управляемых установок БТО?

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Минск : БГУ, 2004. – 532 с.
2. Ланин, В. Л. Инфракрасный нагрев в технологии пайки поверхностного монтажа / В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №3. – С. 38–42.
3. Зворыкин, Д. Б. Отражательные печи инфракрасного нагрева / Д. Б. Зворыкин. – М. : Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Пилипенко, В. А. Физические основы быстрой термообработки. Температурные поля и конструктивные особенности оборудования / В. А. Пилипенко. – Минск : БГУ, 2000. – 136 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ТРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ

Цель работы: изучение состава и принципа действия установок для ионно-плазменного травления, изучение конструкции автономных ионных источников, проведение процесса ионного травления металлических покрытий с использованием технологического модуля на основе ионного источника с анодным слоем.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Получение элементов с субмикронными размерами требует селективного удаления отдельных участков будущей микросхемы с помощью процесса травления. Широко используемое жидкостное химическое травление обладает высокой селективностью и скоростью, однако наличие подтравливания не позволяет получить требуемое разрешение. Для технологических процессов изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) наиболее перспективными являются методы сухого травления, которые подразделяются на ионное травление (ИТ), плазмохимическое травление (ПХТ) и ионно-химическое травление (ИХТ). На рис. 3.1 приведена классификация процессов ионно-плазменного травления [1].



Рис. 3.1. Классификация процессов ионно-плазменного травления

При ИТ для удаления материала используется кинетическая энергия ионов инертных газов, т. е. процесс физического распыления. ИТ подразделяется на ионно-плазменное травление, при котором образцы помещаются на отрицательный электрод разрядного устройства и подвергаются бомбардировке

ионами, вытягиваемыми из плазмы, и ионно-лучевое травление, в котором образцы являются мишенью, бомбардируемой ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника (АИИ).

В ИХТ используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами или молекулами материала.

При ПХТ для удаления материала используется энергия химических реакций между ионами и радикалами активного газа и атомами (или молекулами) обрабатываемого вещества с образованием летучих стабильных соединений. В зависимости от среды, в которую помещаются образцы, ПХТ подразделяется:

– на плазменное травление: образцы помещаются в плазму химически активных газов;

– радикальное травление: образцы помещаются в вакуумную камеру, отделенную от химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами или электрическими или магнитными полями, а травление осуществляется незаряженными химически активными частицами (свободными атомами и радикалами), поступившими из плазмы.

Наибольший интерес представляет плазмохимическое травление, т. к. оно обладает селективностью, равномерностью и скоростью, сравнимыми с жидкостным химическим травлением, но оно не требует очистки поверхностей после обработки, позволяет одновременно травить подложки и удалять фоторезистивные маски, а также может использоваться для любых материалов.

Системы ионно-плазменного травления по способу возбуждения и поддержания плазмы подразделяются на системы с самостоятельными разрядами ВЧ- и СВЧ-тока и системы с искусственным поддержанием разряда с помощью термоэлектронной эмиссии, ВЧ, СВЧ электромагнитных полей.

Ионно-плазменные системы травления можно разделить по числу электрода на двухэлектродные (диодные), трехэлектродные (триодные), а также безэлектродные, в которых генерация плазмы осуществляется электромагнитными полями высокой и сверхвысокой частоты.

Системы с автономными ионными источниками могут быть как с фокусировкой, так и без фокусировки ионного пучка, как с компенсацией, так и без компенсации объемного заряда ионного пучка.

Диодные ВЧ-системы

Диодная ВЧ-система содержит два электрода: заземленный анод и мишень, на которую подается ВЧ-напряжение от генератора и помещаются обрабатываемые образцы (рис. 3.2).

В такой системе возможность травления любых материалов сочетается с простой конструкцией и большой площадью мишени (до 1200 см²), на которой обеспечивается равномерная ионная бомбардировка. Давление в рабочей камере поддерживается 1,33·10⁻¹–13,3 Па. Максимальная ВЧ-мощность составляет 0,8–2,0 кВт и может регулироваться. ВЧ-генераторы, используемые в промыш-

ленности, работают на частотах 1,76, 5,28 и 13,56 МГц. Напряжение между электродами составляет 0,8–4 кВ.

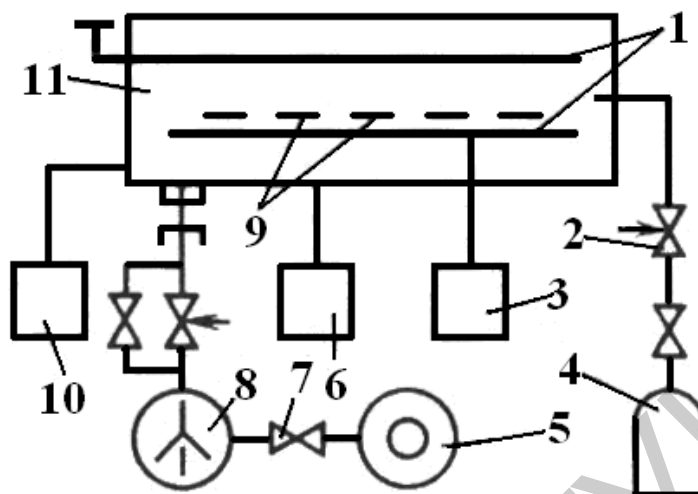


Рис. 3.2. Структурная схема автоматической установки плазмохимического травления с диодной ВЧ-системой:

- 1 – электроды; 2 – натекатели; 3 – блок управления ВЧ-источником питания; 4 – источник газа; 5, 8 – механический и диффузионный насосы; 6 – блок управления последовательностью операций; 7 – вентиль; 9 – подложки; 10 – регулятор давления; 11 – рабочая камера

Характеристической особенностью систем с ВЧ-разрядом является необходимость согласования ВЧ-генератора с распылительной камерой, полное сопротивление которой может меняться в широких пределах. Для осуществления согласования необходим индикатор, в качестве которого удобнее всего использовать измеритель ВЧ-мощности, передаваемой из генератора в камеру. В диодных системах мишень выполняет двойную функцию: с одной стороны, она является источником поддержания разряда, а с другой стороны – местом травления образцов. Поэтому в диодных системах нельзя независимо регулировать энергию ионов и их ток, проводить травление ионами низких энергий до 300 эВ, регулировать угол падения ионов. Применение диодных систем на постоянном токе ограничено, т. к. они позволяют травить только проводящие материалы.

Триодные системы

Триодная система ИТ состоит из трех независимо управляемых электродов: термокатода, анода и мишени, на которой размещаются обрабатываемые образцы (рис. 3.3). После откачки рабочей камеры до давления 10^{-4} Па катод разогревается до температуры, достаточной для достижения высокой плотности тока термоэлектронной эмиссии. Затем в камеру напускается инертный газ до давления 0,066–0,66 Па и подается напряжение между термокатодом и анодом порядка 500 В, что приводит к зажиганию дугового разряда.

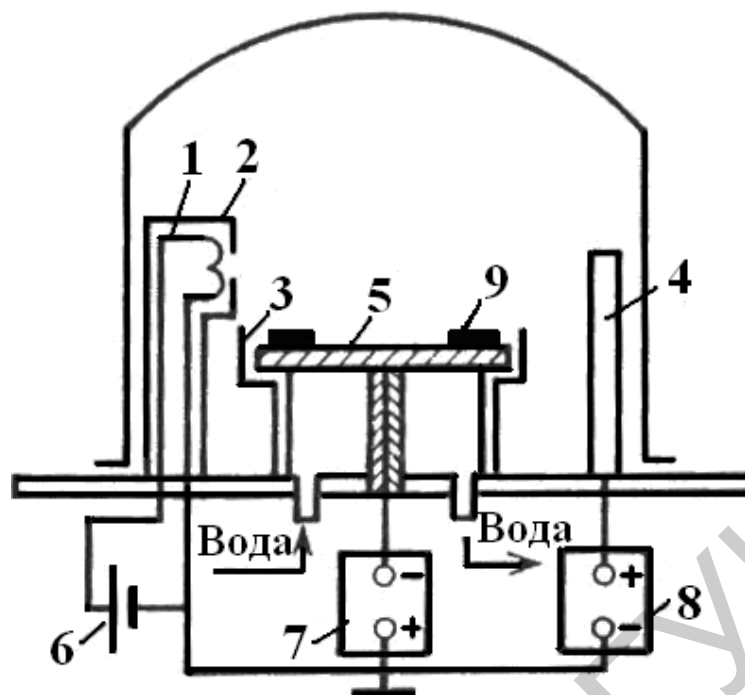


Рис. 3.3. Схема триодной системы ИТ:
 1 – термокатод; 2, 3 – экраны; 4 – анод; 5 – мишень; 6, 7 и 8 – источники питания;
 9 – подложки

На мишень может подаваться как постоянное отрицательное напряжение при травлении проводящих образцов, так и ВЧ-напряжение при травлении диэлектрических образцов. В триодных системах процессы образования плазмы и травления разделены, что позволяет управлять энергией ионов с помощью напряжения на мишени, однако нельзя регулировать их угол падения. Если в диодных системах и системах с АИИ максимальная плотность ионного тока на мишени составляет $1\text{--}5\text{ мА/см}^2$, то в триодных системах $15\text{--}20\text{ мА/см}^2$. Это позволяет получать высокие скорости травления материалов – порядка $5\text{--}10\text{ нм/с}$. В триодных системах трудно получить однородную плазму из-за малого размера термокатаода по сравнению с холодным катодом в диодных системах, что приводит к неравномерности травления образцов по поверхности мишени. Кроме того, наличие накаливаемого термокатаода не позволяет использовать при травлении материалов активные газы.

Устройства для плазмохимического травления

Установки для ПХТ можно разделить на два класса – по типу возбуждаемого в реакционной камере разряда (емкостный или индукционный) и по способу расположения в них подложек (поверхностное или объемное). Ко второму относится установка «Плазма-600», которая характеризуется безэлектродным способом создания плазмы с помощью индуктора, расположенного вокруг реактора. Подложки располагают в виде пакета с равномерным шагом вдоль оси реактора (рис. 3.4).

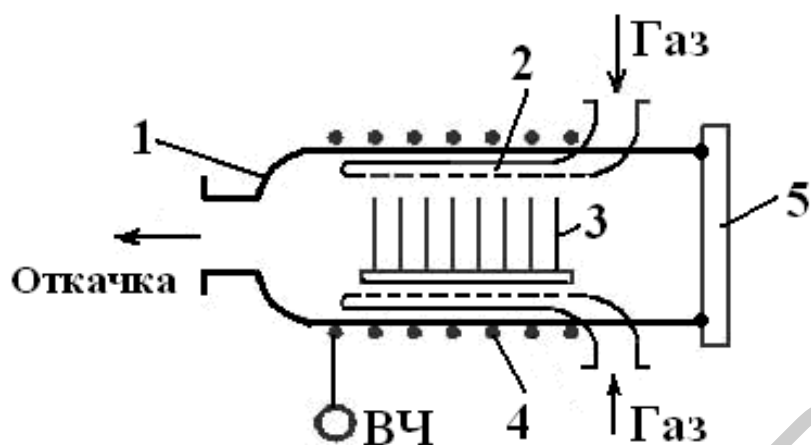


Рис. 3.4. Схема реактора установки «Плазма-600»:
 1 – кварцевый реактор; 2 – газораспределитель; 3 – подложки; 4 – ВЧ-индуктор;
 5 – крышка

Под воздействием этих частиц происходит разложение фоторезиста на двуокись углерода и пары воды, которые удаляются из реактора вакуумным насосом. Производительность установки составляет 200–400 подложек в час.

Оборудование, выпускаемое за рубежом, предназначено для работы как в индукционном, так и емкостном режиме создания разряда. Следует отметить, что КПД при индукционном режиме выше и достигает 95 %.

Системы с автономными ионными источниками

Системы ИТ с автономными ионными источниками по сравнению с ионно-плазменными системами обладают следующими преимуществами:

- уменьшение радиационного воздействия заряженных частиц и фотонов на обрабатываемые структуры в результате отделения рабочей камеры от источника;
- уменьшение загрязнений образцов инородными частицами за счет устранения процессов обратной диффузии и рассеяния при высоком вакууме в рабочей камере (10^{-3} Па);
- возможность независимой регулировки угла падения, энергии и тока ионов, что позволяет контролировать и управлять профилями травления микроструктур;
- возможность наклона и вращения мишени с образцами, позволяющая улучшить равномерность травления и устранить некоторые топографические дефекты.

На рис. 3.5 показана схема установки ИТ Microetching, разработанной фирмой Veeco Instr. Inc. на базе АИИ Кауфмана фирмы Thomsom CSF. Эта установка часто используется при травлении различных материалов. Ионизируемый инертный газ напускается через натекатель в камеру ионного источника, в котором при давлении порядка 0,1–1 Па зажигается плазменный разряд между вольфрамовым термокатодом и окружающим его цилиндрическим анодом, создающим радиальное электрическое поле, служащее для ускорения электро-

нов. Для увеличения эффективности ионизации на разрядный промежуток накладывается аксиальное магнитное поле, которое заставляет электроны двигаться по циклоидальным траекториям. Стенки анода находятся под высоким положительным потенциалом (до нескольких киловольт), что приводит к ускорению ионов и вытягиванию их через систему из трех молибденовых сеток, обеспечивающую получение хорошо сфокусированного ионного пучка диаметром 7,5–10 см с 5%-й неравномерностью плотности тока. Из компенсатора объемного заряда, представляющего раскаленную вольфрамовую нить, в ионный пучок эмиттируются электроны для компенсации его объемного заряда, что позволяет проводить травление диэлектриков. Плотность ионного тока пучка может меняться от 0,3 до 2,5 мА/см², ускоряющее напряжение – от 0 до 2 кВ, угол расхождения пучка составляет 7–10°, а расход инертного газа – 1,0–1,5 см³/мин.

К недостаткам источников с накаливаемым катодом относится трудность использования химически активных рабочих газов, что существенно ограничивает их технологические возможности. Например, применение в источниках Кауфмана с прямонакальным катодом фторсодержащих соединений уменьшает срок службы источника с 40 до 2 ч.

