

УДК 621.385.833.2

© 3. 3. Латыпов

СОВМЕЩЕННЫЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТР И ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЕРДОГО ТЕЛА

В работе рассмотрена возможность создания совмещенных в одной оптической системе энергоанализатора электронов и ионов и масс-спектрометра ионов для исследования свойств твердого тела. Основой совмещенных спектрометров являются источник потока частиц, трансформирующий спектр масс в спектр энергий за счет воздействия на ионы импульсов электрического поля, и электростатический энергоанализатор высокого разрешения с двумерным полем и плоскостью симметрии. Частицы в источнике возникают в результате взаимодействия возбуждающего излучения (поток ионов, атомов, лазерного излучения) из независимых источников с поверхностью исследуемого твердого тела. Проведено численное моделирование работы устройства, подтверждающее реализуемость предложенного метода.

Кл. сл.: электроны, ионы, анализатор энергии, спектры, твердое тело

ВВЕДЕНИЕ

Одним из мощных методов исследований состава и физико-химических свойств твердого тела является определение масс-спектра, зарядового состояния и энергетического спектра испускаемых твердым телом тяжелых частиц и электронов при воздействии на поверхность тела потока частиц (атомов, ионов, электронов) различных энергий, а также пучков лазерного излучения различной интенсивности и жесткости. Процессы распыления и эмиссии вторичных ионов и электронов из твердотельных материалов широко изучались при облучении их ионами различных масс. Большинство этих исследований [1–3] проводилось с помощью различных методов масс-спектрометрии вторичных ионов и электронной спектрометрии в широком интервале энергий первичных частиц (от $\sim 10^3$ до $\sim 10^5$ эВ). В ряде работ [4] проведены исследования распыления и эмиссии частиц из твердых тел, индуцированные тяжелыми ионами при высоких энергиях (выше 10^6 эВ), и показано существенное отличие механизма эмиссии частиц и кластеров из образцов мишеней от механизма при малых энергиях. Однако экспериментальная методика исследований самого процесса взаимодействия излучения с твердым телом по существу не меняется.

В данной работе предлагается новая экспериментальная методика исследований. Ценным, на наш взгляд, для физической электроники является информация о химическом составе и других характеристиках всех частиц испускаемых поверхностью образца при различных воздействиях на

нее, полученная в одном эксперименте. Для решения этой экспериментальной проблемы в настоящей работе исследована возможность создания устройства, совмещающего в одной электронно-оптической системе масс-спектрометр и электронный спектрометр (энергоанализатор) с высокими энергетическими разрешениями. Рассмотренная схема сочетания двух типов спектрометров обеспечивает технологичность и компактность конструкции при наличии высоких физико-технических характеристик.

СТРУКТУРА СОВМЕЩЕННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Ранее нами была показана возможность [5] создания динамического масс-спектрометра на базе новой теории сепарации масс, основанной на ударном эффекте преобразования спектров потока частиц. В основе этой теории — целенаправленное изменение кинетической энергии E_0 движущейся частицы с массой m путем воздействия на нее в течение короткого времени Δt силы F в направлении движения. В результате ударной передачи импульса энергия частицы изменится на величину

$$\Delta E = (F \cdot \Delta t) \sqrt{2E_0 / m} + (F \cdot \Delta t)^2 / 2m, \quad (1)$$

где $(F \cdot \Delta t) = \int_0^{\Delta t} F(t) \cdot dt$ — величина изменения импульса частицы. Мы рассматриваем воздействие импульсного электрического поля на ионы, поэтому действующая сила равна $F = qV(t) / L$, где q — заряд иона, $V(t)$ — импульс электриче-

ского потенциала, L — линейный размер области преобразования. Итак, конечная энергия будет равна $E = E_0 + \Delta E$. Из (1) видно, что моноэнергетический поток частиц, распределенных по массе, можно преобразовать в энергетически диспергированный поток. Для создания такого динамического масс-спектрометра преобразование спектров ионов может производиться в специальном ионном источнике-преобразователе, где поток ускоренных ионов на выходе из источника пропускается через межэлектродное пространство, к электродам которого приложена разность потенциалов в виде последовательности электрических импульсов $V(t)$. Для определенности преобразования спектра потока частиц необходимо обеспечить однократное воздействие импульса электрического поля на ионы за время их пролета области преобразования. Следовательно, период повторения импульсов должен быть по величине не ниже времени пролета ионом области поля

$$T \geq L / \sqrt{2E_0 / m}, \quad (2)$$

где T — период повторения импульсов напряжения. При выборе величины длительности импульса Δt необходимо иметь в виду, что она должна быть существенно меньше времени пролета ионом характерного размера L области преобразования спектра. Для прямоугольных импульсов справедливо соотношение $(F \cdot \Delta t) = qV \Delta t / L$.

