

На правах рукописи

Урусов Виктор Александрович

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРИ АНАЛИЗЕ
ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

01.04.08 — физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Курнаев Валерий Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Сысоев Александр Алексеевич
доктор физико-математических наук,
профессор Волков Степан Степанович

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

Защита состоится «_27_» _января_ 2012 г. в _16_ час. _00_ мин. на
заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при НИЯУ МИФИ в
конференц-зале К-608, по адресу:

115409 Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 8(495)323-91-67, 8(495)324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор, доктор физико-
математических наук



Евсеев И.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Электростатические и магнитные анализаторы являются одним из основных средств в корпускулярной диагностике плазмы и исследовании взаимодействия частиц с поверхностью твердых тел [1-3]. Как известно [4], электростатические и магнитные анализаторы в зависимости от типа сканирования делятся на два типа: первый, когда сканирование спектра происходит по пространственной координате — спектрографы; второй, когда сканирование осуществляется изменением величины поля — спектрометры. В свою очередь, спектрометры делятся на статические и динамические – времяпролетные. Статические спектрометры благодаря компактности и простоте сканирования получили очень широкое распространение. Любой спектрометр вносит искажения в исходный спектр, поэтому возникает задача о восстановлении по сигналу на выходе анализатора истинного распределения частиц по энергиям, поскольку характеристики энергетических спектров, в конечном счете, влияют на понимание и описание процессов, происходящих в плазме и при взаимодействии частиц с поверхностью. На момент начала работы разработанные способы восстановления спектров носили полуэмпирический характер, и серьезного теоретического анализа алгоритмов восстановления спектров проведено не было. Настоящая работа частично устраняет этот пробел для статических спектрометров.

Цель работы

1. Установление для спектрометров общих связей между распределением заряженных частиц по энергии и сигналом на выходе анализатора.
2. Разработка адекватных методов восстановления энергетических спектров заряженных частиц для дисперсионных электростатических и магнитных

спектрометров и спектрометров с предварительным замедлением частиц.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые, исходя из первых принципов, получено общее уравнение связи между функцией распределения по энергии и сигналом на выходе для электростатических и магнитных спектрометров, на основе которого была объяснена экспериментально наблюдаемая линейная зависимость абсолютного энергетического разрешения от энергии.
2. Для электростатических спектрометров получено точное (в виде ряда) решение уравнения связи при условии линейной связи подаваемых на обкладки потенциалов, позволившее оценить область применимости стандартного решения (деления сигнала на энергию настройки).
3. Получено уравнение связи между функцией распределения по энергии и сигналом на выходе и найдено его решение с учетом флуктуаций прикладываемых к дисперсионному спектрометру потенциалов. Показано, что полученное уравнение эквивалентно уравнению, описывающему сглаживание сигнала с помощью фильтра с постоянным окном. На примере экспериментальных спектров отражения ионов дейтерия от поверхности бериллия показано отличие истинного распределения частиц, восстановленного с помощью найденного решения, от спектра, получаемого при применении стандартной процедуры восстановления спектров.
4. Получена приближенная аналитическая формула для восстановления спектра в электростатическом спектрометре с предварительным замедлением, позволившая объяснить наблюдающуюся для некоторых типов спектрометров корневую зависимость функции пропускания от энергии.
5. Для встраиваемого статического масс-спектрометра с разверткой ускоряющим напряжением, работающего в собственном магнитном поле

плазменных установок, получено уравнение связи сигнала и истинной функции распределения ионов по импульсу. Найдено приближенное решение данного уравнения и проведена оценка точности определения массового спектра эмитированных из плазмы ионов.

6. Для двухкаскадного энерго-масс-спектрометра с двойной фокусировкой получено уравнение связи между сигналом и функцией распределения по энергии или по импульсу и обоснованы алгоритмы восстановления энергетических и масс-спектров для разных режимов развертки спектров.

Практическая ценность

Результаты исследований применены для повышения точности нахождения истинных распределений заряженных частиц, эмитированных плазмой и поверхностью твердого тела, а также могут использоваться для:

- улучшения энергетического разрешения спектрометров;
- разработки спектрометров с предварительным замедлением;
- разработки автоматизированных систем обработки спектров;
- обработки масс-спектрометрических данных.

На защиту выносятся следующие, содержащие научную новизну,

результаты:

- полученное из первых принципов уравнение связи между сигналом на выходе электростатических спектрометров и функцией распределения частиц по энергии при условии независимости углового и энергетического распределения частиц на входе в спектрометр;
- решение в виде ряда этого уравнение для случая линейной связи потенциалов, позволившее оценить область применимости стандартной процедуры восстановления спектров и улучшить в 2-3 раза их разрешение;

- уравнение связи между функцией распределения по энергии и сигналом на выходе, учитывающее флуктуации прикладываемых к дисперсионному спектрометру потенциалов и решение этого уравнения;
- уравнение связи между сигналом и функцией распределения для магнитных спектрометров при условии линейной связи элементов магнитной оптики и, полученные на его основе, уравнения для двухкаскадного энерго-масс-спектрометра с двойной фокусировкой и магнитного спектрометра с разверткой ускоряющим напряжением, работающего в собственном магнитном поле плазменных установок;
- приближенная аналитическая формула для восстановления спектра в электростатическом спектрометре с предварительным замедлением, позволившая объяснить наблюдающуюся для некоторых типов спектрометров корневую зависимость функции пропускания от энергии.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на XII, XIII, XX международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (1995, 1997, 2011 Звенигород), 6th Conference on Application of Surface and Interface Analysis «ECACIA 95» (1995 Montreux, Switzerland), в материалах VI российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды» (2008), а также изложены в 12 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя:

Все представленные в диссертации результаты получены автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 103 страницы, 26 рисунков. Список литературы включает 63 наименования.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, представляются основные положения, выносимые на защиту.