С целью устранения отмеченных недостатков применяют источники ионов химически активных соединений, в которых накаливаемый катод отсутствует, например, безсеточные источники ионов, в которых области образования ионов и их ускорения совмещены, и источники ионов, в которых газоразрядная плазма образуется в ВЧ- или СВЧ-полях.

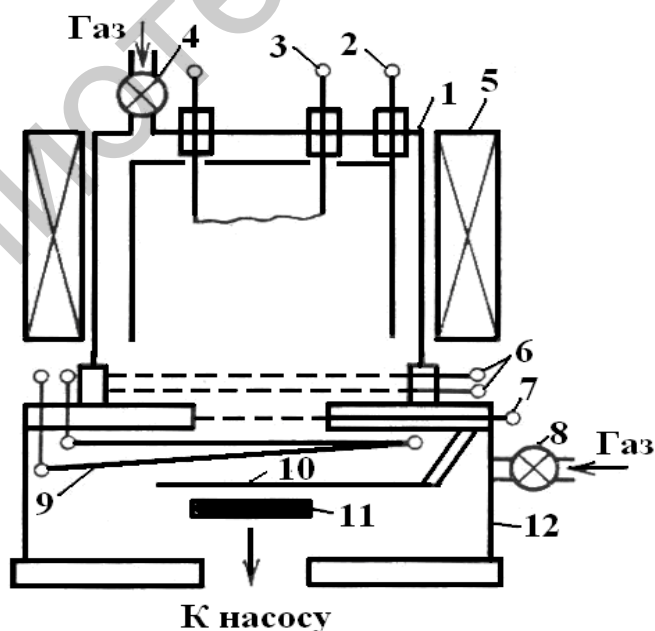


Рис. 3.5. Схема установки ИТ:

- 1 – камера ионного источника; 2 – анод; 3 – термокатод; 4,8 – натекатели;
- 5 – электромагнит; 6 – ионно-оптические сетки; 7 – ускоряющая сетка;
- 9 – нейтрализатор; 10 – заслонка; 11 – водоохлаждаемая подложка; 12 – рабочая камера

Из бессеточных источников наибольшее распространение получили источники, в которых ионы образуются и ускоряются в скрещенных электрическом и магнитном полях. В этих источниках нет ограничения плотности тока пучка ионов. Энергия ионов определяется разностью потенциалов между местом образования иона внутри ускоряющего промежутка и потенциалом обрабатываемого объекта. Созданы три типа таких источников: ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП), ускорители с анодным слоем (УАС) и источники с холодным катодом «Ради-кал» [2].

Контроль скорости удаления материала и толщины пленок в процессе ионно-плазменного травления

Контроль скорости удаления материала или толщины пленки непосредственно в процессе ионно-плазменного травления (ИПТ) необходим потому, что этот процесс обладает низкой селективностью и не прекращается на границе раздела между пленкой подвергаемого травлению материала и пленкой подслоя (или подложкой). Если процесс ИПТ своевременно не остановить, то происходит удаление материала подслоя или подложки, приводящее к ухудшению электрофизических характеристик и браку обрабатываемых микроструктур.

Все методы контроля скорости удаления материалов и толщины пленок в процессе ИПТ можно разделить на две группы [3]:

– прямые методы, в которых на измерительный преобразователь (ИП) (чувствительный элемент, датчик) воздействуют атомы или молекулы подвергаемого ИПТ материала;

– косвенные методы, в которых на ИП воздействуют частицы, не являющиеся атомами или молекулами подвергаемого ИПТ материала и не содержащие атомы или молекулы этого материала.

В основе резистивного метода контроля лежит зависимость между толщиной и сопротивлением проводящей пленки постоянному току. Резистивный метод можно использовать только для контроля ИПТ токопроводящих пленок. Для этого на «свидетель», представляющий собой отрезок диэлектрической или полупроводниковой подложки с двумя контактными площадками, необходимо нанести металлическую пленку такой же толщины, как и на рабочих подложках. Толщина контактных площадок должна быть значительно больше толщины подвергаемой ИПТ металлической пленки. Для проведения ИПТ рабочие подложки и «свидетель» помещаются на мишень, а от контактных площадок «свидетеля» создаются электрические выводы к схеме измерения сопротивления. При полном удалении металлической пленки со «свидетеля» измерительный прибор покажет бесконечное сопротивление и процесс ИПТ может быть остановлен.

К ограничениям резистивного метода контроля следует отнести низкую точность измерения сопротивления в процессе травления и применимость только к проводящим пленкам.

Метод кварцевого резонатора основан на измерении изменения резонансной частоты кварцевого кристалла при травлении пленок материалов. При измерениях в газоразрядной плазме пьезоэлектрические кварцевые кристаллы должны быть тщательно экранированы от электрических полей и заряженных частиц. Поэтому очевидно, что нельзя проводить контролируемое ИПТ пленок непосредственно на кварцевом кристалле. Определять скорость ИПТ можно только во время измерения скорости осаждения распыляемой пленки на экранированный кварцевый датчик. К основным недостаткам метода кварцевого резонатора относятся малый срок службы дорогих кварцевых кристаллов и значительное изменение частоты измерительного кристалла по сравнению с частотой эталонного.

К оптическим методам контроля относятся: фотометрические, использующие измерения величины отражения или пропускания металлических, полупроводниковых и диэлектрических пленок; интерференционные, использующие явление интерференции в системе пленка – подложка; поляриметрические, основанные на измерении поляризации отраженного пленками света; спектроскопические, основанные на измерении характеристического излучения распыляемых частиц, возбуждаемых в газоразрядной плазме.

Фотометрический метод можно применять для контроля окончания процесса ИПТ металлических пленок, нанесенных на диэлектрические подложки, т. к. после стравливания хорошо отражающей металлической пленки значение измеряемого сигнала резко уменьшается. Это изменение можно выделить на фоне помех и наводок, вносимых излучением плазмы. Диодная система ИПТ с устройством для контроля толщины обрабатываемых пленок на основе гелий-неонового лазера показана на рис. 3.6, а. Луч лазера направляется в вакуумную камеру через смотровое окно и при помощи зеркал и микрометрических винтов юстируется на поверхности образца, подвергаемого травлению. Интенсивность отраженного луча регистрируется фотодиодом.

Изменение коэффициента отражения во времени при ИПТ пленки Au толщиной 100 нм на стеклянной подложке показано на рис. 3.6, б.

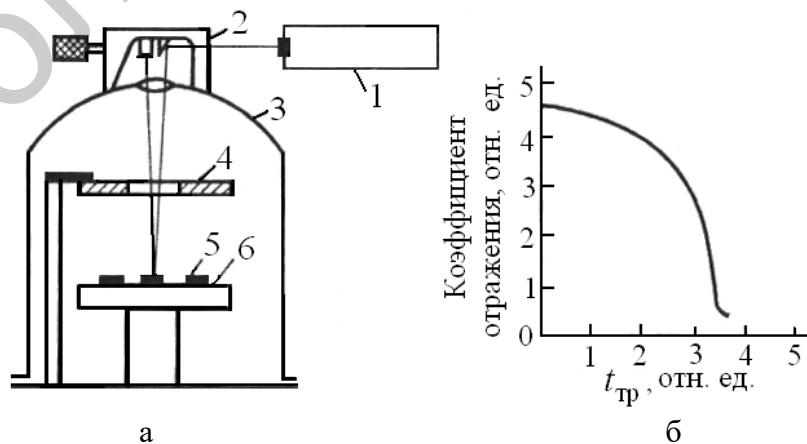


Рис. 3.6. Схема фотометрического метода контроля (а) и зависимость коэффициента отражения золотой пленки от времени ИПТ (б):

1 – лазер; 2 – система отклонения луча лазера; 3 – вакуумная камера; 4 – анод;
5 – подложки; 6 – подложкодержатель

Устройство, изображенное на рис. 3.6, а, может применяться и для интерференционного контроля толщины диэлектрических пленок в многослойных структурах, основанного на подсчете интерференционных экстремумов от системы пленка – подложка (или подслой).

Метод оптической спектроскопии дает хорошие результаты при контроле скорости ИПТ различных материалов. При удалении материала поверхностного слоя интенсивность излучения его атомов резко падает, что позволяет определять границы слоев различных материалов. Метод довольно сложен для производственных целей, но дает хорошие результаты в лабораторных условиях.

Методы поляриметрии редко применяют для контроля процесса травления, т. к. они требуют многочисленных расчетов и графических построений.

Состав и характеристики оборудования

В состав оборудования для ионно-плазменного травления материалов входят следующие основные функциональные системы:

- система травления, служащая для проведения обработки пластин и состоящая из рабочей камеры и расположенных внутри нее или присоединенных к ней снаружи электродов, экранов, подложкодержателей и автономных источников стимулирующих воздействий и химически активных частиц (ХАЧ);

- газовая система, служащая для подачи требуемого потока газа (пара) или газовой смеси в рабочую камеру и в автономные источники стимулирующих воздействий и ХАЧ и состоящая из нескольких каналов, в состав которых входят фильтры, трубы, испарители, вентили, клапаны, измерители и регуляторы расхода газа, коллекторы и стабилизаторы давления;

- вакуумная система, служащая для обеспечения требуемого давления остаточных и рабочих газов в технологической и шлюзовой камерах и состоящая из вакуумных насосов, трубопроводов, клапанов, измерителей и регуляторов давлений и скоростей откачки, азотной ловушки, системы ее регенерации, фильтров или станций для очистки насосного масла, скрубберов или нейтрализаторов выхлопных газов;

- система возбуждения и поддержания плазмы разряда в рабочей камере, а также других стимулирующих воздействий в автономных источниках, состоящая из генераторов и источников электрических и магнитных полей, кабелей или волноводов, измерителей и регуляторов подводимой мощности, согласующих устройств;

- система загрузки-выгрузки пластин, транспортирования и позиционирования их внутри установки, состоящая из передающей и приемной кассет, устройств загрузки и перемещения пластин, шлюзовой камеры, подложкодержателей и прижимных устройств, датчиков положения пластин на различных позициях;

- система термостатирования испарителей, участков газовых каналов, электродов, подложкодержателей и стенок камер, служащая для измерения и регулирования их температуры и состоящая из термостатов, труб, хладо- и теп-

лоагентов, устройств их перекачки, подачи и распределения, а также измерителей и регуляторов температуры;

– система контроля момента окончания процесса травления функционального слоя (времени травления), состоящая из индикаторов на основе эмиссионно-спектрального, лазерного интерферометрического или масс-спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных микропроцессоров для обработки полученных сигналов по соответствующему алгоритму;

– система управления, служащая для управления перечисленными выше системами контроля режимов работы и исправности входящих в них устройств и состоящая из управляющей ЭВМ с программным обеспечением, клавиатурой ввода команд и дисплеем.

К конструкционным характеристикам оборудования относятся форма, материалы, размеры и взаимное расположение функциональных узлов и систем в составе установки, а также отдельных элементов в составе этих узлов и систем. К эксплуатационным параметрам оборудования относятся быстродействие, цикловая производительность, среднее время наработки на отказ.

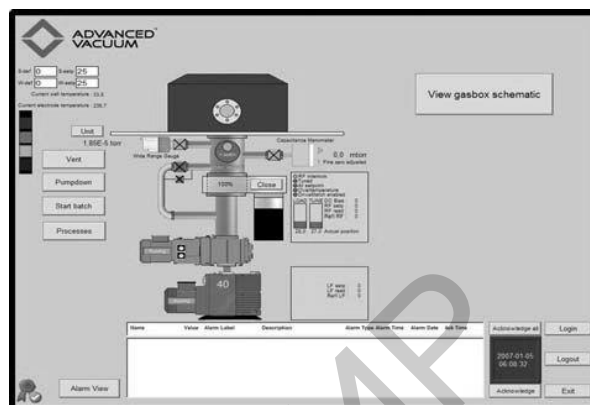
В настоящее время разработано большое количество программно-управляемого оборудования для процессов ионно-плазменного травления.

Установка Vision 322 PE/RIE фирмы Advanced Vacuum компактная, надежная, технологически гибкая и простая в эксплуатации и обслуживании, применяется для изотропного плазменного и реактивного ионного травления (рис. 3.7, а). Вакуумная система включает сухой форвакуумный насос и турбомолекулярный насос на магнитном подвесе. Система отслеживания окончания процесса основана на оптических эмиссионных спектроскопии и интерферометрии, лазерной интерферометрии. Равномерность получения размеров элементов от пластины к пластине составляет $\pm 3\%$. Для управления и контроля процесса травления используется простой, интуитивно понятный интерфейс (рис. 3.7, б). Программное обеспечение позволяет записывать параметры процесса, фиксировать истории аварийных сообщений, обеспечивать многоуровневый доступ пользователей и возможность удаленного управления и контроля состояния установки. Установка Vision 322 PE/RIE позволяет травить металлы, полупроводники, диэлектрики, полимеры с высоким качеством.

Установка Versaline RIE фирмы Plasma-Term с автоматическим шлюзом предназначена для реактивного ионного травления с высокой производительностью (рис. 3.8, а). Максимальный размер подложки 200 мм – поштучная обработка. Установка обеспечивает равномерность травления по толщине и воспроизводимость результатов от пластины к пластине $\pm 2\%$. Имеется автоматический шлюз для мелкосерийного производства, автоматический кассетный загрузчик для серийного производства и роботизированный загрузчик для крупносерийного производства (рис. 3.8, б). Контроль окончания процесса травления выполняется с применением оптических эмиссионных спектроскопии и интерферометрии, лазерной интерферометрии.

