

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления 210100.68 – Электроника и  
наноэлектроника

## **Орликов, Леонид Николаевич**

Специальные вопросы технологии приборов квантовой и оптической электроники: методические указания к лабораторным работам для студентов направления 210100.68 - «Электроника и наноэлектроника» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. - 52 с.

Пособие содержит методические указания по выполнению лабораторных работ: «Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда», «Исследование методов поиска течей в электровакуумных приборах» и «Исследование плазменного источника электронов»

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 200100.68 - «Электроника и наноэлектроника» по дисциплине «Специальные вопросы технологии приборов квантовой и оптической электроники»

© Орликов Леонид Николаевич, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой ЭП

\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ  
КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления 210100.68 – Электроника и наноэлектроника

Разработчик

д-р техн. наук, проф. каф. ЭП

\_\_\_\_\_ Л.Н. Орликов

\_\_\_\_\_ 2012 г

## Содержание

Введение .....	6
Лабораторная работа 1. Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда .....	7
1 Введение .....	7
2.1 Общие понятия .....	7
2.2 Оценка параметров плазмы .....	10
2.3 Контрольные вопросы .....	11
3 Экспериментальная часть .....	12
3.1 Оборудование .....	12
3.2 Задание на работу .....	12
3.3 Обработка результатов измерений .....	13
3.4 Методические указания по выполнению работы .....	14
3.5 Содержание отчета .....	14
Лабораторная работа 2. Исследование методов поиска течей в электровакуумных приборах .....	15
1 Введение .....	15
2 Теоретическая часть .....	16
2.1 Общие положения .....	16
2.2 Манометрический метод течеискания .....	17
2.3. Масс-спектрометрический метод течеискания .....	19
2.4 Контрольные вопросы .....	21
3 Экспериментальная часть .....	22
3.1 Задание на работу .....	22
3.2 Описание лабораторной установки .....	22
3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы и по подготовке течеискателя ПТИ-6 к работе .....	24
3.4 Содержание отчета .....	28
Лабораторная работа 3. Исследование плазменного источника электронов .	30
1 Введение .....	30
2 Теоретическая часть .....	31
2.1 Основные определения .....	31
2.2 Параметры плазменных источников электронов .....	31
2.2.1 Эксплуатационные параметры .....	31
2.2.2 Физико-технологические параметры .....	34
2.3 Эмиссия электронов из плазмы .....	36
2.4 Электронные источники на основе разряда с холодным катодом в магнитном поле .....	37
2.5 Отражательный разряд с полым катодом .....	39
2.6 Электронные источники на основе отражательного разряда с полым катодом .....	41
3 Экспериментальная часть.....	43
3.1 Оборудование .....	43

3.2	Задание.....	45
3.3	Методические указания по выполнению лабораторной работы .....	46
3.4	Содержание отчета.....	48
	Список литературы .....	49
	Приложение А Методика работы с вакуумметром ВСБ-1 .....	50

## Введение

Пособие содержит методические указания по выполнению лабораторных работ:

1. Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда
2. Исследование методов поиска течей в электровакуумных приборах
3. Исследование плазменного источника электронов.

В ходе выполнения лабораторных работ у студентов формируются:

– способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности (ОК-2);

– способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ПК-4);

– способность проектировать устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований (ПК-9);

– способность разрабатывать проектно-конструкторскую документацию в соответствии с методическими и нормативными требованиями (ПК-10);

– способность владеть методами проектирования технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства (ПК-12);

– способность разрабатывать технологическую документацию на проектируемые устройства, приборы и системы электронной техники (ПК-13);

– готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов (ПК-14);

– готовность осуществлять авторское сопровождение разрабатываемых устройств, приборов и системы электронной техники на этапах проектирования и производства (ПК-15);

– готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач (ПК-16).

# Лабораторная работа 1. Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда

## 1 Введение

Метод зондов позволяет определить основные параметры плазмы: электронную температуру, концентрацию электронов и ионов, скорости частиц и т.д. Сущность метода зонда заключается в том, что в плазму погружается металлический электрод небольших размеров и снимается вольтамперная характеристика зонда.

Целью настоящей работы является определение параметров плазмы.

В ходе выполнения лабораторной работы у студентов формируются:

– способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности (ОК-2);

– способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ПК-4);

– готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач (ПК-16).

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Общие понятия

На рис. 2.1 показана схема включения зонда.

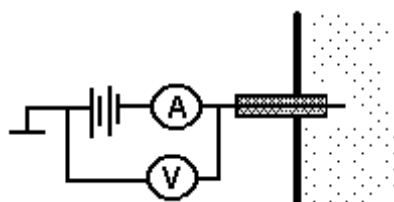


Рисунок 2.1 - Схема включения ленгмюровского зонда

Важно, чтобы размер зонда был небольшим и не влиял на состояние плазмы.

На рис.2.2 показана типичная зондовая характеристика

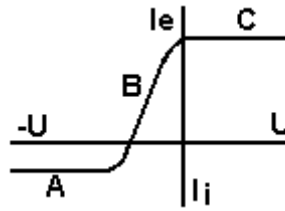


Рисунок 2.2 - Типичная зондовая характеристика

Участок «А» - участок ионного тока. Участок В- область суммарного ионного и электронного токов. Достигнуть зонда могут только те электроны, у которых кинетическая энергия больше энергии поля

$$\frac{mV^2}{2} = kT_e > eU$$

При Максвелловском распределении выполняются процентные соотношения:

37% электронного тока с энергией  $eU = kT_e$

12% -  $eU = 2kT_e$

4% -  $eU = 3kT_e$ .

В общем случае при наложении электрического поля величина электронного тока определяется соотношением:

$$I_e = I_0 e^{-eU/kT}$$

где  $I_0$ - ток в отсутствие поля.

Общий ток на зонд состоит из ионной и электронной составляющей:

$$I = I_i + I_e = I_i + I_0 e^{-eU/kT}$$

Обработку зондовой характеристики упрощают. Строят зондовую характеристику в полулогарифмическом масштабе. (Рис.2.3)

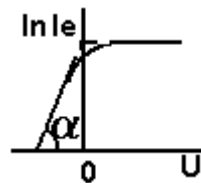


Рисунок 2.3 - Зондовая характеристика одиночного зонда в полулогарифмическом масштабе

Такой график дает выражение для логарифма электронного тока:

$$\ln I_e = \ln I_0 - \frac{eU}{kT_e}$$

Электронная температура находится из выражения:



$$e/kT_e = \operatorname{tg}\alpha$$

Основной недостаток однозондового метода – возмущение плазмы зондом, меняющее функцию распределения потенциала вокруг зонда. В достаточно плотной плазме зонд окружен слоем заряженных частиц, которые экранируют его от остальной плазмы. В настоящее время, кроме одиночного зонда применяются многоэлектродные зонды, позволяющие повысить точность измерений.

Метод двойного состоит в том, что в плазму помещают два зонда, соединенных резистором и измеряют разность потенциалов между ними. Система измерений получается изолированной от электродных цепей. (Зонд не становится анодом).

Ток каждого зонда равен разности электронного и ионного токов.

На рис 2.4 представлена вольтамперная характеристика двойного зонда

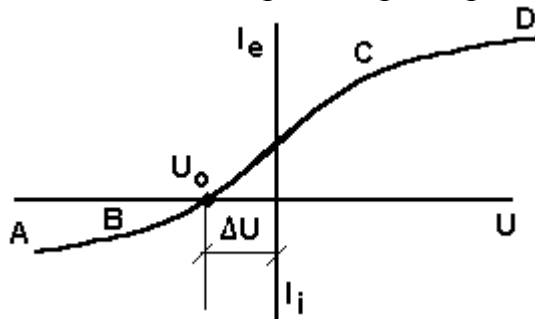


Рисунок 2.4 - Вольтамперная характеристика двойного зонда

В точке  $U_0$  разность потенциалов, приложенная от источника питания равна разности потенциалов между участками плазмы, в которых расположен зонд. В этом случае оба зонда имеют потенциал, равный потенциалу изолированного зонда. Если теперь между зондами приложить более высокую разность потенциалов, чем  $\Delta U$ , то потенциал одного зонда станет выше, а другого ниже потенциала изолированного зонда. Между зондами начнет протекать ток. На один зонд будет преобладать ток электронов, на другой – ток ионов. Электронный ток экспоненциально возрастает с увеличением потенциала. Потенциал же положительного зонда остается немного выше потенциала изолированного зонда. По этой причине на отдаленных участках АВ и CD почти весь ток на зонд является ионным. В этих областях двухзондовая характеристика совпадает с однозондовой.

## 2.2 Оценка параметров плазмы

В таблице 2.1 представлены некоторые соотношения и ориентировочные значения параметров плазмы для слаботоочного газового разряда ( $I=0,5$  А,  $U=1$  кВ,  $d=1$  см).

Таблица 2.1- Соотношения и ориентировочные значения параметров плазмы для слаботоочного газового разряда

Параметр	Формула	Значение
Скорость электрона в электрическом поле в вакууме	$V_e = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$	$2,6 \cdot 10^7$ м/с
Скорость иона в электрич поле	$V_i$	$6 \cdot 10^5$ м/с
Сечение столкновения	$\delta = 3 \cdot 10^5 / T_e$	$\delta = 10^{-6}$ –дуга
Температура газа	$T = P/nk$	319К
Электронная температура ( $T_e$ )	$\frac{3}{2} kT_e = eU_i$	$1,1 \cdot 10^5$ К
Энергия, получаемая электроном на участке пробега	$\Delta W = eE\lambda_e$	$1,8 \cdot 10^{-19}$ Дж
Энергия теплового движения электрона	$W_T = 3/2 kT_e$	$2,67 \cdot 10^{-19}$ Дж
Минимальное сечение взаимодействия	$S_e = n_e Q_e$	$10^{-6}$ 1/см
Коэффициент амбиполярной диффузии	$D = 1/3 v_i \cdot \lambda_i$	$2,79 \cdot 10^2$ м <sup>2</sup> /с
Коэффициент термического равновесия	$\Delta W / W_T$	0,67
Плотность электрического тока	$J = I/S_3$	$5 \cdot 10^{-4}$ А/см <sup>2</sup>
Напряженность поля	$E = U/d$	$2 \cdot 10^4$ В/м
Концентрация плазмы	$J = en_e V_e$	$1,2 \cdot 10^8$ 1/см <sup>3</sup>
Частота столкновений электронов	$\nu_e = (ne^2/\pi m)^{1/2} = 8980n^{1/2}$	$10^{12}$ Гц
Пробег молекулы газа ( $\lambda_{газ}$ )	$(\lambda_{газ}) = 5 \cdot 10^{-5} / P$	$10^{-3}$ м
Пробег иона	$\lambda_i = \sqrt{2} \lambda_{газ}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$ м
Пробег электрона	$\lambda_e = 4 \sqrt{2} \lambda_{газ}$	$5,64 \cdot 10^{-3}$ м
Время пробега электрона	$\tau_{es} = \lambda_e / v_e = 1 / V_e n_e Q_e$	$0,83 \cdot 10^{-3}$ сек
Пробег после соударен	$\lambda_{II} = 1/n\delta$	
Сечение рассеяния	$Q = 1/\lambda_{II}$	

## Окончание таблицы 2.1

1	2	3
Подвижность электронов	$\mu_e = V_e/E$	$1,3 \cdot 10^3$ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Подвижность ионов	$\mu_i = v_i/E$	$30 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
Дебаевский радиус	$r = 5 \sqrt{\frac{T_e}{n}} \text{ см}$	$1,7 \cdot 10^{-1} \text{ см}$
Коэффициент вторичной эмиссии	$\gamma e^{\alpha d} = 1$	$\gamma = 2,9 \cdot 10^{-3}$
Напряжение пробоя (В=300, А=15, d=4 см)	$U = \frac{Bpd}{\ln[Apd / \ln(1/\gamma)]}$	760 В
Проводимость плазмы	$\delta = n_e e V_e / E$	$25 \text{ ом}/\text{м}^2$
Кулоновский логарифм	$\Lambda = 23,4 - 1,15 \lg n - 3,45 \lg T_e$	$8,4 < 50$
Ленгмюровская (плазменная) частота	$\omega_0 = \left( \frac{4\pi n e^2}{m_e} \right)^{1/2}$	$5,94 \cdot 10^3$
Ларморовский радиус (В=0,3Тл)	$R = mV/eB$	$5,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
Ларморовская частота	$f = gH/mc$	$2,55 \cdot 10^{-2}$
Ларморовская круговая частота вращения	$\omega = 2\pi f = 1/T$	$5,6 \cdot 10^9$
Период вращения электрона	$T = 2\pi m/eV$	$178,4 \cdot 10^{-12}$
Мера замагниченности	$\lambda/R$	$10^2$
Коэффициент диффузии (В=0)	$D_0 = \lambda_e V_e / 3$	$4,88 \cdot 10^4$
Параметр Холла	$\omega_e \tau_e$	4,93
Коэффициент анизотропии	$D_0/D_{\perp}$	$2,6 \cdot 10^{13}$

### 2.3 Контрольные вопросы

1. Как определяется концентрация плазмы?
2. Как определяется электронная температура?
3. Каковы преимущества двухзондового метода?
4. Запишите баланс токов в газовом разряде
5. Как по параметрам плазмы отличить тлеющий разряд от дугового?
6. Как влияют размеры зонда на погрешность измерения?
7. Какие разряды можно исследовать зондовым методом?
8. Какие зонды, кроме одиночного и двойного, применяются для исследования плазмы?
9. Как устроен зонд?
10. Какие материалы используются для изготовления зондов?

