

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)

Лабораторная работа 2.3.1

Получение и измерение вакуума

Янковский Д. С.
Б01-405

Долгопрудный, 2025

Содержание

1	Введение	4
2	Методика	5
3	Результаты и их обсуждение	6
4	Выводы	9
5	Приложение	10
5.1	Приложение 1	10
5.2	Приложение 2	11
5.3	Приложение 3	12
5.3.1	Форвакуумный насос (ФН)	12
5.3.2	Диффузионный насос (ВН)	13
5.3.3	Термопарный манометр (M_1, M_2)	14
5.3.4	Ионизационный манометр (И)	15
5.4	Приложение 4	16
5.5	Приложение 5	17
5.6	Приложение 6	18
6	Список литературы	19

Аннотация

Определена скорость откачки воздуха из вакуумной системы по зависимости давления в системе от времени откачки. Также определена скорость откачки воздуха при наличии искусственной течи в системе. Измерения проводились с помощью диффузионного и форвакуумного насосов, подключённых к системе сосудов. В результате получено, что скорость откачки системы при отсутствии течи составила $(3.17 \pm 0.13) \cdot 10^2 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$, что меньше скорости откачки $(27 \pm 10) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$ при наличии искусственной течи. Из этого следует, что скорость откачки зависит не только от производительности насоса, но и от пропускной способности трубопровода.

1 Введение

В современном мире полупроводниковая промышленность является одной из ключевых отраслей, определяющих развитие электроники, информационных технологий и других сфер. Производство полупроводниковых устройств - сложный и многоступенчатый процесс, требующий высокой точности и чистоты. Одним из аспектов обеспечения этих требований является использование вакуумных технологий.

Скорость откачки вакуумных систем играет важную роль в технологических операциях, таких как нанесение тонких пленок, ионное травление и других процессах, связанных с созданием полупроводниковых структур. Недостаточная скорость откачки может привести к загрязнению рабочих камер, образованию дефектов и к снижению качества выходной продукции.

Исследование влияния скорости откачки вакуумных систем на эффективность и качество процессов производства является значимой задачей.

Целью настоящей работы является измерение скорости откачки вакуумной системы при различных параметрах системы.

2 Методика

Из литературы [1] известно, что давление P в сосуде при откачке зависит от времени t так

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}t\right) + P_{\text{пр}} \quad (1)$$

где P_0 - начальное давление в системе, $P_{\text{пр}}$ - предельное давление воздуха при откачке, V - объем откачиваемой системы. Подробный вывод см. в [Приложение 1](#).

Если прологарифмировать правую и левую части выражения (1), получится

$$\ln(P - P_{\text{пр}}) = \ln P_0 - \frac{W}{V}t \quad (2)$$

Для количества газа $\frac{d(PV)}{dt}$, протекающего по трубке при высоком вакууме в единицу времени, справедливо выражение

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{l} \quad (3)$$

где r - радиус трубы, T - температура газа, R - универсальная газовая постоянная, μ - молярная масса газа, l - длина трубы, $P_2 - P_1$ - разность давления на концах трубы.

Чтобы определить скорость откачки W системы, необходимо измерить зависимость давления P воздуха в системе от времени t при откачке. Скорость откачки определяется через угловой коэффициент графика зависимости $\ln(P - P_{\text{пр}})(t)$ согласно выражению (2).

Чтобы определить поток $Q_{\text{н}}$ газа, текущего из насоса в откачиваемый объем, необходимо измерить зависимость давления P газа в установке от времени t при ухудшении вакуума. Для данного процесса выражение (7) принимает вид

$$V_{\text{вв}}dP = (Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}})dt \quad (4)$$

Пренебрегая явлением десорбции газа через стенки трубы, поток $Q_{\text{н}}$ можно вычислить через угловой коэффициент k графика зависимости $P(t)$ согласно следующему выражению

$$Q_{\text{н}} = V_{\text{вв}}k \quad (5)$$

Чтобы определить скорость $W_{\text{теч}}$ откачки воздуха при наличии искусственной течи через капилляр, необходимо измерить установившееся давление на концах капилляра и массовый расход $\frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt}$ воздуха через него с помощью выражения (3). Искомая скорость откачки находится из (6).

$$W_{\text{теч}} = \frac{\frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} \quad (6)$$

Подробный вывод выражения (6) см. в [Приложение 2](#).

3 Результаты и их обсуждение

Экспериментальная установка состоит из форвакуумного и диффузионного насосов, к которым присоединена система из трубок и сосудов. Подробное описание установки см. в [Приложение 3](#).

