



МАТЕРИАЛЫ  
VIII РОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА  
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Москва, НИЯУ МИФИ,  
23-25 октября 2012 г.

Москва 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственная корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ»

Научный совет по физике низкотемпературной плазмы РАН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МАТЕРИАЛЫ  
VIII РОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА  
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ»

Москва, НИЯУ МИФИ, 23–25 октября 2012 г.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель О.  
Борисов Ю.А. Институт ядерной  
и атомной энергии им. А.И. Африкова  
Секретарь О.К. Борисова  
Секретарь О.А. Аникеев  
Заместитель секретаря О.А. Аникеев  
Руководитель О.А. Аникеев

Москва 2012

ББК 22.333я5  
УДК: 533.9 (06)  
С-56

Материалы VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». Москва, 23–25 октября 2012 г. – М.: НИУ МИФИ, 2012, 172 с.

Сборник содержит материалы, представленные в виде устных и стеновых докладов на 8-ой Российской конференции по диагностике плазмы и ее применению. Целью проведения конференции является обмен опытом в области современных достижений в диагностике как высокотемпературной, так и низкотемпературной плазмы с акцентом на привлечение к участию в нем студентов, молодых специалистов и ученых. Тематика сборника охватывает как вопросы диагностики плазмы в термоядерных реакторах, в частности в реакторе ИТЭР, а также в установках с инерционным удержанием плазмы, образуемой лазерами и в Z-пинчах. Представлены также работы по диагностике импульсных и стационарных газовых разрядов в исследовательских и технологических установках.

Включенные в сборник материалы приведены в авторской редакции с минимальной редакторской правкой.

Материалы получены до 20.10.2012.

Редакционная коллегия: *В.А. Курнаев*

*А. С. Савёлов*

*Э.И. Додулад*

*С.А. Саранцев*

ISBN 978-5-7262-1756-7

© Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ», 2012

## ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»  
МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
«РОСАТОМ»

СЕКЦИЯ «ДИАГНОСТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»  
СОВЕТА «ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ» РАН

### ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Воронов Г.С. (ИОФ РАН)  
Гаранин С.Г. (РФЯЦ ВНИИЭФ) чл.корр. РАН  
Ковальский Н.Г. (ТРИНИТИ)  
Кругляков Э.П. (ИЯФ СО РАН) - акад.РАН  
Куринаев В.А. (НИЯУ МИФИ)  
Лебедев Ю.А. (ОФО РФ, ИНХС)  
Петров О.Ф.(ОИВТ РАН) чл.корр. РАН  
Пергамент М.И. (ТРИНИТИ)  
Савёлов А.С. (НИЯУ МИФИ)  
Сергеев В.Ю. (СПбГТУ)  
Сон Э.Е. (ОИВТ РАН)-чл.корр. РАН  
Стрелков В.С. (ИФТ НИЦ "Курчатовский институт")

### ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Куринаев В. А. (НИЯУ МИФИ)  
Савёлов А. С. (НИЯУ МИФИ)  
Додулад Э.И. (НИЯУ МИФИ)  
Саранцев С.А. (НИЯУ МИФИ)  
Золотовская С.В. (НИЯУ МИФИ)  
Раевский И.Ф. (НИЯУ МИФИ)

**НЕУСТРАНИМЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ  
ИСКАЖЕНИЯ СПЕКТРА, ИЗМЕРЕМОГО  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ СПЕКТРОМЕТРАМИ**

B.A. Урусов

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

В оптической спектроскопии, рассматривая редукцию к идеальному спектральному прибору, аппаратную функцию такого прибора считают дельта-функцией [1]. Из оптической спектроскопии это определение распространилось на электронную спектрометрию [2] и масс-спектрометрию [3]. Обосновывался подобный подход требованием, чтобы в идеальном спектральном приборе измеряемое распределение и сигнал на выходе прибора совпадали. При этом накладывалось дополнительное условие на нормировку аппаратной функции, интеграл от которой должен был равняться единице.

Определяемая таким образом аппаратная функция отличается от экспериментально измеряемой функции отклика электростатических спектрометров на моноэнергетический поток заряженных частиц с нормировкой на входной ток и, соответственно, от принятого в настоящей работе определения аппаратной функции. Непонимание этого обстоятельства может привести (и приводит) к путанице в работах.

Как было показано в работах [4]-[6], при условии независимости энергетического и углового распределения на входе в спектрометр в общем случае функция распределения частиц по энергии и выходной сигнал связаны интегральным соотношением

$$\int_0^{\infty} \delta(E) f(E) A\left(\frac{qU_1}{E}, \dots, \frac{qU_n}{E}\right) dE = I(U_1, \dots, U_n), \quad (1)$$

где  $\delta(E)$ -эффективность регистрации частиц выходным детектором,  $f(E)$ -функция распределения частиц по энергии на входе в спектрометр,

$A\left(\frac{qU_1}{E}, \dots, \frac{qU_n}{E}\right)$ -аппаратная функция спектрометра,  $I(U_1, \dots, U_n)$ -сигнал на

выходе спектрометра,  $U_1, \dots, U_n$  - потенциалы на пластинах электростатического спектрометра относительно входной диафрагмы.