Литературный обзор посвящен анализу теоретических работ в области описания связи между выходным сигналом и функцией распределения по энергии для спектрометров. Рассмотрены экспериментальные работы в этой области. Проанализировано наблюдающееся расхождение между экспериментальными работами и теоретическим анализом для спектрометров с предварительным торможением. Проведен критический анализ некоторых последних работ в области аппаратных функций спектрометров.

Во второй главе, исходя из анализа уравнений движения и принципов подобия при условии независимости углового и энергетического решения, используя метод вычисления аппаратных функций, предложенный в работах [1]-[2], для электростатических спектрометров получено общее уравнение связи между сигналом на выходе спектрометра I и функцией распределения по энергии $f_2(E)$

$$I = I_0 \int_0^{\infty} \delta(E) A\left(\frac{qU_1}{E}, \dots, \frac{qU_n}{E}\right) f_2(E) dE, \quad (1)$$

где $A\left(\frac{qU_1}{E}, \dots, \frac{qU_n}{E}\right)$ - аппаратная функция анализатора, U_1, \dots, U_n -

потенциалы на электродах спектрометра относительно входной диафрагмы, I_0 - количество частиц, прошедших через отверстие во входной диафрагме в единицу времени, $\delta(E)$ - эффективность регистрации частиц детектором, q - заряд.

При условии линейной связи потенциалов

$$\frac{U_2}{U_1} = \lambda_2, \dots, \frac{U_n}{U_1} = \lambda_n \quad (2)$$

или, если потенциал подается лишь на один из электродов, уравнение (1) превращается в уравнение свертки меллиновского типа

$$I(U_1) = I_0 \int_0^{+\infty} A\left(\frac{qU_1}{E}, \lambda_2, \dots, \lambda_n\right) \delta(E) f(E) dE \quad (3)$$

Уравнению (3) удовлетворяют многие типы существующих спектрометров: плоский конденсатор (и его модификации подобные коробчатому анализатору), цилиндрическое зеркало, цилиндрический и сферический дефлекторы без торможения и с торможением в режиме ПФТ (постоянного фактора торможения, когда тормозящее поле и напряжение на пластинах дисперсионной части спектрометра прямо пропорциональны) и многие другие типы спектрометров. Из уравнения естественным образом вытекает экспериментально наблюдаемая зависимость энергетического разрешения от энергии настройки W

$$\frac{\Delta W}{W} = const \quad (4)$$

Для уравнения (3) предложено решение в виде ряда по производным

$$f(qkU) = \frac{1}{qI_0 \delta(qkU)} \sum_{n=0}^{+\infty} B_n I^{(n)}(U) U^{n-1} \quad (5)$$

и получено рекуррентное выражение для коэффициентов ряда через моменты

аппаратной функции

$$B_0 = \frac{1}{kC_{00}}, \quad B_n = -\frac{1}{C_{n0}} \sum_{i=0}^{n-1} B_i \frac{C_{i(n-i)}}{(n-i)!}, \quad C_{nm} = \int_0^{+\infty} z^{n-1} (z-k)^m A\left(\frac{1}{z}\right) dz, \quad (6)$$

где k - коэффициент анализатора, связывающий напряжение развертки и энергию настройки анализатора

$$W = qkU_1. \quad (7)$$

С использованием модельного спектра произведена сравнительная оценка точности его восстановления при стандартной процедуре (деление на энергию настройки) и при помощи ряда (7) с точностью до поправок, связанных со второй производной. Сравнение показало, что при учете этих поправок энергетическое разрешение возрастает в 2-3 раза (рис.1).

