

13  
**Совмещенные масс-спектрометр и электронный спектрометр для исследований твердого тела**

© 3.3. Латыпов

Институт аналитического приборостроения РАН,  
 Санкт-Петербург, Россия  
 E-mail: Zeidel@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 21 марта 2012 г.)

Рассмотрена возможность создания устройства совмещенных в одной оптической системе энергоанализатора электронов и ионов и масс-спектрометра для исследования свойств твердого тела. Такое устройство позволяет в одном эксперименте получить информацию о химическом составе и энергетическом спектре всех частиц, испускаемых поверхностью образца исследуемого твердого тела при различных воздействиях на нее. Основой совмещенных спектрометров являются источник потока частиц, трансформирующий спектр масс в спектр энергий за счет воздействия на поток ионов импульсов электрического поля, и электростатический энергоанализатор высокого разрешения. Частицы в источнике возникают в результате взаимодействия возбуждающего излучения из независимого источника с поверхностью исследуемого твердого тела. Вид возбуждающего излучения (поток ионов, атомов, электронов, лазерного излучения) выбирается в зависимости от целей исследования. Проведено численное моделирование работы устройства, подтверждающее возможность его реализации в виде компактной информативной системы для исследований характеристик твердого тела.

**1. Введение**

В настоящее время для исследований физико-химических свойств поверхности и приповерхностных областей твердого тела широко применяются методы определения масс-спектра, зарядового состояния и энергетического спектра тяжелых частиц и электронов, испускаемых твердым телом при воздействии на поверхность тела потока частиц (атомов, ионов, электронов) различных энергий, а также пучков лазерного излучения различной интенсивности и жесткости. Эмиссия вторичных ионов и их зарядовое состояние изучаются методами масс-спектрометрии, эмиссия электронов и их энергетический спектр исследуются методами электронной спектрометрии [1–3] в широком интервале энергии первичных частиц (~ 10<sup>3</sup> до ~ 10<sup>5</sup> eV). В ряде работ [4] проведены исследования распыления и эмиссии частиц из твердых тел, индуцированных тяжелыми ионами при высоких энергиях (выше 10<sup>6</sup> eV), и показано существенное отличие механизма эмиссии частиц и кластеров из образцов мишеней от механизма при малых энергиях. Актуальным является изучение новых структур покрытий (пленок) поверхностей с заданными параметрами, которые в значительной степени определяют развитие технологий микроэлектроники [5].

Обзор работ, посвященных исследованию взаимодействия различных типов излучения с твердым телом, показывает, что экспериментальная методика исследований этого процесса по существу остается неизменной. В настоящей работе предлагается новый более информативный для физической электроники экспериментальный метод исследований. Отличительной чертой этого метода является получение в одном эксперименте

информации о химическом составе и других характеристиках всех частиц, испускаемых поверхностью образца при различных воздействиях на нее. Для решения этой экспериментальной проблемы в настоящей работе исследована возможность создания устройства, в котором в одной электронно-оптической системе совмещены масс-спектрометр и электронный спектрометр (энергоанализатор) с высоким энергетическим разрешением. Рассмотренная схема сочетания двух типов спектрометров в одном устройстве обеспечивает технологичность и компактность конструкции при наличии высоких физико-технических характеристик.

**2. Структура совмещенных спектрометров**

Ранее нами была показана возможность [6] создания динамического масс-спектрометра на базе теории сепарации масс, основанной на ударном эффекте преобразования спектров потока частиц. В основу этой теории положено целенаправленное изменение кинетической энергии  $E_0$  движущейся частицы с массой  $m$  путем воздействия на нее в течение короткого времени  $\Delta t$  силы  $F$  в направлении движения. В результате ударной передачи импульса энергия частицы изменится на величину

$$\Delta E = (F \Delta t) \sqrt{\frac{2E_0}{m}} + \frac{(F \Delta t)^2}{2m}, \tag{1}$$

где  $(F \Delta t) = \int_0^{\Delta t} F(t) dt$  — 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 электрического потенциала,  $L$  — линейный размер области преобразования. Итак, конечная энергия частицы будет равна  $E = E_0 + \Delta E$ . Из (1) видно, что „моноэнергетический“ поток частиц, распределенных по массе, можно преобразовать в энергетически диспергированный поток. 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, например, однократное воздействие импульса электрического поля на ионы за время их пролета области преобразования. Следовательно, период повторения импульсов  $T$  должен быть по величине больше времени пролета ионом области поля