Интеграл от аппаратной функции для электростатических спектрометров, а также для магнитных спектрометров, в общем случае нельзя нормировать на единицу, т. к. в этом случае она перестанет быть ядром интегрального уравнения. Например, для электростатических спектрометров, удовлетворяющих условию линейной связи

$$U_2/U_1 = \lambda_2, \dots, U_n/U_1 = \lambda_n, \quad (2)$$

уравнение (1) приобретает вид

$$\int_0^{\infty} \delta(E) f(E) A\left(\frac{qU_1}{E}, \lambda_2, \dots, \lambda_n\right) dE = I(U_1), \quad (3)$$

где  $\lambda_2, \dots, \lambda_n$  - постоянные.

При условии, что на ширине аппаратной функции распределение меняется слабо, получаем:

$$I(U_1) \approx \delta(kqU_1) f(kqU_1) \int_0^{\infty} A\left(\frac{qU_1}{E}\right) dE = C \cdot \delta(kqU_1) \cdot q \cdot U_1 \cdot f(kqU_1). \quad (4)$$

Дисперсионным электростатическим спектрометром с идеальной фокусировкой будем считать такой спектрометр, который будет фокусировать моноэнергетический пучок в плоскости выходной диафрагмы в точку, а выходную щель будем считать бесконечно малой, но отличной от нуля, т. к. в противном случае выходной сигнал будет равен нулю.

Рассмотрим поведение такого спектрометра на примере спектрометра с линейной связью потенциалов (2). При сканировании напряжением сигнала от моноэнергетического пучка при любом напряжении будет равен нулю, за исключением одной точки, в которой сигнал будет равен входному току. Следовательно, аппаратная функция будет везде равна нулю, за исключением одной точки, в которой будет равна единице.

Рассмотрим теперь связь между функцией распределения по энергии и выходным сигналом. Для простоты будем считать, что эффективность регистрации равна единице. Щель будем считать маленькой, но конечной ширины, а потом совершим предельный переход.

При предельном переходе к бесконечно малой щели, но отличной от нуля, приближенное равенство (4) превращается в точное. Откуда получаем для функции распределения частиц по энергии выражение:

$$f(kqU_1) = \frac{I(U_1)}{CqU_1} \quad (5)$$

Идеальным спектральным измерительным прибором называется прибор, у которого измеряемое распределение и сигнал на выходе совпадают [1]. Следовательно, электростатический спектрометр с идеальной фокусировкой, потенциалы на электродах которого линейно связаны, не является идеальным спектральным измерительным прибором.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:  
для дисперсионного спектрометра с идеальной фокусировкой выходной сигнал и функция распределения по энергии в общем случае будут отличаться по форме;

для дисперсионного спектрометра с идеальной фокусировкой, при условии (2), функцию распределения частиц по энергии можно получить делением выходного сигнала на напряжение развертки (на энергию настройки, учитывая, что энергия настройки и напряжение развертки в этом случае прямо пропорциональны).

В общем случае для электростатического спектрометра с идеальной фокусировкой функцию распределения можно восстановить, пользуясь формулой

$$f(W) = \frac{I(U_1, \dots, U_n)}{\int_0^W A\left(\frac{qU_1}{E}, \dots, \frac{qU_n}{E}\right) dE} \quad (6)$$

где  $W(U_1, \dots, U_n)$  - энергия настройки анализатора, в общем случае произвольная функция потенциалов.

Идеальному спектральному измерительному прибору соответствует режим развертки, при котором интеграл в выражении (6) будет равен постоянной. Частным случаем такого режима является режим описываемый уравнением

свертки. Таким образом, вопрос о существовании режима, в котором спектрометр будет идеальным спектральным измерительным прибором, связан с решением проблемы существования режима с аппаратной функцией вида  $A(W-E)$ . Если, каким-либо образом, будет доказано, что не существует режима развертки, при котором электростатический спектрометр с идеальной фокусировкой будет идеальным спектральным прибором, то это автоматически означает, что не существует режима развертки с аппаратной функцией вида  $A(W-E)$ . Если же будет доказано существование режима развертки с аппаратной функцией вида  $A(W-E)$ , то это автоматически означает, что существует режим развертки, в котором электростатический спектрометр с идеальной фокусировкой будет идеальным спектральным прибором.

В заключение отметим, что полученный результат можно в полной мере применить к магнитным спектрометрам с разверткой энергетического спектра магнитным полем.

#### Литература

1. Раутиан С.Г. Реальные спектральные приборы //УФН, 1958, Т.LXVI, № 11, с.475-517
2. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978, 224 с.
3. Разников В.В., Разникова М.О. Информационно-аналитическая масс-спектрометрия. М.: Наука, 1992, 247 с.
4. Курнаев В.А., Урусов В.А. Аппаратные функции электростатических и магнитных анализаторов и обработка экспериментальных результатов. Препринт № 018-95. .М.: МИФИ, 1995, 36 с.
5. Курнаев В.А., Урусов В.А.//Труды XII международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью". Т.1. М.:1995. с.185-187
6. Курнаев В.А., Урусов В.А. Влияние аппаратных функций электростатических и магнитных анализаторов на обработку экспериментальных результатов // ЖТФ, 1997, Т.67, №6, с.86-91