

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

Кафедра электронных приборов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направлений «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»

2012

**Орликов, Леонид Николаевич**

Исследование плазменного источника электронов: методические указания к лабораторной работе для студентов направлений «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» / 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. - 23 с.

Целью настоящей работы является исследование плазменного источника электронов

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства») по курсу «Спец. вопросы технологии»

© 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.

## СПЕКТРОМЕТРИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ КРИСТАЛЛОВ

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направлений «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Разработчик

д-р техн. наук, проф.каф.ЭП

\_\_\_\_\_ Л.Н.Орликов

\_\_\_\_\_ 2012 г

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| 1. Введение .....  | 5  |
| 2. Теоретическая часть .....   | 5  |
| 2.1. Основные определения .....  | 5  |
| 2.2. Параметры плазменных источников электронов .....                                  | 6  |
| 2.2.1. Эксплуатационные параметры .....  | 6  |
| 2.2.2. Физико-технологические параметры .....  | 8  |
| 2.3. Эмиссия электронов из плазмы .....  | 10 |
| 2.4. Электронные источники на основе разряда с холодным катодом в магнитном поле ..... | 11 |
| 2.5. Отражательный разряд с полым катодом.....   | 13 |
| 2.6. Электронные источники на основе отражательного разряда с полым катодом .....      | 15 |
| 3. Экспериментальная часть .....   | 16 |
| 3.1. Оборудование.....   | 16 |
| 3.2. Задание .....   | 19 |
| 3.3. Методические указания по выполнению лабораторной работы .....                     | 19 |
| 3.4. Содержание отчета .....   | 21 |
| 4. Рекомендуемая литература.....   | 21 |

## 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.

## 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,  $A \cdot m^{-2}$ ;

$S_0$  - площадь эмиссионного отверстия,  $m^2$ .

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 которо

м 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 aberrаций 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 неустойчивостей. 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  $Q=(1-100) \text{ см}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ . 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 неравномерным 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.

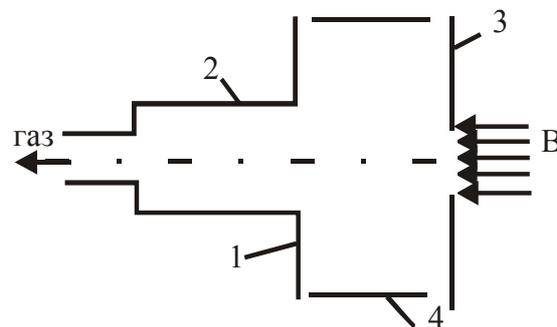
**Тлеющий отражательный разряд.** Повышение давления газа в разряде приводит обычно при  $P \geq 1,3 \cdot 10^{-1}$  Па к переходу в низковольтную форму. При токах  $I_p < 1$  А и отсутствии катодных пятен разряд во многом подобен аномальному тлеющему разряду с положительным столбом в магнитном поле.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

зовать 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

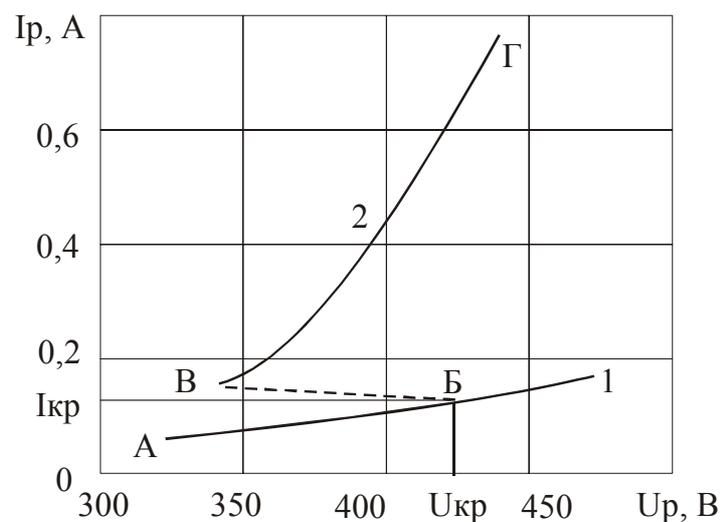
Для повышения энергетической эффективности пеннинговского тлеющего разряда используют эффект полого катода, при реализации которого снижается напряжение горения разряда и происходит локальное повышение плотности плазмы на оси полого катода. Схема электродной системы разрядной камеры с полым катодом приведена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

