

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 ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ДВОЙНОГО ЗОНДА

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

Орликов, Леонид Николаевич

Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда: 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. - 13 с.

Цель работы: Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда

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

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА
МЕТОДОМ ДВОЙНОГО ЗОНДА

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
2.1 Общие понятия	5
2.2 Оценка параметров плазмы	7
2.3 Контрольные вопросы	9
3 Экспериментальная часть	9
3.1 Оборудование	9
3.2 Задание на работу	10
3.3 Обработка результатов измерений	10
3.4 Методические указания по выполнению работы	11
3.5 Содержание отчета	11
Рекомендуемая литература	12

1 Введение

Метод зондов позволяет определить основные параметры плазмы: электронную температуру, концентрацию электронов и ионов, скорости частиц и тд. 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.

2. Теоретическая часть

2.1 Общие понятия

На рис. 2.1 показана схема включения зонда.

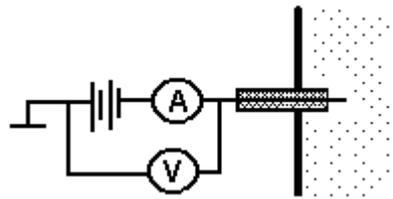


Рисунок 2.1 - Схема включения Ленгмюровского зонда

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

На рис. 2. 2 показана типичная зондовая характеристика

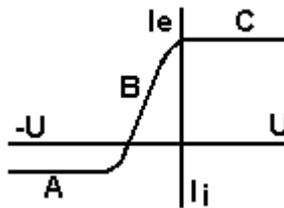


Рисунок 2.2 - Типичная зондовая характеристика

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)

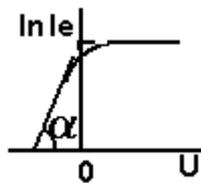


Рисунок 2.3 - Зондовая характеристика одиночного зонда в полулогарифмическом масштабе

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

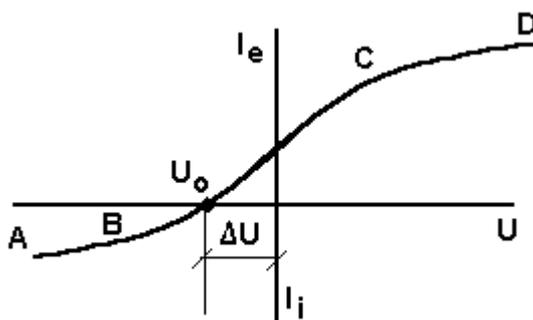


Рисунок 2.4 - Вольтамперная характеристика двойного зонда

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 ΔU , 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 слаботочного газового разряда ($I=0,5$ А, $U=1$ кВ, $d=1$ см).

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

1	2	3
Коэф термического равновесия	$\Delta W/ W_T$	0,67
Плотность электрического тока	$J=I/S_3$	$5 \cdot 10^{-4}$ А/см ²
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 ³
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	$\lambda_n=1/n\delta$	
Сечение рассеяния	$Q=1/\lambda_n$	
Минимальное сеч взаимодействия	$S_e=n_e Q_e$	10^{-6} 1/см
Коэф амбиполярной диффузии	$D=1/3 \nu_i \cdot \lambda_i$	$2,79 \cdot 10^2$ м ² /с
Подвижность электронов	$\mu_e=V_e/E$	$1,3 \cdot 10^3$ м ² /В·с
Подвижность ионов	$\mu_i=\nu_i/E$	30 м ² /В·с
Дебаевский радиус	$r=\sqrt{\frac{T_e}{n}}$ см	$1,7 \cdot 10^{-1}$ 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 ом/м ²
Кулоновский логарифм	$\Lambda=23,4 - 1,15 \lg n - 3,45 \lg T_e$	$8,4 < 50$
Ленгмюровская (плазменная) частота	$\omega_0=(\frac{4\pi n e^2}{m_e})^{1/2}$	$5,94 \cdot 10^3$
Ларморовский радиус (В=0,3Тл)	$R=mV/eB$	$5,68 \cdot 10^{-2}$ 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	$T=2\pi m/eB$	$178,4 \cdot 10^{-12}$
Мера замагниченности	λ/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.

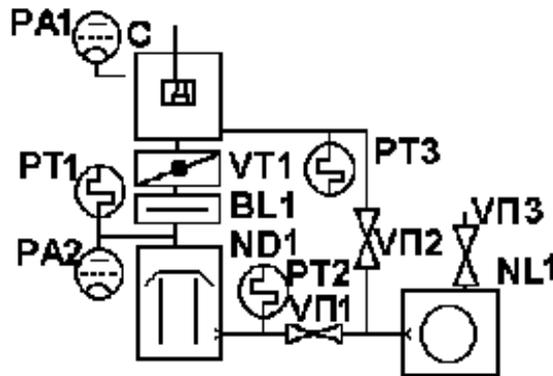


Рисунок 3.1 - Вакуумная схема установки квазипериодического действия

С-камера, Д-деталь, РА1, РА2-ионизационные датчики давления. РТ1-РТ3- тепловые датчики давления, VT1-высоковакуумный затвор, BL1-ловушка, ND1-диффузионный насос, NL1-форвакуумный насос, ВП1-ВП2-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 ВП1 и ВП2. 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 ~ 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.

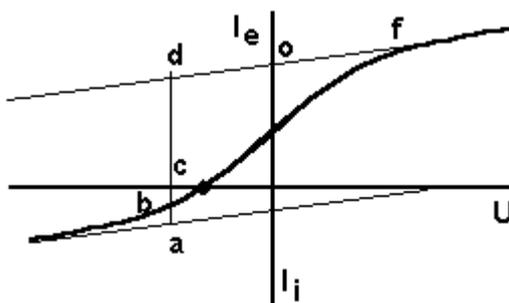


Рисунок 3.2 - Вид зондовой характеристики двойного зонда

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.

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

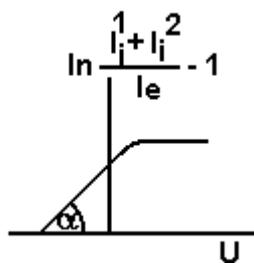


Рисунок 3.3 - Полулогарифмическая зависимость токов зондов от напряжения на зонды

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 β мала и можно допустить, что:

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

3.5 Содержание отчета

- 1 Схема вакуумной системы
- 2 Схема высоковольтной части установки
- 3 Принципиальная схема питания зонда
- 4 Расчеты параметров плазмы

- 5 Алгоритм включения и выключения установки
- 6 Схема силового питания вакуумных насосов
- 7 Конструкции вакуумных соединений (в ручном исполнении)

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
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
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
4. 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
5. 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

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование плазмы газового разряда методом двойного зонда

Методические указания к лабораторной работе

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