Для измерения давления в разных частях системы использовались термоманометры, масляный и ионизационный манометры. Описание их устройства см. в [Приложение 3](#).

Перед определением скорости откачки были измерены объемы форвакуумной $V_{\text{фв}}$ и высоковакуумной $V_{\text{вв}}$ частей установки (см. [Приложение 4](#)). Они составили $V_{\text{фв}} = (2010 \pm 40)\text{см}^3$, $V_{\text{вв}} = (1150 \pm 30)\text{см}^3$.

Для определения скорости откачки высоковакуумной части вся установка была откачана форвакуумным насосом до давления $3 \cdot 10^{-2}$ торр, и затем высоковакуумная часть установки была отделена от форвакуумной путем закрытия крана K_6 и откачана диффузионным насосом до давления $P_{\text{пр}} = 5.6 \cdot 10^{-5}$ торр, измеренного с помощью ионизационного манометра.

Затем высоковакуумная часть была отсоединена от насоса на некоторое время для ухудшения вакуума и присоединена обратно. Была измерена зависимость давления P воздуха в части от времени t откачки. Результаты измерений приведены в таблице (2). По результатам измерений построен график зависимости $\ln(P - P_{\text{пр}})(t)$ (1).

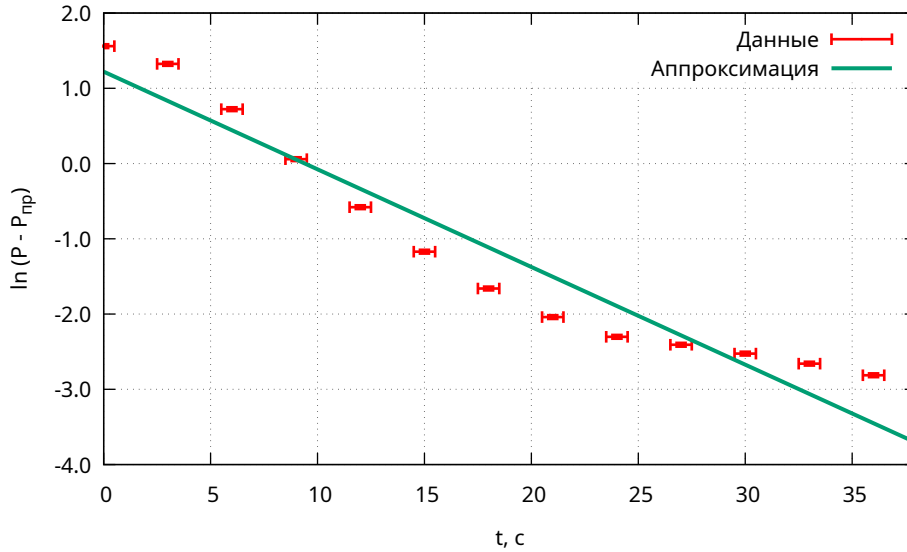


Рис. 1: Зависимость разности давления P в системе и предельного давления $P_{\text{пр}}$ измеренная в мм. рт. ст. от времени t в логарифмическом масштабе при улучшении вакуума.

С помощью метода наименьших квадратов определен угловой коэффициент $k = (-0.253 \pm 0.010)\text{с}^{-1}$ графика зависимости $\ln(P - P_{\text{пр}})(t)$, и, зная объем $V_{\text{вв}}$ откачиваемой системы, из (2) определена скорость откачки $W = (3.17 \pm 0.13) \cdot 10^2 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$. Таким образом, данный метод позволяет измерить скорость откачки с точностью 4.1%.

Также полезно знать величину потока Q_n газа, поступающего из диффузионного насоса в откачиваемую систему. Для этого был закрыт кран K_3 , чтобы прекратить откачку высоковакуумной части установки. При помощи ионизационного манометра была измерена зависимость давления P от времени t при ухудшении вакуума. Результаты измерений приведены в таблице 2 (Приложение 6). График зависимости $P(t)$ представлен на рис. (2).

