

ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Ф.М. ДОСТОЕВСКОГО

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ И РАДИОФИЗИКИ

Зондовый метод исследования плазмы

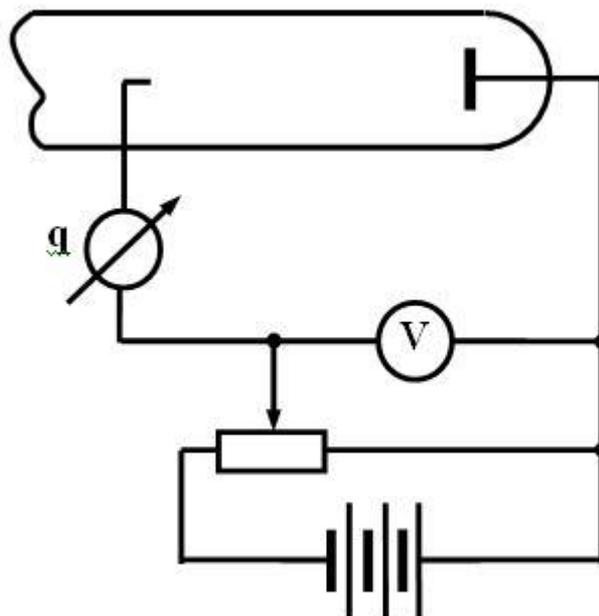
Выполнил: магистрант 1 курса
группы ФРМ-502-О-01
Ю.М. Терёхин

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
доцент, В.В. Шкуркин

Цель работы:

- описать методы зондовых исследований плазмы,
- изучить теорию электронного тока на зонд,
- установить связь энергетического спектра электронов и производных ВАХ,
- описать модуляционный метод второй производной тока зонда по потенциалу.

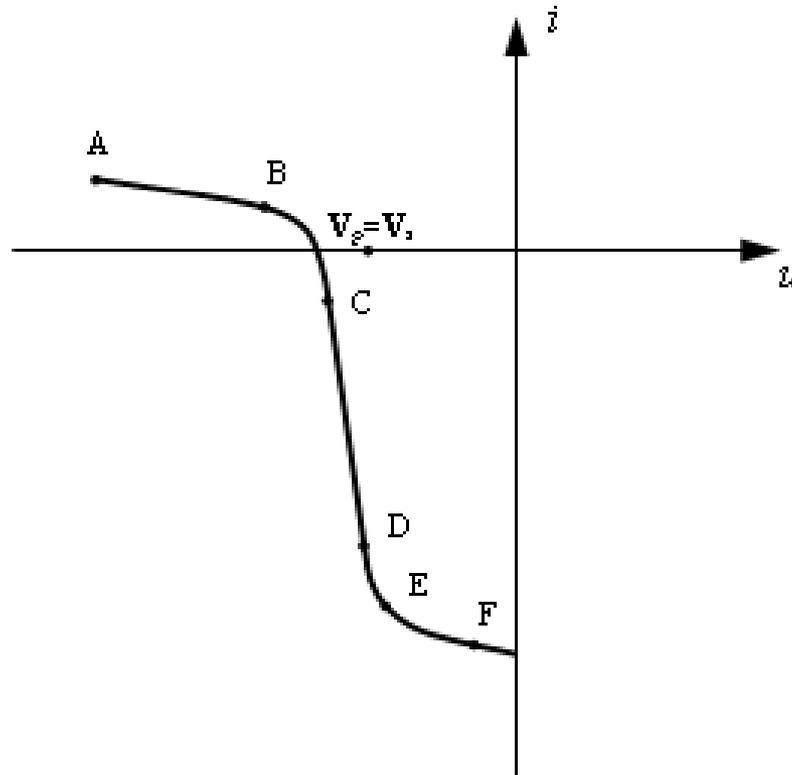
Рис.1. Схема зондовых измерений Ленгмюра (1923г.)



Достоинства:

1. Возможность определять локальные значения параметров в точке, где находится зонд. Размер области, по которой усредняются значения параметров, незначительно превышает размеры зонда.
2. Простота измерений, не требующих специальной, сложной аппаратуры.

Рис. 2. Общий вид зондовой характеристики



Для определения параметров плазмы необходимо вычислить ВАХ исходя из принятой теоретической схемы и сравнить ее с наблюдаемой. В силу значительной сложности теории, объясняющей зависимость тока на зонд от его потенциала, точный вид характеристики зонда получить невозможно [1], поэтому при построении теории приходится вводить те или иные ограничения.