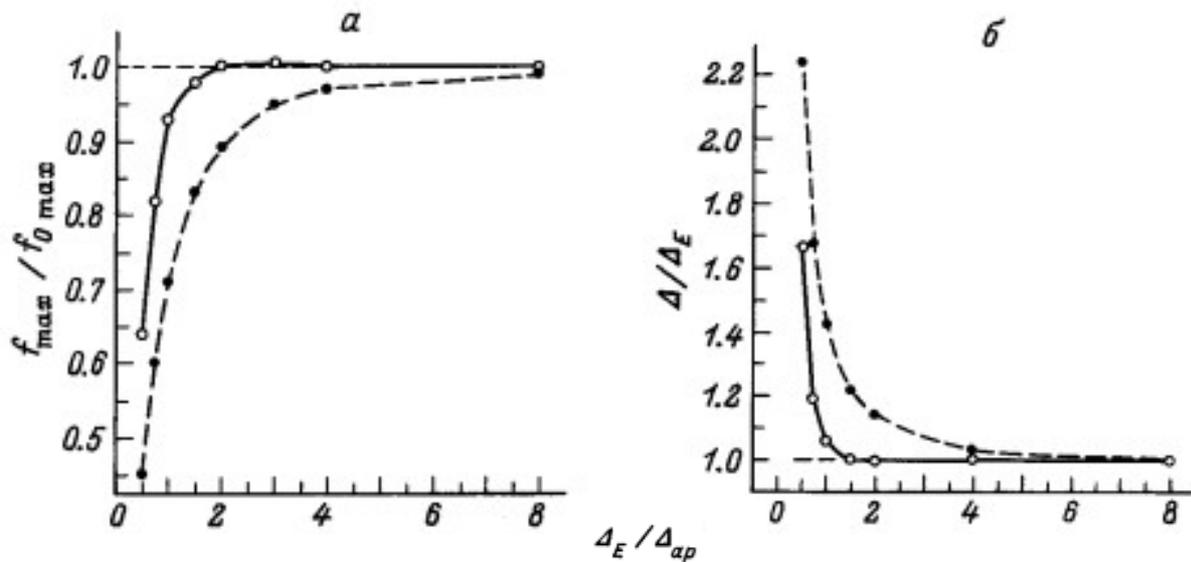


Рис. 1. f_{\max} - высота восстановленного спектра, $f_{0\max}$ - высота истинного распределения, Δ - ширина на половине высоты восстановленного спектра, Δ_E - ширина на половине высоты истинного распределения, Δ_{ap} - ширина на половине высоты аппаратной функции; сплошная кривая - с учетом поправки, связанной со второй производной, штриховая кривая - для спектров, полученных простым делением на энергию.

При условии линейной связи потенциалов (2) доказана неприменимость для описания связи функции распределения по энергии и сигнала на выходе электростатических спектрометров уравнения свертки с интегральным ядром разностного типа [4]:

$$I(W) = \int A(W-E) f(E) dE, \quad (8)$$

Доказано, что при выполнении условия (2) идеальный электростатический спектрометр не является идеальным спектральным измерительным прибором, и выходной сигнал будет передавать функцию распределения с искажениями даже при точечной фокусировке и бесконечно узкой выходной щели.

Исследовалось влияние флуктуаций потенциалов на электродах на поведение аппаратной функции анализатора. На примере сферического дефлектора, работавшего в режиме пошаговой развертки на установке «Большой масс-монохроматор МИФИ» [3], показано, что влияние переходных процессов в некоторых ситуациях оказывается решающим для энергетического разрешения. Проведен анализ процедуры восстановления спектра для подобных случаев.

Существенное влияние на форму спектра, помимо флуктуаций потенциалов, оказывают флуктуации самого измеряемого сигнала. Применение сглаживающих фильтров при больших флуктуациях сигнала ухудшает энергетическое разрешение. Для определения влияния сглаживающего фильтра на восстанавливаемый спектр был рассмотрен случай фильтра с постоянным окном. Полученное уравнение математически оказалось тем же самым, что и уравнение с флуктуациями потенциалов. Приближенное решение этого уравнения

$$f(qk\bar{U}) \approx \frac{1}{qC_{10}I_0\delta(qk\bar{U})} \left(\frac{I_1(\bar{U})}{\bar{U}} - \frac{\bar{U}d^2I_1/d\bar{U}^2}{2} \left(1 - \frac{C_{10}^2}{C_{00}C_{20}} + \frac{\sigma^2}{\bar{U}^2} \right) \right), \quad (9)$$

где $I_1(U) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\check{U})\varphi(\check{U}-U)d\check{U}$ - сглаженный сигнал или сигнал с учетом флуктуаций потенциалов (в зависимости от решаемой задачи), σ^2 - дисперсия фильтра или флуктуаций потенциалов, позволяет восстанавливать спектр с улучшенным энергетическим разрешением.

Продемонстрирована работоспособность методики на реальных экспериментальных спектрах отражения ионов дейтерия от поверхности бериллия, одного из возможных материалов термоядерных реакторов (рис. 2)