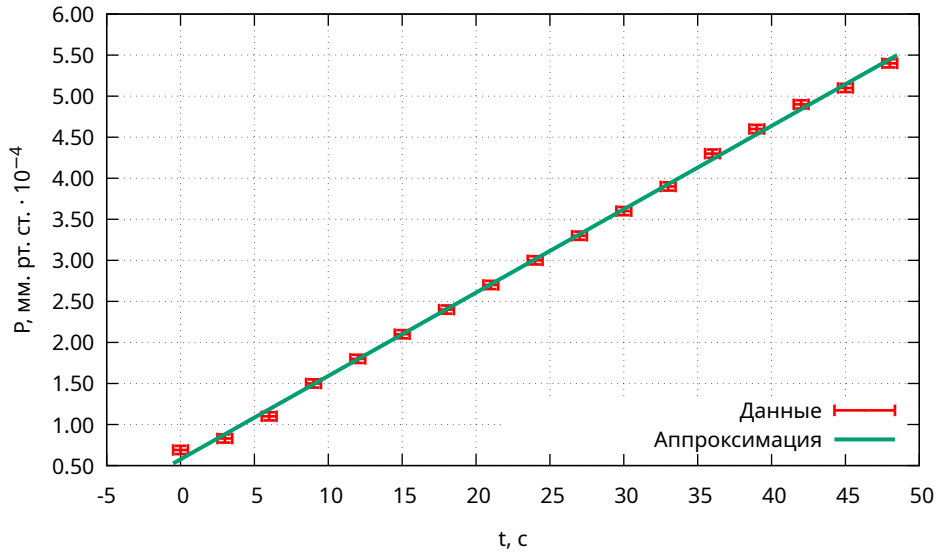


Рис. 2: Зависимость давления P в системе от времени t при ухудшении вакуума.

График аппроксимируется линейной зависимостью, из этого следует, что для описания зависимости давления газа от времени при ухудшении вакуума справедливо выражение (4).

С помощью метода наименьших квадратов определён угловой коэффициент $k = (6.4 \pm 1.0) \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст./с. Из (5) определён массовый поток Q_n газа, который составил

$$Q_n = (1.23 \pm 0.15) \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{с}.$$

Для определения скорости $W_{\text{теч}}$ откачки системы диффузионным насосом при наличии течи, был открыт кран K_6 , чтобы появилась искусственная течь через капилляр. Было измерено установившееся давление $P_{\text{уст}} = (5.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$ торр в высоковакуумной части и давление $P_{\text{фв}}$ со стороны форвакуумного насоса. По измеренным давлениям, а также параметрам установки, таким как температура воздуха $T = 298.7\text{K}$, длина $l = (10.8 \pm 0.1)\text{см}$, радиус $r = (0.40 \pm 0.05)\text{мм}$ капилляра был определен массовый расход воздуха через капилляр и по (6) определена скорость откачки. $W_{\text{теч}} = (27 \pm 10) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$.

Найденное значение скорости откачки оказалось меньше при наличии течи, чем при её отсутствии. Это можно обосновать тем, что после создания течи эффективная пропускная способность системы вместе с капил-

ляром снизилась, что не позволило достичь максимальной производительности насоса. Из этого следует, что скорость откачки зависит не только от производительности насоса, но и от пропускной способности трубопровода.

4 Выводы

Скорость откачки $W = (3.17 \pm 0.13) \cdot 10^2 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$ системы при отсутствии течи оказалась больше скорости откачки $W_{\text{теч}} = (27 \pm 10) \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$ при наличии искусственной течи через капилляр. Это можно обосновать тем, что после создания течи эффективная пропускная способность системы вместе с капилляром снизилась, что не позволило достичь максимальной производительности насоса. Из этого следует, что скорость откачки зависит не только от производительности насоса, но и от пропускной способности трубопровода.

5 Приложение

5.1 Приложение 1

Рассмотрим обычную схему откачки. Разделим вакуумную систему на две части: «откачиваемый объем» (в состав которого включим используемые для работы части установки) и «насос», к которому, кроме самого насоса, отнесём трубопроводы и краны, через которые производится откачка нашего объема. Пусть Q_d - количество газа, десорбирующего с поверхности откачиваемого объема в единицу времени, $Q_{\text{и}}$ - количество газа, проникающего в единицу времени в этот объем извне - через течи, $Q_{\text{н}}$ - количество газа, поступающего в систему из насоса в единицу времени. Будем измерять количество газа $Q_d, Q_{\text{и}}, Q_{\text{н}}$ в единицах PV с точностью до константы $\frac{RT}{\mu}$. Выражение, описывающее процесс откачки, имеет вид

$$-VdP = (PW - Q_d - Q_{\text{и}} - Q_{\text{н}})dt \quad (7)$$

Левая часть равна убыли массы газа в откачиваемом объеме, правая определяет количество газа, уносимое насосом, и количество прибывающего вследствие указанных выше причин за время dt .

