

Министерство образования Российской Федерации  
Петрозаводский государственный университет  
Научно-образовательный центр «Плазма»

**Л. А. ЛУИЗОВА**

**ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ**

*Учебное пособие*

Петрозаводск

2003

УДК 533.9.08  
ББК 22.233  
Л 839

**Рецензенты:**  
доктор физ.-мат. наук Ю. З. Ионих  
доктор физ.-мат. наук В. И. Сусун

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Петрозаводского государственного университета

**Луизова Л. А.**

Л 839 Оптические методы диагностики плазмы: Учеб. пособие /  
Л. А. Луизова; ПетрГУ. – Петрозаводск, 2003. – 148 с.  
ISBN 5–8021–0289–6

Пособие предназначено для студентов, аспирантов и научных сотрудников, специализирующихся по физической электронике, спектроскопии, физике плазмы. Рассмотрены методы определения параметров плазмы по излучению, поглощению, преломлению, рассеянию света. В отдельные главы выделено описание спектральных приборов и методов спектроскопии сверхвысокого разрешения. Описаны методы, в том числе оригинальные, диагностики неоднородной плазмы и учета аппаратных искажений при спектроскопических измерениях.

УДК 533.9.08  
ББК 22.233

ISBN 5–8021–0289–6 © Л. А. Луизова, 2003  
© Петрозаводский госуниверситет, 2003

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ОБЩАЯ СХЕМА ДИАГНОСТИКИ .....	6
2. МОДЕЛИ СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ .....	9
3. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПО СПЕКТРАМ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ .....	12
3.1. Спектроскопические характеристики элементарного объема .....	12
3.2. Формирование контура тонкого слоя .....	16
3.2.1. Общие положения .....	16
3.2.2. Естественное уширение .....	17
3.2.3. Допплеровское уширение .....	18
3.2.4. Эффекты давления. Используемые приближения .....	20
3.2.5. Штарковское уширение линий водорода и водородоподобных ионов .....	21
3.2.6. Уширение линии из-за квадратичного Штарк- эффекта .....	22
3.2.7. Резонансное уширение .....	25
3.2.8. Ван-дер-ваальсовское уширение .....	25
3.3. Спектроскопические характеристики плазмы. Модели источника .....	30
3.3.1. Контур линии излучения .....	30
3.3.2. Оптическая толщина .....	30
3.3.3. Однородный источник .....	30
3.3.4. Оптически тонкая неоднородная плазма .....	33
3.3.5. Оптически плотная неоднородная плазма .....	34
3.3.6. Плазма с конденсированной дисперсной фазой (КДФ) .....	39
3.4. Спектральные приборы. Модель аппаратуры .....	40
3.4.1. Общая схема и показатели назначения спектроскопической установки .....	40
3.4.2. Классификация спектральных приборов .....	41
3.4.3. Аппаратная функция (импульсный отклик) спектрального прибора .....	42
3.4.4. Светосила прибора .....	44
3.4.5. Щелевые приборы .....	45
3.4.6. Интерференционные приборы .....	55
3.4.7. Характеристики фотоприемников .....	64
3.4.8. Градуировка спектрометров по длинам волн .....	66

3.4.9. Измерение энергетической яркости .....	66
3.4.10. Измерение оптической толщины .....	71
3.4.11. Определение температуры по излучению .....	74
3.4.12. Координатно-чувствительная спектроскопия .....	76
<b>4. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ</b>	
<b>ПРЕЛОМЛЕНИЯ</b> .....	81
4.1. Связь показателя преломления с параметрами плазмы ....	81
4.2. Теневой (шлирен) метод .....	84
4.3. Интерферометрические методы определения показателя преломления .....	88
4.4. Поляризация спектроскопия .....	92
<b>5. «НЕКОРРЕКТНЫЕ» ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В ОПТИЧЕСКОЙ</b>	
<b>ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ</b> .....	96
5.1. Исключение аппаратных искажений .....	96
5.2. Плазменная томография .....	98
5.2.1. Принципы томографии .....	98
5.2.2. Приложение методов томографии к задачам диагностики плазмы .....	104
5.2.3. Рациональные алгоритмы обработки больших массивов отсчетов в оптической диагностике неоднородной плазмы .....	110
5.2.4. СВЧ-томография .....	116
<b>6. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ПО РАССЕЯНИЮ ЛАЗЕРНОГО</b>	
<b>ИЗЛУЧЕНИЯ</b> .....	117
6.1. Рассеяние на свободных электронах .....	117
6.2. Учет корреляции движения электронов, рассеяние на плазменных колебаниях .....	121
6.3. Определение заселенностей уровней методом КАРС-спектроскопии .....	124
6.4. Рассеяние на макрочастицах .....	127
<b>7. СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ</b> .....	129
7.1. Внутридоплеровская спектроскопия .....	129
7.2. Фотогетеродинамирование и корреляционная спектроскопия .....	131
<b>8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО</b>	
<b>ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ</b> .....	139
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	141
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	146

## ВВЕДЕНИЕ

Плазма — это частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, а линейные размеры области, занимаемой им, значительно превосходят расстояние (так называемый дебаевский радиус), на котором электрическое поле отдельной заряженной частицы исчезает вследствие экранирования другими частицами.

Диагностика плазмы — это определение локальных и мгновенных значений основных ее параметров: концентраций электронов, атомов и молекул, входящих в состав плазмообразующей среды в основном и различных возбужденных состояниях, а также функций распределения различных компонент плазмы по энергиям. В предположении о максвелловских распределениях они характеризуются соответствующими температурами (электронной, ионной, атомной). Низкотемпературной называют плазму, в которой средняя энергия электронов не превосходит энергии ионизации основной компоненты плазмообразующей среды (около 10 эВ).

Целью диагностики, как правило, является проверка и построение физической и математической моделей плазмообразующей среды. Такие модели имеют как фундаментальное научное значение (т. к. плазма — это уникальная «лаборатория» элементарных процессов взаимодействия атомов, молекул и заряженных частиц), так и прикладное, поскольку понимание процессов, протекающих в технологическом объекте (источнике света, разряднике, сварочной дуге и т. п.) позволяет направленно совершенствовать его рабочие характеристики.

В то же время любой метод диагностики, который, в сущности, есть метод косвенного измерения некоторой физической величины, всегда основан на определенных моделях изучаемого объекта, на каких-то априорных предположениях о свойствах и параметрах объекта.

Эти модели и предположения исследователь строит на основании общепринятых теорий, изучения опыта предшественников, и вероятность того, что полученные результаты достоверны, определяется их внутренней непротиворечивостью и сравнением с результатами независимых экспериментов.

В основе оптических методов диагностики лежат как определенные модели исследуемого объекта (плазмы), так и модели оптического сигнала и процессов формирования оптических характеристик такого сложного объекта, каким является неоднородная нестационарная плазма.