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

где  $\chi_n$  - 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 повышение 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 катодное падение потенциала. Из разряда могут выйти лишь те электроны, которые эмитированы 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.

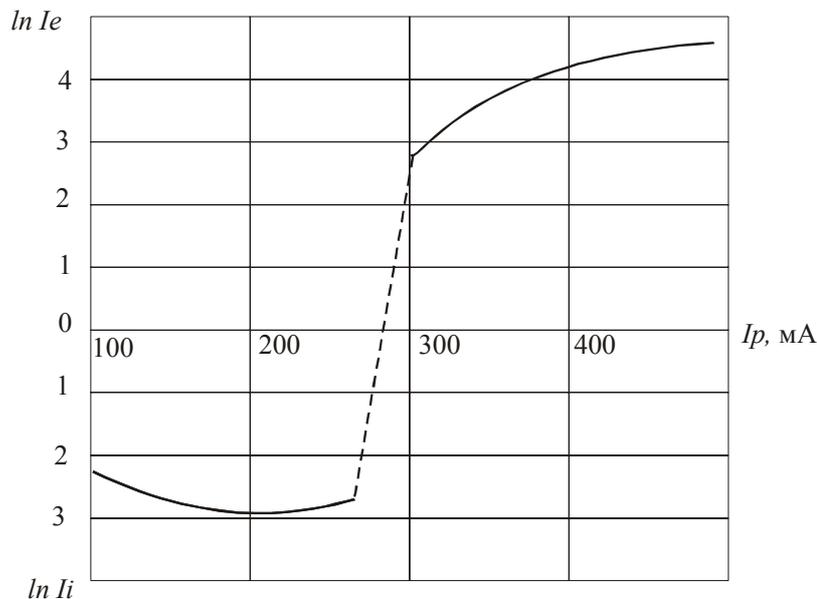


Рисунок 2.3 – Зависимость тока извлеченных частиц от тока разряда

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

$$l_k \leq \chi_3 \quad (2.12)$$

где  $\chi_3$  - радиус эмиссионного отверстия в катоде.

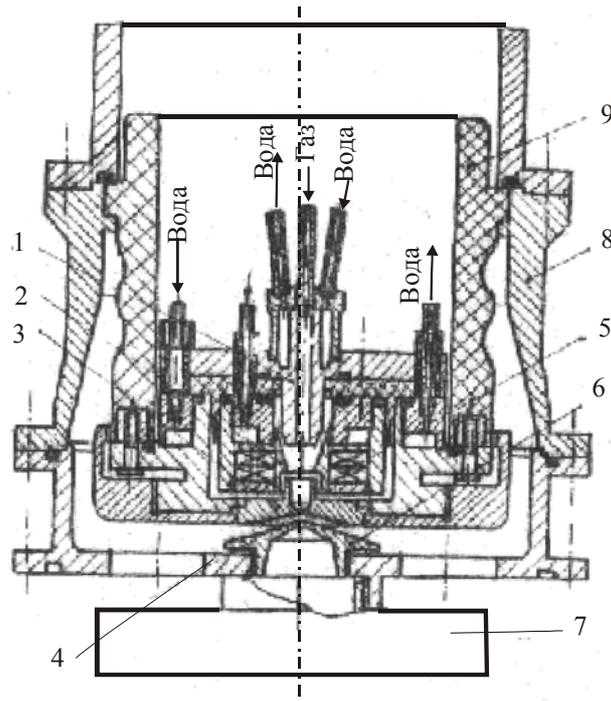
После разрыва катодной оболочки происходит отбор электронов из плазмы, проникающей из разрядного промежутка в эмиссионный канал.