При достижении предельного вакуума $P_{\text{пр}}$

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad (8)$$

Из (7) с учетом (8) следует

$$P_{\text{пр}}W = Q_d + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}} \quad (9)$$

Интегрируя выражение (7) и, используя (9), получаем

$$P - P_{\text{пр}} = (P_0 - P_{\text{пр}}) \exp\left(-\frac{W}{V}\right) \quad (10)$$

где P_0 - начальное давление в системе. Обычно оно велико по сравнению с $P_{\text{пр}}$, следовательно (10) можно записать так

$$P = P_{\text{пр}} + P_0 \exp\left(-\frac{W}{V}\right) \quad (11)$$

Рассмотрим, чем определяется скорость откачки откачивающей системы. Откачивающая система состоит из насоса и трубопроводов, соединяющих насос с откачиваемым объемом. При математическом описании откачивающей системы возникают уравнения, очень похожие на уравнения Кирхгофа, описывающие протекание тока в электрических цепях. Перепад давления ΔP заменяет разность электрических потенциалов, поток газа — силу тока, а пропускная способность C элементов вакуумной системы — проводимость элементов цепи. Закон сложения пропускных способностей аналогичен закону сложения проводимостей. При последовательном соединении элементов

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_{\text{н}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (12)$$

где $W_{\text{н}}$ - проводимость насоса, C_1, C_2 - проводимости трубопровода, W - проводимость откачивающей системы.

5.2 Приложение 2

Вывод выражения для скорости откачки при наличии в системе искусственной течи

Рассмотрим высоковакуумную часть установки при отсутствии искусственной течи, то есть закрытом кране K_6 . В выделенный объем в единицу времени будет натекает масса Q_1 воздуха, но в то же время насос будет откачивать за единицу времени массу газа $P_{\text{пр}}W$, где $P_{\text{пр}}$ - предельное давление в системе в стационарном состоянии. Из этого следует, что справедливо

$$P_{\text{пр}}W = Q_1 \quad (13)$$

Рассмотрим систему с искусственной течью через капилляр $K_6 - K_5$. Измерим новое предельное установившееся давление $P_{\text{уст}}$ в высоковакуумной части и давление на втором конце капилляра на входе в форвакуумный насос. С помощью выражения (3) определён массовый расход $\frac{d(PV)}{dt}$ воздуха через капилляр. Справедливо выражение, аналогичное (13) с добавлением массового расхода через капилляр

$$P_{\text{уст}}W_{\text{теч}} = Q_1 + \frac{d(PV)}{dt} \quad (14)$$

Из (13) и (14) следует, что

$$W_{\text{теч}} = \frac{\frac{d(PV)_{\text{кап}}}{dt}}{P_{\text{уст}} - P_{\text{пр}}} \quad (15)$$

5.3 Приложение 3

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

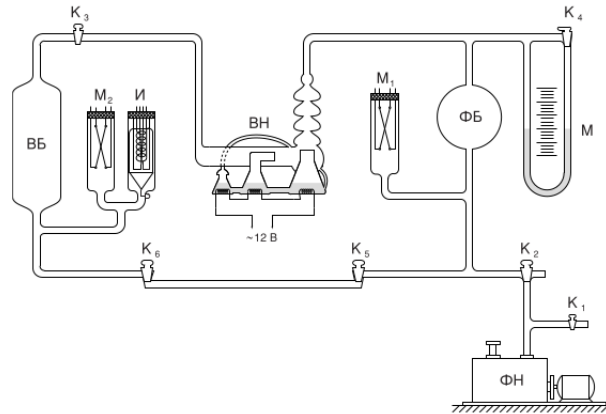


Рис. 3: Экспериментальная установка для измерения скорости откачки воздуха

Установка изготовлена из стекла и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термодинамических манометров (M_1, M_2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов K_1, K_2, \dots, K_6 .

Кран K_1 используется для заполнения форвакуумного насоса и вакуумной установки атмосферным воздухом. Трехходовой кран K_2 служит для соединения форвакуумного насоса с установкой или атмосферой. Кран K_3 отделяет высоковакуумную часть установки от форвакуумной. Кран K_4 соединяет между собой колена масляного манометра. Он должен быть открыт во всё время работы установки и закрывается лишь при измерении давления в форвакуумной части. Краны K_5 и K_6 стоят по концам капилляра и соединяют его с форвакуумной и высоковакуумной частями установки.

5.3.1 Форвакуумный насос (ФН)

Устройство и принцип действия схематически показаны на рисунке 2.