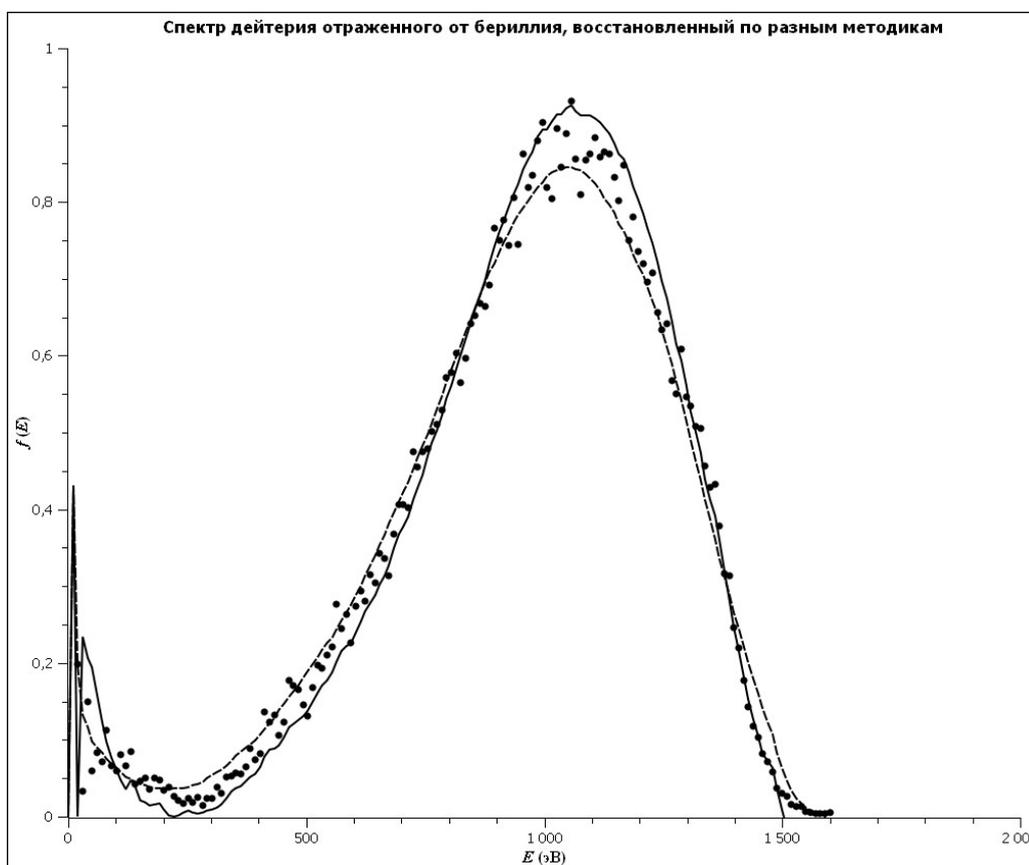


Рис. 2. Восстановленный по разным методикам спектр ионов дейтерия, отраженных от поверхности бериллия (точки — экспериментальный спектр, деленный на энергию; пунктир — сглаженный спектр, деленный на энергию; сплошная линия — сглаженный спектр, восстановленный по формуле (9)).

В третьей главе исследована связь между сигналом и функцией распределения по импульсу или энергии для магнитного спектрометра. По аналогии с уравнением (3) для электростатических анализаторов при условии линейной связи между полями, создаваемыми элементами магнитной оптики, было получено уравнение

$$I(H) = I_0 \int_0^{\infty} \delta(p, m) f(p) A\left(\frac{qH}{p}\right) dp, \quad (10)$$

где $p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ - модуль импульса.

Значение импульса, соответствующего настройке анализатора, и величина магнитного поля H связаны соотношением:

$$p_1 = qkH. \quad (11)$$

Для нерелятивистского случая и функции распределения частиц по энергии уравнение (10) приобретает вид:

$$I(H) = I_0 \int_0^{\infty} \delta(E, m) f(E, m) A\left(\frac{qH}{\sqrt{2mE}}\right) dE. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) в первом приближении

$$f(k^2 q^2 H^2 / 2m) \approx \frac{m I(H)}{\delta C_1 I_0 q^2 H^2}. \quad (13)$$

Полученные уравнения были использованы для описания связи между сигналом на выходе и истинным распределением частиц по энергии в двухкаскадном энерго-масс-спектрометре с двойной фокусировкой (рис. 3).

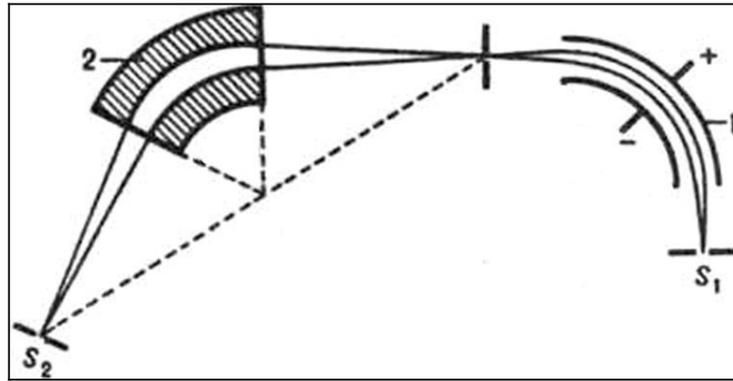


Рис. 3. Принципиальная схема двухкаскадного энерго-масс-спектрометра с двойной фокусировкой (1 - электростатический спектрометр, 2 — секторный магнитный спектрометр).

Уравнение, описывающее такой спектрометр, является комбинацией уравнений (3) и (12)

$$I(U) = \sum_i I_{0i} \int_0^{\infty} \delta_i(E) f_i(E) A_1\left(\frac{q_i U}{E}\right) A_2\left(\frac{q_i H}{\sqrt{2 m_i E}}\right) dE, \quad (14)$$

где суммирование ведется по всем различным массам частиц,

$A_1\left(\frac{qU}{E}\right)$ - аппаратная функция электростатического спектрометра,

$A_2\left(\frac{qH}{\sqrt{2 m E}}\right)$ - аппаратная функция магнитного спектрометра.