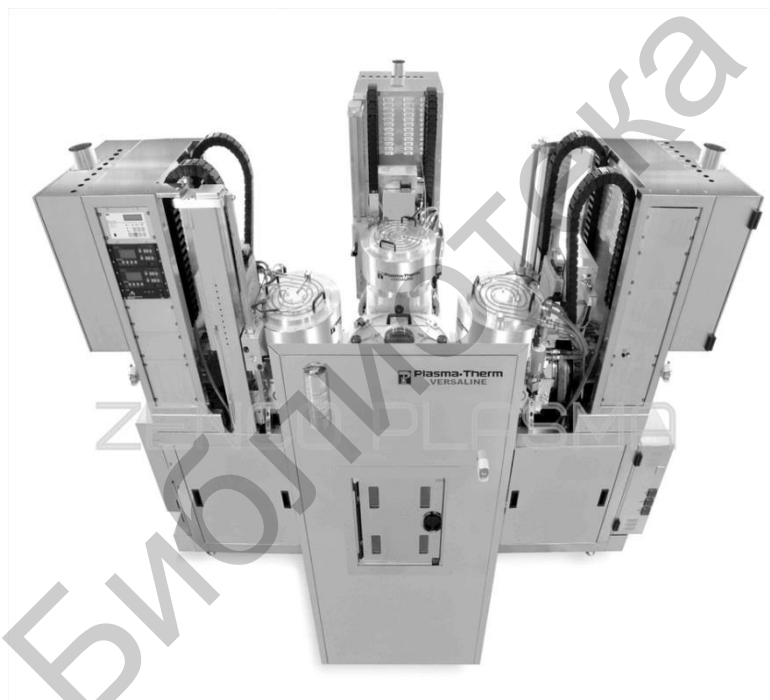


а

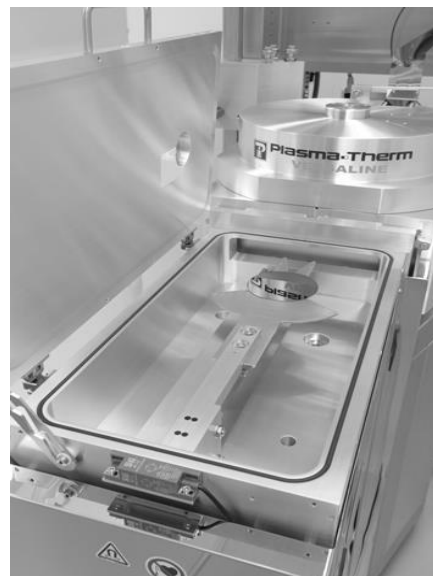


б

Рис. 3.7. Внешний вид установки Vision 322 PE/RIE (а) и интерфейса (б)



а



б

Рис. 3.8. Внешний вид установки Versaline RIE (а) и автоматического шлюза (б)

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Для осуществления процесса ионного травления используется модернизированная установка вакуумного напыления УРМ 3.279.017, упрощенная схема которой приведена на рис. 3.9. Вакуумная система включает в себя цилин-

дрическую рабочую камеру, механический пластинчато-роторный насос НВР-5Д14 со скоростью откачки 5 л/с, диффузионный насос со скоростью откачки 450 л/с, высоковакуумный затвор, азотную ловушку.

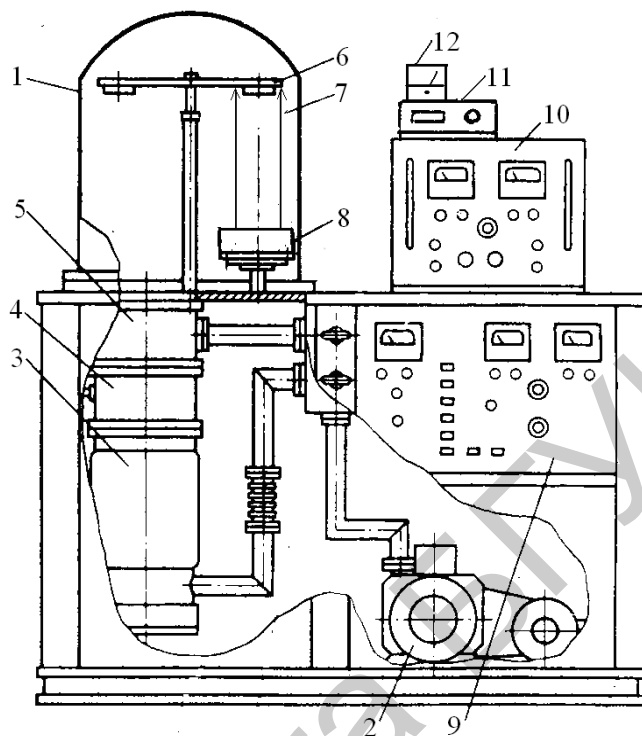


Рис. 3.9. Упрощенная схема установки УРМ 3.279.017:

- 1 – рабочая камера; 2 – механический насос; 3 – диффузионный насос; 4 – азотная ловушка; 5 – высоковакуумный затвор; 6 – карусель с подложкой и маской; 7 – ионный пучок; 8 – ионный источник; 9 – панель управления и контроля; 10 – блок питания БП-94; 11 – цифровой вольтметр В7-27; 12 – микроамперметр

Система газоснабжения состоит из баллона с аргоном, редуктора, игольчатого натекателя и газовой магистрали.

Подъем и опускание рабочей камеры осуществляется гидроприводом. Для охлаждения диффузионного насоса, рабочей камеры, внутрикамерных устройств применяется гидросистема, состоящая из клапанов, водяного реле, кранов для горячей и холодной воды.

В качестве АИИ используется плазменный ускоритель с анодным слоем, который формирует кольцевой ионный пучок диаметром 100 мм. Источник состоит из соленоида, анода, катода. Преимуществом ионных источников на основе плазменных ускорителей является отсутствие накаливаемого термокатода и ионно-оптической системы, что существенно упрощает их конструкцию и увеличивает ресурс работы. Ионные источники на базе ускорителей с анодным слоем содержат кольцевой анод 1 и электромагнитную систему, состоящую из катушки соленоида 4, катодов 2 и магнитопровода 3 (рис. 3.10).

С помощью катушки соленоида создается радиальное магнитное поле в ускоряющей промежутке-зазоре между катодом и анодом, а между анодом и

катодом, который обычно находится под земным потенциалом, – электрическое поле, силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям магнитного поля. Электроны (в любом газе всегда имеется некоторое количество свободных электронов из-за воздействия различных ионизирующих излучений, например, космическая радиация, естественный радиоактивный фон и т. д.), совершая замкнутый холловский дрейф в скрещенных $E \times H$ полях, ионизируют атомы рабочего газа, и в прианодном слое возникает плазменный разряд. Так как анод находится под большим положительным потенциалом $U_a = (0,5–5)$ кВ, то ионы будут отталкиваться от него, приобретать энергию, равную $E = (0,5–0,7)U_a$. При этом будет формироваться пучок ускоренных ионов 5, который будет иметь трубчатую (О-образную) форму. Данный пучок можно направить на подложку с целью травления последней.

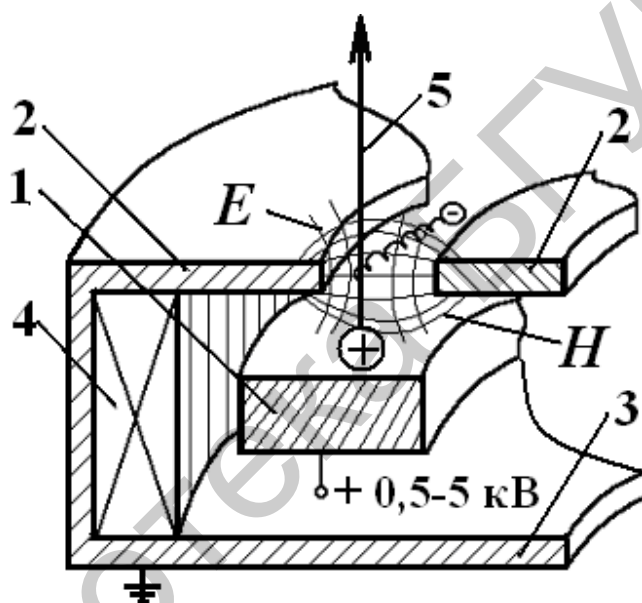


Рис. 3.10. Упрощенная схема ускорителя с анодным слоем

В качестве образцов для травления используются пленки меди, никеля, алюминия, нанесенные на подложки из кремния или ситалла. Формирование конфигурации элементов в пленке осуществляется с помощью съемной металлической маски. На рис. 3.11 показан ионный источник, столик для подложки с маской и «свидетеля», электрический зонд для измерения тока ионного пучка. Величина ионного тока измеряется с помощью стрелочного микроамперметра. Контроль момента окончания процесса травления осуществляется резистивным методом с использованием цифрового вольтметра В7-27. Вакуум измеряется вакуумметром ВИТ-2 с термопарными и ионизационными манометрическими преобразователями. Питание анода и соленоида ионного источника осуществляется блоком питания БП-94.

Контроль качества травления и измерение размеров элементов проводится с использованием оптического микроскопа. Толщина пленок измеряется на микроскопе МИИ-4.

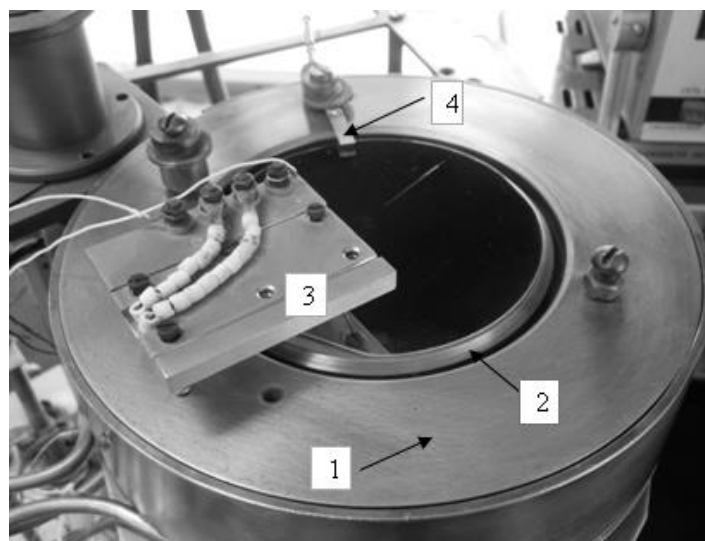


Рис. 3.11. Внешний вид ионного источника:
1 – ионный источник; 2 – разрядная щель; 3 – столик; 4 – зонд

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Микроамперметр.
2. Цифровой вольтметр В7-27.
3. Оптический измерительный микроскоп.
4. Микроскоп МИИ-4.
5. Ионный источник «Радикал».

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством технологического модуля ионного травления на базе установки УРМ 3.279.017, конструкцией источника «Радикал».

2. Поместить на карусель установки подложку с металлической пленкой и маской, присоединить контакты к «свидетелю» и установить его над ионным источником.

3. Под руководством преподавателя провести процесс ионного травления металлической пленки. В процессе травления через каждые 30 с фиксировать сопротивление «свидетеля». Окончание процесса травления определить по сопротивлению «свидетеля». Записать режимы процесса ионного травления – остаточный вакуум, рабочий вакуум, напряжение на аноде, ток соленоида, ток ионного пучка (ток зонда), время травления.

4. Построить график зависимости сопротивления «свидетеля» от времени травления.

5. С помощью оптического измерительного микроскопа измерить несколько размеров элементов на протравленном образце $d_{\text{п}}$ и на маске $d_{\text{м}}$.

6. Измерить толщину металлической пленки с использованием микроско-

па МИИ-4. Рассчитать скорость травления. Результаты всех измерений и вычислений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1
Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Материал пленки	d , нм	U_a , кВ	I_z , мА	$t_{тр}$, нм/с	$V_{тр}$, нм/с	d_m , мкм	d_p , мкм

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Упрощенная схема технологического модуля ионного травления на базе установки УРМ 3.279.017.
3. Эскиз конструкции источника «Радикал».
4. Результаты измерений и вычислений, график зависимости.
5. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие методы ионно-плазменного травления вы знаете?
2. Как функционирует устройство для диодного травления?
3. Какова конструкция устройства для триодного травления?
4. Каков принцип работы установок плазмохимического травления?
5. Каковы преимущества систем травления с АИИ?
6. Что входит в состав установок для ИПТ?
7. Какие существуют способы контроля окончания процесса травления?
8. Что входит в состав установки УРМ 3.279.017 для травления?

ЛИТЕРАТУРА

1. Маишев, Ю. П. Источники ионов и ионно-лучевое оборудование для нанесения и травления материалов / Ю. П. Маишев // Вакуумная техника и технология. – 1992. – Т. 2. – №4. – С. 53–58.
2. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3 т. Т. 2 / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : ФУ Аинформ, 2001. – 244 с.
3. Машиностроение: энциклопедия : в 40 т. / ред. совет: К. В. Фролов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1994–2012. – Т. III-8 : Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Ю. В. Панфилов [и др.] ; под общ. ред. Ю. В. Панфилова. – 2000. – 744 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДУЛИ И УСТРОЙСТВА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

Цель работы: изучение состава установок вакуумного напыления, назначения, принципа работы и конструкции технологических модулей и устройств, проведение процесса нанесения покрытий с использованием резистивного испарения и ионно-лучевого распыления.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Успешное развитие ряда направлений науки и техники в значительной степени определяется прогрессом в области тонкопленочных покрытий, которые позволяют целенаправленно изменять оптические, механические, химические, электрофизические, магнитные и другие свойства поверхности материалов. Наиболее широко распространенной промышленной технологией получения тонких пленок является их нанесение в вакууме. В настоящее время наиболее распространенным типом вакуумного оборудования являются универсальные установки, базовую часть которых можно использовать как в электронике, так и в оптике и которые оснащаются набором технологической оснастки по заказу потребителя. Разнообразие процессов и материалов, используемых для получения покрытий, а также возрастающие требования к точности, воспроизводимости, надежности и производительности напылительных установок требует их непрерывного совершенствования, создания многочисленных видов дополнительной оснастки и перехода к автоматизации технологических процессов.