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Оборудование

Этап вакуумной подготовки предполагает получение вакуумной среды в рабочей камере. На рис.3.1 представлена схема типовой вакуумной установки.

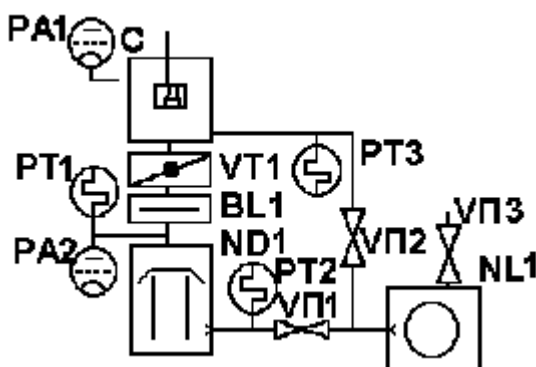


Рисунок 3.1 - Вакуумная схема установки квазипериодического действия

С-камера, Д-деталь, PA1, PA2-ионизационные датчики давления. PT1-PT3- тепловые датчики давления, VT1-высоковакуумный затвор, BL1-ловушка, ND1-диффузионный насос, NL1-форвакуумный насос, VP1-VP2-вентили.

Как видно из рисунка 3.1. вакуумная схема является универсальной и состоит из стандартных типовых элементов.

Перед запуском вакуумной системы требуется закрыть все вентили и подать воду на охлаждение установки. Затем включается механический форвакуумный насос и открываются вентили VP1 и VP2. По истечении 5-10 минут в вакуумной камере реализуется давление достаточное для проведения последующих операций.

#### 3.2 Задание на работу

1. Снять размеры катода, зонда, расстояния от катода до анода.
2. Откачать вакуумную камеру до давления  $6-7 \times 10^{-2}$  мм рт ст. Зажечь разряд током 3-5 мА при напряжении  $\sim 2$  кВ.
3. Снять вольтамперную характеристику разряда
4. Включить питание зондов. Снять ионную часть зависимости тока зондов от напряжения.
5. Откачать вакуумную камеру до давления  $1-2 \times 10^{-2}$  мм рт ст. Снять электронную часть зависимости тока зондов от напряжения, сохраняя ток разряда.
6. Заполнить таблицу измерений.

### 3.3 Обработка результатов измерений

Графоаналитический способ обработки зондовой характеристики.

На рис. 3.2 представлена зондовая характеристика двойного зонда. Алгоритм обработки двухзондовой характеристики аналогичен обработке однозондовой характеристики.

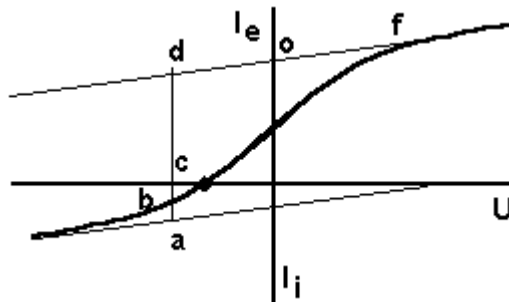


Рисунок 3.2 - Вид зондовой характеристики двойного зонда

Алгоритм обработки зондовой характеристики состоит в следующем:

Проводится экстраполяция ионного тока из области насыщения;

Проводится прямая, параллельная оси тока на расстоянии, равном началу аппроксимации ( $od=of$ ).

Определяем токи на зонды. Общий ток на первый зонд  $I_i^1 = ac$ ;

Общий ток на второй зонд  $I_i^{11} = cd$ ;

Электронный ток на первый зонд  $I_e^1 = ac - bc = ab$ ;

Строим полулогарифмическую зависимость тока зондов от напряжения на зонды.

ПРИМЕЧАНИЕ. Ток зондов следует перевести в амперы.

$$\ln \frac{I_i^1 + I_i^{11}}{I_e} - 1 = f(U)$$

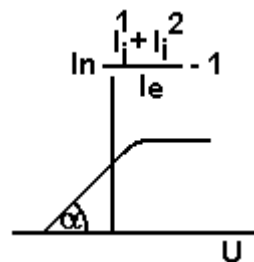


Рисунок 3.3 - Полулогарифмическая зависимость токов зондов от напряжения на зонды

По тангенсу наклона находим электронную температуру.

### 3.4 Методические указания по выполнению работы

1. Тангенс угла определяется не из рисунка, а численным отношением противолежащего катета к прилежащему, что позволяет учесть масштабирование осей координат и определить соотношение:

$$e/kT_e = \operatorname{tg}\alpha \rightarrow \text{находится } T_e$$

2. Вычисление концентрации заряженных частиц производится из тока насыщения с использованием формулы Бома.

$$J = 0,4n\sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}}$$

$$J_i = 0,4S_i n\sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}}$$

$S_i$ - площадь поверхности ионного слоя вокруг зонда.

3. Толщина ионного слоя зависит от параметров плазмы. Для упрощения расчетов для цилиндрического зонда вводится функция отношения радиуса ионного слоя  $r_i$  к радиусу зонда  $r_3$ :

$$\beta^2 = f(r_i/r_3). \text{ В условиях лабораторной работы } \beta = 1$$

Для ориентировочных измерений в разреженной плазме при большой концентрации ионного тока функция  $\beta$  мала и можно допустить, что:

- а) разница потенциалов между зондами невелика (несколько вольт);
- б) радиус ионного слоя равен радиусу зонда ( $\sim 1$  мм)

### 3.5 Содержание отчета

- 1 Схема вакуумной системы (ПК-9, ПК-10, ПК-12)
- 2 Схема высоковольтной части установки (ПК-4, ПК-9)
- 3 Принципиальная схема питания зонда (ПК-4, ПК-10)
- 4 Расчеты параметров плазмы (ОК-2, ПК-16)
- 5 Алгоритм включения и выключения установки (ПК-4)
- 6 Схема силового питания вакуумных насосов (ПК-4)
- 7 Конструкции вакуумных соединений (ПК-15)

## **Лабораторная работа 2. Исследование методов поиска течей в электровакуумных приборах**

### **1 Введение**

Широкое применение вакуумных установок в различных областях промышленности обязано значительным успехам в разработке методов конструирования и освоения технологии изготовления деталей вакуумных систем из различных материалов, преимущественно из металлов. Помимо требований, предъявляемых к деталям машин в общем машиностроении, к деталям вакуумных установок предъявляются дополнительные требования:

- стенки и места соединений деталей должны быть герметичными;
- размеры поверхностей, обращенных к вакууму, должны быть сведены к минимуму, в том числе и за счет чистоты их обработки.

В связи с этим все узлы и детали, используемые в вакуумной системе, перед сборкой необходимо проверить на герметичность, что предотвращает непроизводительные затраты времени и средств для отыскания мест натекания в уже собранной системе. Если все же суммарное натекание в собранной вакуумной системе превышает допустимую величину, то необходимо отыскать течи и устранить их.

Целью настоящей работы является изучение методов оценки герметичности вакуумной системы и методов поиска течей, ознакомление с принципами действия и основными характеристиками аппаратуры, применяемой для течеискания, освоение методов течеискания.

В ходе выполнения лабораторной работы у студентов формируются:

- способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности (ОК-2);
- способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ПК-4);
- способность проектировать устройства, приборы и системы электронной техники с учетом заданных требований (ПК-9);
- способность разрабатывать проектно-конструкторскую документацию в соответствии с методическими и нормативными требованиями (ПК-10);
- способность владеть методами проектирования технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства (ПК-12);

- способность разрабатывать технологическую документацию на проектируемые устройства, приборы и системы электронной техники (ПК-13);
- готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов (ПК-14);
- готовность осуществлять авторское сопровождение разрабатываемых устройств, приборов и системы электронной техники на этапах проектирования и производства (ПК-15);
- готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач (ПК-16).

## **2 Теоретическая часть**

### **2.1 Общие положения**

В вакуумной технике под течеисканием понимается совокупность средств, методов и способов обнаружения течей и установления степени герметичности вакуумных систем.

Герметичность вакуумной системы - это свойство всех ее элементов и их соединений обеспечивать настолько малое проникновение (натекание) газа через них, чтобы им можно было пренебречь в рабочих условиях. Степень герметичности вакуумной системы характеризуется общим потоком воздуха, перетекающего в единицу времени из атмосферы в вакуум через все имеющиеся в оболочке системы течи при нормальных условиях. Нормальными условиями считаются атмосферное явление, равное  $(10^5 \pm 4 \cdot 10^3)$  Па; температура окружающей среды, равная  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

Место нарушения сплошности оболочки называют течью. Величина течи, также как и степень герметичности, характеризуется потоком воздуха, перетекающего через течь в единицу времени при нормальных условиях. Величина потока воздуха оценивается в единицах  $PV$  за секунду ( $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$  или Вт).

Требования к степени герметичности вакуумной системы определяются величиной максимально допустимого натекания в систему. При контроле герметичности системы следует различать две основные технологические операции:

- 1) контроль герметичности - технологическая операция, служащая для установления степени герметичности системы;
- 2) поиск течи - операция, заключающаяся в обнаружении мест расположения единичных течей.



Для установления степени герметичности системы с одной стороны оболочки подают пробное вещество - газ или жидкость, легко выделяемые в окружающей среде или в составе остаточного газа. С другой стороны оболочки фиксируют появление и количественное изменение содержания пробного вещества. По способу создания потока и выделения пробного вещества различают следующие методы контроля герметичности:

- метод опрессовки;
- люминесцентный метод;
- метод искрового разряда;
- манометрический метод;
- галогенный метод;
- масс-спектрометрический метод и некоторые другие / 1-3 /.

## 2.2 Манометрический метод течеискания

Манометрический метод наиболее прост и удобен для оценки степени герметичности вакуумной системы, имеющей собственные средства откачки и измерения давления, так как не требует специального оборудования. Для контроля герметичности может быть использован любой манометрический преобразователь, имеющийся в системе. Этим методом может быть определено суммарное натекание в систему и могут быть выявлены единичные течи.

Для определения суммарного натекания предварительно откаченную до динамического предельного давления испытываемую вакуумную систему разобщают от средств откачки и строят график изменения давления в изолированной вакуумной системе. Возможны три зависимости изменения давления во времени в изолированной вакуумной системе. Эти зависимости приведены на рис.2.1.

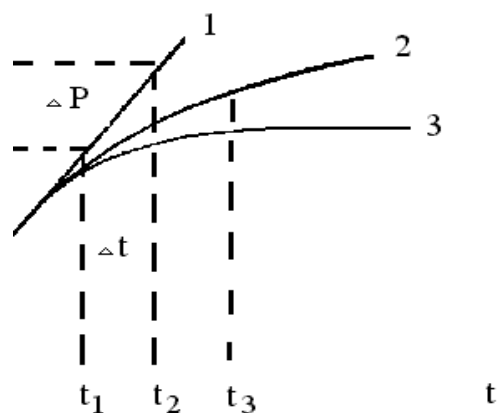


Рисунок 2.1 - Изменение давления во времени в изолированной вакуумной системе

Зная объем вакуумной системы, изменение давления  $\Delta P$  на линейном участке кривой и время  $\Delta t$ , за которое произошло изменение давления, можно рассчитать величину натекания по формуле (2.1):

$$B = V \frac{\Delta P}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

где  $B$  - натекание,  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ ;

$V$  - объем вакуумной системы,  $\text{м}^3$ .

Для поиска течей могут быть использованы любые манометрические преобразователи, показания которых зависят от рода газа, например, ионизационные и тепловые. Поиск течей сводится к следующему. После достижения в системе установившегося давления подозреваемые в натекании места обдувают пробным газом или пробным веществом. Изменения показаний вакуумметра свидетельствуют о наличии течей. Наибольший эффект дает работа с жидкими пробными веществами (ацетон, спирт, бензин). Небольшие количества жидкости, проникшие в вакуумную систему через течь, испаряясь в вакуум, резко увеличивают общее давление в системе.

Поиск течей с помощью жидких пробных веществ наряду с большой эффективностью имеет свои недостатки. Подъем жидкости по каналу малых течей, меньших  $10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , происходит за время от нескольких минут до нескольких часов. Поэтому вакуумметр может среагировать на пробное вещество в тот момент, когда будет обследоваться уже другой участок поверхности. Это приводит к возникновению ложных представлений о месте расположения течей. Чтобы убедиться в правильности обнаружения места расположения течи, удаляют пробное вещество и после установления давления в системе повторяют испытание.

Работа с газообразными пробными веществами не так эффективна (меньше изменение показаний вакуумметра), но реакция вакуумметра на пробное газообразное вещество возникает практически мгновенно в силу высокой проникающей способности газа.

Для количественной оценки величины течи необходимо знать свойства используемого манометрического преобразователя.

При использовании ионизационных манометрических преобразователей поток газа через течь близок к молекулярному и замена воздуха другим газом в потоке через течь не сопровождается изменением давления в объеме (пропорционально меняются скорости натекания и откачки). Для этих двух случаев можно записать выражения для тока коллектора ионизационного манометрического преобразователя.

$$I_i = P \cdot K_g \cdot I_e, \quad (2.2)$$

$$I_i = P \cdot K_n \cdot I_e \quad (2.3)$$

где  $I_i$ ,  $I_i$  - ионные токи коллектора манометрического преобразователя, при измерении давления воздуха и пробного газа, соответственно;

$K_e$  ,  $K_n$  - коэффициенты чувствительности преобразователя по воздуху и пробному газу, соответственно;

$I_e$  - ток эмиссии катода преобразователя.

$$\Delta I_i = I_i - I_i^0 = P \cdot I_e (K_e - K_n) = P \cdot I_e \cdot K_e (1 - \beta_i), \quad (2.4)$$

где  $\beta_i$  - коэффициент относительной чувствительности преобразователя по пробному газу ( $\beta_i = K_n / K_e$ ).