Для измерения энергетического спектра с фиксированным отношением массы частиц к заряду используется режим развертки, в котором

$$\frac{m_i U}{q_i H^2} = const. \quad (15)$$

В этом режиме уравнение (14) сводится к уравнению свертки меллиновского типа. Решение такого уравнения было рассмотрено выше и, в

первом приближении, сводится к делению сигнала на напряжение развертки.

Для спектрометра с двойной фокусировкой были проанализированы используемые для снятия масс-спектров режимы развертки $U=const$ или $H=const$. Были получены формулы для определения относительной доли масс-пиков через площади с учетом нормировочных коэффициентов при различных алгоритмах обработки спектра.

В этой же главе рассмотрен случай магнитного спектрометра с разверткой ускоряющим напряжением (рис. 4).

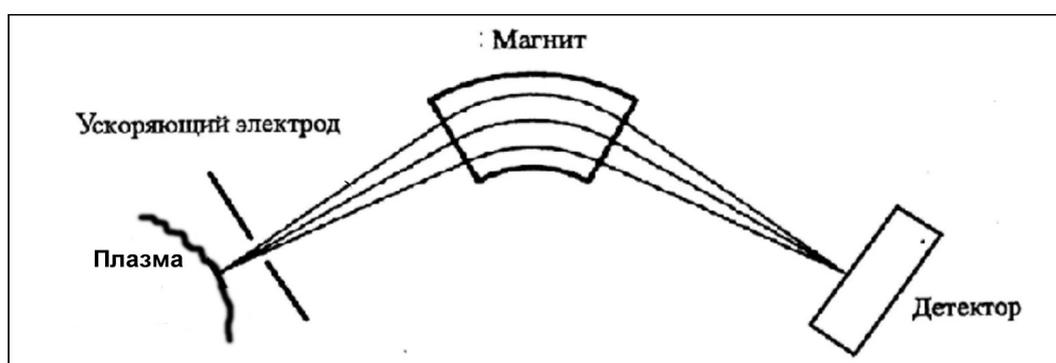


Рис. 4. Принципиальная схема статического магнитного масс-спектрометра с разверткой ускоряющим напряжением.

При упрощающем предположении, что угловое распределение частиц после прохождения ускоряющего напряжения на входе в магнитный спектрометр будет неизменным, сигнал на выходе спектрометра для пика i массы будет описываться следующим уравнением

$$I_i(H, U) = I_{0i} \int_0^{\infty} \delta(E + q_i U, m_i) f(E, m_i) A\left(\frac{q_i H}{\sqrt{2 m_i (E + q_i U)}}\right) dE . \quad (16)$$

Для относительной доли пиков получаем:

$$\frac{I_{0i}}{I_{0n}} = \frac{m_i q_n \delta (\bar{E} + q_n U_{nmax}) \int_0^{\infty} I_i(H, U) dU}{m_n q_i \delta (\bar{E} + q_i U_{imax}) \int_0^{\infty} I_n(H, U) dU}, \quad (17)$$

где \bar{E} - средняя кинетическая энергия ионов до ускорения, U_{max} - ускоряющее напряжение соответствующее максимуму пика.

Проверка работоспособности методики определения массового состава через площади пиков (17) может быть осуществлена следующим образом: сначала выходная щель делается достаточно широкой, чтобы наблюдались плоские вершины пиков, затем по двум методикам (по отношению значений пиков в максимуме и по отношению площадей под пиками) вычисляются относительные доли пиков, а полученные значения сравниваются. Затем, при условии, что полученные доли совпадают, щель делают узкой и производят измерения с высоким разрешением по массе. На рис. 5 показаны примеры спектров, измеренных с помощью масс-анализатора с разверткой ускоряющим напряжением, работающим в собственном магнитном поле плазменной установки [5]-[6]. Сравнительный анализ относительной доли попавших в анализатор ионов различной массы с помощью упомянутых выше методик для случая калибровочного спектра с широкой щелью (а) показывает, что систематическая ошибка при определении относительной доли ионов различных масс не превышает 10%. Пример применения формулы (17) для масс-спектра, полученного в режиме высокого разрешения с узкой щелью (б), дает относительную долю для ионов аргона по отношению ионам азота $I_{Ar}/I_{N_2} = 1,22 \pm 0,08$, простое отношение амплитуды пиков дает отношение $I_{Ar}/I_{N_2} = 1.04 \pm 0,04$. Таким образом, при измерениях в режиме высокого разрешения определение относительной доли ионов путем интегрирования сигнала по формуле (17) дает отличие от способа определения доли ионов по отношению амплитуд примерно на 20%. Таким образом, определение состава

плазмы по измерению отношения амплитуд пиков в режиме высокого разрешения приводит к систематической ошибке.

