

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени В. Н. КАРАЗИНА

**И. Н. Серета, А. Ф. Целуйко**

# **ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ**

Учебное пособие

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины

Харьков–2015

УДК 533.9.08(075.8)

ББК 22.333я73

С 32

**Рецензенты:**

**В. В. Чечкин** – доктор физико-математических наук, начальник лаборатории Института физики плазмы Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины;

**Н. И. Гришанов** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Украинской государственной академии железнодорожного транспорта;

**К. П. Шамрай** – доктор физико-математических наук, заведующий отделом теории плазмы Института ядерных исследований НАН Украины.

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины  
как учебное пособие для студентов высших учебных заведений  
(письмо № 1/11-4607 от 31.03.2014 г.)*

**Середа И. Н.** Зондовые методы диагностики плазмы : учеб. пособие [для студентов и аспирантов, изучающих диагностику плазмы] / И. Н. Середя, А. Ф. Целуйко – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015. – 192 с.

**ISBN 978-966-285-119-9**

Учебное пособие посвящено вопросам практического применения и теоретической интерпретации зондовых измерений в низкотемпературной плазме. Основное внимание уделяется зондовым измерениям в неподвижной плазме низкого, высокого и промежуточных давлений при отсутствии магнитного поля. Также обосновывается применение и интерпретация теории зондов в пылевой плазме и в плазме с магнитным полем. Приводятся рекомендации для практического определения параметров плазмы. Пособие предназначено для студентов и аспирантов, изучающих физику плазмы, и ориентировано на формирование базовых знаний в данной области.

**УДК 533.9.08(075.8)**

**ББК 22.333я73**

ISBN 978-966-285-119-9

© Харьковский национальный университет  
имени В. Н. Каразина, 2015

© Середя И. Н., Целуйко А. Ф., 2015

© Литвинова О. А., макет обложки, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	9
1.1. Применимость зондовых методик.....	9
1.2. Принцип работы зонда .....	11
1.3. Заряженный слой при малых потенциалах зонда. Радиус Дебая .....	12
1.4. Вольтамперная характеристика слоя. Толщина слоя пространственного заряда при большом потенциале зонда.....	14
<b>Глава 2. ПРЕДЕЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ</b> .....	19
2.1. Электронный ток на отталкивающий зонд.....	19
2.2. Ток на зонд в притягивающем поле .....	21
2.2.1. Сферический зонд.....	22
2.2.2. Цилиндрический зонд .....	24
<b>Глава 3. УЧЕТ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗОНДА В ПЛАЗМУ</b> .....	28
3.1. Критерий образования слоя .....	29
3.2. Оценка величины ионного тока на зонд .....	30
3.3. Эффективная потенциальная энергия .....	32
3.4. Лимитационное движение .....	36
3.5. Ионный ток на сферический зонд в неизотермической разреженной плазме .....	38
3.5.1. Связь концентрации в окрестности зонда с ходом потенциала .....	38
3.5.2. Распределение потенциала в окрестности зонда .....	41
3.5.3. Область слоя пространственного заряда .....	45
3.5.4. Область ионного слоя.....	46
3.5.5. Ионная часть зондовой характеристики .....	46
3.6. Ионный ток на цилиндрический зонд в неизотермической разреженной плазме .....	49

3.6.1. Связь концентрации в окрестности зонда с ходом потенциала.....	49
3.6.2. Распределение потенциала в окрестности зонда.....	50
3.6.3. Область слоя пространственного заряда.....	52
3.6.4. Область ионного слоя.....	52
3.6.5. Ионная часть зондовой характеристики.....	53
<b>Глава 4. РАСЧЕТ ИОННОГО ТОКА НА ЗОНД БЕЗ РАЗБИЕНИЯ НА ОБЛАСТИ ПЛАЗМЫ И СЛОЙ.....</b>	<b>55</b>
4.1. Радиальная теория движения ионов на зонд.....	55
4.2. Орбитальная теория движения ионов на зонд. Учет потенциальных барьеров.....	58
4.3. Практическое использование результатов расчета ионного тока для определения концентрации плазмы.....	66
<b>Глава 5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>77</b>
5.1. Потенциал плазмы. Плавающий потенциал.....	77
5.2. Определение температуры электронов.....	78
5.3. Обработка результатов зондовых измерений.....	79
<b>Глава 6. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>82</b>
6.1. Двойное электрическое дифференцирование ВАХ (модулирование ВАХ сигналами специальной формы или естественным шумом).....	83
6.2. Двойное аналоговое дифференцирование.....	86
6.3. Двойное численное дифференцирование.....	87
<b>Глава 7. ДВОЙНОЙ ЗОНД.....</b>	<b>89</b>
7.1. Температура электронов.....	91
7.2. Определение электронной температуры по изменению потенциала и концентрации плазмы в амбиполярном поле.....	95
7.3. Оценка электронной температуры, исходя из уравнений баланса электронов и ионов в разряде.....	97
<b>Глава 8. МЕТОД ПРОТИВОЗОНДА. ТРОЙНОЙ ЗОНД.....</b>	<b>99</b>
8.1. Метод противозонда.....	99
8.2. Тройной зонд.....	101
<b>Глава 9. ЭМИССИОННЫЕ ЗОНДЫ.....</b>	<b>104</b>
9.1. Термозонд.....	104
9.2. Зонд тлеющего разряда.....	107

<b>Глава 10. МНОГОСЕТОЧНЫЙ ЗОНД</b> .....	109
<b>Глава 11. ПОБОЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ИСКАЖАЮЩИЕ ЗОНДОВУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ</b> .....	118
<b>Глава 12. ЗОНД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ</b> .....	125
12.1. Дрейф и диффузия заряженных частиц в магнитном поле .....	126
12.2. Коэффициенты диффузии электронов в магнитном поле .....	127
12.3. Слабые магнитные поля .....	128
12.4. Умеренные магнитные поля .....	129
12.4.1. Электронный ток на собирающий зонд. Диффузионное приближение .....	129
12.4.2. Движение электронов вблизи зонда в магнитном поле. Бесстолкновительная модель .....	136
12.5. Сильные магнитные поля.....	140
<b>Глава 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗОНДЫ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ</b> .....	141
13.1. Слой пространственного заряда с учетом столкновений .....	143
13.2. Ионный ток на отрицательно заряженный зонд .....	146
13.2.1. Ионный ток на плоский зонд.....	148
13.2.2. Ионный ток на сферический зонд.....	149
13.2.3. Ионный ток на цилиндрический зонд .....	150
13.3. Численные решения без разбиения на область квазинейтральности и слой.....	153
<b>Глава 14. ЗОНДОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ</b> .....	159
14.1. Орбитальная модель движения частиц в столкновительном слое .....	159
14.2. Радиальная модель движения частиц в столкновительном слое .....	161
14.3. Совместная столкновительная модель орбитального и радиального движения ионов на зонд.....	166
<b>Глава 15. МЕТОДЫ ТЕОРИИ ЗОНДОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ</b> .....	172
15.1. Теория радиального дрейфа.....	173
15.2. Теория ограниченных орбит .....	175
15.3. Гидродинамическая модель диффузионного приближения .....	177
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	185