Состав оборудования для нанесения покрытий в вакууме

К вакуумному оборудованию предъявляются следующие требования:

- высокая скорость откачки газов из рабочей камеры;
- минимальный обратный поток паров из вакуумных насосов в камеру;
- разборность установки для удобства эксплуатации;
- высокая производительность при групповой обработке подложек.

Вакуумные установки для нанесения тонких пленок разнообразны по конструкции, однако имеют ряд общих элементов. Промышленностью выпускаются вакуумные установки разных моделей, отличающиеся устройством внутрикамерной оснастки, степенью автоматизации и оснащенностью аппаратурой для измерения параметров технологического процесса.

Одним из важнейших параметров вакуумных установок является производительность Q , которая при их бесперебойной работе определяется количеством изделий (подложек), обрабатываемых в единицу времени (шт./ч):

$$Q=1/\tau_p+\tau_x, \quad (4.1)$$

где τ_p – время технологического воздействия на подложку (рабочее);
 τ_x – вспомогательное (холостое) время.

Рабочее время τ_p складывается из времени предварительного нагрева подложки τ_n , времени нанесения пленки $\tau_{п}$ и времени охлаждения τ_o подложки перед разгерметизацией камеры:

$$\tau_p = \tau_n + \tau_{п} + \tau_o. \quad (4.2)$$

Холостое время τ_x складывается из времени напуска воздуха в рабочую камеру и ее открытия τ_k , времени загрузки подложек τ_z и времени откачки рабочей камеры τ_b :

$$\tau_x = \tau_k + \tau_z + \tau_b. \quad (4.3)$$

Рабочее время определяется особенностями технологического процесса и не может быть уменьшено. Поэтому для повышения производительности установок сокращают, а в некоторых случаях и совмещают составляющие, входящие в холостое время.

В зависимости от вида производства, а также требований производительности различают три типа установок:

- периодического действия, используемые в мелкосерийном производстве и для отработки технологических процессов;
- полунепрерывного действия, используемые в серийном производстве с относительно частой сменой технологического процесса;
- непрерывного действия, используемые в крупносерийном и массовом производстве.

Основными системами и устройствами вакуумного оборудования являются:

- вакуумная система (камера, насосы, фланцы, трубопроводы, уплотняющие элементы, затворы, клапаны, вентили, вакуумные реле, натекатели, ловушки, азотные питатели);
- устройства для генерации потоков наносимого вещества;
- устройства для ионной очистки;
- система контроля параметров техпроцесса и управления режимами работы установки (приборы для измерения вакуума, скорости осаждения, толщины пленок, температуры испарителей и подложек, аппаратура для автоматического управления процессом откачки);
- транспортирующие устройства (арматура для вращения подложек, перемещения испарителей и распылителей, шлюзовые устройства);
- системы электропитания, гидро- и пневмосистемы;
- газовая система (клапаны, натекатели, расходомеры, смесители, редукторы);
- вспомогательные устройства (нагреватели, охладители, экраны, заслонки, дозаторы и т. п.);
- микроконтроллеры, микроЭВМ.

На рис. 4.1 приведена структурная схема установки вакуумного напыления (УВН). Основным элементом УВН является вакуумная камера. В течение многих лет в качестве стандартной камеры использовался цилиндрический стеклянный или стальной колпак. Таким колпаком до настоящего времени снабжаются несложные и недорогие установки, предназначенные для простейших видов покрытий. Разновидностью подъемного колпака является откидной колпак уменьшенной высоты, используемый обычно в установках катодного и магнетронного распыления, где расстояние источник – подложка выбирается минимальным [1].



Рис. 4.1. Структурная схема установки вакуумного напыления

Современный подход к построению УВН определяется необходимостью жесткого технологического контроля хода процессов, высокой производительности и удобства обслуживания. Универсальные УВН последних лет выпуска имеют просторную камеру кубической или полуцилиндрической формы с определяющим размером (диаметром или высотой) от 0,5 до 1,5 м (рис. 4.2). Размеры двери камеры, равные по площади ее максимальному сечению, позволяют без препятствий загружать в установку различные изделия. «Шкафной» тип конструкции камеры позволяет, во-первых, перенести откачной патрубков на боковую стенку и увеличить его диаметр, что повышает скорость откачки; вынос откачного агрегата из-под станины камеры устраняет ограничение на его размеры и тип. Во-вторых, появляется возможность использовать дефицитную площадь под днищем камеры для размещения дополнительных испарителей, токовводов и вводов вращения, окон фотометрического контроля, ИК-излучателей и т. п. В боковых стенках помимо фланца откачки размещают и подачу технологических газов, датчиков. В двери устанавливают одно или несколько смотровых окон.

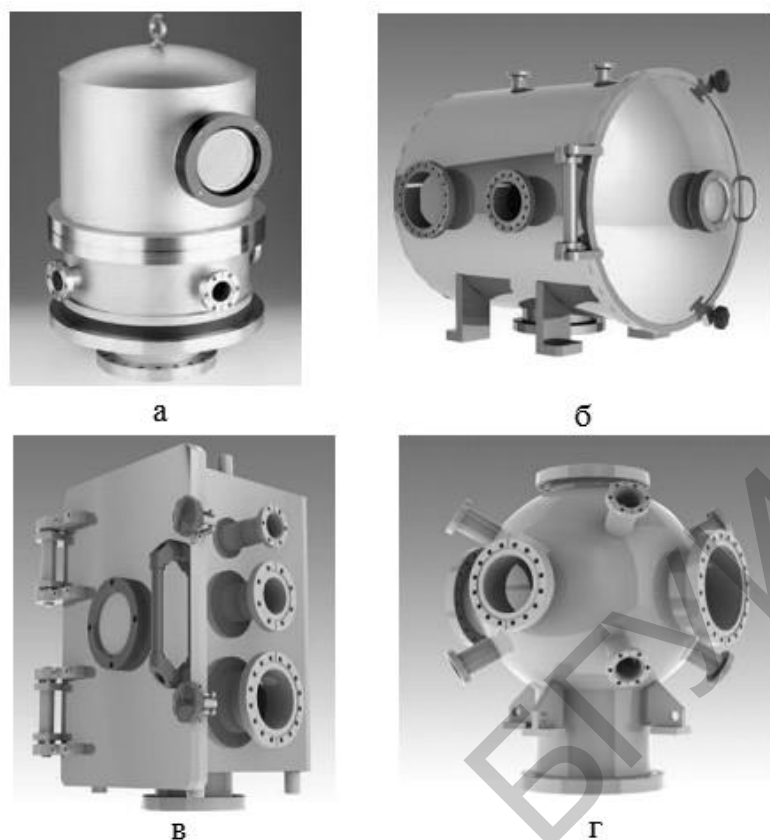


Рис. 4.2. Конструкции вакуумных камер:

а – цилиндрическая вертикальная; б – цилиндрическая горизонтальная; в – плоская; г – сферическая

В верхней части камеры обычно располагается ввод вращения подложкодержателей, манометрические вводы, вводы нагрева и охлаждения.

Для нанесения покрытий на широкоформатные подложки, например, на оконные стекла, лавсановую ленту и т. п., используются прямоугольные камеры «in line» с вертикальным или горизонтальным расположением, имеющие большие длину и ширину (до 10–15 м) и небольшую высоту (около 0,1 м). Они, как правило, снабжены шлюзовыми устройствами и устройствами перемещения подложек конвейерного типа.

Большинство процессов нанесения покрытий требует создания в технологическом объеме камеры вакуума порядка 10^{-4} – 10^{-5} Па. С учетом значительных объемов камер (200–1000 л и более) для его получения и поддержания в условиях больших потоков десорбции и напускаемых технологических газов необходима мощная система вакуумной откачки. Условия вакуумной гигиены в рабочей зоне УВН, необходимость наличия максимально чистого вакуума в камере, минимума шума и вибраций обуславливают жесткие требования к параметрам системы вакуумной откачки. Основным средством получения вакуума остается агрегат на основе механического вращательного насоса (или комбинации вращательных насосов), паромасляного диффузионного насоса и шевронной ловушки, охлаждаемой проточной водой, холодильным реагентом или жидким азотом. Подобными системами оснащаются до 90 % моделей выпускае-

мых установок. В них используются паромасляные насосы с быстротой откачки от 250 до 15 000 л/с при диаметре откачного патрубка вакуумной камеры от 300 до 800 мм. Приблизительно в одной трети УВН предусмотрена возможность комплектации установки по заказу потребителя турбомолекулярным, криогенным или ионно-сорбционным насосом.

Стыковка вакуумных элементов системы с камерой и между собой в современных установках осуществляется, как правило, малогабаритными фланцами по стандартам ИСО, которые просты в изготовлении и имеют уменьшенный наружный диаметр, что может оказаться очень важным в условиях недостатка пространства. Для крепления таких фланцев используются быстроразъемные соединения с накидным хомутом или с зажимными скобами.

Характеристики и конструктивные особенности устройств для генерации потоков наносимого вещества

По способам создания потоков наносимого вещества методы вакуумного осаждения можно разделить на три группы: термическое испарение, ионное распыление, термоионное осаждение (рис. 4.3). Каждый из этих способов имеет свое специфическое конструктивное оформление.

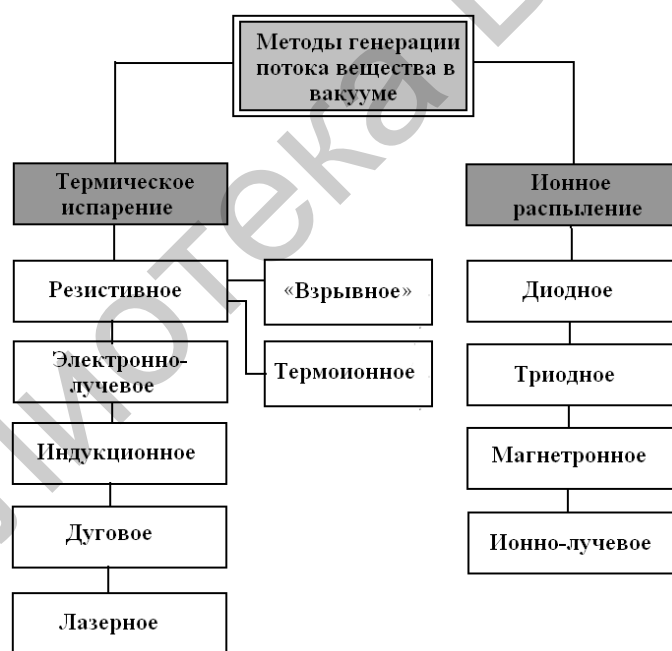


Рис. 4.3. Классификация методов генерации потока вещества в вакууме

Рассмотрим подробнее наиболее перспективные способы вакуумного осаждения, получившие наибольшее распространение [2].

Резистивное испарение – наиболее простой способ. Конструктивно он включает в себя собственно испаритель (проволочный, ленточный или тигельный), медные водоохлаждаемые тоководы и блок питания, позволяющий пропускать через испаритель ток до 500 А. Основные недостатки этого способа: низкая контролируемость процесса, невозможность испарять тугоплавкие ма-

териалы, загрязнение пленки материалом испарителя, плохая адгезия покрытий из-за низкой энергии конденсирующихся на подложке атомов материала, нарушение стехиометрии пленок при испарении сплавов, химических соединений. Последний недостаток частично устраняется при использовании метода «взрывного испарения». В этом случае материал сложного состава в виде мелких гранул или порошка с помощью вибробункера подается на раскаленную ленту из углеграфитовой ткани или вольфрама. Этим достигается одновременное испарение компонентов сложного вещества. Испарение микродоз происходит практически мгновенно и полностью, в результате чего на подложке последовательно осаждаются очень тонкие слои. В пределах каждого слоя наблюдается неоднородный состав (вследствие фракционирования сплава), однако уже в процессе нанесения взаимной диффузией атомов составляющих компонентов выравнивается концентрация каждого из них по толщине пленки. Этот метод особенно эффективен при нанесении многокомпонентных сплавов (например, МЛТ-2М, нихром – оксид кремния). Достоинством является отсутствие загрязнений пленки материалом испарителя (малое время контакта микродозы сплава с испарителем).

Среди термических способов электронно-лучевой нагрев получил наибольшее применение в промышленных установках. Для электронно-лучевого нагрева в промышленности используется электронно-лучевые испарители (ЭЛИ) с пушкой Пирса и ЭЛИ с криволинейным лучом (или с поворотом луча).

При нанесении тонких пленок в установках средней и высокой производительности экономически более выгодно использовать малогабаритные ЭЛИ с криволинейным лучом (рис. 4.4), которые особенно удобны для монтажа в установках с вертикальным подъемом колпака или в камерах с открывающейся дверью. Эти ЭЛИ отличаются малыми габаритами, широким диапазоном мощности пучка.

Работа ЭЛИ с криволинейным пучком осуществляется следующим образом. Электронный луч формируется в электронной пушке, состоящей из вольфрамового термокатода 6, заземленного анода 11 и отражателя 7, находящегося под небольшим отрицательным потенциалом относительно катода. Получив ускорение в электрическом поле, образованном между катодом и анодом, приложенным к катоду ускоряющим напряжением (5–20 кВ), пучок электронов 8 двигается далее в магнитном поле, создаваемом полюсным наконечником 1. Величина магнитного поля может регулироваться изменением тока электромагнита 2. Под действием магнитного поля H происходит искривление траектории электронного луча.

Магнетронное распыление – это высокопроизводительный процесс нанесения тонких пленок металлов, полупроводников и диэлектриков со скоростями осаждения в пределах единиц микрон в минуту и относительно низкой температурой поверхности осаждаемых пленок. По существу магнетронная система распыления (МСР) представляет собой обычную диодную систему распыления, в область разряда которой введено постоянное магнитное поле (рис. 4.5).