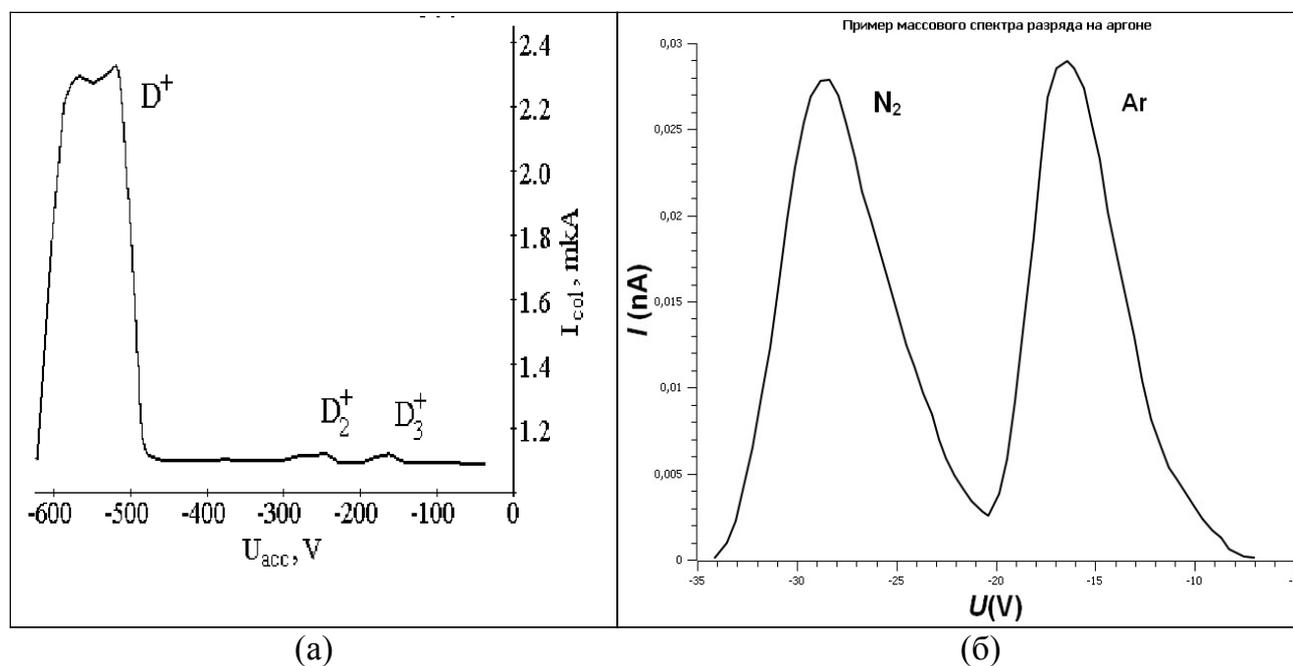


Рис. 5. Образцы спектров полученные на магнитном спектрометре с разверткой ускоряющим напряжением [5]-[6]: (а) калибровочный спектр, снятый при широкой выходной щели; (б) спектр, снятый в режиме высокого разрешения.

В четвертой главе рассмотрено поведение аппаратной функции спектрометра с тормозящим полем для потоков частиц с малой угловой расходимостью. Проанализировано влияние флуктуаций потенциалов на аппаратную функцию. В этой же главе исследована связь между выходным сигналом и истинной функцией распределения частиц по энергиям спектрометра с предварительным замедлением для простейшей модели спектрометра при различных режимах развертки.

Простейшая модель спектрометра с предварительным замедлением представляет собой систему торможения (две-три диафрагмы с круглыми отверстиями) и дисперсионный анализатор (рис. 6). Угловое распределение частиц на входе в систему предварительного замедления приближенно

считалось изотропным в пределах апертуры углов, видимых анализатором.

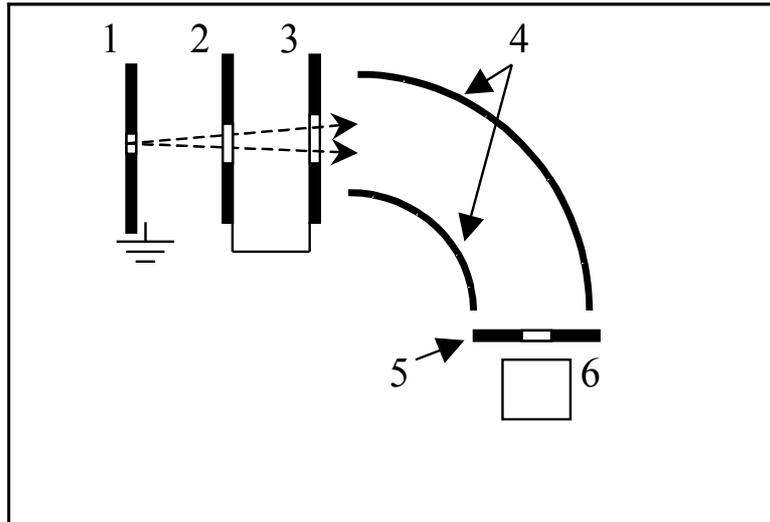


Рис. 6. Геометрическая модель дисперсионного спектрометра с системой предварительного замедления : 1 - входная диафрагма, 2 - первая коллимирующая диафрагма, 3 - вторая коллимирующая диафрагма, 4 - дисперсионный анализатор, 5 - выходная диафрагма, 6 — детектор.

