

01;10;12

Восстановление энергетических спектров для спектрометров с предварительным замедлением из диафрагм с круглыми отверстиями

© В.А. Курнаев, В.А. Урусов

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)
E-mail: urvik@mail.ru, kurnaev@plasma.mephi.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2009 г.

Исследовалась связь между распределением частиц по энергии и сигналом на выходе анализатора для дисперсионных электростатических спектрометров с предварительным замедлением. Теоретическая модель сравнивалась с результатами, полученными с помощью компьютерного моделирования, и экспериментальными данными. Предложена простая формула для восстановления истинного распределения по энергии в области низких значений фактора торможения.

Большинство современных электростатических спектрометров снабжены системой предварительного замедления [1–3]. Обычно такие спектрометры используются в двух режимах: в первом режиме энергия настройки дисперсионного анализатора и замедляющий потенциал линейно связаны (режим постоянного фактора торможения — ПФТ), во втором — энергия настройки дисперсионного анализатора фиксирована, а развертка спектра осуществляется изменением замедляющего потенциала (режим постоянной энергии пропускания — ПЭП). В монографии [1] дан анализ работы электростатических спектрометров с предварительным замедлением. Кроме того, существует целый ряд работ, в которых с помощью компьютерного моделирования исследовалось влияние различных факторов на энергетическое разрешение и форму аппаратной функции [4–6]. Однако теоретического анализа связи между

функцией распределения по энергии и сигналом на выходе анализатора для систем с предварительным замедлением так и не было проведено, отсутствует алгоритм восстановления истинного распределения по энергии.

В работе [7] доказано, что в режиме ПФТ ток частиц на выходе анализатора $I(U)$ и энергетическое распределение на входе $f(E)$, при условии пропорциональности потенциалов на электродах спектрометра, связаны уравнением

$$I(U) = \int_0^{\infty} A \left(\frac{qU}{E} \right) f(E) dE, \quad (1)$$

где $A(qU/E)$ — аппаратная функция анализатора. При условии, что энергетическое распределение мало меняется на ширине аппаратной функции, из уравнения следует, что интеграл от аппаратной функции пропорционален энергии настройки анализатора $W = kqU$, где q — заряд частицы, k — коэффициент пропорциональности, который зависит от геометрии спектрометра [7].

Для режима ПЭП подобной универсальной зависимости не существует. В некоторых случаях интеграл от аппаратной функции обратно пропорционален энергии настройки спектрометра [8]. Однако существует большое количество экспериментальных работ [2,3,9–11], в которых показано, что экспериментальная зависимость интеграла от аппаратной функции аппроксимируется корневой зависимостью от энергии (см. обзор в работе [3]). В настоящей работе исследуется влияние предварительного замедления в электростатических спектрометрах на связь между функцией распределения частиц по энергии и сигналом на выходе спектрометра для случая, когда пропускание ограничено геометрическими факторами.

Простейшая модель спектрометра с предварительным замедлением представляет собой систему торможения (две-три диафрагмы с круглыми отверстиями) и дисперсионный анализатор (рис. 1). Угловое распределение частиц на входе в систему предварительного замедления будем приближенно считать изотропным в пределах апертуры углов, видимых анализатором. При условии, что энергетическое распределение мало

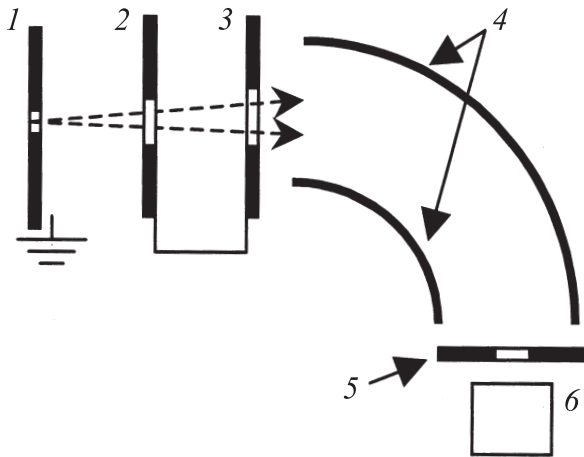


Рис. 1. Геометрическая модель дисперсионного спектрометра с системой предварительного замедления: 1 — входная диафрагма, 2 — первая коллимирующая диафрагма, 3 — вторая коллимирующая диафрагма, 4 — дисперсионный анализатор, 5 — выходная диафрагма, 6 — детектор.