Далее пространственное разделение ионов осуществляется в поле электростатического анализатора частиц по энергии, что дает возможность

получения энергетического спектра ионов, однозначно связанного с их масс-спектром. В данной работе выбран высокодисперсный энергоанализатор с двумерным полем и плоскостью симметрии, описанный в [6]. Гармонический потенциал этого поля — $\Phi = \Phi_0 e^{-bx/l} \cos(by/l)$, где Φ_0 — значение потенциала в точке $x = y = 0$, b — безразмерный параметр, l — выбранный линейный масштаб. Эквипотенциалами этого поля являются цилиндрические поверхности с сечением любой плоскости $z = \text{const} = C$ в виде "арки". Потенциал вдоль оси симметрии будет иметь вид $\Phi_{y=0} = \Phi_0 e^{-bx/l}$.

В настоящей работе рассмотрен вариант совмещения а) электронного спектрометра, состоящего из источника-преобразователя спектра частиц и высокодисперсного энергоанализатора, и б) динамического масс-спектрометра, состоящего из источника-преобразователя, в котором преобразование спектра потока ионов производится на выходе источника в пространственно однородном поле плоского конденсатора, и названного выше энергоанализатора для пространственного разделения ионов. Частицы в источнике-преобразователе возникают в результате взаимодействия возбуждающего излучения (потоки ионов, атомов, лазерного излучения) из независимых источников с поверхностью исследуемого образца твердого тела. Источники возбуждающего излучения выбираются в зависимости от исследуемой задачи и в данной работе не обсуждаются.

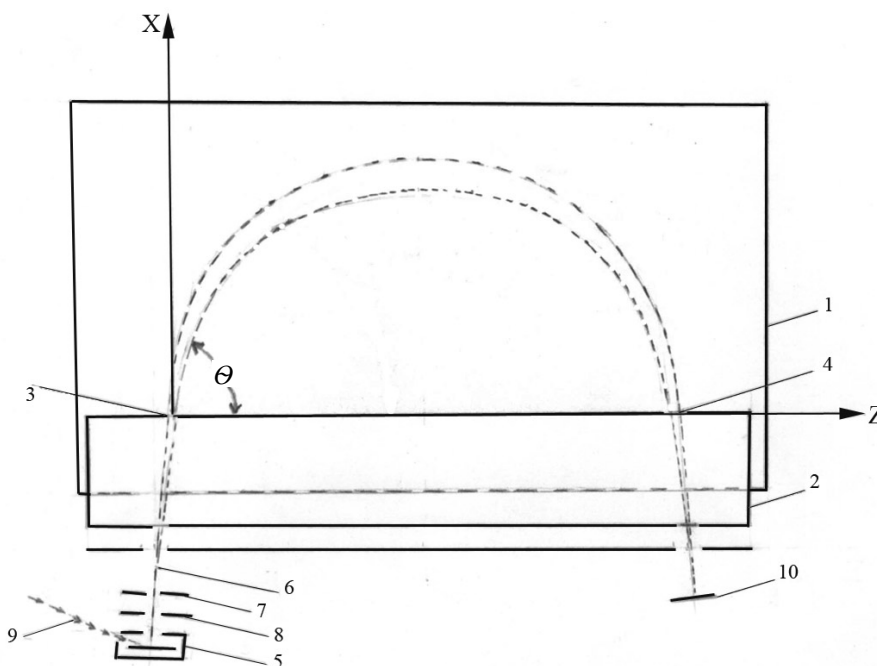


Схема электродов совмещенных спектрометров (вид сбоку). 1, 2 — электроды энергоанализатора; 3, 4 — входное и выходное отверстия диафрагмы энергоанализатора; 5 — источник ионов и электронов; 6 — пучок исследуемых частиц; 7, 8 — электроды конденсатора-преобразователя; 9 — поток частиц или лазерного излучения; 10 — детектор частиц