При условии, что энергетическое распределение мало меняется в пределах аппаратной функции, было получено приближенное решение уравнения (1):

$$f(qU + kqU_1) \approx \frac{4 \cdot I(U, U_1)}{C \cdot q \cdot U_1 \cdot \delta(W_1) \cdot (1 + \sqrt{1 - UI(U + kU_1)})^2}, \quad (18)$$

где $W = qU + kqU_1$ – энергия настройки анализатора для данного случая; U – замедляющий потенциал относительно входной диафрагмы; U_1 – потенциал на электродах дисперсионного анализатора относительно замедляющей диафрагмы, W_1 – энергия, с которой частицы попадают на детектор (например, она может быть равна W , если детектор находится под потенциалом входной диафрагмы, или равна $(W - qU)$, если детектор находится под тормозящим потенциалом).

Результаты теоретического моделирования функции пропускания

сравнивались с результатами, полученными с помощью программы Simion 3D (рис. 7). Получено хорошее качественное и количественное соответствие при малых размерах отверстий и, соответственно, малом провисании потенциала. При большом размере отверстий провисание потенциала приводит к немонотонной зависимости в области больших значений фактора торможения, что связано с фокусирующим действием полей рассеяния.

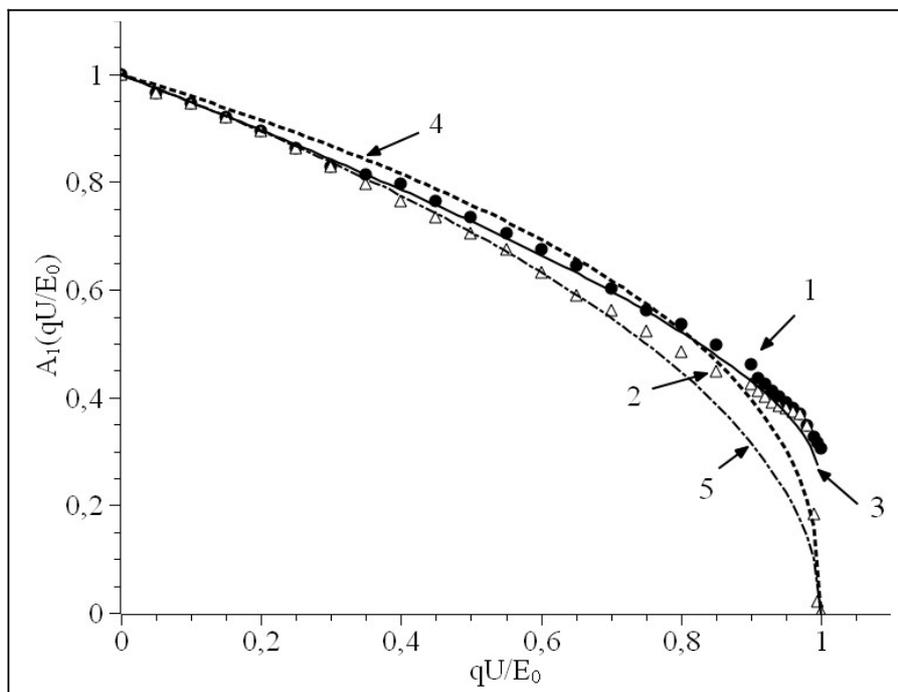


Рис. 7. Зависимость функции пропускания системы предварительного замедления спектрометра от тормозящего потенциала:

1 – моделирование с помощью кода Simion 3D ослабления пучка частиц, прошедших через первую коллимирующую диафрагмы; 2 – то же для частиц, прошедших обе коллимирующие диафрагмы; 3 — теоретическая модель; 4 - аппроксимация эксперимента функцией $(1 - qU/E_0)^{0.4}$ [7]; 5 - аппроксимация эксперимента функцией $(1 - qU/E_0)^{0.5}$ [8].

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что в режиме ПЭП (режим постоянной энергии пропускания — режим, в котором энергия настройки дисперсионной части анализатора фиксирована, а развертка спектра

осуществляется изменением замедляющего потенциала), в отличие от режима ПФТ (режим постоянного фактора торможения — режим, в котором энергия настройки дисперсионной части анализатора и замедляющий потенциал линейно связаны), не существует универсальной во всем диапазоне энергий зависимости между током на выходе анализатора и функцией распределения. Однако, для данной геометрии (рис. 6) формула (18) позволяет восстанавливать спектр как для режима ПЭП, так и для режима ПФТ.

Основные результаты и выводы

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Впервые, исходя из первых принципов, были получены уравнения для связи между сигналом на выходе электростатического спектрометра и функцией распределения по энергии потока заряженных частиц. На основе этих уравнений проанализирована возможность использования для описания уравнения свертки с интегральным ядром разностного типа и уравнения свертки меллиновского типа, показана неприменимость описания связи с помощью уравнения свертки, сформулированы четкие критерии применимости уравнения свертки меллиновского типа. Показано, что в случае линейной связи потенциалов ширина аппаратной функции прямо пропорциональна энергии частиц, что подтверждается многочисленными экспериментами различных авторов.
2. На основе анализа уравнения связи теоретически обоснована процедура обработки энергетического спектра делением на энергию, как первого приближения при восстановлении истинного энергетического спектра. Предложено решение уравнения связи в виде ряда, позволяющее с помощью математической обработки увеличить энергетическое разрешение при восстановлении спектров в 2-3 раза.