Выражение (2.4) может быть представлено в следующем виде

$$\Delta I_i = \frac{Q^0}{S_o \cdot C} (1 - \beta_i), \quad (2.5)$$

где  $Q^0$  - поток воздуха через обнаруживаемую течь в условиях испытаний, равный величине течи ( $Q^0 = B$ );

$S_o$  - эффективная быстрота откачки испытываемого объема;

$C$  - постоянная преобразователя, зависящая от тока эмиссии катода ( $C = 1 / (K_e \cdot I_e)$ ).

Количественная оценка течи с помощью теплового манометрического преобразователя затруднена из-за нелинейности градуировочной характеристики преобразователя.

Минимальная величина течей, выявленных манометрическим методом, зависит от общего давления в системе, которое в данном случае, является фоном. По мере обнаружения и устранения течей установившееся давление в системе понижается и соответственно повышается вероятность обнаружения все более малых течей.

### 2.3. Масс-спектрометрический метод течеискания

Распространенным в вакуумной технике методом контроля герметичности и поиска течей является масс-спектрометрический метод, обладающий высокой чувствительностью. Сущность метода заключается в регистрации прохождения через оболочку вакуумной системы пробного вещества с помощью масс-спектрометра, настроенного на данное пробное вещество. Промышленные течеискатели используют в качестве пробного вещества гелий. Выбор гелия обусловлен тем, что концентрация гелия в атмосфере очень мала ( $\gamma_{He} = 5 \cdot 10^{-4} \%$ ); размер атомов гелия минимальный; он не горит и легче воздуха; в составе газов, выделяющихся со стенок вакуумной аппаратуры, отсутствует.

Основной частью течеискателя является масс-спектрометрический анализатор с магнитным отклонением пучка ионов. Откачка камеры масс-спектрометра производится собственной насосной группой течеискателя. Вакуумная система течеискателя (рис.2.2) состоит из небольшого диффузионного насоса с воздушным охлаждением, соединенного с механическим вращательным насосом.

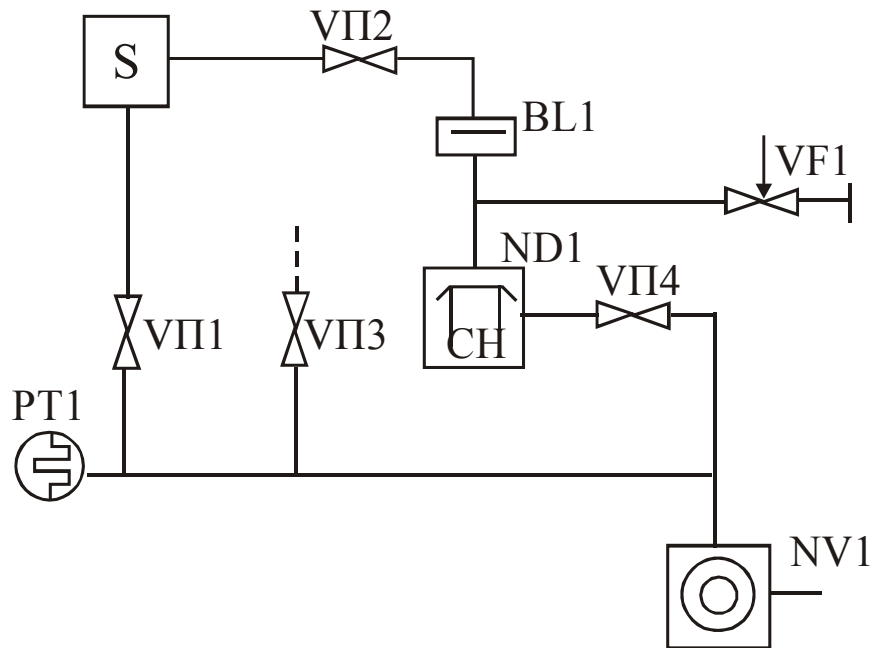


Рисунок 2.2 - Вакуумная схема масс-спектрометрического течеискателя ПТИ-6

Все необходимые коммутации производятся с помощью клапанов ДУ-8 (*VII1*, *VII3*, *VII4*), ДУ-25 (*VII2*) и Д-32 (*VF1*). Масс-спектрометрическая камера *S* имеет обводную откачку, позволяющую менять сгоревший катод ионизатора без охлаждения диффузионного насоса *ND1* (НВО-40). Вакуумная система течеискателя посредством фланцевого соединения дросселирующего клапана *VF1* подключается к вакуумной системе испытываемой установки.

Масс-спектрометрическая камера имеет ионный источник, в котором под действием потока электронов, испускаемых термокатодом, ионизируются газы, поступающие в камеру через вакуумную систему течеискателя из вакуумной системы испытываемой установки. Электрическое поле, ускоряющее ионы, и магнитное поле, разделяющее их на различные потоки, согласованы таким образом, что на коллектор попадают только положительные ионы гелия. Величина ионного тока пропорциональна давлению в камере масс-спектрометра и, соответственно, давлению гелия в объеме испытываемой системы. До момента попадания гелия в вакуумную систему ток коллектора (ионный ток) масс-спектрометра очень мал. В процессе перемещения обдувателя, соединенного с баллоном или кислородной подушкой, заполненных гелием, вблизи негерметичного места испытываемой вакуумной системы в камере масс-спектрометра происходит повышение давления вследствие проникновения гелия. Если через некоторое время отнести обдуватель от негерметичного места, то из-за прекращения поступления гелия в вакуумную систему, происходит падение давления гелия в камере масс-спектрометра в результате работы насосной системы течеискателя и насосной системы испытываемой установки. Характер роста и снижения

давления зависит от отношения скорости откачки  $S_0$  к откачиваемому объему испытываемой системы  $V$

Если количество газа, проходящего через течь за время  $dt$ , составляет  $Q_{He} \cdot dt$ , а количество откачанного газа равно  $P_{He} \cdot S_0 \cdot dt$ , то изменение давления гелия, начиная с момента закрытия течи гелием ( $t=0$ ), описывается уравнением

$$V \cdot dP = (Q_{He} - S_0 \cdot P_{He}) \cdot dt. \quad (2.6)$$

Так как в процессе испытания на герметичность  $Q_{He} = const$ , то изменение давления гелия во времени описывается выражением

$$P_{He}(t) = \frac{Q_{He}}{S_0} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{S_0}{V} \cdot t\right) \right]. \quad (2.7)$$

После снятия струи гелия с места течи в момент времени  $t = t_1$  давление гелия в объеме вакуумной системы начинает падать в соответствии с уравнением

$$P_{He}(t) = \frac{Q_{He}}{S_0} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{S_0}{V} \cdot t_1\right) \right] \cdot \exp\left[-\frac{S_0}{V}(t - t_1)\right]. \quad (2.8)$$

На выносном пульте управления течеискателем (ВПУ-1) будет фиксироваться изменение выходного напряжения, пропорциональное изменению давления гелия в вакуумной системе.

Время закрытия течи струей гелия должно находиться в пределах  $\tau \leq t_1 \leq 10\tau$  ( $\tau = V/S_0$ ). При  $t_1 \approx 3\tau$  обеспечивается практически достижение максимально возможного давления гелия ( $P_{He} = Q_{He}/S_0$ ). При  $t_1 \approx 10\tau$  форма пика гелия, фиксируемая выносным прибором, будет близка к прямоугольной и это обеспечивает четкую фиксацию проникновения гелия через течь, т.е. локализацию течи. На практике обычно время закрытия течи берут менее  $3\tau$ . Если взять  $t_1 < \tau$ , то снижается чувствительность метода поиска течи и на результаты работы сильное влияние будут оказывать флуктуации показаний выносного прибора течеискателя.

Максимальная чувствительность течеискания будет в том случае, когда объем испытываемой системы может быть откачан до рабочего давления течеискателя вакуумной системой самого течеискателя, т.е. когда удастся полностью открыть дросселирующий клапан  $VFI$  и отключить вращательный (форвакуумный) насос испытываемой вакуумной системы. В этом случае в течеискатель попадает весь гелий, прошедший через течь.

## 2.4 Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства и недостатки использованных методов поиска течи?
2. Что такое мнимые течи?
3. Как регулируется чувствительность течеискателя через параметры диффузионного насоса?

4. Как математически связано время обдувания течи с параметрами откачки?
5. Как определить поток натекания, зная давление и марку насоса?
6. Как отличить поток десорбции от потока натекания?
7. Как провести оценку течи, исходя из показаний течеискателя?
8. Покажите математически почему для работы течеискателя применяется гелий?
9. Какие места вакуумной системы наиболее предпочтительны для подключения течеискателя?
10. Объясните экспресс – методы обработки графиков откачки в течеискании.

### **3 Экспериментальная часть**

#### **3.1 Задание на работу**

- 3.1.2. Подготовить ответы на контрольные вопросы и ввести их в контролируемую машину КИСИ-5.
- 3.1.3. Записать паспортные данные насосов испытуемой вакуумной системы и подсчитать постоянную скорость откачки.
- 3.1.4. Определить необходимое время закрытия течи.
- 3.1.5. Выписать паспортные параметры течеискателя и оценить реальную чувствительность его.
- 3.1.6. Ознакомиться с устройством откачного поста ВУП-4 и течеискателя ПТИ-6.
- 3.1.7. Изучить предложенные преподавателем методы течеискания и освоить их на практике.
- 3.1.8. Дать оценку степени герметичности испытуемой вакуумной системы.
- 3.1.9. Определить допустимое натекание в вакуумную систему для случая откачки объема только механическим насосом 2НВР-5ДМ и для случая откачки насосами Н-160/700 и 2НВР-5ДМ.
- 3.1.10. Найти негерметичную часть установки и определить величину общего натекания.
- 3.1.11. Локализовать течи и оценить их величины.
- 3.1.12. Рассчитать форму пика гелия для выбранного времени закрытия течи.
- 3.1.13. Определить экспериментально форму пика гелия и сравнить ее с расчетной.

#### **3.2 Описание лабораторной установки**

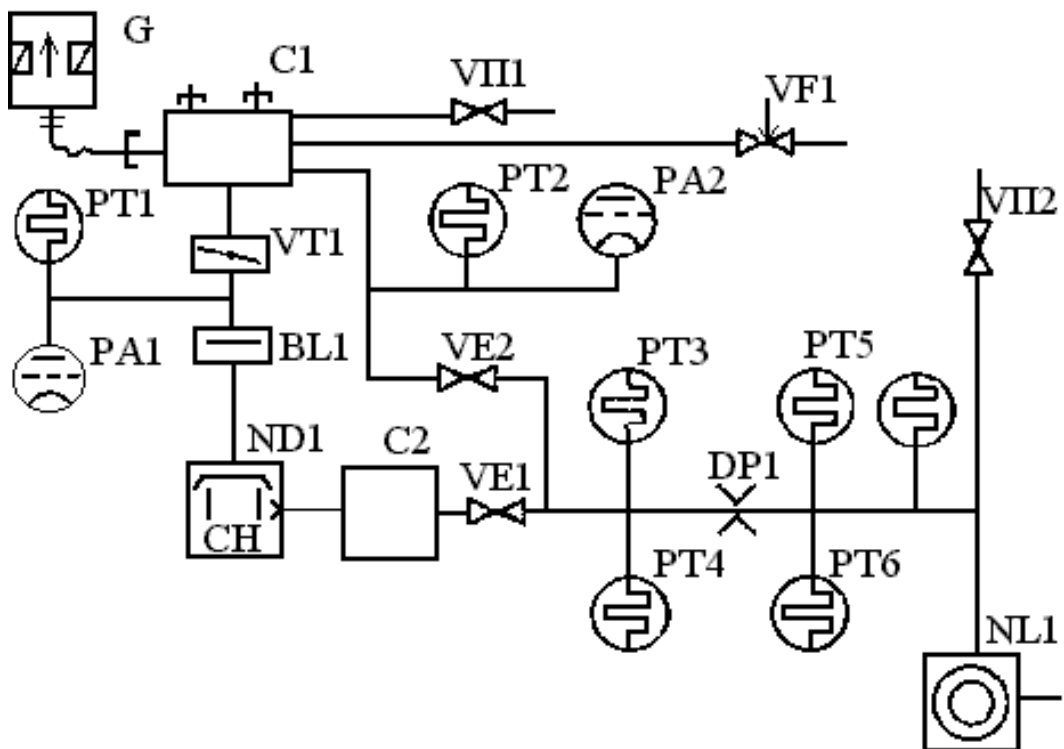
В состав лабораторной установки входят:

- откачной пост типа ВПУ-4;
- масс-спектрометрический течеискатель 1ГШ-6;

- искровой течеискатель;
- вакуумметры ВСБ-1, ВНТ-1А и ВИТ-2.

Схема вакуумной системы установки приведена на рис.3.1.

Вакуумная камера  $C_1$  объемом  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  снабжена съемной крышкой, содержащей семь штуцерных разъемных соединений с резиновым уплотнением. С помощью одного из штуцерных соединений к вакуумной камере подсоединен гелиевый течеискатель ПТИ-6 ( $G$ ). Остальные штуцерные соединения используются для подключения к вакуумной камере различных манометрических преобразователей (ПМТ-6, ПМТ-2, ПМИ-2), разрядных трубок, дополнительных вакуумных объемов, присутствие которых определяется задачами эксперимента. Откачка камеры может осуществляться механическим насосом 2НВР-5ДМ ( $NL1$ ) и высоковакуумным диффузионным насосом Н-160/700 ( $ND1$ ). В форвакуумную магистраль введен дроссель  $D1$ , который совместно с манометрическими датчиками  $PT3 - PT6$  типа ПМТ-6 входит в состав потокомера.