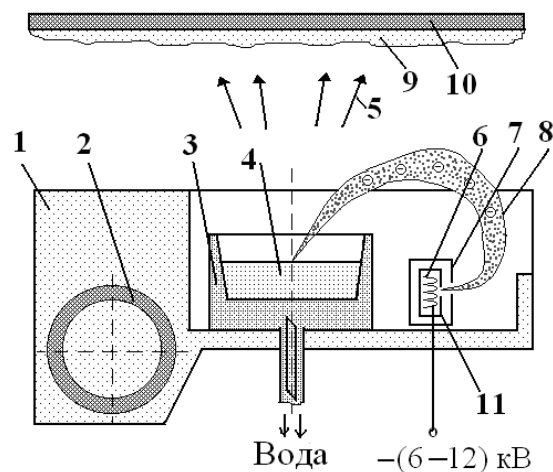


Рис. 4.4. Электронно-лучевой испаритель с криволинейным лучом:
 1 – полюсный наконечник; 2 – электромагнит; 3 – водоохлаждаемый тигель;
 4 – испаряемый материал; 5 – поток испаренного материала; 6 – термокатод;
 7 – отражатель; 8 – пучок электронов; 9 – покрытие; 10 – подложка; 11 – анод

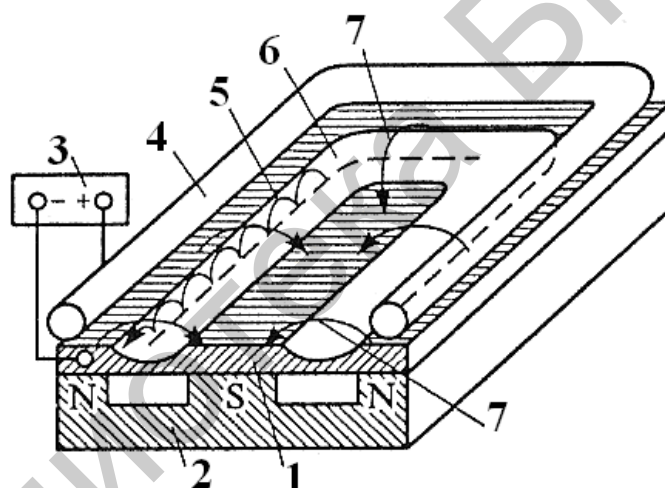


Рис. 4.5. Упрощенная схема МСР:
 1 – мишень; 2 – магнитная система; 3 – блок питания; 4 – анод; 5 – траектория электронов;
 6 – зона распыления; 7 – силовые линии магнитного поля

МСР работает следующим образом. В зоне над поверхностью мишени из распыляемого материала, где электрическое поле E и магнитное H взаимно перпендикулярны, образуется область локализации плазмы, имеющая форму замкнутого кольца, в котором электроны двигаются по непрерывным траекториям, совершая так называемый дрейф Холла. С помощью электрического поля, создаваемого отрицательным потенциалом мишени-катода, ускоренные ионы, вытягиваемые из плазменного кольца, бомбардируют мишень, выбивая атомы распыляемого материала. Зона распыления представляет собой кольцеобразную выемку на поверхности мишени. Можно изготовить магнетроны с различными формами мишени и любых размеров.

Ионно-лучевые распылительные системы создаются в основном на базе ионных источников Кауфмана и холловских ускорителей с анодным слоем. Ионный источник Кауфмана осуществляет ускорение ионов путем подачи напряжения на специальную сетку-электрод, при этом ионы проходят через ячейки сетки. Однако в этом случае происходит распыление сетки ионами, и материал сетки попадает в мишень, что вызывает загрязнение последней.

Ионные источники на основе плазменных ускорителей характеризуются отсутствием накаливаемого термокатода и ионно-оптической системы, что существенно упрощает их конструкцию и увеличивает ресурс работы. Кроме того, такие ионно-лучевые распылительные системы имеют следующие преимущества:

- универсальность по виду наносимого материала (металлы, диэлектрики, полупроводники, многокомпонентные материалы);
- использование любых рабочих газов;
- высокий рабочий вакуум;
- пространственное разделение областей генерации плазмы и непосредственной конденсации материала;
- минимальное воздействие вторичных электронов на подложки, а следовательно, уменьшенные нагревы и степени радиационных повреждений;
- отсутствие высокого напряжения на мишени;
- простота конструкции, возможность применения как аксиальных, так и протяженных ионных источников.

Ионные источники на базе ускорителей с анодным слоем содержат кольцевой анод 1 и магнитную систему, состоящую из катушки соленоида 3 (или постоянных магнитов) и полюсных наконечников-катодов 2 (рис. 4.6, а).

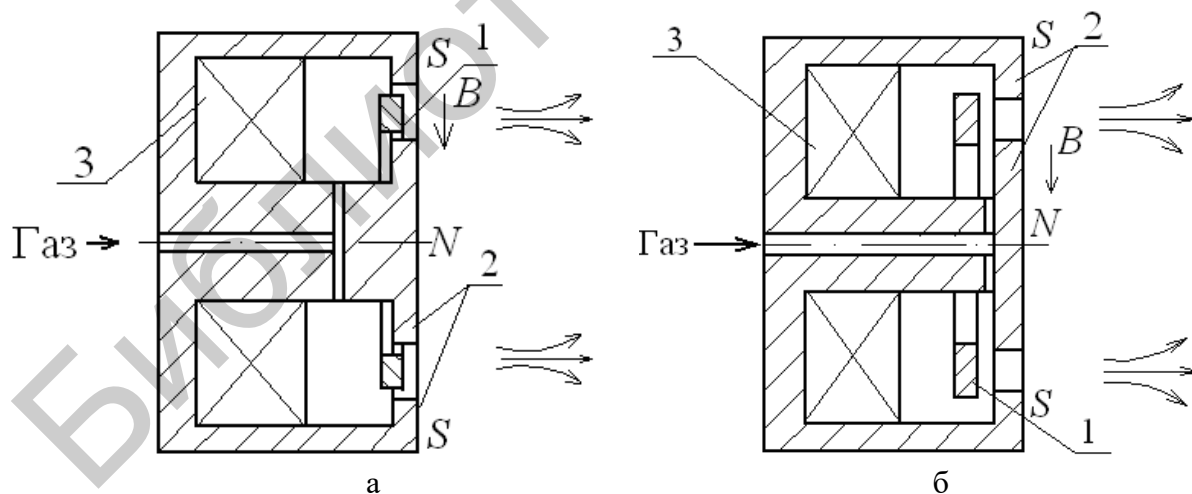


Рис. 4.6. Схемы холловского ускорителя с анодным слоем (а) и источника ионов с холодным катодом «Радикал» (б)

В источнике «Радикал» реализован замкнутый дрейф электронов в скрещенных магнитном и электрическом полях в промежутке катод-анод. Удерживаемые электроны совершают замкнутый холловский дрейф, ионизируют рабочий газ и компенсируют пространственный заряд пучка ионов (рис. 4.6, б).

Анод источника, который находится под положительным потенциалом $U_a=0,5-5$ кВ, будет отталкивать и ускорять ионы. Сформированный пучок ускоренных ионов, который будет иметь трубчатую (О-образную) форму, можно направить на мишень из распыляемого материала или на подложку с целью очистки последней [3].

Устройства для перемещения и нагрева подложек, контроля толщины покрытий, системы газо- и водоснабжения

Производительность установок и качество получаемых покрытий в значительной степени определяются конструкцией и разнообразием выбора подколпачной арматуры, устройств для перемещения подложек, которые должны обеспечивать максимальную загрузку и минимальную неоднородность по толщине (1–5 %). В устройствах для нагрева и поддержания температуры подложек в качестве нагревателей обычно используются трубчатые электронагреватели, кварцевые галогенные лампы или специальные ИК-излучатели. Следует отметить, что указанные способы нагрева затрудняют точный контроль температуры самих подложек в процессе их вращения, и эта температура принимается равной температуре окружающей арматуры, что вносит определенную погрешность. Другой серьезной проблемой является обеспечение беспрепятственного вращения карусели подложек в опорах при температурах до 400 °С в условиях вакуума и при отсутствии консистентных смазок.

Необходимыми узлами современных УВН являются приборы контроля свойств наносимых пленок и контроля основных параметров технологического процесса, которые необходимы для воспроизводимости процессов напыления и их автоматизации.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие методы измерения толщины и скорости осаждения пленок: метод кварцевого генератора, метод измерения удельного сопротивления «свидетеля», оптические методы. В современных установках наиболее широко используются кварцевые датчики и оптические (фотометрические) системы измерения.

Принцип действия кварцевого измерителя толщины основан на регистрации изменения частоты колебаний кристалла кварца при конденсации на нем пленки напыляемого вещества. Для стабильной работы прибора необходимо обеспечить тепловую экранировку кристалла, стабилизировать уровень возбуждения кристалла и напряжений питания генератора.

В последнее время в приборах обычно используется цифровая система контроля скорости осаждения толщины пленок, а также устройство автоматической остановки процесса при достижении заданной толщины.

С помощью фотометрических систем осуществляется контроль оптических характеристик покрытий: показателя преломления, коэффициентов пропускания и отражения. Показатель преломления является функцией основных технологических параметров: температуры подложки, давления остаточных газов, скорости нанесения. Поэтому по его величине можно контролировать ход

процесса, что используется при управлении технологическим процессом от ЭВМ.

Почти все УВН имеют системы газо- и водоснабжения. Первые, кроме натекаателей или систем точного напуска рабочего газа, включают в себя трубопроводы, электромагнитные клапаны, смесители, редукторы, приборы для контроля расхода газа. Система водоснабжения необходима для эффективного охлаждения диффузионного насоса, испарителей систем распыления, поверхности вакуумной камеры. Предусмотрена также возможность прокачки горячей воды через устройства внутрикамерной оснастки и самой вакуумной камеры для дегазации паров воды и газов, которые сорбируются на поверхности и тем самым замедляют процесс достижения высокого вакуума. Системы водоснабжения включают в себя клапаны, краны, водяные реле, фильтры.

Все установки комплектуются блоками питания для систем нагрева испарителей, систем распыления, ионной очистки. Многие УВН включают в себя таймеры, реле времени, электромагнитные заслонки для быстрого перекрытия потока наносимого вещества, различные шлюзовые устройства, освещение камеры и т. п.

Системы автоматического управления, используемые в УВН

Вакуумные установки бывают с ручным управлением, полуавтоматические и автоматические. Две последние оснащены системами пневматики или электропривода для переключения клапанов откачки, открывания и закрывания высоковакуумного затвора, напуска воздуха в камеру.

Качественным этапом в развитии вакуумных напылительных установок является переход от частичной автоматизации, т. е. автоматического контроля работы отдельных систем установки и автоматического поддержания некоторых параметров процесса, к полностью автоматическому управлению работой всей установки и всем технологическим процессом нанесения покрытия с его математическим моделированием, обработкой результатов измерений и корректировкой параметров, т. е. выполнению функций опытного оператора без его участия, что сводит к минимуму брак за счет возможных ошибок оператора.

Подтверждением является следующий наглядный пример. При нанесении однослойного четвертьволнового покрытия из MgF_2 на установке с ручным управлением оператор за цикл напыления выполняет 31 операцию, связанную с переключением режимов, снятием показаний или регулированием, при общей длительности процесса менее одного часа. При изготовлении сложного светоделительного покрытия, состоящего из 43 чередующихся слоев TiO_2 и SiO_2 , приходится выполнять уже 1118 операций с увеличением длительности процесса до нескольких часов. Соответствующим образом возрастает психологическая нагрузка на оператора и резко увеличивается возможность ошибки с его стороны, что приведет к значительному снижению процента выхода годных деталей. Нанесение в ручном режиме управления установкой ста и более слоев, необходимых при изготовлении новейших типов покрытий, представляется просто

немыслимым. Однако необдуманый подход к вопросам автоматизации процессов может привести к эффектам, которые в сумме создадут «автоматизированное производство брака». Перед введением автоматизации процессов должно быть тщательно взвешено соотношение ожидаемых выгод с затратами на приобретение нового автоматизированного оборудования, подготовку и содержание квалифицированного обслуживающего персонала, переподготовку операторов и т. д. Тем не менее проблемы переходного периода автоматизации не должны преуменьшать революционизирующий фактор ее широкого внедрения в разработку и производство оптических покрытий.

Системы автоматического управления, используемые в УВН, обеспечивают различные уровни автоматизации, которые можно разделить на три основные группы:

– автоматизация отдельных операций на основе релейных схем при общем ручном управлении (операции переключения клапанов, блокирования, аварийного отключения, поддержания заданных значений температуры и давления и т. п.);

– автоматизация и программирование отдельных технологических процессов и операций на основе релейных схем и микропроцессоров при общем контроле со стороны оператора и его периодическом вмешательстве (автоматизация откачки, операций по обработке подложек, автоматическое нанесение слоев и т. п.);

– полностью автоматизированный программируемый процесс от момента загрузки подложек до их выгрузки с помощью центральной ЭВМ-установки или ЭВМ-цеха (участка) с возможностью автоматического контроля параметров, их коррекции и быстрой перенастройки на различные технологические процессы.

Автоматизация третьего уровня осуществляется на основе достаточно мощной ЭВМ (персонального компьютера) с обширной библиотекой специализированных программ управления и обработки.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для осуществления процессов нанесения тонкопленочных покрытий в вакууме используется модернизированная установка вакуумного напыления УРМ 3.279.017 (рис. 4.7). Вакуумная система включает в себя цилиндрическую рабочую камеру, механический пластинчато-роторный насос НВР-5Д14 со скоростью откачки 5 л/с, диффузионный насос со скоростью откачки 450 л/с, высоковакуумный затвор, азотную ловушку.

Управление установкой ручное. Подколпачные устройства включают в себя горизонтальную карусель с подложкодержателями, приводимую во вращение электродвигателем РД-9 с редуктором или вручную, двухлучевой ионный источник с анодным слоем, водоохлаждаемый блок мишеней, резистивный испаритель, лампу для освещения камеры. Питание ионного источника осуществляется блоком питания БП-94. Испаритель запитывается через сильно-

точный трансформатор. Ток через испаритель регулируется лабораторным автотрансформатором. Установка оснащена вакуумметром ВИТ-2, системой напуска рабочих газов с ручными игольчатыми натекателями.