Допущения зондовой теории, разработанные Ленгмюром

- 1. В области плазмы можно пренебречь объемным зарядом частиц вследствие квазинейтральности плазмы.
- 2. В области слоя при отрицательном потенциале зонда можно пренебречь объемным зарядом, создаваемым электронами.
- 3. Образование ионов в слое и вторичных частиц на поверхности зонда не происходит.
- 4. На внешней границе слоя объемного заряда потенциал обращается в нуль (т.е. электрическое поле зонда не проникает в плазму и она за пределами слоя не возмущена).

Методы измерения функции распределения электронов по энергиям опираются на интегральное соотношение, установленное Ленгмюром [1]:

$$j = \frac{2\pi e n}{m^2} \int_{eV}^{\infty} (\varepsilon - eV) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

где n , e , m - плотность, заряд, и масса электрона соответственно, V - потенциал зонда.

$$\frac{d^2 j}{dV^2} = \frac{2\pi e^3 n}{m^2} f(eV). \quad (2)$$

Формула Дрювестейна, устанавливающая связь между второй производной электронного тока на зонд по его потенциалу и функцией распределения электронов по энергиям

$$f(\varepsilon) = \left(\frac{m}{2\pi k T_e}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k T_e}\right) \quad (3)$$

$$\langle v \rangle = (8kT_e / \pi m)^{1/2} \quad (4)$$

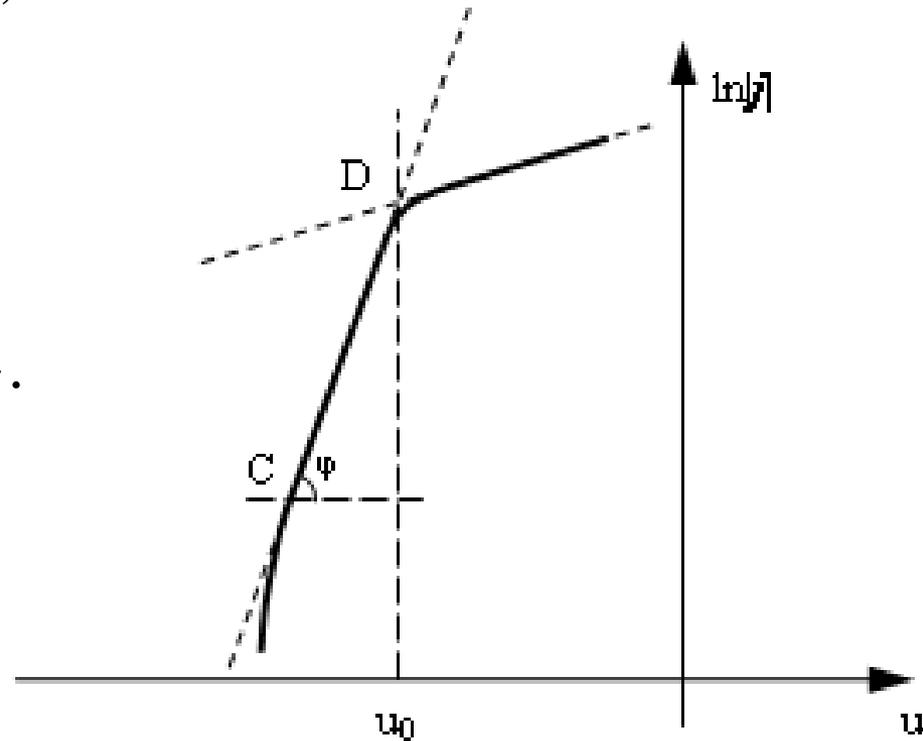
$$j = \frac{ne\langle v \rangle}{4} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right). \quad (5)$$

$$\ln|j| = \ln(ne\langle v \rangle/4) - eV/kT_e; \quad (6)$$

$$\frac{d \ln|j|}{dV} = -\frac{e}{k T_e};$$

$$T_e = -\frac{e}{k} \frac{1}{d \ln|j| / dV} = -\frac{e}{k} \frac{1}{\operatorname{tg} \phi}.$$