$C2$  - баллон форвакуумный;  $PT1-PT2$  - преобразователь манометрический ПМТ-2;  $PA1 - PA2$  - преобразователь манометрический ПМИ-2;  $DP1$  - диафрагма дросселирующая потокомера;  $VI1, VI2$  - клапан вакуумный с ручным управлением;  $VF1$  - натекатель с ручным управлением;  $VT1$  - клапан вакуумный тарельчатый;  $VE1, VE2$  - клапан вакуумный электромагнитный;  $PT7$  - преобразователь манометрический ПМТ-2.

Рисунок 3.1 – Схема вакуумной системы установки

Органы управления насосами, электромагнитными клапанами *VE1* и *VE2* расположены в правой стойке поста ВУП-4. Там же расположен вакуумметр, к входу которого подключены манометрические преобразователи *PT2* (ПМТ-2) и *PA2* (ПМИ-2). Электрические блоки остальных вакуумметров и потокомера расположены в стойке ВМБС-1.

### **3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы и по подготовке течеискателя ПТИ-6 к работе**

3.3.1. Для получения допуска к работе необходимо ответить на все поставленные контрольные вопросы.

3.3.2. В связи с тем, что вакуумная система течеискателя выходит на режим в течение 30-40 мин (такое же время требуется на прогрев электрических блоков течеискателя), следует сначала запустить течеискатель. Время выхода течеискателя на рабочий режим использовать для знакомства с инструкциями по эксплуатации вакуумметров, изучения устройства вакуумного поста (приложение А).

Запуск течеискателя осуществляется в следующей последовательности. Проверить все ли клапаны закрыты. Включить тумблер СЕТЬ на передней панели течеискателя. При этом должен начать работать вентилятор диффузионного насоса. Включить механический насос выключателем МЕХАНИЧЕСКИЙ НАСОС. Включить терморный вакуумметр. После достижения давления 5-8 Па в форвакуумной линии открыть клапан ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС. Клапан находится на щитке вакуумных клапанов с левой стороны течеискателя. Когда давление вновь достигнет значения 5-8 Па в форвакуумной линии открыть клапан ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС и установить напряжение нагревателя насоса 220 В. Для этого, нажав вниз рукоятку тумблера НАПРЯЖЕНИЕ НАГРЕВАТЕЛЯ и удерживая ее в этом положении, установить с помощью автотрансформатора, расположенного на щитке вакуумных клапанов, требуемое напряжение по среднему прибору на панели включения.

Включить усилитель постоянного тока тумблером УПТ на панели включения с одновременным удержанием кнопки справа от тумблера в нажатом положении в течение 30-40 с. После отпускания кнопки должна продолжать гореть неоновая сигнальная лампа слева от тумблера. Переключатель шкалы на ВПУ-1 должен находиться в положении БЫКЛ.

По истечении 45-50 мин с момента включения диффузионного насоса закрыть клапан достижения давления 5-8 Па в форвакуумной линии открыть клапан ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС и открыть клапан КАМЕРА для предварительной откачки масс-спектрометрической камеры. Во избежание сильного загрязнения камеры парами рабочей жидкости механического насоса не следует долго оставлять камеру под откачкой



механическим насосом. После достижения давления в форвакуумной линии достижения давления 5-8 Па в форвакуумной линии открыть клапан ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС. После этого открыть клапан ДУ-25 (VII2, см. рис.2.2) между масс-спектрометрической камерой и диффузионным насосом. При последующем выключении течеискателя масс-спектрометрическую камеру следует оставить под вакуумом. Через 2-3 мин включить магниторазрядный вакуумметр тумблером ВАКУУММЕТР МАГНИТНЫЙ, предварительно поставив тумблер с такой же гравировкой на панели включения в положение 2500 мкА. Стрелка прибора магнитного вакуумметра должна двигаться влево, что свидетельствует о работе диффузионного насоса. При достижении рабочего давления в камере (100-150 мкА на шкале 500 мкА) включить накал катода ионизатора. Для этого следует:

- 1) включить тумблер СТАБИЛИЗАТОР ЭМИССИИ на панели включения. При этом должна загореться неоновая сигнальная лампа;
- 2) через 2-3 мин нажать на 5-10 с кнопку ПУСК на щитке управления. Переключатель ЭМИССИЯ должен быть в положении ВЫКЛ;

- 3) включить тумблер КАТОД на ВПУ-1;

- 4) поставить тумблер ЭМИССИЯ- УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ на щитке управления в положение ЭМИССИЯ;

- 5) поставить переключатель ЭМИССИЯ в положение 1 мА. При этом должна загореться зеленая лампа КАТОД ВКЛЮЧЕН, прибор ЭМИССИЯ - УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ должен показывать 1-2 мА. Через 2-3 мин поставить переключатель ЭМИССИЯ в положение 5 мА. Ток

эмиссии при этом должен установиться около 5 мА. В случае, если прибор ЭМИССИЯ не показывает наличие тока, а зеленая сигнальная лампа горит, следует вторично нажать кнопку ПУСК.

Если нет тока эмиссии и горит красная сигнальная лампа СГОРЕЛ КАТОД, то следует об этом сообщить преподавателю, а самим дать предложения, как вскрыть масс-спектрометрическую камеру без остановки насосной группы.

После выведения катода на режим проверить наличие ускоряющего напряжения. Для этого тумблером КАТОД ВКЛЮЧЕН должна загореться зеленая лампа КАТОД ВКЛЮЧЕН, прибор ЭМИССИЯ - УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ перевести в положение УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ. Показания прибора при этом должны быть в пределах 300-400 В. После этого выключить катод тумблером КАТОД на ВПУ-1 и установить нуль усилитель постоянного тока. Для этого необходимо, последовательно переводя переключатель шкалы прибора на ВПУ-1 в сторону наибольшей чувствительности (вправо), установить на каждом пределе нуль прибора при помощи ручек ГРУБО и ПЛАВНО.

Для окончательной настройки течеискателя на пик гелия необходимо:

1) обеспечить свободный доступ воздуха на вход течеискателя. Это достигается приподнятием крышки вакуумной камеры *С1* испытуемой установки (см. рис. 3.1);

2) осторожно вращая маховик дросселирующего клапана ДУ-32 (*VF1*, см. рис. 2.2), установить давление в камере, соответствующее току магнитного вакуумметра 350 мкА (риска рабочего давления);

3) включить катод тумблера КАТОД на ВПУ-1 (ток эмиссии должен быть около 5 мА);

4) вращая ось потенциометра РЕГУЛИРОВКА УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ, получить максимальное отклонение стрелки прибора ВПУ-1. Для проверки правильности настройки течеискателя на пик гелия следует закрыть клапан ДУ-32. Показания прибора ВПУ-1 должны резко уменьшиться до величины, соответствующей остаточному фону гелия в камере масс-спектрометра. Для правильно настроенного течеискателя чувствительность его к атмосферному гелию при рабочем давлении в масс-спектрометрической камере должны быть не менее 10 мВ при напряжении на нагревателе пароструйного насоса 220 В.

При использовании течеискателя ПТИ-6 для количественного определения величины течи или натекания необходимо определить реальную чувствительность его, т.е. провести градуировку. В данной работе градуировка производится по смеси известной концентрации, дросселируемой в течеискатель до рабочего давления, когда в течеискатель поступает известный поток газа. В качестве смеси для градуировки используется атмосферный воздух, в котором концентрация гелия  $\gamma_{\text{He}} = 5 \cdot 10^{-4} \%$  (1/200000).

В этом случае

$$S\gamma = \gamma_{\text{He}} / \alpha, \quad (3.1)$$

где  $S\gamma$  - чувствительность течеискателя к концентрации газа, выраженная в долях или процентах на мВ;

$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$  - отсчет в мВ, вызванный проникновением в течеискатель смеси с концентрацией  $\gamma_{\text{He}}$  ( $\alpha_1$  - фоновый отсчет при закрытом клапане ДУ-32 в мВ,  $\alpha_2$  - полный отсчет в мВ).

Предельная чувствительность, т.е. минимально обнаруживаемая концентрация

$$\gamma_{\text{He max}} = 2\Delta \alpha_1 \cdot S\gamma, \quad (3.2)$$

где  $\Delta \alpha_1$  - максимальная амплитуда флуктуаций фона;

$2\Delta \alpha_1$  - отсчет на приборе ВПУ-1, принимаемый за достоверный.

Зная чувствительность  $S\gamma$  и отсчет, вызванный проникшим через течь гелием, можно определить поток газа в течеискатель

$$Q_{\text{He}} = P_{\text{He}} \cdot S\gamma, \quad (3.3)$$

где  $P_{He}$  - давление гелия в камере масс-спектрометра;

$S_0$  - эффективная скорость откачки камеры масс-спектрометра.

Давление гелия в камере связано с рабочим давлением течеискателя  $P_0$  следующим соотношением

$$P_{He} = \gamma_{He} \cdot P_0. \quad (3.4)$$

Тогда  $Q'_{He} = \gamma_{He} \cdot P_0 \cdot S_0$ , но из выражения (3.1) следует, что  $\gamma_{He} = S\gamma \cdot \alpha$ , следовательно,

$$Q'_{He} = \alpha \cdot S\gamma \cdot P_0 \cdot S_0. \quad (3.5)$$

Для течеискателя ПТИ-6  $S_0 = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , а  $P_0 = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ .

Выражение (3.5) можно представить в виде

$$Q'_{He} = \alpha \cdot S_{Q'}, \quad (3.6)$$

где  $S_{Q'} = S\gamma \cdot P_0 \cdot S_0$  - чувствительность течеискателя по потоку газа.

3.3.3. Выключение течеискателя проводится в следующей последовательности:

- 1) закрыть дросселирующий клапан ДУ-32;
- 2) выключить катод тумблером КАТОД на ВПУ-1;
- 3) переключатель ЭМИССИЯ поставить в положение ВЫКЛ.;
- 4) закрыть клапан ДУ-25;
- 5) тумблеры УПТ, СТАБИЛИЗАТОР ЭМИССИИ, ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС, ВАКУУММЕТР МАГНИТНЫЙ поставить в положение ВЫКЛЮЧЕНО;
- 6) через 30 мин закрыть клапан ПАРОСТРУЙНЫЙ НАСОС, выключатели МЕХАНИЧЕСКИЙ НАСОС И СЕТЬ поставить в положение ВЫКЛЮЧЕНО;
- 7) открыть клапан ДУ-8 АТМОСФЕРА.

В таком состоянии течеискатель может быть оставлен до следующего включения.

3.3.4. Техника поиска течей заключается в следующем. В испытываемой вакуумной системе создается установившееся пониженное давление. Течеискатель к этому времени должен быть подготовлен к работе, однако катод масс-спектрометрической камеры должен быть выключен. Открывая дросселирующий клапан ДУ-32, установить рабочее давление в масс-спектрометрической камере течеискателя. Если дросселирующий клапан полностью открыт, а давление в масс-спектрометрической камере меньше рабочего, следует с помощью винтового накидного зажима обеспечить пережатие резинового вакуумного трубопровода на участке между диффузионным  $NDI$  и механическим  $NLI$  насосами (см. рис.3.1). Пережатие увеличивается до тех пор, пока давление в камере не достигнет рабочего. Может иметь место полное пережатие вакуумного трубопровода и откачка испытываемой системы только насосной группой течеискателя.

Включить катод масс-спектрометрической камеры и произвести обдув гелием испытуемой установки, начиная с наиболее удаленной от насосов части и которая находится выше других в пространстве, постепенно приближаясь к механическому насосу как по схеме вакуумной системы, так и по расположению в пространстве обследуемых участков оболочки вакуумной системы.

Обдув производится с помощью обдувателя пистолетного типа, подсоединенного к медицинской кислородной подушке, заполненной гелием. Скорость перемещения должна быть такой, чтобы выполнялось условие  $\tau \leq t_l \leq 3\tau$ . Рекомендуется сопло обдувателя располагать на расстоянии порядка 1 см от поверхности оболочки установки. Тогда струей гелия будет перекрыт участок поверхности диаметром около 1 см. При скорости перемещения обдувателя 1 см/с время закрытия течи будет порядка 1 с. Снижение скорости перемещения обдувателя неоправданно увеличивает длительность испытаний: увеличение скорости перемещения обдувателя может привести к пропуску малых течей.

3.3.5. Запуск вакуумной системы поста ВУП-4 производится следующим образом. Проверить состояние клапана *VP2* (см. рис.3.1). Клапан должен быть закрыт (клапан находится на задней стенке ВУП-4). Запустить насос 2НВР-5ДМ (*NL1*) нажатием кнопки *ФН* (форвакуумный насос). Включить вакуумметр ВИТ-1А в стойке ВМБС-1 и проверить работоспособность насоса *NL1*. У нормально работающего насоса давление на входе через 3-5 мин после запуска должно быть не более 10 Па.

Откачать рабочую камеру *С1* механическим насосом. Для этого открыть клапан *VE2* путем нажатия кнопки *ПВ* (предварительный вакуум).

После 10-15 минут приступить к поиску течи.

3.3.6. Остановка вакуумной системы поста ВУП-4 производится следующим образом.

Закрыть клапан *VPI*. Выключить термопарные вакуумметры и остановить механический насос. Открыть на 1-3 с клапан *VPI2* (напуск газа в насос) и вновь его закрыть. Перекрыть воду в системе охлаждения установки. Выключить вентилятор и обесточить установку.