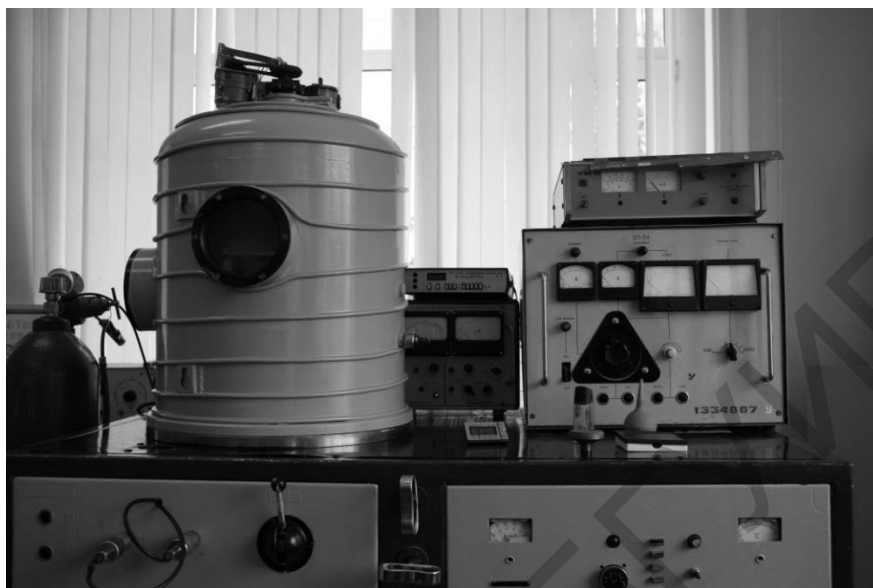


Рис. 4.7. Внешний вид установки УРМ 3.279.017

В качестве ионного источника используется двухлучевой плазменный ускоритель с анодным слоем, упрощенная схема которого представлена на рис. 4.8. Он позволяет формировать два независимых пучка ионов: из верхней ступени в виде полого цилиндра и конусообразный из нижней ступени. Первый пучок предназначен для ионной очистки, второй – для распыления мишени.

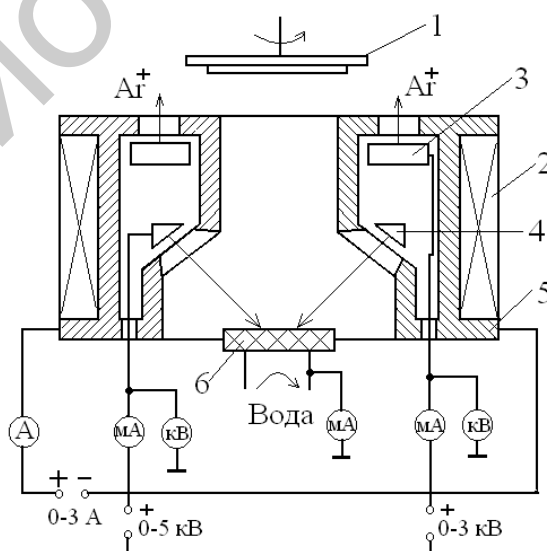


Рис. 4.8. Упрощенная схема двухлучевого плазменного ускорителя с анодным слоем:
 1 – подложкодержатель; 2 – соленоид; 3 – анод верхней ступени; 4 – анод нижней ступени;
 5 – магнитопровод; 6 – мишень, охлаждаемая водой

Общий вид конструкции ионного источника и карусели с подложкодержателями представлен на рис. 4.9.

Конструктивно ионный источник выполнен в виде полого цилиндра. Корпус источника изготовлен из магнитомягкого материала (Ст3), т. к. одновременно выполняет роль несущей конструкции и магнитопровода, по которому магнитное поле от своего источника направляется в разрядный промежуток. В качестве источника магнитного поля используется соленоид, выполненный из медной проволоки, намотанной на каркас из немагнитного материала (сплав Д16). Каждый из ускорителей имеет индивидуальное газо- и энергообеспечение.



Рис. 4.9. Общий вид конструкции ионного источника и карусели с подложкодержателями

Для эффективного охлаждения анода распыляющей мишени ступени ионного источника к анодному кольцу приварена трубка из меди или нержавеющей стали, по которой во время работы пропускается холодная вода. Аноды обеих ступеней ионного источника изолированы от корпуса керамическими и фторопластовыми изоляторами.

Для контроля толщины наносимого покрытия применяется метод «свидетеля». Контроль электрического сопротивления «свидетеля» осуществляется цифровым вольтметром В7-27.

В качестве рабочего газа используется аргон газообразный, чистый марки «А», ГОСТ 10157–73. Для измерения удельного поверхностного сопротивления применяется четырехзондовый метод с использованием цифрового измерителя ИУС-3. Толщина пленок измеряется с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством установки УРМ 3.279.017.
2. Под руководством инженера провести процессы формирования тонкопленочных покрытий из алюминия и никеля с использованием резистивного испарения и ионно-лучевого распыления соответственно.

3. В процессе нанесения пленки никеля осуществлять контроль сопротивления «свидетеля» через каждые 30 с. Построить график полученной зависимости.

4. Определить величины холостого и рабочего времени процесса формирования пленок, рассчитать производительность установки по формулам (4.1)–(4.3).

5. Измерить толщину полученных пленок на микроскопе МИИ-4, рассчитать скорость нанесения покрытий. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

6. Измерить удельное поверхностное сопротивление ρ_{\square} с помощью прибора ИУС-3. Сравнить измеренную величину с ρ_{\square} покрытия, нанесенного на «свидетель».

7. Рассчитать величину удельного объемного сопротивления покрытий.

8. Ознакомиться с проспектами отечественных и зарубежных фирм по вакуумной технике.

9. Изучить конструкции испарителей, ионных источников, магнетронов, электронно-лучевого испарителя, кварцевого датчика, нагревателей, натекателей, шлюзового устройства (стенд «Элементы газо- и гидросистем оборудования»), планшеты «Испарители», «Электронно-лучевое испарение»).

10. По индивидуальному заданию преподавателя подготовить детальное описание конструкции и принципа работы одного из технологических модулей и устройств УВН.

11. Оформить отчет по лабораторной работе.

Таблица 4.1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	τ_p , мин	$\tau_{\text{ч}}$, мин	Q , шт./ч	Метод нанесения	Материал	t_n , мин	Толщина, мкм	V_n , нм/с

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Упрощенная схема двухлучевого ускорителя с анодным слоем.
3. Режимы нанесения пленок, результаты измерений холостого и рабочего времени, результаты расчетов скорости нанесения и производительности, удельного объемного сопротивления.
4. Результаты выполнения индивидуального задания.
5. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие требования предъявляются к вакуумному оборудованию?
2. Что входит в состав оборудования для нанесения покрытий в вакууме?
3. Какова конструкция и принцип работы электронно-лучевого испарителя?
4. Какова конструкция и принцип работы магнетрона?

5. Какова конструкция и принцип работы ионного источника на основе ускорителя с анодным слоем?
6. Какие есть разновидности термического испарения и ионного распыления?
7. Каковы конструкции вакуумных камер и устройств для нагрева подложек?
8. Что входит в состав гидравлических и газовых систем?
9. Каковы тенденции проведения автоматизации УВН?

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакуумные системы технологического оборудования : учебник / Л. В. Кожитов [и др.]. – М. : Изд. дом «Руда и металлы», 2002. – 455 с.
2. Машиностроение: энциклопедия : в 40 т. / ред. совет: К. В. Фролов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1994–2012. – Т. III-8 : Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении / Ю. В. Панфилов [и др.] ; под общ. ред. Ю. В. Панфилова. – 2000. – 744 с.
3. Свадковский, И. В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / И. В. Свадковский ; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Бестпринт, 2002. – 214 с.

ТОРЦЕВОЙ ХОЛЛОВСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ

Цель работы: изучение конструкции и принципа работы ионного источника на базе торцевого холловского ускорителя, ознакомление с технологическим оборудованием, проведение процесса модификации поверхности полимеров ионными пучками активных газов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Устройства для получения пучков ионов называются автономными ионными источниками. Так как в газоразрядной плазме содержится много свободных ионов, то наиболее перспективный способ генерации ионных потоков основан на извлечении ионов из плазмы. Основной функцией ионного источника является сообщение нейтральным атомам и молекулам вещества такого количества энергии, какого было бы достаточно для их ионизации. Чаще всего ионизация осуществляется электронным ударом по атому. Свободные электроны появляются либо из накаливаемого термокатода, либо из остаточного и рабочего газов, где они генерируются за счет воздействия естественных ионизирующих излучений. В результате произошедшей ионизации в источнике устанавливается определенная концентрация заряженных частиц, их вытягивание и формирование в пучок требуемого сечения является назначением ионно-оптической системы. Различают источники с накаливаемым и холодным катодом, источники с ВЧ-разрядом. Конструктивное исполнение источника зависит от системы экстракции и формирования ионного пучка. Известны источники с аксиальным или поперечным (относительно направления магнитного поля) выводом, причем выходной пучок может быть цилиндрическим или ленточным. В технологических приложениях широко используются многопучковые источники, формирующие однородные ионные пучки с поперечными размерами до нескольких десятков сантиметров [1].

Многообразие требований, предъявляемых к ионным пучкам в различных случаях применения, не позволили до настоящего времени создать универсальный ионный источник. Основными конструктивными элементами плазменных источников ионов являются:

- разрядная камера;
- катодный узел;
- ионно-оптическая система формирования пучка;
- магнитная система (в источниках с магнитным полем);
- система подачи рабочего вещества;
- вакуумная система;
- система электропитания;
- система контроля и управления.

Технические возможности ионно-лучевой установки во многом определяются типом ионного источника. Разнообразие типов разработанных источников обусловлено в первую очередь различными эксплуатационными требованиями к ним. Выбор конкретного типа ионного источника для использования в технологической или экспериментальной установке осуществляют на основе сравнения их основных технических характеристик. Такой выбор обычно обусловлен требованиями к ионному потоку и непосредственно к самому источнику.

Ионный поток можно охарактеризовать следующими основными параметрами [2]:

- общим током пучка, максимальное значение которого определяется «яркостью» источника; обычно яркость ионных источников значительно меньше, чем электронных, и не превышает $100 \text{ A}/(\text{cm} \cdot \text{m}^2)$;

- однородностью ионного потока, определяемой составом пучка по массе и зарядности ионов; состав оценивается или в процентах, или значением тока для каждого типа ионов;

- распределением ионов по энергиям (моноэнергетичностью) относительно среднего значения; это распределение зависит от типа источника и режима его работы;

- стабильностью тока, позволяющей использовать ионный поток для технологических целей; количественно нестабильность оценивают степенью модуляции;

- расходимостью пучка, определяемой системой формирования ионного потока и направленного пучка и зависящей от режима работы источника.

Эксплуатационные особенности источников оцениваются целой группой характеристик. В этой группе можно выделить следующие основные характеристики: режим работы (стационарный или импульсный); возможность ионизовать вещества в их различных состояниях; коэффициент использования рабочего вещества (для газовых источников – газовая экономичность, определяемая отношением числа выходящих из источника ионов к числу атомов газа, вводимых в источник); легкость управления ионами по энергиям; необходимость в принудительном охлаждении; светосила, определяемая как отношение числа выходящих из источника ионов к их общему числу в источнике (обычно это величина порядка 0,1–1 %). При выборе источника следует учитывать его экономичность – ионный ток, приходящийся на единицу мощности, подводимой к источнику.

Важной характеристикой применения источников в технологических установках является их долговечность, определяемая как период непрерывной работы (в часах) без замены деталей и разборки источника. Простота конструкции, особые требования к блокам питания и управления также важны при выборе типа источника.

В настоящее время разработано и эксплуатируется большое число источников различных типов. Для процессов нанесения и травления тонких пленок наибольшее распространение получили сеточные ионные источники, называе-

мые также источниками Кауфмана. В таком источнике разряд локализуется между стенками анодного цилиндра, термокатодом и системой экстракции (рис. 5.1). Осцилляция электронов в продольном магнитном поле и электрическом поле, образованном системой электродов, приводит к увеличению эффективности ионизации рабочего газа. Отличительной особенностью конструкции источника является наличие двух- или трехэлектродной многоапертурной ионно-оптической системы (ИОС), предназначенной для экстракции и формирования ионного потока, состоящего из множества (до 1000) отдельных пучков.

ИОС представляет собой две или три сетки с отверстиями одинакового диаметра. Число отверстий соответствует числу ионных пучков. Сетки имеют вид плоских или выгнутых в сторону разряда тонких металлических или графитовых дисков. Каждая из сеток (экстрагирующая, ускоряющая, замедляющая) имеет определенный потенциал. Экстрагирующая сетка находится под высоким (до 8 кВ) отрицательным потенциалом, замедляющая сетка – под нулевым потенциалом (заземлена). Преимуществами таких источников являются низкое напряжение разряда (~20 В), что уменьшает степень распыления стенок камеры, моноэнергетичность ионного пучка, высокий КПД, низкое рабочее давление.