$$n = \frac{4i_{e0}}{e\langle v \rangle S}. \quad (7)$$



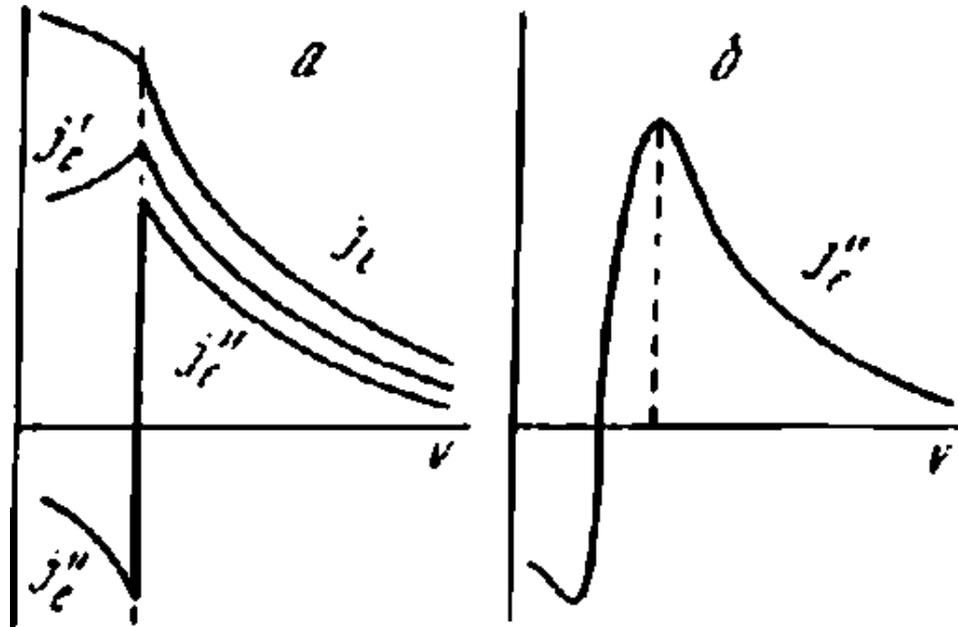


Рис. 4. Схематический вид зондовых характеристик и их производных
 а) - идеальная характеристика j_e , ее первая и вторая производные j_e' , j_e'' ;
 б) - типичная экспериментальная вторая производная j_e'' .

Метод второй гармоники

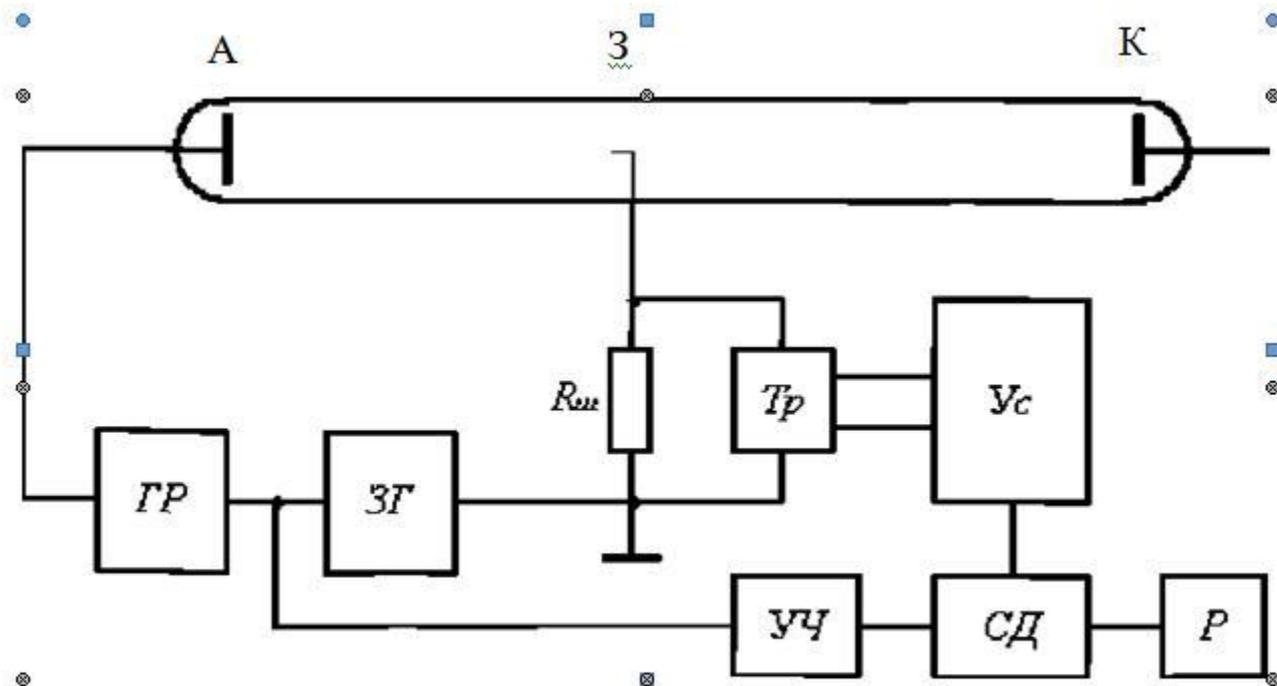
заключается в модуляции потенциала зонда синусоидальным напряжением малой амплитуды $v = v_0 \sin \omega t$, где $v_0 \ll V$.