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

Для прямоугольных импульсов справедливо соотношение  $(F \Delta t) = qV \Delta t/L$ . 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 настоящей работе выбран высокодисперсный энергоанализатор с двумерным полем и плоскостью симметрии, описанный в [7]. Гармонический потенциал этого поля  $\Phi = \Phi_0 \exp(-bx/l) \cos(by/l)$ , где  $\Phi_0$  — 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  $\Phi_{y=0} = \Phi_0 \exp(-bx/l)$ . Здесь необходимо отметить, что поток ионов, испускаемых источником частиц, в процессе воздействия возбуждающего излучения на твердое тело имеет свое распределение по энергии, т. е. величина  $E_0 = E_{00} + \Delta E_{00}$  — переменная. Переменной составляющей начальной энергии  $\Delta E_{00}$  можно пренебречь, выбрав величины ускоряющего напряжения источника частиц и амплитуды импульсов напряжения в области преобразования спектра достаточно большими:  $\sim 150$  и  $\sim 1000$  В соответственно.

В настоящей работе рассмотрен вариант совмещения электронного спектрометра, состоящего из источника частиц (электронов и ионов) и высокодисперсного энергоанализатора, и динамического масс-спектрометра, состоящего из источника частиц — преобразователя спектра — и энергоанализатора для пространственного разделения ионов. Частицы в источнике-преобразователе возникают в результате взаимодействия возбуждающего излучения (потоки ионов, атомов, электронов, лазерного излучения) из независимых источников с поверхностью

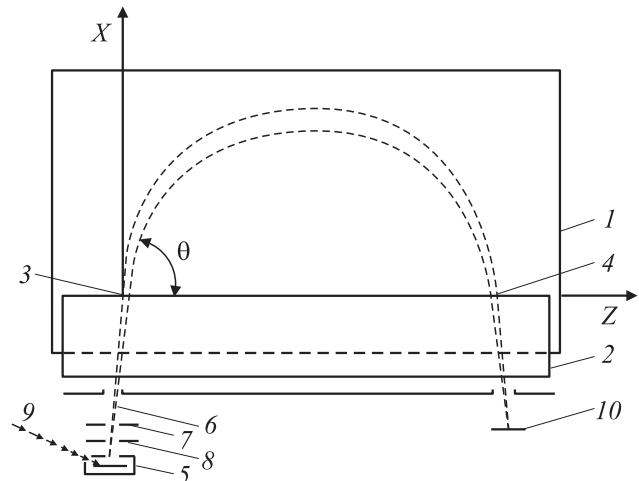


Схема электродов совмещенных спектрометров (вид сбоку). 1, 2 — электроды энергоанализатора, 3, 4 — входная и выходная диафрагмы энергоанализатора, 5 — источник ионов и электронов, 6 — пучок исследуемых частиц, 7, 8 — электроды конденсатора-преобразователя, 9 — поток частиц или лазерного излучения, 10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

исследуемого образца. Источники возбуждающего излучения выбираются в зависимости от исследуемой задачи и в настоящей работе не обсуждаются.

На рисунке представлена схема электродов совмещенных спектрометров (вид сбоку).

Предполагается, что устройство работает в двух режимах. В режиме регистрации ионов сканирование спектров частиц удобнее проводить путем изменения амплитуды импульсов напряжения в области преобразования источника частиц в диапазоне 50–2000 В. В режиме регистрации спектра электронов необходимо изменить полярность ускоряющего напряжения источника 5, напряжения питания анализатора и детектора частиц, а также отключить импульсное поле в пространстве 7–8. При регистрации потока электронов преобразование спектра не требуется. Используемые источники возбуждающего излучения 9 в настоящей работе не рассматриваются. Получение спектра электронов должно производиться изменением ускоряющего напряжения источника в диапазоне 60–150 В. Регистрация частиц в обоих режимах производится без отключения процесса взаимодействия возбуждающего излучения с поверхностью исследуемого образца в источнике.