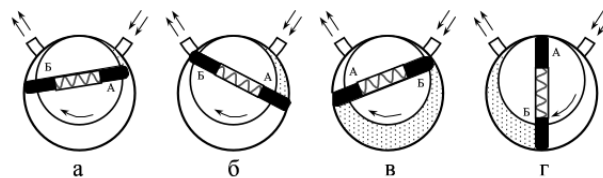


Рис. 4: Принцип работы форвакуумного насоса. В положениях "а" "б" пластина "А" засасывает разреженный воздух из откачиваемого объёма, а пластина "Б" вытесняет ранее захваченный воздух в атмосферу, в положениях "в" и "г" пластины поменялись ролями.

В цилиндрической полости массивного корпуса размещён эксцентрично ротор так, что он постоянно соприкасается своей верхней частью с корпусом. В диаметральный разрез ротора вставлены две пластины, раздвигаемые пружиной и плотно прижимаемые к поверхности полости. Они разделяют объём между ротором и корпусом на две части.

Действие насоса ясно из изображенных на рис. 2 последовательных положений пластин при вращении ротора по часовой стрелке. В положении «а» газ из откачиваемого объема поступает в пространство между пластиной «А» и линией соприкосновения корпуса и ротора. По мере вращения это пространство увеличивается (рис. 2 б), пока вход в него не перекроет другая пластина «Б» (рис. 2 в). После того как пластина «А» пройдет выходное отверстие и линию соприкосновения (рис. 2 г), лопасть «Б» будет сжимать следующую порцию газа и вытеснять его через клапан в атмосферу.

5.3.2 Диффузионный насос (ВН)

Схема устройства диффузионного насоса представлена на рисунке 3.

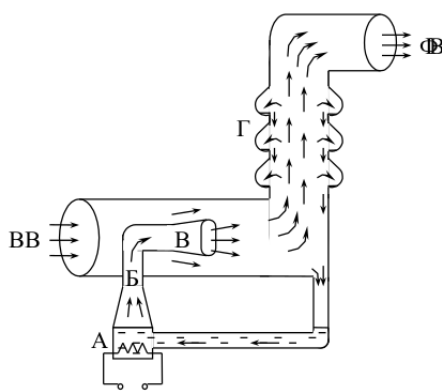


Рис. 5: Устройство диффузионного насоса

Откачивающее действие диффузионного насоса основано на диффузии молекул разреженного воздуха в струю паров масла. Попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад. На прежнем их месте образуется пустота, которая немедленно заполняется следующими порциями газа, увеличивая степень разрежения газа в окрестности струи и оказывая таким образом сильное откачивающее воздействие на весь газ в откачиваемом объеме.

Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубе Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. Дальше смесь попадает в вертикальную трубу Г. Здесь масло осаждается на стенках трубы и маслосборников и стекает вниз, а оставшийся газ через трубу ФВ откачивается форвакуумным насосом.

Диффузионный насос, используемый в установке, имеет две ступени, и соответственно, два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень). За второй ступенью имеет-

ся еще одна печь, но пар из этой печи поступает не в сопло, а по тонкой трубке подводится ближе к печке первой ступени. Эта печь осуществляет фракционирование масла. Легколетучие фракции масла, испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая ее легколетучей фракцией масла. По этой причине плотность струи первой ступени выше, и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части установки. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров масла в этой ступени. Соответственно, в откачиваемый объем поступает меньше паров масла, и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем если бы мы работали только с одной ступенью.

Спираль, опущенная в масло, подогревается переменным током ($U \approx 12\text{В}$). Ток регулируется автотрансформатором в пределах от 11,5А. При включении подогрева давление в системе сначала возрастает вследствие выделения растворенного в масле воздуха. Минут через 10 после начала подогрева начинается интенсивное испарение масла, заметное по появлению на стенках насоса пленки конденсирующихся паров.

5.3.3 Термопарный манометр (M_1, M_2)

Схема устройства термопарного манометра приведена на рисунке 4.

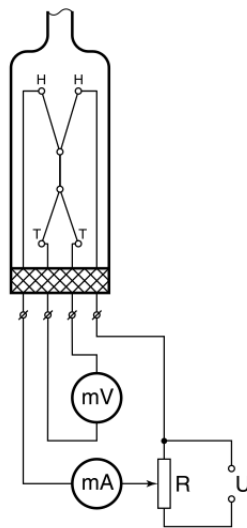


Рис. 6: Устройство термопарного манометра

Чувствительным элементом манометра является платино-платинородиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключённая в стеклянный баллон (лампа ЛТ-2 или ПМТ-2). По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R, расположенный на передней панели вакуумметра. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в окружающее пространство. Градуировочная кривая термопары ПМТ-2 приведена на рисунке 5.