$$i = i(V + v). \quad (15)$$

$$\begin{aligned} i = & i(V) + \frac{v_0^2}{4} i''(V) + \frac{v_0^4}{64} i^{IV}(V) + \frac{v_0^6}{2304} i^{VI}(V) + \dots + \left[v_0 i'(V) + \frac{v_0^3}{8} i'''(V) + \frac{v_0^5}{192} i^V(V) + \dots \right] \sin \omega t - \\ & - \left[\frac{v_0^2}{4} i''(V) + \frac{v_0^4}{48} i^{IV}(V) + \frac{v_0^6}{1536} i^{VI}(V) + \dots \right] \cos 2\omega t - \left[\frac{v_0^3}{24} i'''(V) + \frac{v_0^5}{384} i^V(V) + \dots \right] \sin 3\omega t + \\ & + \left[\frac{v_0^4}{192} i^{IV}(V) + \frac{v_0^6}{3840} i^{VI}(V) + \dots \right] \cos 4\omega t + \dots \end{aligned} \quad (16)$$

$$i_{2\omega} = \frac{v_0^2}{4} i''(V) \cos 2\omega t. \quad (17)$$

Рис. 5. Схема устройства для измерений второй производной ВАХ модуляционным методом



Заключение

Для повышения точности измерения второй производной зондовой характеристики и упрощения экспериментальной установки, предлагается:

- применить аппаратную функцию для устранения погрешностей, вызванных несовершенством метода,
- моделировать зондовые измерения с применением цифровой обработки сигналов,
- используя фильтрующие свойства быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычислить вторую производную тока зонда по потенциалу,
- оптимизировать процесс вычисления (определить приемлемый объем буфера БПФ и объем накопления спектров зондового тока) ВАХ с приемлемой точностью, при наличии шумов различного уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каган Ю.М., Перель В.И. Зондовые методы исследования плазмы. - УФН, 1963, Т. 81, вып. 3, с. 409 - 452.
2. Голубовский Ю.Б., Захарова В.М., Пасункин В.Н., Цендин Л.Д. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 3. С. 620–628.
3. Чен Ф. Электрические зонды. В кн.: Диагностика плазмы / под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. - М.: Мир, 1967, с. 94 - 164.
4. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат. 1969. 291 с.
5. Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981, 143 с.
6. Белов В.Г., Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Использование зондового метода в условиях шумящей плазмы // Журн.техн.физ. 1983. N.1, С.156-158.
7. Горбунов Н.А., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые измерения ФРЭЭ при промежуточных и высоких давлениях // Физика плазмы. 1989. Т.15, вып.12. С.1513-1520.
8. Арсланбеков Р.Р., Кудрявцев А.А., Хромов Н.А. Методика определения ФРЭЭ из зондовых характеристик при промежуточных и высоких давлениях // Физика плазмы. 1991. Т.17, вып.7. С.855-862.
9. Арсланбеков Р.Р., Кудрявцев А.А., Хромов Н.А. Зондовые измерения ФРЭЭ при промежуточных давлениях // Физика плазмы. 1991. Т.17, вып.7. С.863-867.
10. Арсланбеков Р.Р., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. и др. Восстановление функции распределения электронов по энергиям из зондовых характеристик при промежуточных и высоких давлениях // Физика плазмы. 1991. Т.17, вып.9. С.1161-1165.