На рисунке представлена схема электродов совмещенных спектрометров (вид сбоку). 1, 2 — электроды энергоанализатора; 3, 4 — входная и выходная диафрагмы электрода 2; 5 — источник ионов и электронов; 6 — пучок анализируемых частиц; 7, 8 — электроды конденсатора-преобразователя энергии частиц; 9 — пучок частиц и лазерный луч, создаваемые независимыми источниками; 10 — детектор частиц. Предполагается, что устройство работает в двух режимах. В режиме регистрации энергетического спектра электронов необходимо изменить полярности ускоряющего напряжения источника частиц, напряжения питания энергоанализатора и детектора частиц, отключить импульсное поле в пространстве преобразователя. Получение спектра электронов должно производиться изменением ускоряющего напряжения источника в диапазоне 60–100 В. В режиме регистрации ионов сканирование спектров частиц удобнее реализовать путем изменения амплитуды импульсов напряжения в области преобразования источника частиц в диапазоне 30–1500 В. Регистрация частиц в обоих режимах производится без отключения процесса взаимодействия возбуждающего излучения с поверхностью исследуемого образца в источнике.

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ

Приведем численный пример, дающий представление о физических величинах входящих в предлагаемый метод. Численное моделирование было проведено при нижеследующих условиях. Рассмотрен источник-преобразователь спектра частиц с ускоряющим напряжением 40 В. Линейные размеры области преобразования выбраны с учетом реальных размеров масс-спектрометров, как $L \sim 1.5$ см. Характеристики импульсов электрических потенциалов: длительность импульсов $\Delta t = 5 \cdot 10^{-7}$ с; период их повторения $T = 10 \Delta t = 5 \cdot 10^{-6}$ с и частота их поступления $f \sim 2 \cdot 10^5$ с $^{-1}$; максимальная амплитуда импульсов порядка ~ 2000 В. Эти характеристики выбраны на основе существующих и описанных в литературе высокочастотных и высоковольтных генераторов электрических импульсов [7–9].

Соотношение (1) позволяет получить зависимость разрешающей силы устройства по массе R_m от разрешающей силы по энергии R_E . Численные оценки параметров энергетического преобразования пучка ионов, обеспечивающих желаемое разрешение по энергии и по массе рассмотрены на примере однозарядных ионов. Выберем разность конечных энергий ионов с массами, например,

$m_1 = 299$ а.е.м. и $m_2 = 300$ а.е.м. и начальной энергией $E_0 = 40$ эВ, равной $E_{299} - E_{300} = \delta E = 0.1$ эВ. Для получения разрешения по массе не хуже $\delta m = 1$ а.е.м. необходимо выполнение условия

$$\frac{qV\Delta t}{L} = \frac{\sqrt{2E_0}\sqrt{m_1m_2}}{\sqrt{m_2 + m_1}} \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{\delta E}{E_0}\right) \frac{\sqrt{m_2 + m_1}}{\sqrt{m_2 - m_1}}} \right\},$$

позволяющего определить требуемую величину амплитуды импульса потенциала. Так, в приведенном примере требуются импульсы напряжения амплитудой $V = 582$ В. При этом прирост энергии ионов с массой 299 а.е.м. составит $\delta E = 49$ эВ, а энергетическое разрешение составит $\delta E/E = 0.1/89 \approx 0.001$. При этом выполняется также условие (2).

В [6] показано, что высокое разрешение по энергии $\delta E/E$ около 0.05 % в выбранном энергоанализаторе можно получить для параксиального потока частиц, падающего на входную диафрагму электрода 2 вблизи плоскости симметрии XOZ под углами $75^\circ < \nu < 85^\circ$ к оси OZ и с малым поперечным угловым расхождением $-2^\circ < \beta < 2^\circ$.