### 3. Основные характеристики устройства для исследования твердых тел

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 необходимое разрешение по

энергии и по массе, рассмотрены на примере однозарядных ионов. Выберем разность конечных энергий ионов с массами, например,  $m_1 = 299$  а.м.у. и  $m_2 = 300$  а.м.у. и начальной энергией  $E_0 = 40$  эВ, равной  $E_{299} - E_{300} = \delta E = 0.1$  эВ. Для получения разрешения по массе не менее  $\delta m \approx 1$  а.м.у. необходимо выполнение условия

$$\frac{qV\Delta t}{L} = \frac{\sqrt{2E_0}\sqrt{m_1m_2}}{\sqrt{m_2} + \sqrt{m_1}} \left\{ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{\delta E}{E_0}\right) \frac{\sqrt{m_2} + \sqrt{m_1}}{\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1}}} \right\}, \quad (3)$$

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

В [7] 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  $75 < \vartheta < 85^\circ$  к оси  $OX$  и с малым поперечным угловым расхождением  $-2 < \beta < +2^\circ$ . Рассмотрим движение частиц, выпущенных из точки  $x_0$  со скоростью  $v_0$  под действием электрического поля конденсатора 7, 8, включающегося на короткие промежутки времени  $\Delta t$  (см. рисунок). Численное моделирование было проведено при следующих условиях. Рассмотрен источник-преобразователь спектра частиц с ускоряющим напряжением 40 эВ. Линейные размеры области преобразования выбраны как  $L \sim 1.5$  см с учетом реальных размеров масс-спектрометров. При выборе характеристик импульсов электрических потенциалов (длительность импульсов  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-7}$  с, период их повторения  $T = 10\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}$  с, частота поступления  $f^* \sim 2 \cdot 10^5$  с $^{-1}$ , амплитуда импульсов в диапазоне 400–2000 В) учитывались описанные в литературе высокочастотные и высоковольтные генераторы электрических импульсов [8–10]. При численном моделировании безразмерный параметр анализатора выбран равным  $b = 3.7$ , линейный масштаб  $l = 6.0$  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 анализаторе показывает, что ионы с массой 299 а.м.у. и кинетической энергией 89 эВ на выходе анализатора пересекают ось  $OZ$  в точке с координатой  $z = P$ , при этом вершина траектории имеет координату  $x = 5$  см. В анализаторе [7] 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 разреше-

нием порядка  $\delta E/E < 0.001$  обеспечивает разрешение соседних масс в диапазоне 1–1500 а.м.у.

## 4. Заключение

Рассмотрена возможность создания актуального для исследования твердых тел устройства высокого разрешения по массе и энергии, совмещающего электронный спектрометр и масс-спектрометр с источником потока частиц, трансформирующим спектр масс в спектр энергий. Предполагается, что устройство работает в режимах регистрации энергетического спектра электронов и регистрации масс-спектра ионов. Регистрация частиц в обоих режимах производится без отключения процесса взаимодействия возбуждающего излучения с поверхностью исследуемого образца в источнике. Численное моделирование работы устройства подтверждает возможность создания информативного и компактного средства исследования физико-химических свойств поверхности твердых тел.

## Список литературы

- [1] Interaction of charged particles with solids and surfaces. V. 271 of NATO ASI Ser. / Eds A. Gras-Marti, H.M. Urbassek, N.R. Arista, F. Flores. Plenum Press, N.Y. (1991).
- [2] Yu. Ming. In: Sputtering by particle bombardment III / Eds R. Behisch, K. Wittmaack. Springer, Berlin-Heidelberg (1991). P. 91.
- [3] H. Kudo. Ion-induced electron emission from crystalline solids. Springer, Berlin (2001). 161 p.
- [4] N. Imanishi, S. Niomiya. J. Nucl. Radiochem. Sci. **5**, 1, R9 (2004).
- [5] А.А. Лебедев, И.С. Котоусова, А.В. Лаврентьев, С.П. Лебедев, П.А. Дементьев, В.Н. Петров, А.Н. Смирнов, А.Н. Титков. ФТТ **52**, 4, 799 (2010).
- [6] Z.Z. Latypov, L.N. Gall, G.K. Golikov. Int. J. Mass Spectrometry **202**, 139 (2000).
- [7] Ю.К. Голиков, К.Г. Уткин, В.В. Чепарухин. Электростатический анализатор. А.С. № 1047332. Приоритет от 29 марта 1981 г.
- [8] Ю.В. Аристов, Б.В. Воронков, И.В. Грехов, А.Л. Жмодиков, А.К. Коротков. ПТЭ **3**, 72 (2007).
- [9] Б.В. Воронков, И.В. Грехов, А.К. Козлов, С.В. Коротков, А.Л. Степанов. ПТЭ **3**, 75 (2007).
- [10] Б.В. Воронков, И.В. Грехов, А.К. Козлов, С.В. Коротков, А.Л. Степанов. ПТЭ **3**, 78 (2007).