меняется в пределах аппаратной функции, получаем приближенное уравнение [7]

$$I(U, U_1) \approx f(W) \int_0^{\infty} A \left(\frac{qU}{E}, \frac{q(U - U_1)}{E}, \frac{q(U + U_1)}{E} \right) dE, \quad (2)$$

где $W = qU + kqU_1$ — энергия настройки анализатора для данного случая; U — замедляющий потенциал; U_1 — потенциал на электродах дисперсионного анализатора относительно входной замедляющей диафрагмы. При условии, что функция пропускания системы торможения слабо меняется на ширине аппаратной функции дисперсионного анализатора, а угловое распределение на входе в дисперсионный анализатор мало влияет на величину интеграла от аппаратной функции, можно

уравнение (2) упростить

$$\begin{aligned}
 I(U, U_1) &\approx f(W) \int_{qU}^{\infty} A_1\left(\frac{qU}{E}\right) A_2\left(\frac{-qU_1}{E-qU}, \frac{qU_1}{E-qU}\right) dE \\
 &\approx f(W) A_1\left(\frac{qU}{W}\right) C q U_1,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $C = \int_0^{\infty} A_2(1/z) dz = \text{const}$, $A_1(qU/W)$ — аппаратная функция системы торможения.

Аппаратная функция системы торможения сильно зависит от геометрии, поэтому рассматривалась простейшая модель с малым входным отверстием и изотропным в пределах угловой апертуры распределением частиц на входе. Провисанием потенциала в отверстии пренебрегалось. В этом случае аппаратную функцию (функцию пропускания) системы торможения можно найти как отношение телесных углов частиц, прошедших через диафрагмы при тормозящем потенциале U и нулевом тормозящем потенциале. При малоугловом приближении она имеет следующий вид:

$$A_1\left(\frac{qU}{W}\right) = \frac{\Omega}{\Omega_0} \approx \frac{(1 + \sqrt{1 - qU/W})^2}{4}, \tag{4}$$

где Ω_0 — телесный угол, в пределах которого частицы проходят через коллимирующие диафрагмы при нулевом тормозящем потенциале.

Выражение (4) применимо в случае, если тормозящий потенциал лежит в пределах

$$0 < U < \frac{W/q}{1 + \text{tg}^2 \theta_0/4}, \tag{5}$$

где θ_0 — максимальный угол, под которым заряженные частицы могут пройти систему торможения при нулевом тормозящем потенциале. Вне этих пределов поведение аппаратной функции системы торможения меняется. Согласно расчетам, она будет линейно спадать до нуля. Однако на аппаратную функцию существенное влияние оказывают поля рассеяния, поэтому вне пределов [5] зависимость может отличаться от линейной.

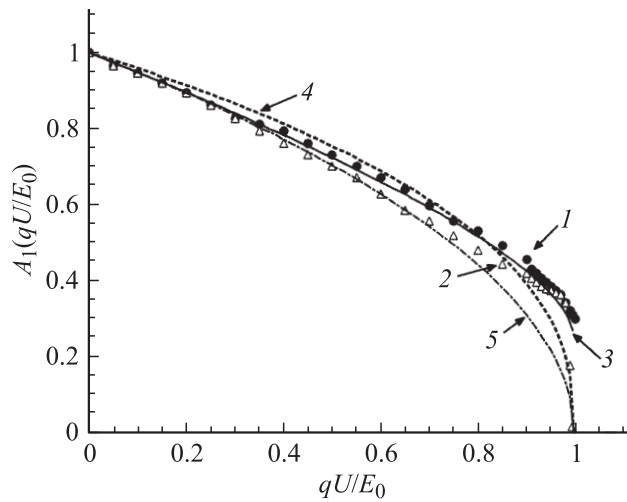


Рис. 2. Зависимость функции пропускания системы предварительного замедления от тормозящего потенциала: 1 — Simion 3D после первой коллимирующей диафрагмы; 2 — Simion 3D после второй коллимирующей диафрагмы; 3 — теоретическая модель, уравнение (4); 4 — $(1 - qU/E_0)^{0.4}$ аппроксимация эксперимента [3]; 5 — $(1 - qU/E_0)^{0.5}$ аппроксимация эксперимента [11].