Рассмотрим движение частиц, выпущенных из точки X_0 со скоростью v_0 под действием электрического поля конденсатора 7-8, включающегося на короткие промежутки времени Δt (см. рисунок). При численном моделировании безразмерный параметр анализатора выбран равным $b = 3.7$; линейный масштаб — равным $l = 6.0$ см; ширина "арки" — $H = l\pi/b = 5$ см; база траектории ионов (точка возврата иона на ось Z) $P = 2\pi/b (\sim 10$ см); расстояние между вершинами полеобразующих электродов анализатора 7 см. Входной электрод 2 заземлен, на электрод 1 подается потенциал $\Phi_0 = 2000$ В. Численное моделирование движения ионов в энергоанализаторе показывает, что ионы массы 299 а.е.м. с кинетической энергией 89 эВ приходят на базу траектории с координатой $z = P$ и при этом вершина траектории имеет координату $x = 5$ см. В анализаторе [6] имеется фокусировка второго порядка с координатами фокуса (под "аркой") $x_f = -4/b$, $z_f = 2\pi/b$. Из полученных данных следует, что выбранный энергоанализатор с разрешением порядка $\delta E/E < 0.001$ вполне обеспечивает разрешение соседних масс в диапазоне масс $1 \dots \sim 1500$ а.е.м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность создания актуального для исследования твердых тел устройства высокого разрешения, совмещающего электронный спектрометр и масс-спектрометр с источником потока частиц, трансформирующим спектр масс в спектр энергий. Предполагается, что устройство

работает в двух режимах. В режиме регистрации энергетического спектра электронов и в режиме регистрации ионов. Регистрация частиц в обоих режимах производится без отключения процесса взаимодействия возбуждающего излучения с поверхностью исследуемого образца в источнике. По своим энергетическим разрешениям названные спектрометры согласуются и, таким образом, появляется возможность создать информативное и компактное средство исследования физико-химических свойств образцов твердых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gras-Marti A., Urbassek H.M., Arista N.R., Flores F.* Interaction of charged particles with solids and surfaces. 1991. V. 271 of NATO ASI Series. Plenum Press, New York.
2. *Ming Yu.* // Sputtering by particle bombardment III / R. Behisch, K. Wittmaack (eds). Springer, Berlin, Heidelberg, 1991. P. 91.
3. *Kudo H.* Ion-induced electron emission from crystal-line solids. Springer, Berlin, 2001.
4. *Imanishi N., Niomiya S.* Nuclear and electronic sputtering induced by high energy heavy ions // J. Nucl. Radiochem. Sciences. 2004. V. 5, N 1. P. R9–17.
5. *Latypov Z.Z., Gall L.N., Golikov G.K.* Mass spectrometer based on conversion of spectra // Int. J. Mass Spectrom. 2000. V. 202. P. 139–145.

6. *Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Чепарухин В.В.* Электростатический анализатор. А.С. № 1047332. Приоритет от 29 марта 1981 г.
7. *Аристов Ю.В., Воронков Б.В., Грехов И.В. и др.* Полупроводниковые формирователи наносекундных импульсов высокого напряжения // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С. 72–74.
8. *Воронков Б.В., Грехов И.В., Козлов А.К. и др.* Высокочастотный полупроводниковый генератор высоковольтных наносекундных импульсов // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С. 75–77.
9. *Воронков Б.В., Грехов И.В., Козлов А.К. и др.* Полупроводниковый генератор высоковольтных наносекундных прямоугольных импульсов // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С. 78–80.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург*

Контакты: *Латыпов Зайдель Зарифович,
Zeidel@yandex.ru*

Материал поступил в редакцию 15.11.2011.

COMBINED MASS AND ELECTRON SPECTROMETERS FOR THE STUDY OF SOLIDS

Z. Z. Latypov

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

The determinations of the mass spectrum, the charge and energy spectra of heavy particles and electrons emitted by solids when they are acted upon by particle and laser beams are effective method in studying physicochemical properties of solids. The paper considers the possibility of developing combined high energy resolution electron and mass spectrometers for research into solids. The spectrometers must have a relative high energy resolution. The device consists of a particle (ions and electrons) source converting particle energy spectrum into the mass spectrum, and energy analyzer with two-dimensional electrostatic field and plane of symmetry. The sources of beams exciting the surface of the sample under study are independent and not considered in the paper. The mathematical simulation of the device performance confirms the realizability of the method suggested.

Keywords: electrons, ions, energy analyzer, spectra, solid surface