### 3.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) схемы вакуумных систем установок ВУП-4 и ПТИ-6 с указанием диапазона работы датчиков и насосов (ПК-4, ПК-9, ПК-10, ПК-13);
- 2) эскиз узлов с указанием мест течи (ПК-4, ПК-9, ПК-10, ПК-15);
- 3) уравнение газового баланса (ОК-2, ПК-16);
- 4) расчет эквивалентности диаметра течи (ПК-12, ПК-16);

- 5) данные по чувствительности манометрического датчика для различных пробных жидкостей при токах накала 150 мА (ПК-4, ПК-14)
- 6) конструкции нескольких вакуумплотных соединений (ПК-10, ПК-15)
- 7) расчет совместимости откачных средств (ОК-2, ПК-12, ПК-16)
- 8) алгоритм включения и выключения течеискателя (ПК-13)
- 9) схему масс-спектрометрической камеры и принцип ее работы (ОК-2, ПК-16)
- 10) распечатки программ и расчетов на ЭВМ (ПК-12)

## Лабораторная работа 3. Исследование плазменного источника электронов

### 1 Введение

В настоящее время много внимания уделяется методам получения мощных электронных пучков с помощью плазмы. Интерес к плазменным источникам электронов связан с успехами, достигнутыми в физике и технике плазмы, а также расширением применений электронных пучков.

Плазменные источники электронов (ПИЭЛ) позволяют получать электронные пучки с недоступными для других источников параметрами, например, с токами  $10^5 - 10^6$  А. Это открывает возможность принципиально новых применений электронных пучков. С другой стороны, ПИЭЛ перспективны при использовании в некоторых областях традиционного применения электронных пушек с термокатодом, например в электронно-лучевой технологии, поскольку они надежно работают в тяжелых вакуумных условиях, определяемых агрессивной газовой средой, интенсивной ионной бомбардировкой и периодическими контактами с атмосферой. Кроме того, большинство ПИЭЛ отличаются от электронных пушек с термокатодом отсутствием накаливаемых деталей.

Целью настоящей работы является изучение устройства ПИЭЛ на основе разряда Пеннинга с полым катодом и его характеристик.

В ходе выполнения лабораторной работы у студентов формируются:

- способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ПК-4);

- способность владеть методами проектирования технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства (ПК-12);

- готовность обеспечивать технологичность изделий электронной техники и процессов их изготовления, оценивать экономическую эффективность технологических процессов (ПК-14);

- готовность осуществлять авторское сопровождение разрабатываемых устройств, приборов и системы электронной техники на этапах проектирования и производства (ПК-15);

- готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач (ПК-16).

## **2 Теоретическая часть**

### **2.1 Основные определения**

К плазменным источникам электронов относят устройства, в которых для получения электронных пучков используется плазма. Во многих случаях отбор электронов производится с границы плазмы, образованной в ограниченном объеме. Уход электронов из плазмы восполняется электронной эмиссией с катода и ионизацией газа. Плазма, из которой можно извлекать электроны, создается с помощью газовых разрядов, при взрыве проводников и катодных микровыступов, в результате поверхностной ионизации атомов и рядом других способов.

Плазма в ПИЭЛ служит:

- 1) для возбуждения электронной эмиссии из холодного катода;
- 2) для защиты расположенного определенным образом в разрядной камере катода от бомбардировки высокоэнергетическими ионами, поступающими из ускоряющего промежутка, и запыления парами обрабатываемого материала;
- 3) для перехода от плотности эмиссионного тока катода к плотности тока пучка (увеличение плотности тока может быть достигнуто за счет сжатия столба разряда и размножения электронов в результате ионизации газа, а уменьшение плотности тока и увеличение эмитирующей поверхности - за счет расширения плазмы в экспандере);
- 4) для устранения зависимости электронно-оптических свойств ПИЭЛ от степени эрозии катода и осуществления эмитирующей поверхностью плазменной фокусировки пучка;
- 5) для получения наряду с электронным пучком ионного потока при смене полярности ускоряющего напряжения.

### **2.2 Параметры плазменных источников электронов**

Все параметры ПИЭЛ разделяют на эксплуатационные и физико-технологические. Первые позволяют определять практическое применение ПИЭЛ, характеризуют их как электронно-лучевые устройства и позволяют сравнивать ПИЭЛ с другими электронными источниками. Вторые - описывают особенности ПИЭЛ как плазменных устройств и позволяют сравнивать ПИЭЛ различных типов.

#### **2.2.1 Эксплуатационные параметры**

Номинальный ток электронного пучка  $I$ . При отборе электронов с границы стационарной плазмы, создаваемой с помощью газового разряда ток пучка равен

$$I = f_1 \cdot f_2 \cdot j \cdot S_0, \quad (2.1)$$

где  $f_1$  - коэффициент токопрохождения, учитывающий потери пучка на ускоряющем и других электродах;

$f_2$  - коэффициент, зависящий от положения плазменной эмиссионной поверхности. Значение коэффициента  $f_2$  может быть больше или меньше единицы;

$j$  - плотность электронного теплового тока в плазме вблизи эмиссионного отверстия,  $\text{А м}^{-2}$ ;

$S_0$  - площадь эмиссионного отверстия,  $\text{м}^2$ .

Стартовый ток пучка  $I_{ст}$ . В отдельных случаях ПИЭЛ должны при значительном номинальном токе пучка обеспечивать и работу при малых токах. Малый ток применяется, например, при технологическом использовании ПИЭЛ для совмещения сфокусированного пучка с местом обработки.

В пушках с термокатодом ток пучка уменьшается специальным управляющим электродом при постоянной эмиссии катода или изменением эмиссии при изменении тока накала катода.

Первый способ усложняет конструкцию пушки и требует отдельного источника питания, находящегося под высоким напряжением, а второй обладает большой инерционностью.

В ПИЭЛ, у которых есть разрядная камера, возможно эффективное управление током пучка за счет изменения эмиссионной способности плазмы регулировкой тока разряда. Однако каждая разрядная камера характеризуется минимальным током, при котором еще не гаснет разряд, причем ток зависит от формы разряда, давления газа, материала катода, геометрических размеров разрядной камеры, диаметра эмиссионного отверстия и ряда других факторов.

Ускоряющее (извлекающее) напряжение  $U$  определяет энергию электронов и мощность пучка. В отличие от пушек с термокатодом в ПИЭЛ от ускоряющего напряжения зависит также положение и форма эмиссионной поверхности. Таким образом, ПИЭЛ являются электронно-лучевыми системами с переменным первеансом. Кроме того, ускоряющее напряжение влияет на устойчивость отбора электронов из плазмы и стабильность горения разряда.

Размеры сечения пучка на выходе ПИЭЛ зависят от его назначения, конструкции и возможностей используемого способа получения пучка с помощью плазмы. Например, для технологических применений обычно требуются пучки с круглым сечением малого диаметра, а также узкие кольцевые и ленточные пучки, в то время как в квантовой электронике используются пучки с большим сечением прямоугольной формы. Минимальный диаметр пучка определяется параметрами системы его формирования и фокусировки, а также свойствами эмиттера. В отсутствие



аббераций и действия пространственного заряда максимальная плотность тока в сфокусированном пучке

$$j_{\max} = j_o [(eU / \kappa T_e) + 1], \quad (2.2)$$

где  $j_o$  - плотность тока эмиссии;

$T_e$  - электронная температура.

При стационарном отборе электронов с плазменной поверхности это соотношение при  $eU/\kappa T_e \gg 1$  можно представить в следующем виде:

$$j_{\max} = e^2 n_e U / \sqrt{\pi m} \cdot \kappa T_e, \quad (2.3)$$

где  $n_e$  - концентрация плазмы.

Поскольку электронная температура плазмы на порядок и более превышает температуру термокатодов, то пушки с термокатодом при одинаковой плотности тока эмиссии позволяют получать пучки с меньшим сечением, чем ПИЭЛ. Однако плазма обеспечивает значительно большую плотность эмиссионного тока, чем термокатоды, что в значительной мере компенсирует отрицательное влияние высокой электронной температуры на фокусировку пучка.

С помощью ПИЭЛ электронные пучки большого сечения получают тремя способами:

1) формированием пучка, извлеченного с малой эмиссионной поверхности, до требуемых размеров соответствующей электронно-оптической системой;

2) отбором электронов из плазмы, которая возбуждается в объеме с сечением, близким к требуемому сечению пучка;

3) отбором электронов с большой плазменной поверхности, которая образуется в результате расплывания плотной плазмы, проникающей из малого объема через эмиссионное отверстие в специальный экспандер (расширитель).

Глубина ВЧ-модуляции тока пучка

$$Km = 2\Delta I / I_{\max},$$

где  $\Delta I$  - амплитуда переменной составляющей тока;

$I_{\max}$  - максимальный ток пучка.

При извлечении электронов из газоразрядной плазмы модуляция тока ПИЭЛ вызывается колебаниями в разряде, неустойчивостью эмиссионной плазменной поверхности, а также неустойчивостью пучка в промежутке между плазменной поверхностью и ускоряющим электродом.

Модуляция тока - характерная особенность ПИЭЛ, которые работают при времени, превышающем время развития соответствующих не-

устойчивостей. Однако это не является препятствием для большинства технических применений ПИЭЛ.

К эксплуатационным параметрам относятся также срок службы ПИЭЛ и время готовности к работе и ряд других.

### 2.2.2 Физико-технологические параметры

**Эффективность извлечения электронов.** В большинстве ПИЭЛ эмиттером электронов служит газоразрядная плазма. Поэтому при выбранном способе генерирования плазмы необходимо обеспечить условия эффективного извлечения из нее электронов. Степень использования плазмы в ПИЭЛ оценивается параметром эффективности извлечения

$$\alpha = I/I_p, \quad (2.4)$$

где  $I_p$  - ток разряда.

При извлечении электронов через отверстие в аноде разрядной камеры, пренебрегая ионной составляющей анодного тока, можно считать, что  $\alpha$  характеризует долю образующихся в разряде электронов, которые сформированы в пучок. Возможны три пути повышения эффективности извлечения электронов из газоразрядной плазмы:

1) создание неоднородной плазмы с повышенной плотностью в области токоотбора;

2) увеличением отношения площади эмиссионного отверстия к площади токоприемной поверхности анода путем уменьшения размеров разрядной камеры при постоянных значениях плотности эмиссионного тока и площади эмиссионного отверстия;

3) увеличением отношения площади плазменной эмиссионной поверхности к площади токоприемной поверхности анода расширением эмиссионной поверхности при постоянных значениях плотности эмиссионного тока и площади токоприемной поверхности анода.

Неоднородная плазма с высокой локальной плотностью теплового тока создается:

- контрагированием разряда, т.е. сжатием его анодной части, чтобы диаметр канала разряда вблизи эмиссионного отверстия был соизмерим с диаметром этого отверстия. Возможно контрагирование отверстием в специальном электроде, помещенном в разрядный промежуток, сужением в разрядной трубке, однородным и неоднородным магнитными полями, а также ионным потоком, поступающим в разрядную камеру из ускоряющего промежутка;

- использованием в разрядной камере катода специфической формы или с неоднородной эмиссией, обеспечивающим неравномерность распределения плотности анодного тока. Примером такого катода может служить плоский катод с центральной цилиндрической полостью, вдоль

оси, которой в разряде образуется плотный плазменный столб;

- использованием в разрядной камере анода рациональной формы, которая обеспечивает неравномерное распределение плотности анодного тока.

При уменьшении размеров разрядной камеры эффективность извлечения электронов повышается, но она ограничивается ухудшением условий зажигания и горения разряда. Увеличение эмиссионного отверстия приводит к недопустимому повышению давления в ускоряющем промежутке при постоянном давлении в разряде. Кроме того, увеличение эмиссионного отверстия усиливает связь между областью разряда и ускоряющим промежутком, что может вызвать нестабильность горения разряда и даже его погасание при высоком напряжении извлечения. Обычно эмиссионные отверстия в ПИЭЛ имеют диаметр порядка 1 мм и возможности его изменения для увеличения эмиссионного тока довольно ограничены.

Энергетическая эффективность характеризует экономичность эмиттера и выражается как

$$H = I/P_{\text{Э}}, \quad (2.5)$$

где  $I$  - ток электронной эмиссии, мА;

$P_{\text{Э}}$  - мощность, затраченная на его получение, Вт.

При отборе электронов из плазмы,  $P_{\text{Э}}$  - мощность, расходуемая на ее возбуждение.

Пути повышения энергетической эффективности зависят от типа ПИЭЛ. Для ПИЭЛ на основе извлечения электронов из газоразрядной плазмы энергетическую эффективность с учетом выражений (2.4) и (2.5) можно выразить как

$$H = \alpha/U_p,$$

где  $U_p$  - напряжение горения разряда.

Таким образом, повышение достигается снижением напряжения горения разряда при постоянной эффективности извлечения.

**Расход рабочего вещества.** Плазма в ПИЭЛ образуется в результате ионизации рабочего вещества, которым в источниках различных типов служит напускаемый в ПИЭЛ газ, испаряющийся материал электродов, а также специально вносимое легко испаряющееся и ионизирующееся вещество (оргстекло, цезий). Некоторая часть рабочего вещества остается в плазменной камере в результате внедрения ионов в электроды, адсорбции атомов на пленках напыленного материала электродов и конденсации паров на стенках. Однако большая часть в виде потока нейтральных атомов проникает в ускоряющий промежуток и удаляется с помощью откачных средств.

Расход рабочего вещества определяется необходимым давлением в плазменной камере. В газоразрядных ПИЭЛ, работающих при постоянном напуске газа, его расход составляет  $Q=(1-100) \text{ см}^3\text{ч}^{-1}$ . Измерения объема расходуемого газа проводится при атмосферном давлении. В качестве рабочего газа могут быть использованы воздух, гелий, аргон, водород и многие другие. Газовая экономичность  $\Gamma = I / Q$  определяет удельный расход газа и в совокупности с параметрами  $\alpha$  и  $H$  позволяет достаточно полно характеризовать используемые в ПИЭЛ способы получения электронных пучков с помощью плазмы.