Результаты теоретического моделирования сравнивались с результатами, полученными с помощью программы Simion 3D (рис. 2). 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 (рис. 3), что связано с фокусирующим действием полей рассеяния. На практике для уменьшения влияния полей рассеяния используются сетки, что позволяет применять формулу (4) до больших значений фактора торможения.

Одним из стандартных методов калибровки спектрометра является калибровка моноэнергетическим плоскопараллельным пучком. Моделирование с помощью программы Simion 3D для плоскопараллельного пучка на входе в спектрометр дает слабую зависимость функции пропускания тормозящей системы в широком диапазоне энергий, при больших значениях фактора торможения зависимость становится по-

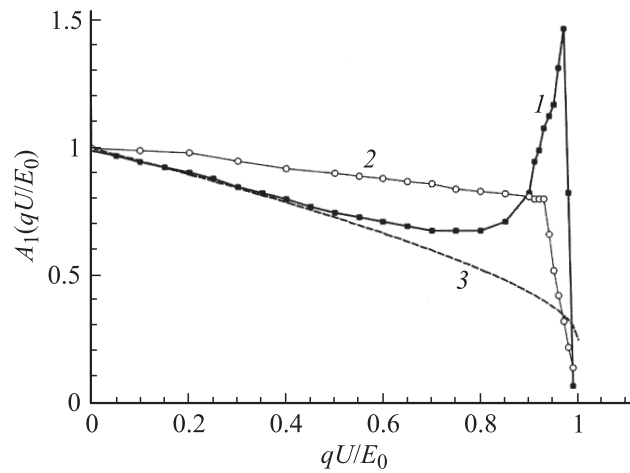


Рис. 3. Функция пропускания системы торможения: 1 — случай, когда отверстие во второй коллимирующей диафрагме меньше, чем в первой; 2 — случай плоскопараллельного пучка на входе в систему торможения; 3 — уравнение (4).

чти линейной (рис. 3). Следовательно, подобная экспериментальная калибровка спектрометра может дать функцию пропускания, отличную от истинной, например при исследовании взаимодействия заряженных частиц с поверхностью, если размеры облучаемой области больше видимой анализатором области.

В целом результаты исследования позволяют сделать вывод, что в режиме ПЭП, в отличие от режима ПФТ, не существует универсальной во всем диапазоне энергий зависимости между током на выходе анализатора и функцией распределения. Однако для данной геометрии (рис. 1) формулы (3) и (4) позволяют восстанавливать спектр как для режима ПЭП, так и для режима ПФТ.

Список литературы

- [1] *Афанасьев В.П., Явор С.Я.* Электростатические анализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.
- [2] *Cross Y.M., Castle J.E.* // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1981. V. 22. P. 53.
- [3] *Scharli M., Brunner J.* // Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1983. V. 31. P. 323.

- [4] *Benis E.P., Zouros T.J.M.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2000. V. A440. P. 462.
- [5] *Zouros T.J.M.* // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 2006. V. 152. P. 67.
- [6] *Benis E.P., Zouros T.J.M.* // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 2008. V. 163. P. 28.
- [7] *Курнаев В.А., Урусов В.А.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 6. С. 86.
- [8] *Ruffieux P. et al.* // Rev. Scien. Inst. 2000. V. 71. N 10. P. 3634.
- [9] *Hall S.M., Andrade J.D., Ma S.M., King R.N.* // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1979. V. 17. P. 181.
- [10] *Алов Н.В., Осолок К.В.* // Вест. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1998. Т. 39. № 6. С. 394.
- [11] *Castle J.E., West R.H.* // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 1980. V. 19. P. 409.