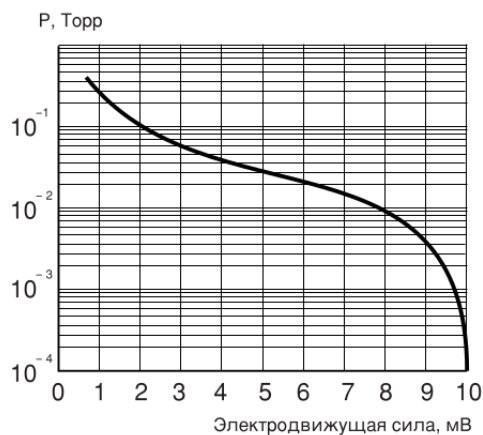


Рис. 7: Градуировочная кривая термопары ПМТ-2

5.3.4 Ионизационный манометр (И)

Схема ионизационного манометра приведена на рисунке 6.

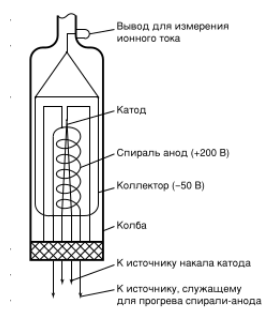


Рис. 8: Схема ионизационного манометра

Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются накалившимся катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за ее витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к катоду, а от него вновь увлекаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и поэтому может служить мерой давления.

5.4 Приложение 4

Способ измерения объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

Необходимо открыть все краны, кроме K_1, K_2 и впустить через них атмосферный воздух в систему. Затем закрываем краны K_5, K_6 и таким образом запираем воздух при атмосферном давлении $P_{\text{атм}} = (748 \pm 1)$ торр в капилляре объемом $V_{\text{кап}} = 50 \text{ см}^3$. Подключаем установку к форвакуумному насосу, открыв краны K_1, K_2 , и откачиваем систему до давления 10^{-2} торр. После достижения необходимого давления отсоединяем установку от насоса и краном K_3 отделяем высоковакуумную и форвакуумную части установки. Откроем кран K_4 , чтобы привести в готовность к измерениям масляный манометр. Откроем кран K_5 , воздух распространится из капилляра в форвакуумную часть установки, измерим давление $P_1 = 18.6$ торр по масляному манометру. С помощью закона Бойля-Мариотта определим объем $V_{\text{фв}} = 11.8$ торр форвакуумной части установки (16).

$$P_{\text{атм}} V_{\text{кап}} = P_1 (V_{\text{кап}} + V_{\text{фв}}) \rightarrow V_{\text{фв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_{\text{кап}}}{P_1} - V_{\text{кап}} \quad (16)$$

Откроем кран K_3 , газ распространится на всю установку. Снова измерим давление P_2 в системе с помощью масляного манометра. Из закона Бойля-Мариотта определим объем $V_{\text{вв}}$ высоковакуумной части установки (17).

$$P_{\text{атм}} V_{\text{кап}} = P_2 (V_{\text{кап}} + V_{\text{фв}} + V_{\text{вв}}) \rightarrow V_{\text{вв}} = \frac{P_{\text{атм}} V_{\text{кап}}}{P_2} - V_{\text{кап}} - V_{\text{фв}} \quad (17)$$

5.5 Приложение 5

$t, \text{мс}$	$P \cdot 10^{-4}, \text{мм. рт. ст.}$
48	5.4
51	4.4
54	2.7
57	1.7
60	1.2
63	0.95
66	0.83
69	0.77
72	0.74
75	0.73
78	0.72
81	0.71
84	0.70

Таблица 1: Зависимость давления P воздуха от времени t при улучшении вакуума

5.6 Приложение 6

$t, \text{мс}$	$P \cdot 10^{-4}, \text{мм. рт. ст.}$
0	0.69
3	0.83
6	1.1
9	1.5
12	1.8
15	2.1
18	2.4
21	2.7
24	3.0
27	3.3
30	3.6
33	3.9
36	4.3
39	4.6
42	4.9
45	5.1
48	5.4

Таблица 2: Зависимость давления P воздуха от времени t при ухудшении вакуума

6 Список литературы

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Термодинамика и молекулярная физика*. Физматлит, 2005.