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 капрлона. 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 труб проводе 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 экраниро-

ванными 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.

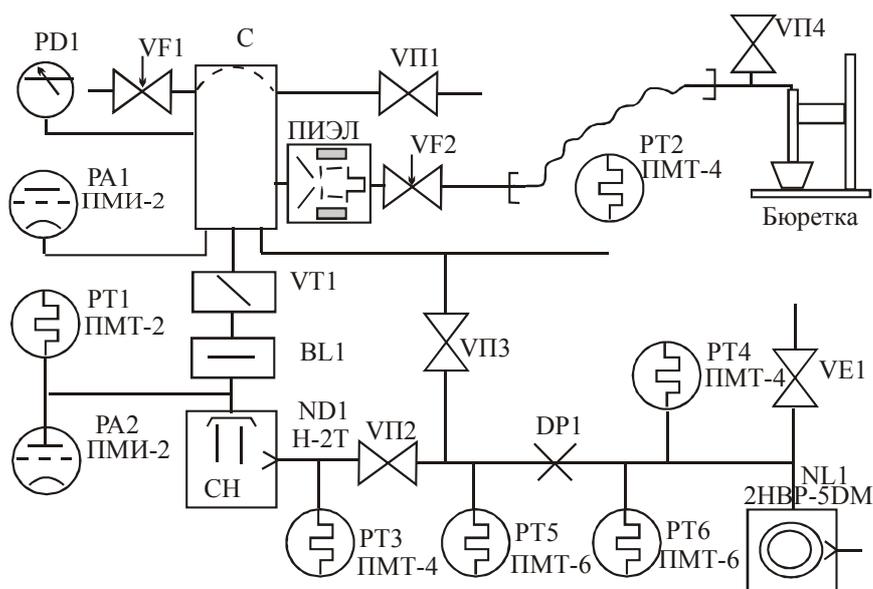


Рисунок 3.2 – Схема вакуумной системы установки УВН-2М

### 3.2.Задание

3.2.1.Изучить конструкцию ПИЭЛ.

3.2.2.Ознакомиться с вакуумной системой установки УВД-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 *NL1* 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 *VT1* (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 натекаль *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 натекаль *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 натекаля *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. Отчет составляется в соответствии с действующими в институте правилами оформления отчета о лабораторной работе.

3.4.2. В отчете представить индивидуальное задание, схему устройства ПИЭЛ.

3.4.3. Все непосредственно измеренные величины и данные, вычисленные из них, должны быть приведены в табличной и графической формах.

3.4.4. Выводы по результатам экспериментов.

3.4.5. Список использованной литературы.

## **4. Рекомендуемая литература**

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. Блюменштейн В. Ю., Клепцов А. А. Проектирование технологической оснастки: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 224 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978 5 8114 1099 6 Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=628](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=628)

3. 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)

### **3.2 Дополнительная литература, предназначенная для углубленного изучения дисциплины.**

1. 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)

2. 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

*Периодическая литература* (за последние 5 лет).

Технология машиностроения: обзорно-аналитический, научно-технический и производственный журнал. - М.: Технология машиностроения. - ISSN 1562-322X. -

Компоненты и технологии: научно-технический журнал. - М. : Издательство Файнстрит.

Современные технологии автоматизации . - М. : СТА-Пресс. - ISSN 0206-975X. Выходит ежеквартально (Есть прилож.: эл. опт. диск (CD-ROM) - Шифр ЭН 308)

Журналы: “Известия вузов, серия физика”, “Автоматизация и современные технологии” и др.

Реферативные журналы: ”Электроника”, “Физика”

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование плазменного источника электронов

Методические указания к лабораторной работе

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