### 2.3 Эмиссия электронов из плазмы

Отбор электронов в большинстве ПИЭЛ производится с границы плазмы в ускоряющем промежутке. Между плазмой и извлекающим электродом образуется слой отрицательного пространственного заряда, на котором падает ускоряющее напряжение. Проникновением ускоряющего поля в плазму при отборе электронов, когда  $T_e \gg T_i$ , обычно пренебрегают.

Положение эмитирующей плазменной поверхности и ее устойчивость зависят от ускоряющего напряжения, плотности плазмы и температуры ее компонентов. Этим электронная эмиссия из плазмы в значительной степени подобна термоэлектронной эмиссии из твердых тел.

Потенциальная энергия электронов в плазме определяется их ткулоновским взаимодействием с ионами

$$W = \kappa T_e / (6V_D \cdot n_e), \quad (2.6)$$

где  $V_D$  - объем дебаевской сферы.

В отличие от термокатодов, в ПИЭЛ при используемых обычно плотности и температуре плазмы ( $n_e \leq 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_e \geq 10^4 \text{ К}$ ) потенциальная энергия электронов в плазме мала по сравнению с тепловой энергией, так что выполняется условие

$$V_D \cdot n_e \gg 1. \quad (2.7)$$

Из выражения (2.7) следует, что в термодинамическом отношении плазма ПИЭЛ ведет себя как идеальный газ, электроны плазмы подчиняются статистике Максвелла-Больцмана. В этом случае эмиссионная формула для плазменных катодов будет иметь вид

$$j = en_e \left[ \kappa T_e / 92\pi m \right]^{1/2} = 2,1 \cdot 10^{-16} n_e \sqrt{T_e}, \quad (2.8)$$

где  $j$  - плотность тока, извлекаемого из плазмы,  $\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$ .

Концентрация свободных электронов в плазме значительно меньше, чем в металле. Однако из-за отсутствия потенциального барьера на границе плазмы и более высокой температуры электронов по сравнению с допустимой температурой термокатодов эмиссионные свойства плазмы выше, чем у термокатодов.

При извлечении электронов из плазмы напряженность электрического поля у стационарной эмитирующей плазменной поверхности равно нулю, а в слое пространственного заряда в вакууме присутствуют только электроны, связь между протяженностью слоя  $d$ , извлеченным из плазмы электронным током  $I$  и извлекающим напряжением  $U$  определяется законом "степени 3/2".

$$I = (4\varepsilon_0 / 9) \sqrt{2e/m} (U^{3/2} / d^2) \cdot S \cdot f(r), \quad (2.9)$$

где  $S$  - площадь плазменного катода, м<sup>2</sup>;

$f(r) \gg 1$  - коэффициент, зависящий от геометрии извлекающего промежутка.

Несмотря на применение к стационарному отбору электронов из плазмы закона "степени 3/2", ток, протекающий в извлекающем промежутке, является током насыщения, так как наличие экстремума потенциала, ограничивающего ток, противоречит условию стационарности границы плазмы. Изменение извлекающего напряжения или плотности плазмы вызывает перемещение эмитирующей плазменной поверхности, при котором на этой поверхности восстанавливается нулевая напряженность поля.

Плазменная граница токоотбора в зависимости от  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $U$  может находиться в промежутке между эмиттерным электродом, имеющим эмиссионный канал, и извлекающим электродом, в эмиссионном канале или в плазменной камере.

## 2.4 Электронные источники на основе разряда с холодным катодом в магнитном поле

Преимущества ПИЭЛ перед электронными пушками с термокатодом в полной мере проявляются лишь при использовании разрядов с холодным катодом. Условия для зажигания таких разрядов при низких давлениях и высокую степень ионизации газа можно обеспечить с помощью электродов нужной конфигурации, а также рациональным сочетанием электрического и магнитного полей. Находит широкое применение отражательный или пеннинговский разряд, который зажигается при низких давлениях вплоть до высокого вакуума и устойчиво горит в широком диапазоне изменения тока и давления.

Отражательный разряд реализуется в пеннинговской электродной системе, которая обычно образуется двумя плоскими катодами и расположенным между ними анодом, в виде кольца, полого цилиндра, прямоугольной рамки. При этом система: электродов находится в аксиально-симметричном магнитном поле, силовые линии, которого направлены перпендикулярно плоскости катодов.

В зависимости от совокупности параметров, главную роль среди которых играют давление газа и напряженность магнитного поля, различают несколько типов отражательного разряда.

Высоковольтный разряд низкого давления существует при  $P \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$  Па, когда средняя длина свободного пробега электронов много больше размеров электродной системы. Напряжение горения разряда при этом обычно составляет  $U_p > 10^3$  В, а плотность катодного тока  $j \leq 10^{-7}$  А · м<sup>-2</sup>.

Магнитное поле не позволяет электронам в пеннинговской системе сразу попасть на анод, и они совершают продольные колебания между катодами, одновременно участвуя в циклотронном вращении и азимутальном дрейфе в окрещенных полях. Радиальное положение центра у циклотронной орбиты электронов изменяется лишь в результате их столкновении с атомами.

Различают два основных режима разряда низкого давления, один из которых существует при слабых магнитных полях, а другой - при сильных. В первом режиме зависимость разрядного тока от магнитного поля линейна, в разряде отсутствуют ВЧ - колебания, распределение отрицательного пространственного заряда в анодном цилиндре близко к равномерному. Во втором режиме - ток относительно слабо зависит от магнитного поля. В разряде наблюдаются интенсивные ВЧ - колебания, вблизи анода образуется слой отрицательного пространственного заряда.

**Переходная форма разряда.** С увеличением давления газа при некоторых условиях возникает переходная от высоковольтного режима низкого давления к низковольтному режиму высокого давления форма разряда. В этой форме разряда еще сохраняется прианодная электронная оболочка с неравномерном азимутальным распределением заряда, но уже существует характерный для тлеющего разряда прикатодный ионный слой. Приложенное напряжение делится между этими двумя областями, разделенными плазмой. Напряжение горения разряда остается высоким, а ток достигает нескольких десятков миллиампер.

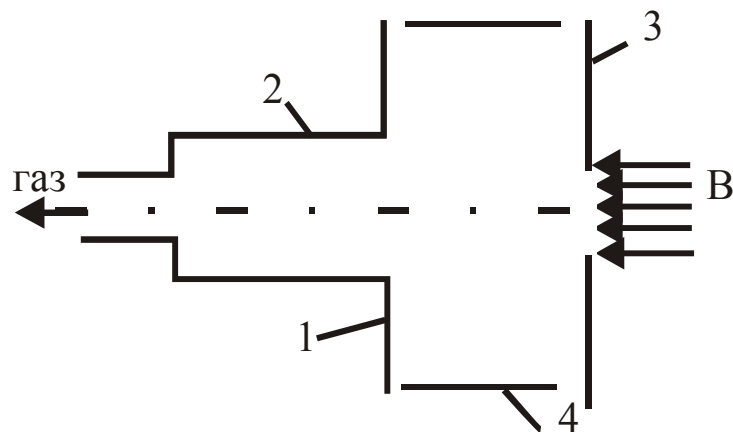
**Тлеющий отражательный разряд.** Повышение давления газа в разряде приводит обычно при  $P \geq 1,3 \cdot 10^{-1}$  Па к переходу в низковольтную форму. При токах  $I_p < 1$  А и отсутствии катодных пятен разряд во многом подобен аномальному тлеющему разряду с положительным столбом в магнитном поле. Основная часть напряжения сосредоточена в катодном падении потенциала. Ионный ток на катоде составляет 50-80 %. При токах в несколько, сот миллиампер и более напряжение горение рея ряде

достигает  $10^3$  В, что ограничивает применение такого разряда в ПИЭЛ из-за низкой энергетической эффективности, жестких требований к системе охлаждения разрядной камеры и интенсивной эрозии катодов за счет бомбардировки их высокоэнергетичными ионами.

**Дуговой отражательный разряд.** С ростом тока тлеющий отражательный разряд может переходить в дугу с катодным пятном. Использовать плазму такого разряда для получения электронных пучков нецелесообразно из-за нестабильности локальных параметров плазмы, которая имеет место при перемещении катодных пятен, возникающих попеременно на обоих катодах.

## 2.5 Отражательный разряд с полым катодом

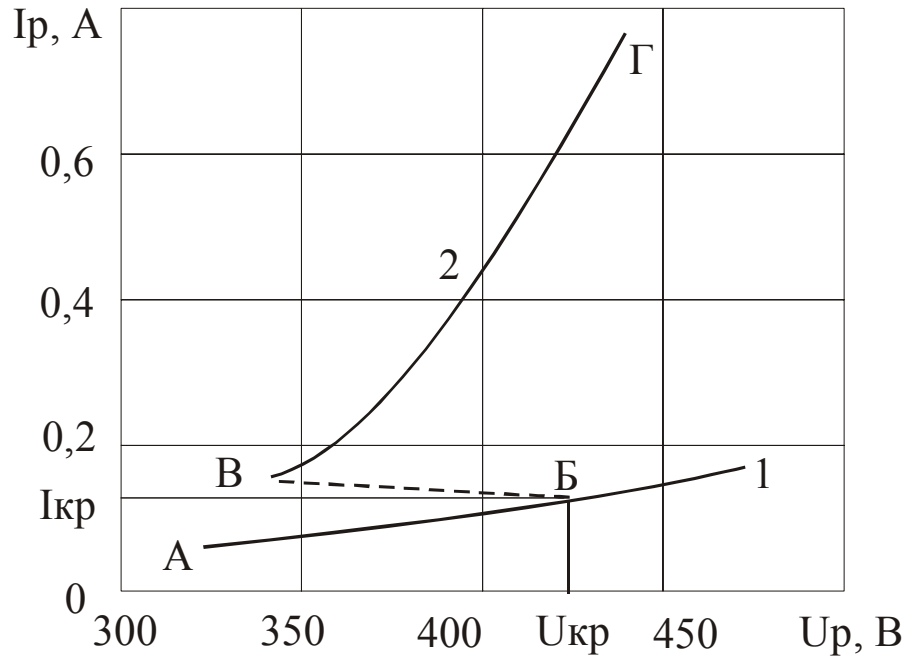
Для повышения энергетической эффективности пеннинговского тлеющего разряда используют эффект полого катода, при реализации которого снижается напряжение горения разряда и происходит локальное повышение плотности плазмы на оси полого катода. Схема электродной системы разрядной камеры с полым катодом приведена на рис.2.1.



1- полый катод; 2 – катодная полость; 3 – отражательный катод; 4 - анод

Рисунок 2.1- Схема электродной системы разрядной камеры с полым катодом

Вольт-амперные характеристики отражательного разряда приведены на рис. 2.2.



1 - с плоским катодом; 2 - с полым катодом.

Рисунок 2.2 - Вольт-амперные характеристики отражательного разряда

При малых разрядных токах в пределах участка АБ в системе с полым катодом возбуждается обычный отражательный разряд, на который катодная полость не оказывает влияния. Отсутствие эффекта полого катода при малых токах обусловлено тем, что в этих условиях электрическое поле и заряженные частицы не проникают из пеннинговской системы в катодную полость. Проникновению плазмы и электронов препятствует катодное падение  $U_k$  перед апертурой катодной полости, а попадание ионов в нее затрудняется их рассеянием перед апертурой полости вследствие специфической формы границы темного катодного пространства.

С увеличением тока протяженность  $l_k$  области катодного потенциала уменьшается. При некоторых критических параметрах отражательного разряда, соответствующих точке Б, темное катодное пространство в области апертуры полости уменьшается настолько, что происходит разрыв ионной оболочки перед апертурой полости и плазма проникает в катодную полость. Условие проникновения плазмы можно найти из выражения (2.10)

$$l_k \leq c_n, \quad (2.10)$$

где  $c_n$  - радиус катодной полости.

Поскольку проникающая в катодную полость плазма является источником ионов и ультрафиолетового излучения, а также имея потенциал, близкий к анодному, обеспечивает радиальное электрическое поле в этой полости, катодные процессы распространяются на ее стенки,



распределение поля в катодной полости создает условия для радиальных колебаний электронов, которые повышают степень ионизации газа в полости. При этом происходит перестройка разряда (участок БВ), сопровождаемая увеличением тока, снижением напряжения горения, появлением тока в катодной полости и ярко светящегося плазменного шнура в разрядном промежутке против апертуры полости. Возникает эффект полого катода, существованию которого соответствует участок ВГ вольт-амперной характеристики. Ток полого катода в этом режиме в несколько раз превышает ток плоского катода.

Основным механизмом электронной эмиссии полости является фотоэффект, а в обычном отражательном разряде основную роль играют ионно-электронная эмиссия и выход электронов через окисные покрытия при оседании на них ионов.