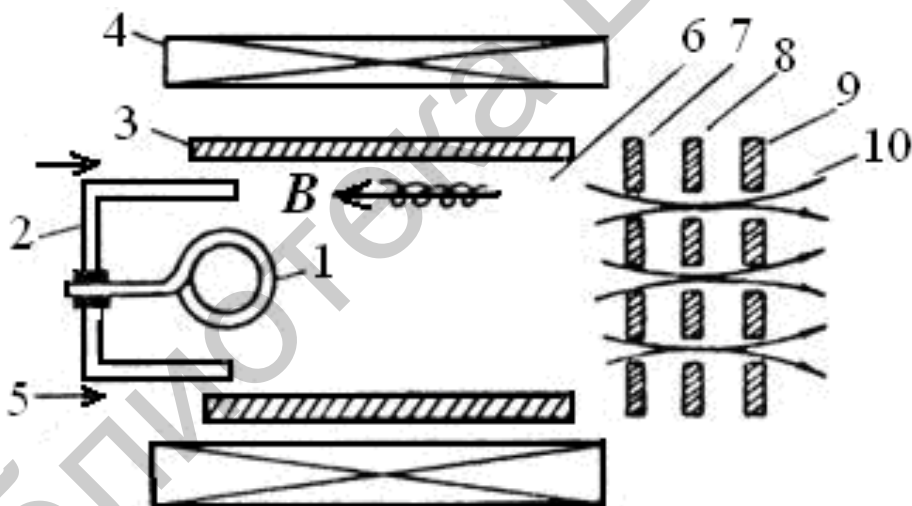


Рис. 5.1. Многолучевой источник Кауфмана:

- 1 – термокатод; 2 – экран катода; 3 – цилиндрический анод; 4 – соленоид; 5 – ввод рабочего газа; 6 – плазма; 7 – экстрагирующий электрод; 8 – ускоряющий электрод; 9 – замедляющий электрод, 10 – ионный пучок

К недостаткам можно отнести использование термокатода, что ограничивает срок службы источника и не позволяет работать с химически активными рабочими веществами, сложность конструкции, использование многих блоков питания. Многоапертурные источники ионов серийно выпускаются в США фирмами Veeco, Commonwealth Scientific, Ion Tech, CSC и др. На рис. 5.2 показан внешний вид такого источника и ионного пучка.

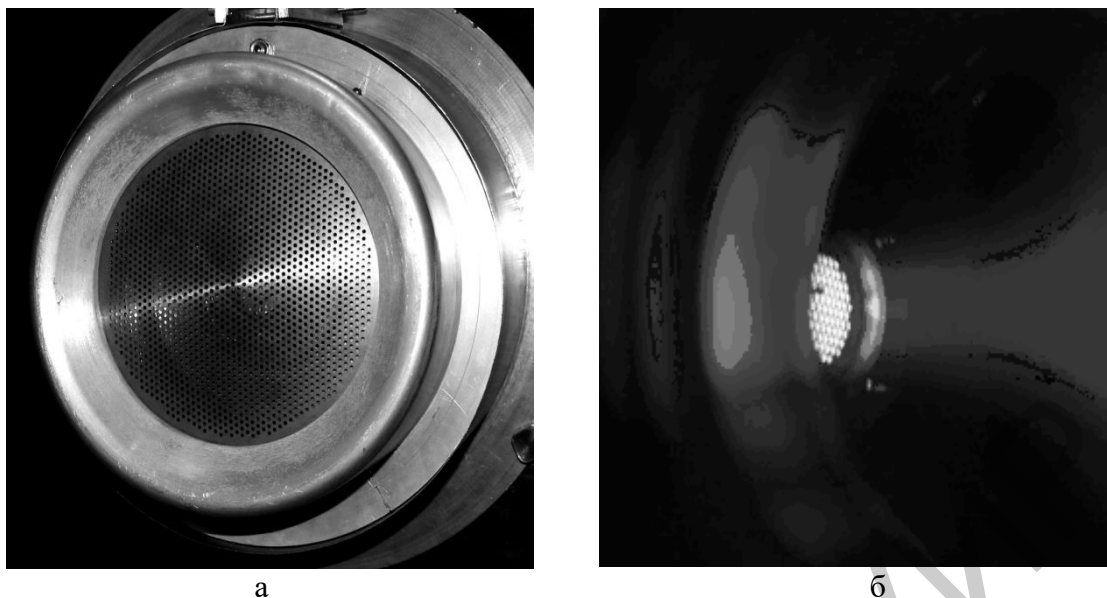


Рис. 5.2. Внешний вид многолучевого источника Кауфмана (а) и ионного пучка (б)

В технологии нанесения и травления тонкопленочных покрытий, очистки и модификации поверхности наибольшее распространение получили источники, в которых ионы образуются и ускоряются в скрещенных электрическом и магнитном полях. Преимуществом таких источников на основе плазменных ускорителей является совмещение областей образования и ускорения ионов. В этих устройствах (рис. 5.3) ионизация газа производится встречным потоком электронов, замагниченных в поперечном магнитном поле, ускорение ионов происходит без нарушения квазинейтральности плазмы в зоне разряда, что снимает ограничения на плотность отбираемого ионного тока. Одна из модификаций этого класса устройств, имеющая металлические стенки ускорительного канала, получила название ускорителя с анодным слоем (УАС).

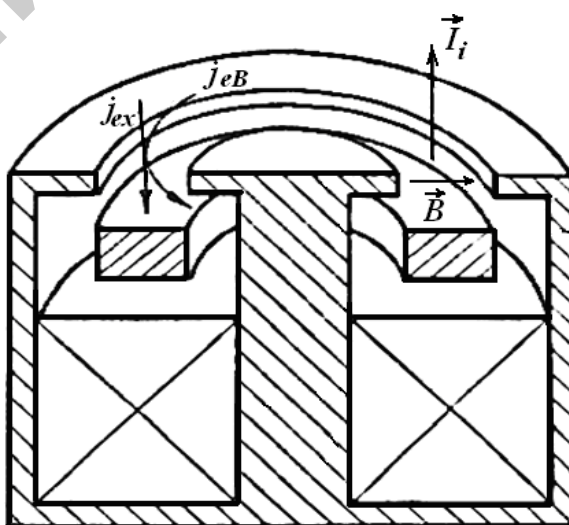


Рис. 5.3. Источник ионов с холловским током

Ионные источники на основе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов впервые были разработаны в качестве двигателей для космических аппаратов, но оказались востребованными и в технологии формирования тонкопленочных покрытий. Ток ионного пучка может изменяться от единиц миллиампер до единиц ампер при энергии ионов до 3 кэВ. Источник имеет магнитную систему, которая создает магнитное поле между внутренним и внешним полюсами магнитопровода. После подачи положительного потенциала на анод между ним и катодом формируется область со скрещенными аксиальным электрическим и радиальным магнитным полями, что способствует возникновению электрического разряда [3]. В этом случае электроны дрейфуют в азимутальном направлении по замкнутым траекториям, многократно ионизуя атомы рабочего газа и постепенно диффундируя к аноду. Образовавшиеся ионы ускоряются сильным электрическим полем и покидают ионный источник через щель ускоряющего канала. Средняя энергия ионов в ионном источнике с анодным слоем составляет примерно 0,5–0,6 от величины анодного напряжения. Конструкция аксиального ионного источника приведена на рис. 5.4, а, внешний вид сфокусированного ионного пучка – на рис. 5.4, б.

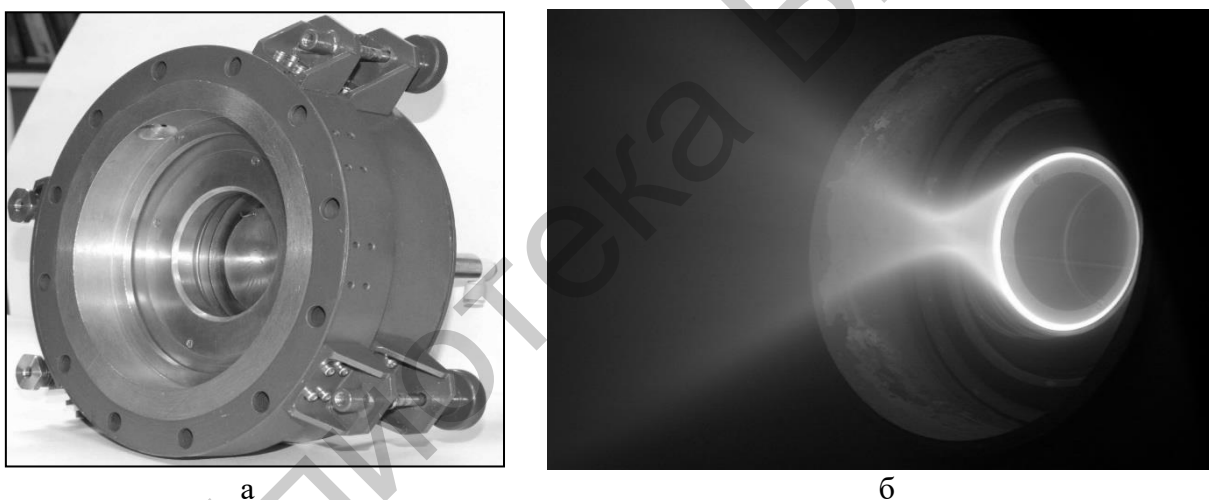


Рис. 5.4. Конструкция аксиального ионного источника (а) и внешний вид сфокусированного ионного пучка (б)

Ионные источники на основе УАС имеют простую конструкцию, долговечны (отсутствует термокатод), позволяют осуществлять фокусировку ионного пучка изменением формы полюсов магнитопровода, что позволит распылять мишени малых габаритов. При использовании постоянных магнитов для создания магнитного поля требуется только один блок питания для создания ускоряющего напряжения. Можно использовать как аксиальные (цилиндрические), так и протяженные (линейные) конструкции источников на основе УАС. К недостаткам источников относятся возможность распыления стенок ускоряющего канала, высокое минимальное значение энергии ионов (около 200 эВ) и незначительный ионный ток в диапазоне энергий до 1 кВ, отсутствие независимого контроля тока и энергии ионов.

Видоизменение разрядной области УАС, при котором ускорительный канал ориентируется не параллельно оси устройства, а под некоторым углом к нему позволяет устранить недостатки УАС. При этом сторона анода, формирующая направление ускорения ионов, вырождается в поверхность конической формы, а внутренние полюсные наконечники смещены внутрь устройства таким образом, что формируемое магнитное поле имеет значительную осевую составляющую и параллельно рабочей поверхности анода. Подобная схема источника реализована в торцевом холловском ускорителе (ТХУ) (рис. 5.5). Потенциал зажигания разряда ТХУ составляет 35–60 В. При увеличении анодного напряжения происходит значительный рост разрядного тока вплоть до 10 А.

Схема источника, реализованная в торцевом холловском ускорителе, также разработанном Кауфманом, позволяет обеспечить эффективную ионизацию при больших давлениях рабочего газа за счет конфигурации, при которой направление электрического поля практически совпадает с направлением магнитного поля, что минимизирует воздействие на электрон при транспортировке.

Для ТХУ в качестве источника электронов применяются накаливаемые термокатоды, полые катоды, плазменно-мостовые нейтрализаторы. При процессах в ТХУ часть электронного потока направлена в разряд для поддержания процесса ионообразования, а часть необходима для компенсации пространственного заряда ионного потока.

К недостаткам ТХУ, предназначенных для процессов нанесения пленок, относятся значительный разброс энергии ионов и ограничения, связанные с использованием активных рабочих газов для длительных процессов.

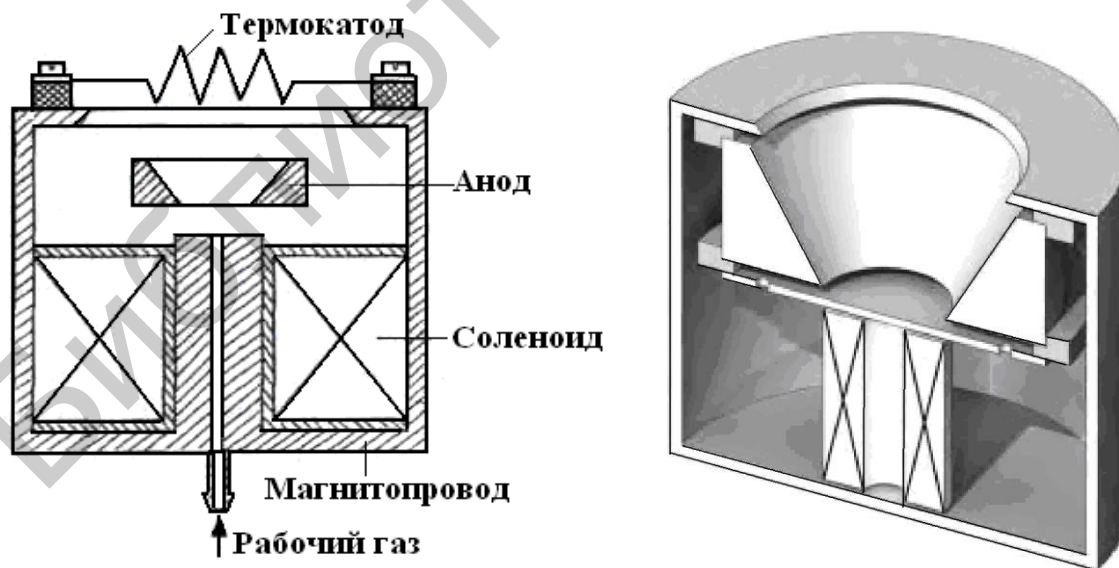


Рис. 5.5. Ионный источник типа ТХУ

Конструкция и принцип действия торцевого холловского ускорителя изображены на рис. 5.6.