3. Доказано для идеального электростатического спектрометра, что электростатический спектрометр с линейно связанными потенциалами не является идеальным спектральным измерительным прибором; в общем случае, вопрос о существовании режима, в котором спектрометр может быть идеальным спектральным измерительным прибором, связан с возможностью представить аппаратную функцию в виде $A(W - E)$.
4. Исследовано влияние флуктуаций потенциалов на поведение аппаратной функции. Обоснована процедура обработки экспериментальных спектров для этого случая. Продемонстрирована работоспособность методики на реальных экспериментальных спектрах отражения ионов дейтерия от поверхности бериллия, одного из возможных материалов термоядерного реактора.
5. Впервые, исходя из первых принципов, получено уравнение связи между сигналом на выходе магнитного спектрометра и функцией распределения по энергии или импульсу потока заряженных частиц. На основе этого уравнения исследованы случаи двухкаскадного масс-спектрометра с двойной фокусировкой и магнитного спектрометра с разверткой спектра ускоряющим напряжением. Предложены алгоритмы обработки энергетических спектров и масс-спектров на основе вычисления площадей пиков. Показана работоспособность предложенной методики определения относительной доли ионов различной массы в масс-спектре эмитированных из плазмы частиц для встраиваемого спектрометра с разверткой спектра ускоряющим напряжением, работающего в собственном магнитном поле плазменных установок.
6. Для спектрометров с предварительным торможением получено уравнение, позволяющее восстанавливать спектры как в режиме постоянного фактора торможения, так и в режиме постоянного энергетического пропускания при малых значениях фактора торможения.

На основе предложенной модели предложено объяснение экспериментально наблюдавшейся зависимости функции пропускания от энергии близкой к корневой для ряда спектрометров с предварительным торможением.

Список цитируемой литературы

- [1] Готт Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях. М.: Атомиздат.1978. 273 с.
- [2] Готт Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л. Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы. М.: МИФИ. 2008. 143 с.
- [3] Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат. 1977. 304 с.
- [4] Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц.М.:Наука.1978. 224 с.
- [5] Визгалов И.В., Кирнев Г.С., Курнаев В.А., Сарычев Д.В. Научная сессия МИФИ - 1998. Сборник научных трудов.Ч.3: Ядерная физика. Физика ускорителей заряженных частиц. Физика плазмы. 1998 .С.177-179
- [6] I.V. Vizgalov at al.//Instrum. and Experim..1999. V.42. № 5. P.718
- [7] M. Scharli and J. Brunner//J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom . 1983. V.31. P.323
- [8] J.E.Castle and R.H.West//J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. . 1980. V.19. P.409

Список публикаций по теме диссертации:

В журналах из списка ВАК:

1. 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
2. Курнаев В.А., Урусов В.А. Влияние флуктуаций потенциалов на аппаратные функции электростатических анализаторов // ЖТФ. 1997. Т.67. № 6, с. 92-95
3. Еванов А.А., Курнаев В.А., Левчук Д.В., Трифонов Н.Н., Урусов В.А. Отражение дейтерия от бериллиевых мишеней с различной шероховатостью.// Известия РАН. Серия физическая. 1998. Т. 62. № 04. с. 751-755
4. Курнаев В.А., Урусов В.А. Восстановление энергетических спектров для спектрометров с предварительным замедлением из диафрагм с круглыми отверстиями // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 10. С. 24-30

В других рецензируемых источниках:

5. Курнаев В.А., Урусов В.А.//Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том.(под. редакцией академика В.Е. Фортова).М.: Наука.2000. Т.2. С. 623
6. Коборов Н.Н., Курнаев В.А., Урусов В.А. Устройство для измерения дифференциальных параметров отраженного пучка// Взаимодействие ионов и плазмы с поверхностью твердого тела / под ред. Тельковского В.Г. / М.:Энергоатомиздат.1986. С. 22- 31
7. Курнаев В.А., Урусов В.А. Аппаратные функции электростатических и

магнитных анализаторов и обработка экспериментальных результатов.
Препринт № 018-95.М.: МИФИ. 1995. 36 с.

В материалах международных и национальных конференций:

8. Курнаев В.А., Урусов В.А. Аппаратные функции электростатических и магнитных анализаторов и обработка экспериментальных результатов//Труды XII международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью". Т. 1. М.: 1985. С.185 -187
9. Еванов А.А., Курнаев В.А., Левчук Д.В., Трифонов Н.Н., Урусов В.А. Отражение дейтерия от бериллиевых мишеней с различной шероховатостью//Труды XIII международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью". Т. 1. М.: 1997. С.194 -197
10. Kurnaev V.A., Urusov V.A. Apparatus function of electrostatic and magnetic analyzers and experimental data processing//6th Conference on Application of Surface and Interface Analysis «ECACIA 95» (1995 Montreux, Switzerland) abstract QA 36
11. Курнаев В.А., Урусов В.А. Сравнительный анализ режимов работы спектрометров с предварительным замедлением//Материалы VI российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». 2008. М.: МИФИ. С.127-129
12. Урусов В.А. Восстановление энерго- и масс-спектров для спектрометров с двойной фокусировкой//Труды XX международной конференции "Взаимодействие ионов с поверхностью". Т.1 .М.: 2011. С.359 -361