При постоянном расходе газа катодные полости меньшего диаметра обеспечивают меньшее напряжение горения разряда, но требуют для возбуждения эффекта полого катода повышения тока и напряжения зажигания ( $I_{кр}$ ,  $U_{кр}$ ). Увеличение  $I_{кр}$  обусловлено необходимостью уменьшения  $l_k$  согласно условию выражения (2.10), а некоторые повышения  $U_{кр}$  вызваны понижением давления газа в промежутке между катодами вследствие уменьшения пропускной способности катодной полости. При постоянном расходе напускаемого в ту полость газа и при постоянном давлении в ней существует оптимальное отношение  $ln/dn$ , при котором ток разряда с полым катодом достигает максимального значения, а напряжение горения - минимального. Оптимальное значение  $ln/dn$  не зависит от диаметра полости и составляет

$$(ln/dn)_{opt} = 7-9.$$

Плотность плазмы при постоянном токе разряда повышается при уменьшении окна в аноде (диаметра анода). В разряде с полым катодом предпосылки для сокращения поперечных размеров анода создаются благодаря тому, что режим горения разряда в основном определяется процессами в полости относительно малого диаметра  $dn$ . Однако чрезмерное сокращение анодного окна уменьшает ток вспомогательного отражательного разряда, что затрудняет условия возбуждения эффекта полого катода. Экспериментально установлено, что в магнитном поле  $B \sim 7 \cdot 10^{-2}$  Тл при давлении аргона между катодами  $P < 6,5$  Па необходимо выполнять условие

$$D \geq 3dn, \quad (2.11)$$

где  $D$  - диаметр анода.

## 2.6 Электронные источники на основе отражательного разряда с полым катодом

Имеется две принципиальные возможности извлечения заряженных частиц из отражательного разряда:

- 1) вдоль магнитного поля через катодное отверстие;
- 2) поперек магнитного поля через отверстие в аноде.

Отбор электронов из разряда в обоих случаях имеет определенные особенности. Так извлечению через катодное отверстие препятствует поле катодного падения потенциала, а через анодное отверстие - поперечное магнитное поле.

В настоящей работе исследуется электронный источник с продольным извлечением заряженных частиц через отверстие в отражательном плоском катоде. Характер изменения тока извлеченных частиц представлен на рис.2.3.

При малых разрядных токах на выходе источника преобладает ионный ток, поскольку в этих условиях у эмиссионного отверстия существует препятствующее выходу электронов катодной падение потенциала. Из разряда могут выйти лишь те электроны, которые эмиттированы полым катодом и прошли без соударений промежутков между катодами, сохранив начальную энергию, которую они имели при выходе из металла в газ. Кроме того, через катодное отверстие могут выйти "аномальные" электроны, получившие необходимую энергию за счет колебаний в разряде.

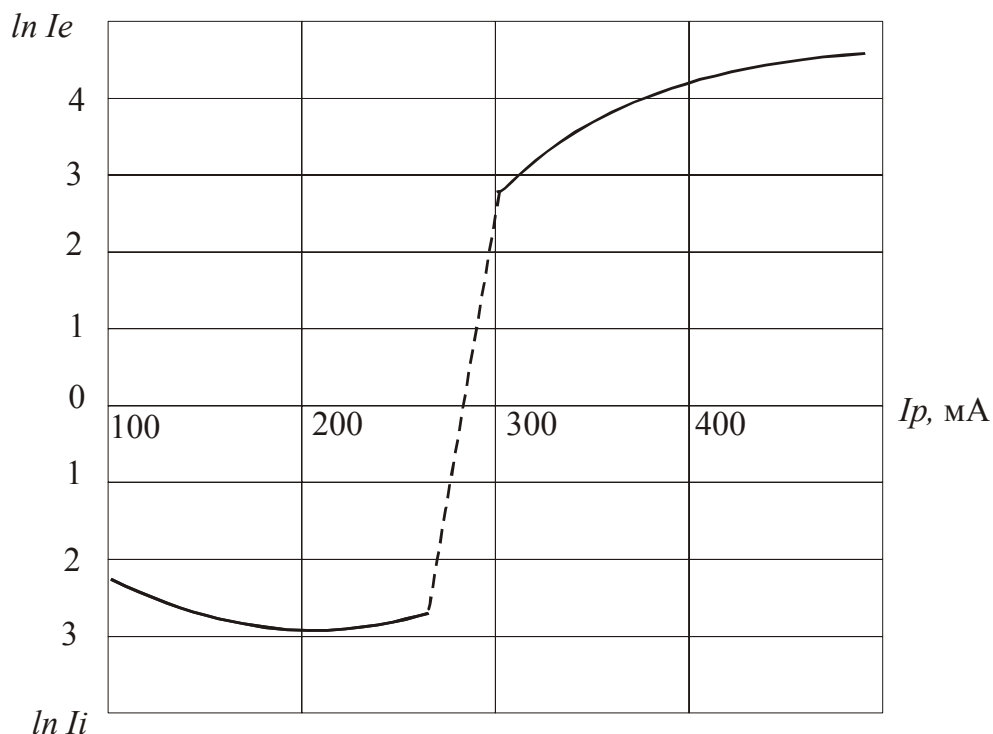


Рисунок 2.3 – Зависимость тока извлеченных частиц от тока разряда

При некотором критическом разрядном токе характер тока на выходе через катодное отверстие меняется скачком. Ионный ток сменяется электронным током. Выход электронов в этом случае обусловлен разрывом катодной ионной оболочки перед эмиссионным отверстием, т.е. начинает выполняться условие

$$l_k \leq r_0 \quad (2.12)$$

где  $r_0$  - радиус эмиссионного отверстия в катодe.

После разрыва катодной оболочки происходит отбор электронов из плазмы, проникающей из разрядного промежутка в эмиссионный канал.

Одной из особенностей ПИЭЛ с продольным извлечением частиц является эффективное извлечение ионов при смене полярности извлекающего напряжения.

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Оборудование

Исследованию подлежит ПИЭЛ с продольным извлечением, способный работать при токах разряда до 1,5 А и извлекающим напряжении до 30 кВ. Однако в целях техники безопасности при исследовании источника разрядный ток ограничен значением 0,1-5 А, а извлекающее напряжение - 10 кВ.

Конструкция ПИЭЛ приведена на рис.3.1.

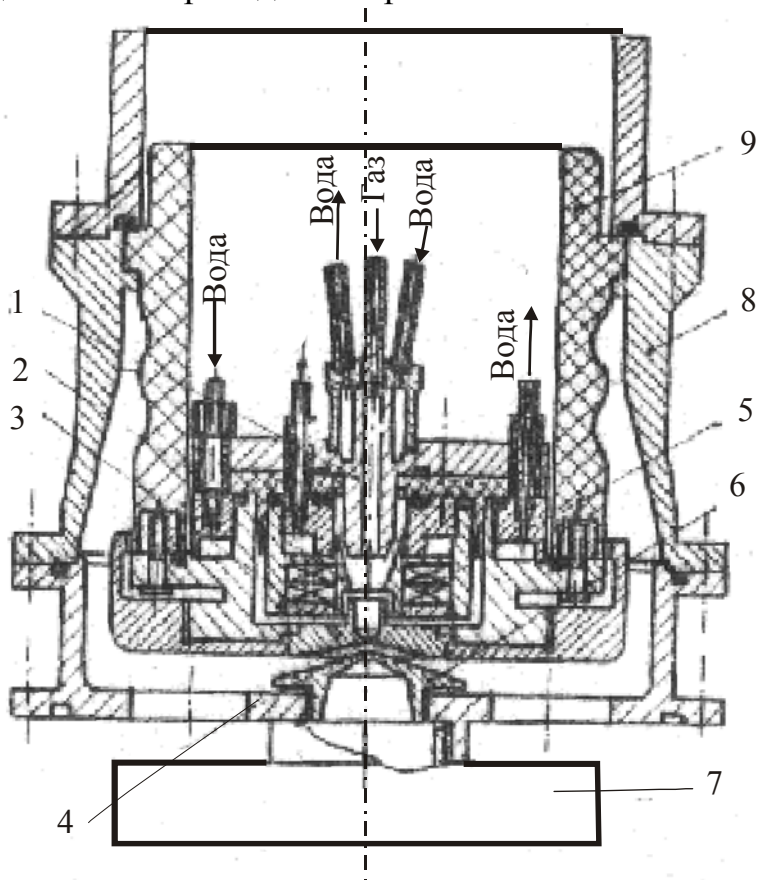


Рисунок 3.1- Конструкция ПИЭЛ с продольным извлечением электронов

Разрядная система образована полым стальным катодом 1, медным анодом 2 с коническим окном и стальным плоским отражательным катодом 3, имеющим экстракционное отверстие 4. Магнитное поле между катодами создается двумя постоянными магнитами 5 кольцевой формы. Извлекающее напряжение подается на экстрактор 6. Под действием электрического поля экстрактора происходит первичное формирование извлеченного электронного потока. Последующее формирование осуществляется с помощью фокусирующей катушки 7. Разрядная система закреплена в корпусе 8 пушки с помощью изолятора 9, выполненного из капролона. Газовое питание разрядной системы осуществляется через катодную полость. Поток газа регулируется внешним натекателем. Все электроды разрядной системы охлаждаются водой, подводимой через длинный трубопровод, выполненный из изоляционного материала. Столб воды в этом трубпроводе играет роль водяного сопротивления определяющего величину токов утечки в системе электропитания электродов пушки.

Высокое, относительно заземленного экстрактора, напряжение извлечения подается на катод разрядной системы.

Источник питания разрядной камеры находится под высоким напряжением относительно земли. Такая особенность системы электропитания определила конструкцию пушки в целом. Электродная система пушки размещена в закрытом корпусе. Там же размещено и водяное сопротивление. Подводка электропитания осуществляется экранированными высоковольтными проводами.

С помощью фланца 10 пушка присоединяется к патрубку вакуумной камеры установки УВН-2М. В вакуумной камере размещен медный цилиндр Фарадея, служащий мишенью для электронного пучка. Ток в цепи цилиндра Фарадея измеряется с помощью прибора, размещенного в стойке питания пушки.

Стойка электропитания включает в себя:

1) блок питания разрядной камеры, выполненный по схеме двухполупериодного выпрямителя с Г-образным  $RC$  фильтром;

2) источник извлекающего напряжения, выполненный по схеме двухполупериодного мостового выпрямителя с Г-образным  $RC$  фильтром. В обоих источниках питания сопротивления фильтров играют роль ограничивающих сопротивлений, препятствующих развитию дугового разряда в камере и извлекающем промежутке;

3) измерительные приборы контроля режимов работы пушки;

4) регуляторы напряжения разряда и напряжения извлечения;

5) реле максимального тока, отключающее от сети источник извлекающего напряжения при электрическом пробое извлекающего промежутка. После устранения причин пробоя реле максимального тока вручную возвращают в исходное состояние;

6) стабилизированный блок питания фокусирующей катушки и

цилиндра Фарадея;

7) панель электрических пускателей.

Для измерения потока газа, поступающего в разрядную камеру, используется бюретка.

Схема вакуумной системы установки УВН-2М приведена на рис.3.2.

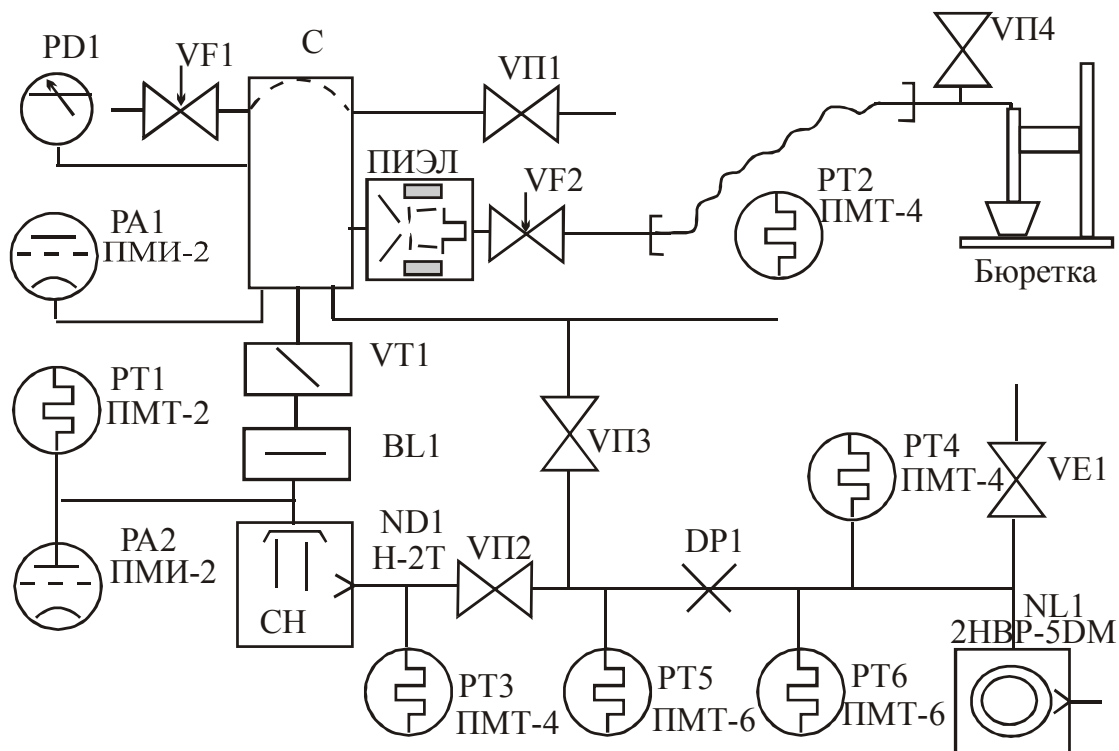


Рисунок 3.2 – Схема вакуумной системы установки УВН-2М

### 3.2 Задание

3.2.1. Изучить конструкцию ПИЭЛ.

3.2.2. Ознакомиться с вакуумной системой установки УВН-2М и уяснить взаимосвязь ее элементов.

3.2.3. Ознакомиться с правилами эксплуатации вакуумметрической аппаратуры.

3.2.4. Снять семейство вольт-амперных характеристик разрядной камеры при различных расходах рабочего газа и для различного рода его. Одновременно следует фиксировать род и величину тока заряженных частиц, выходящих из разрядной камеры.