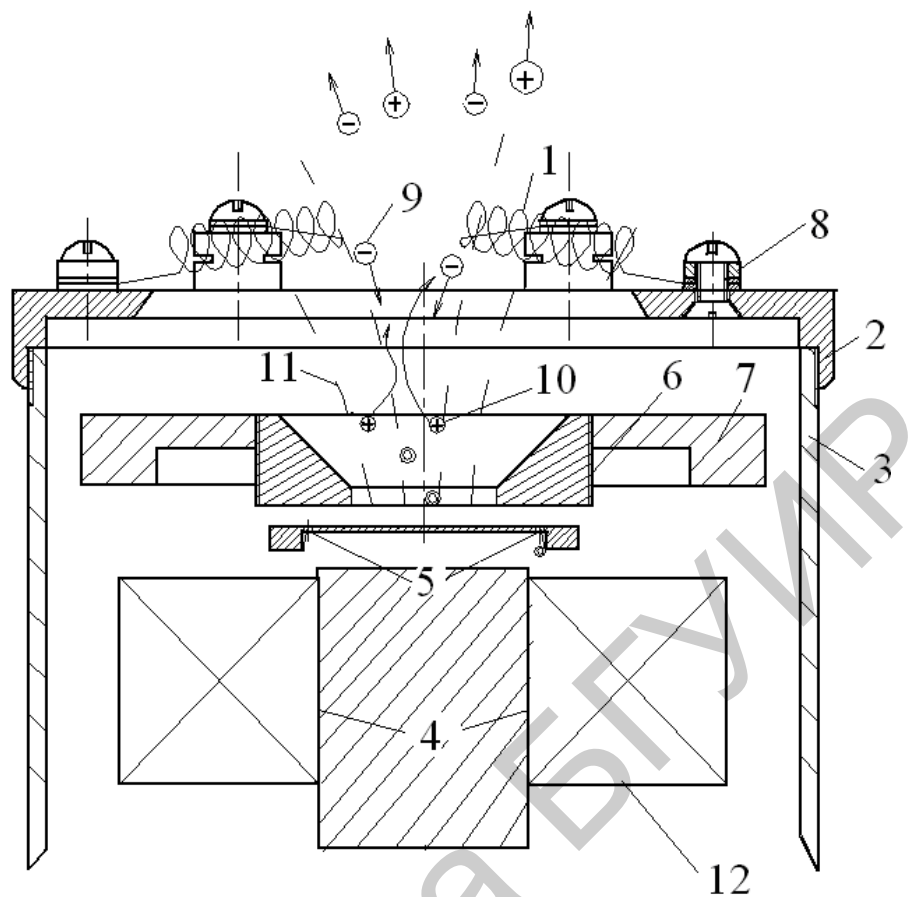


Рис. 5.6. Конструкция ионного источника на базе ТХУ:

- 1 – термокатод; 2 – магнитопровод; 3 – корпус источника; 4 – центральный магнитопровод;
 5 – газораспределитель; 6 – анод; 7 – держатель анода; 8 – изолированный контакт термокатада; 9 – электроны; 10 – ионы; 11 – магнитные силовые линии;
 12 – магнитная система

Нейтральные атомы или молекулы рабочего газа подаются в ионный источник через отверстия в газораспределителе 5. Быстрые электроны 9 от термокатада 1 следуют вдоль магнитных силовых линий 11 в обратном направлении в область разряда, охваченную анодом 6, бомбардируя атомы или молекулы в этой области. Некоторые такие соударения создают ионы 10. Смесь электронов и ионов в области разряда образует проводящий газ или плазму. Поскольку плотность нейтральных атомов или молекул уменьшается от анода к катоду, то большинство ионизирующих столкновений происходит в области, охваченной анодом.

Такие ионные источники позволяют формировать широкие пучки ионов любых газов. Они могут быть как цилиндрические, так и протяженные, что обеспечивает высокую равномерность покрытий по толщине. ТХУ имеют простую конструкцию, надежны в эксплуатации. Для функционирования таких устройств не требуется применения высоковольтного питания. На рис. 5.7 приведена конструкция аксиального ТХУ и внешний вид ионного пучка. В качестве источника электронов используется плазменно-мостовой нейтрализатор.

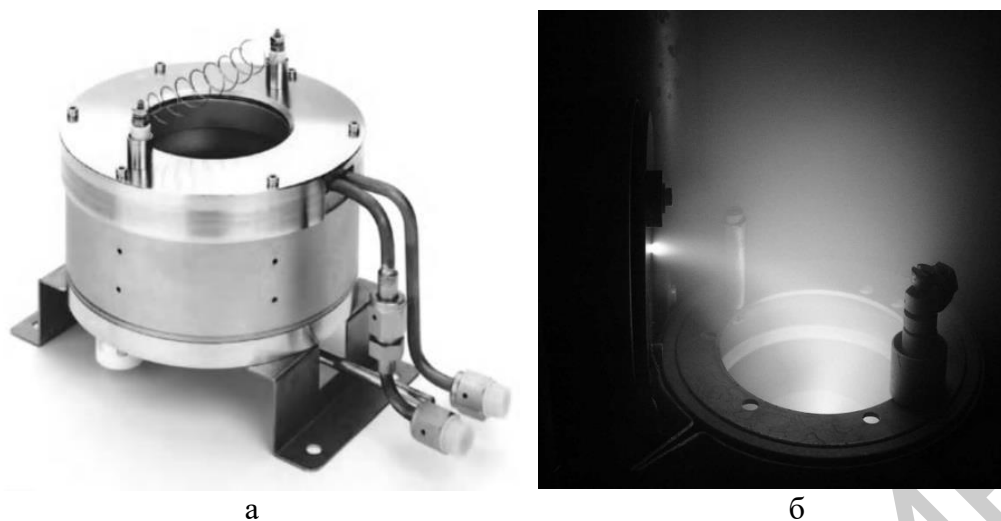


Рис. 5.7. Конструкция аксиального ТХУ (а) и внешний вид ионного пучка (б)

Модификация поверхности полимерных материалов

Как правило, полимерные материалы характеризуются низкими значениями поверхностной энергии, плохо смачиваются растворителями, плохо склеиваются, имеют низкую адгезию к нанесенным тонкопленочным слоям. Для улучшения смачивания и адгезии применяются различные методы модификации поверхности полимеров.

Из физических методов активации поверхности практический интерес представляют газопламенная обработка, активация ионизирующим излучением, коронным зарядом, пучками электронов, радикалов, а также активация в плазме и др. При воздействии ионизирующих излучений на полимерные материалы в поверхностном слое образуются полярные группы, происходит сшивание молекул, а также их деструкция. Для активации используют рентгеновские и гамма-лучи, электроны, протоны, а также ультрафиолетовое и лазерное облучение. Оборудование для облучения с учетом техники безопасности достаточно сложное. При облучении полимеров частицами высокой энергии, в том числе и ускоренными электронами, наблюдаются выделение водорода и газообразных углеводородов, образование C–C= связей между молекулами, сшивка и окислительные реакции. Протонное облучение приводит к незначительной деструкции полимера. Масс-спектры газообразных продуктов радиолитического разложения содержат ацетальдегид, водород и хлороводород.

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации поверхности полимеров является воздействие низкотемпературной плазмы, которое позволяет изменить свойства поверхностей этих материалов в широких пределах и значительно расширить области их использования. Экологически чистые современные плазмохимические методы значительно выигрывают по сравнению с химической модификацией, при которой используются вредные химические реагенты. Наиболее важной особенностью процесса плазмохимической модификации полимерных материалов, определяющей особый инте-

рес к этому методу, является то, что изменениям подвергается только обрабатываемая поверхность материала и очень тонкий приповерхностный слой, толщина которого по разным оценкам составляет от 100 ангстрем до нескольких микрон. Основная же масса полимера не изменяется, сохраняя механические, физико-химические и электрофизические свойства модифицируемого материала. Воздействие плазмы на поверхность полимера позволяет изменять в основном его контактные свойства (смачивание, адгезию к тонким пленкам, способность к склеиванию, адгезию используемых при печати красителей и т. п.). Как правило, улучшение адгезионных свойств полимеров под воздействием плазмы связано не только с очисткой поверхности от различного рода загрязнений, но и с образованием гидрофильных групп различной химической природы, обеспечивающих высокие адгезионные свойства модифицированных поверхностей. Состав, структура и свойства таких полярных групп зависят как от природы полимера, так и от свойств плазмы и природы плазмообразующего газа. Если в качестве рабочего газа плазмы используется кислород или воздух, то на поверхности полимера образуются кислородсодержащие полярные группы (карбонильные, карбоксильные, эфирные и т. п.). Воздействие разряда в атмосфере инертных газов приводит к образованию активных свободных радикалов, которые на воздухе превращаются в гидроперекисные и перекисные, а затем – в стабильные кислородсодержащие полярные группы. На рис. 5.8 приведены методы плазменной модификации поверхности полимеров.



Рис. 5.8. Методы плазменной модификации

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на модернизированной вакуумной установке ВУ-1А. Она оснащена пластинчато-роторным насосом, насосом Рутса со скоростью откачки 50 л/с, паромасляным диффузионным насосом со скоростью откачки 1500 л/с. В камере может быть смонтирован четырехпозиционный вращающийся либо нагреваемый неподвижный подложкодержатель.

Установка оснащена ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя. В ионный источник рабочие газы подаются с применением игольчатых натекателей. Давление в рабочей камере контролируется вакуумметром ВИТ-2. В качестве рабочих газов используются аргон высшей очистки, кислород, азот. Упрощенная схема подколпачного устройства приведена на рис. 5.9, а внешний вид – на рис. 5.10.

Для подачи напряжения на соленоид используется источник питания ВС-24м. Источник питания ИП-50 используется для подачи напряжения на термокатод. А с помощью источника питания ИП-250/10 подается напряжение на анод.

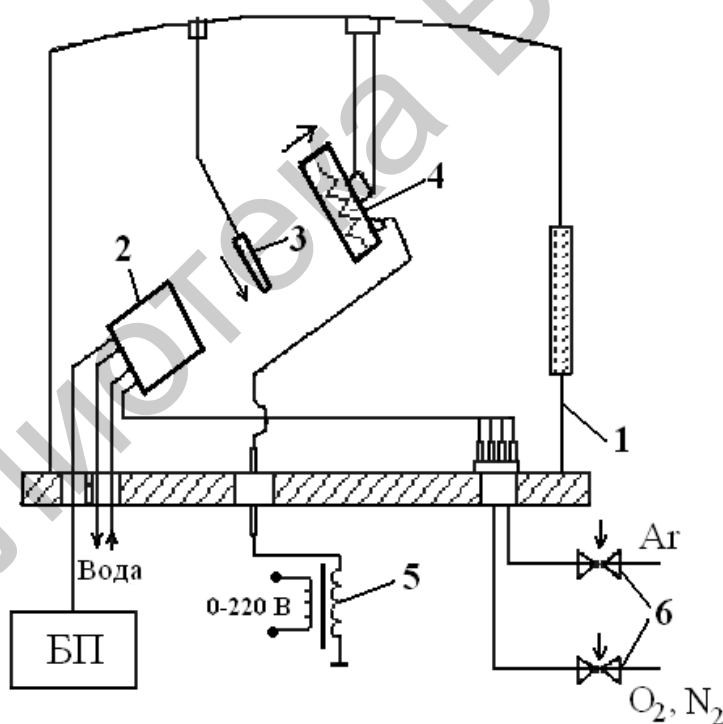


Рис. 5.9. Схема подколпачного устройства:

1 – вакуумная камера; 2 – ионный источник; 3 – зонд-коллектор; 4 – подложкодержатель с подогревом; 5 – трансформатор питания подложкодержателя; 6 – газовые натекатели

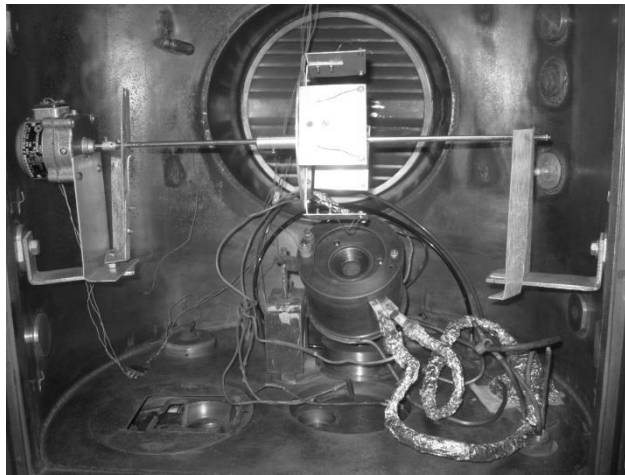


Рис. 5.10. Внешний вид подколпачного устройства

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями по лабораторной работе.
2. Закрепить на подложкодержателе подложку из поликарбоната, закрыть камеру и осуществить процесс откачки вакуумной камеры до остаточного давления $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.
3. Подать в ионный источник аргон и установить давление в камере $(8-10) \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.
4. Включить источники питания ВС-24м, ИП-50 и ИП-250/10.
5. На источнике питания ВС-24м установить ток, равный 3–4 А.
6. На источнике питания ИП-50 установить ток эмиттера электронов 12–13 А.
7. Изменяя напряжение на аноде поворотом ручки «Регулировка выхода» на источнике питания ИП-250/10, снять зависимость тока разряда от напряжения на аноде $I_p = f(U_a)$.
8. Установить ток компенсатора 10 А и снять зависимость тока разряда от напряжения на аноде $I_p = f(U_a)$.
9. Отключить приборы в обратной последовательности и перекрыть подачу аргона.
10. Подать в ионный источник воздух до давления в $8 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.
11. Установить ток эмиттера электронов 12–13 А, ток разряда – 1 А.
12. Провести процесс модификации поверхности поликарбоната в течение 5 мин.
13. Извлечь подложку из камеры, нанести на ее поверхность каплю дистиллированной воды и визуально оценить угол смачивания. Провести то же самое и на необработанной подложке.
14. Оформить отчет о проделанной работе.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Схема технологической установки.
3. Результаты экспериментов.
4. Графики зависимостей $I_p=f(U_a)$.
5. Анализ полученных результатов и выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие разновидности автономных ионных источников вы знаете?
2. Каковы требования к ионным источникам?
3. Каковы характеристики ионных источников?
4. Каковы основные узлы ионных источников?
5. Какова конструкция и принцип работы сеточного источника Кауфмана?
6. Каков принцип действия ионного источника на основе УАС?
7. Какова конструкция и принцип работы торцевого холловского ускорителя?
8. Какие методы модификации поверхности полимерных материалов вы знаете?

ЛИТЕРАТУРА

1. Сवादковский, И. В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / И. В. Сवादковский ; под ред. А. П. Достанко. – Минск : Бестпринт, 2002. – 214 с.
2. Коткин, В. В. Технология ионных источников : учеб. пособие / В. В. Коткин. – М. : МИФИ, 1990. – 86 с.
3. Браун, Я. Физика и технология источников ионов / Я. Браун. – М. : Мир, 1998. – 420 с.

Учебное издание

Телеш Евгений Владимирович
Соловьев Ярослав Александрович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДУЛИ И УСТРОЙСТВА
ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 09.01.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,53. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 30 экз. Заказ 277 .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/238 от 24.03. 2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6