3.2.5. Определить зависимость извлеченного тока от напряжения извлечения при различных токах разряда и постоянном расходе рабочего газа.

3.2.6. Получить зависимость извлеченного тока от тока разряда при постоянном извлекающем напряжении и для различного рода рабочего газа при постоянном расходе его.

3.2.7. Исследовать влияние рода и расхода рабочего газа на величину извлеченного тока при постоянном значении извлекающего напряжения.

3.2.8. На основании полученных результатов рассчитать параметры ПИЭЛ.

### 3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы

3.3.1. Для нормальной работы ПИЭЛ необходимо создать в извлекающем промежутке давление порядка  $1 \cdot 10^{-3}$  -  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Поскольку область извлекающего промежутка сообщается с вакуумной камерой УВН-2М через каналы большой проводимости, то давления в камере и извлекающем промежутке практически совпадают. Информацию о давлении в извлекающей промежутке считывать с прибора вакуумметра ВИТ-2.

3.3.2. Для запуска вакуумной системы установки необходимо придерживаться вполне определенной последовательности. Последовательность эта следующая. Проверяется положение всех клапанов системы. Все клапаны должны быть закрыты. Сетевые тумблеры всех электрических блоков установки должны находиться в положении ВЫКЛЮЧЕНО. Подается вода в систему охлаждения насоса Н-2Т. Установка подключается к электросети, при этом загорается лампа СЕТЬ. Включается механический насос *NLI* (2НВР-5ДМ) и проверяется его работоспособность с помощью манометрического преобразователя *PT4* и измерительного блока ВТ-2П. При нормальной работе насоса *C* (давление на входе его должно лежать в диапазоне 1-10 Па) открывается клапан *VII2*. Для этого ручку клапана повернуть против часовой стрелки и вытянуть на себя до отказа. При достижении в объеме насоса Н-2Т давления порядка 6-10 Па (контроль с помощью *PT1*) включается нагреватель диффузионного насоса. Одновременно с откачкой объема насоса Н-2Т может быть откачан объем камеры *C*, если начальное давление в ней не более 100-200 Па. Для параллельной откачки насоса и камеры должны быть открыты клапаны *VII2* и *VII3*. Если давление в рабочей камере *C* много больше 200 Па, то до начала откачки объема насоса следует сначала откачать камеру до давления не более 50 Па (контроль с помощью преобразователя *PT2*), а затем перейти на параллельную откачку и после достижения в камере давления порядка 6-8 Па клапан *VII3* перекрывается.

Откачка рабочей камеры *C* установки механическим насосом *NLI* до возможно более низкого давления приносит только вред, так как в процессе откачки механическим насосом при давлении ниже 6-8 Па камера загрязняется парами масла из механического насоса. Диффузионный же насос успешно может начать откачку с давлением 1-10 Па.

После выхода насоса Н-2Т на рабочий режим (давление на входе насоса станет меньше  $1,3 \cdot 10^{-1}$  Па) открывается клапан *VII1* (клапан *VII3*

должен быть закрыт). Когда давление на входе насоса вновь уменьшится до значений порядка  $1,3 \cdot 10^{-1}$  -  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па включается ионизационный вакуумметр ВИТ-1А или ВИТ-2, Методика работы с вакуумметрами ВИТ-1А и ВИТ-2 изложена в приложениях А и Б.

Выключение установки производится в следующей последовательности. Выключаются ионизационные вакуумметры ВИТ-1А и ВИТ-2. Закрывается натекатель *VF2*, а затем затвор *VT1*. Выключается нагреватель диффузионного насоса. Для ускорения охлаждения насоса с него снимается нагреватель и включается вентилятор для обдува насоса воздухом. Нагреватель снимается лаборантом или преподавателем. Через 20 мин закрывается клапан *VII2*, и выключается механический насос. После этого на вход насоса *NL1* (2НВР-5ДМ) напускается воздух через натекатель *VE1* с электромеханическим приводом путем нажатия кнопки НАТЕКАТЕЛЬ. Затем выключаются все электрические блоки установки.

3.3.3. После достижения предельного вакуума в камере *C* с помощью натекателя *VF2* устанавливается требуемый расход рабочего газа. Расход рабочего газа следует выбирать в диапазоне  $15-100 \text{ см}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ . О достижении установившегося состояния можно судить по показаниям вакуумметра ВИТ-2. Для контроля расхода рабочего газа любого рода используется бюреточная система. Если в качестве рабочего газа используется газ, отличный по своему составу от воздуха, то перед напуском такого газа объем бюреточной системы должен быть предварительно откачан до давления 10-50 Па с помощью вспомогательного насоса. После откачки объема бюреточной системы в него напускается выбранный в качестве рабочего газ до давления порядка  $(1,1-1,2) \cdot 10^5$  Па. Аналогичная процедура откачки и напуска производится при любой смене рода рабочего газа.

3.3.4. При определении извлеченного тока необходимо из измеренной величины вычесть ток утечки по водяному сопротивлению, соответствующий данному извлекающему напряжению. Зависимость тока утечки от извлекающего напряжения снимается предварительно при отсутствии тока разряда.

3.3.5. При снятии зависимостей извлеченного тока от напряжения извлечения и расхода газа может иметь место развитие пробоя в извлекающем промежутке, приводящее к автоматическому отключению источника извлекающего напряжения. Такая ситуация обычно возникает при больших расходах рабочего газа.

Для продолжения эксперимента следует уменьшить расход газа, уменьшить извлекающее напряжение до нуля и, открыв дверцы стойки управления, вручную вернуть реле максимального тока в исходное положение поворотом ручки на корпусе реле в направлении часовой стрелки (в окне реле должен появиться флажок, покрашенный в белый цвет).

3.3.6. При проведении экспериментов не допускать в камере давление более  $6,5 \cdot 10^{-2}$  Па.

3.3.7. При снятии зависимостей, параметрами которых являются величина расхода газа и род его, следует сначала получить все зависимости для одного рода рабочего газа, а затем - для рабочего газа другого рода. В качестве рабочих газов в работе могут быть использованы воздух, гелий, аргон, углекислый газ, азот.

3.3.8. Конкретный объем исследования определяет преподаватель.

### **3.4 Содержание отчета**

3.4.1. Схема ПИЭЛ. (ПК-15)

3.4.2. Схема вакуумной системы установки УВН-2М (ПК-12)

3.4.3. Алгоритм измерения вакуума (ПК-14)

3.4.4. Семейство вольт-амперных характеристик разрядной камеры при различных расходах рабочего газа и для различного рода газа (ПК-4, ПК-16)

3.4.5. Зависимость извлеченного тока от напряжения извлечения при различных токах разряда и постоянном расходе рабочего газа (ПК-4, ПК-16)

3.4.6. Зависимость извлеченного тока от тока разряда при постоянном извлекающем напряжении и для различного рода рабочего газа при постоянном его расходе (ПК-4, ПК-16)

3.4.7. Зависимость рода и расхода рабочего газа от величины извлеченного тока при постоянном значении извлекающего напряжения (ПК-4, ПК-16)

3.4.8. Расчет параметров ПИЭЛ (ПК-12)



## Список литературы

1. Александров С. Е., Греков Ф. Ф. Технология полупроводниковых материалов: Учебное пособие. 2 е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 240 с.: ил. — [http://e.lanbook.com/books/element.php? pl1\\_cid=25&pl1\\_id=3554](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=3554)
2. Основы физики плазмы: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. - СПб.: Издательство "Лань", 2001. - 448 с. ISBN 978-5-8114-1198-6. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=1550](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1550)
3. Рожанский В. А. Теория плазмы: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань». — 2012. — 320 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). Режим доступа [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2769](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2769)
4. Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2005. - 316 с. ISBN 5-86889-244-5: Экз - 103

### Методика работы с вакуумметром ВСБ-1

Вакуумметр ВСБ-1 это тепловой вакуумметр сопротивления блокировочный с выдачей информации на показывающий и самопишущий приборы. Подготовка прибора к работе производится следующим образом.

Установить переключатель в положение КАЛИБРОВКА ВАКУУММЕТРА. Включить вилку сетевого кабеля в сеть 220 В. Включить тумблер СЕТЬ, при этом должна загореться лампочка ПЕРВЫЙ (30-0,7 мм рт.ст.). Дать прибору прогреться в течение 15-30 мин.

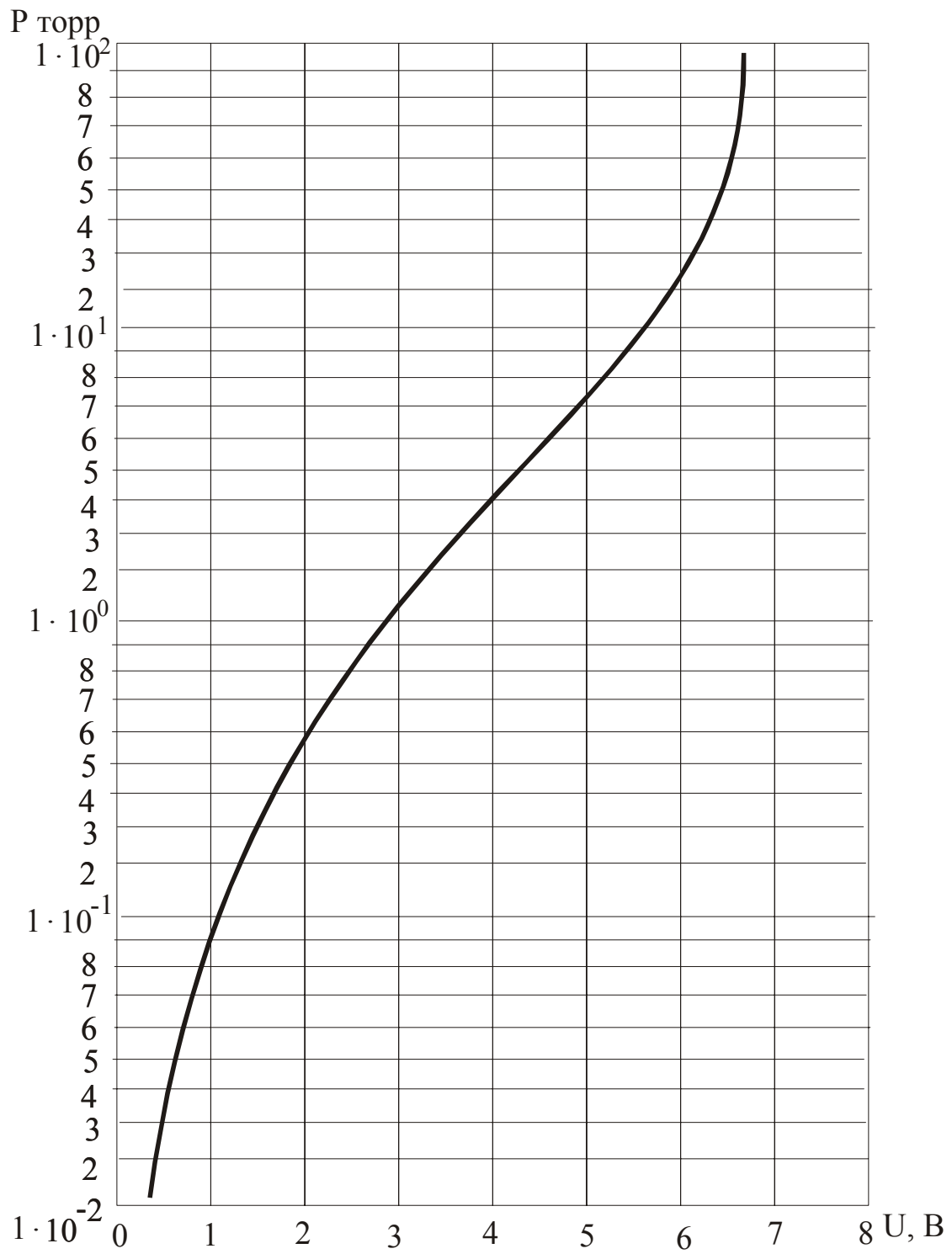
Произвести калибровку прибора. Для этого резистором КАЛИБРОВКА ВАКУУММЕТРА - УСТАНОВИТЬ НА РИСКУ установить стрелку прибора измерительного блока на риск (середина верхней шкалы), при этом должен быть включен сигнал ПЕРВЫЙ (30-0,7 мм рт.ст.).

Перевести переключатель в положение ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА. Резистором КОРРЕКТОР на задней стенке шасси стрелку измерительного прибора установить на конец шкалы. В процессе калибровки давление в вакуумной системе, с которой соединен манометрический преобразователь ПМТ-6, должно быть равно атмосферному. Прибор готов к работе.

Измерение давления при откачке вакуумной системы осуществляется в пределах  $4 \cdot 10^3 - 1,33$  Па. Прибор имеет два диапазона  $4 \cdot 10^3 - 10^2$  Па и  $10^2 - 1,33$  Па. Переход с одного диапазона давлений на другой осуществляется автоматически. Шкала измерительного прибора градуирована в вольтах. Переход к значениям давления производится с помощью типовой градуировочной кривой, приведенной на рисунке.

При записи давления на ленте самописца ПС1-С2 необходимо иметь ввиду то обстоятельство, что шкала стрелочного прибора ВСБ-1 нелинейна, а шкала ПС1-02 линейна. Для расшифровки диаграммы самописца следует на ней делать записи текущего давления, т.е. сразу же по ходу вычерчивания диаграммы проводить ее градуировку.

## Градуировочная кривая ПМТ-6



Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Специальные вопросы технологии приборов  
квантовой и оптической электроники

Методические указания к лабораторным работам

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40