

- [4] Levin M. D., Nomokonov D. V., Rubanovitch M. M. // Proc. of Intern. Symp. «Surface waves in solids and layered structures». Novosibirsk, 1986. Vol. 1. P. 317—320.
 [5] Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 592 с.
 [6] Крайцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.

Поступило в Редакцию
20 октября 1986 г.

В окончательной редакции
24 марта 1988 г.

СЕПАРАЦИЯ ИОНОВ ПО МАССАМ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ И ВЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПЛОСКИХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ПОЛЯХ

М. В. Калашников, Н. В. Коненков, В. И. Кратенко, Г. И. Шагимуратов

Представляет научный и практический интерес использование II и III областей стабильности [1-3] параметров a, q уравнения Матье, описывающего траектории движения ионов в квадрупольном фильтре масс.

Полезность применения режима сепарации в указанных областях состоит в достижении высокой разрешающей способности при энергиях анализируемых ионов 0.1—1 кэВ [3]. Это

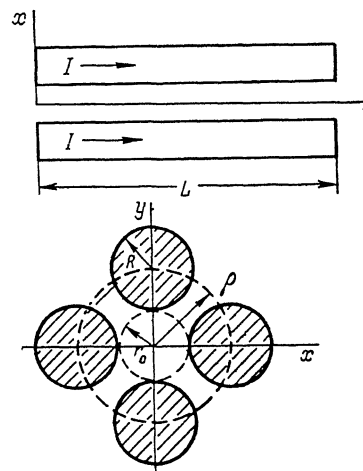
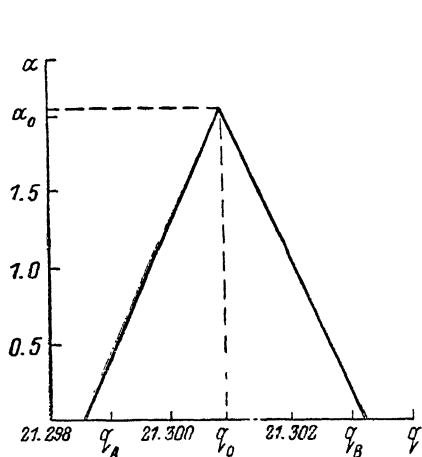


Рис. 1. III область стабильности параметров a, q уравнения Матье ($q_A=21.29863$, $q_0=21.3009$, $q_B=21.30317$, $a_0=2.06 \cdot 10^{-3}$).

Рис. 2. Конфигурация электродов квадрупольного фильтра масс.

важно, например, при использовании искровых источников ионов для анализа поверхности твердых тел [4], а также для исследования молекулярно-ионных реакций в тандемной масс-спектрометрии [5].

Целью настоящей работы является анализ работы квадрупольного фильтра масс, в котором для получения режима сепарации ионов в III области стабильности (рис. 1) предлагается использовать постоянное магнитное поле.

Для создания плоского магнитного поля с составляющими вектора магнитной индукции $B_x \propto y$ и $B_y \propto x$ вблизи оси анализатора можно в качестве проводников с током использовать круглые электроды квадрупольного конденсатора (рис. 2). Для этого необходимо пропускать ток через x -электроды в направлении оси z и через y -электроды в противоположном направлении. Такая конфигурация линейных токов (рис. 2) в приближении бесконечно длинных проводников ($r_0 \ll L$) создает плоское магнитное поле с индукцией B

$$\mathbf{B} = B_x(x, y) \mathbf{i} + B_y(x, y) \mathbf{j} \quad (1)$$

и с компонентами

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{y - \rho}{(y - \rho)^2 + x^2} + \frac{y + \rho}{(y + \rho)^2 + x^2} - \frac{y}{(\rho - x)^2 + y^2} - \frac{y}{(\rho + x)^2 + y^2} \right], \quad (2)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{x - \rho}{(x - \rho)^2 + x^2} + \frac{x + \rho}{(x + \rho)^2 + x^2} - \frac{x}{(\rho - y)^2 + x^2} - \frac{x}{(\rho + y)^2 + x^2} \right], \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная вакуума, ρ — радиус вписанной окружности между центрами электродов, I — величина тока.

Считая, что вблизи оси z анализатора $x, y \ll \rho$, из (2) и (3) получим

$$B_x \simeq -\frac{\mu_0 I}{\pi \rho^2} y, \quad (4)$$

$$B_y \simeq -\frac{\mu_0 I}{\pi \rho^2} x. \quad (5)$$

Круглыми электродами формируется в приосевой области анализатора переменное электрическое поле с напряженностью

$$E = \frac{2V \cos \omega t}{r_0^2} [-x\mathbf{i} + y\mathbf{j}], \quad (6)$$

где V, ω — значения амплитуды и частоты напряжения, прикладываемого к противоположным электродам анализатора; r_0 — радиус поля (радиус окружности, вписанной между вершинами электродов), который связан с радиусом электрода как $R \simeq 1.15 r_0$.

Уравнение движения иона в анализаторе определяется силой Лоренца

$$m\ddot{\mathbf{r}} = e\mathbf{E} + e[\dot{\mathbf{r}}\mathbf{B}]. \quad (7)$$

Расписывая покомпонентно (7), с учетом (4)–(6) получим систему уравнений

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{e}{m} (E_x - eB_y \dot{z}), \\ \ddot{y} = \frac{e}{m} (E_y - eB_x \dot{z}), \\ \ddot{z} = \frac{e\mu_0 I}{\pi m \rho^2} [y\dot{y} - x\dot{x}]. \end{cases} \quad (8)-(10)$$

Интегрируя (10), получим

$$\dot{z} = \frac{e\mu_0 I}{\pi m \rho^2} (y^2 - x^2) + \dot{z}_0. \quad (11)$$

Для типичных значений параметров $I = IA$; $\rho = 4$ см; $m = 100$ а. е. м.; $\dot{z}_0 = 10^4$ м/с; $x, y \leq r_0 = 1$ см; первым слагаемым в (11) можно пренебречь и считать, что $\dot{z} = \dot{z}_0$ (\dot{z}_0 — скорость иона вдоль оси z анализатора). Таким образом, при токах в единицы ампер изменение осевой скорости \dot{z}_0 иона незначительно за счет влияния магнитного поля. Это позволяет представить уравнения (8) и (9) в стандартной форме уравнения Матье

$$\ddot{x} + (-a + 2q \cos 2\xi) x = 0, \quad (12)$$

$$\ddot{y} - (-a + 2q \cos 2\xi) y = 0, \quad (13)$$

где

$$q = \frac{4eV}{m\omega^2 r_0^2}, \quad a = \frac{4\mu_0 I e \dot{z}_0}{\pi \rho^2 \omega^2 m}, \quad \xi = \frac{\omega t}{2}.$$

При амплитудной развертке по массам изменение величины тока на единицу массы в соответствии с (13) составляет

$$\frac{I}{m} = \frac{\pi a \rho^2 \omega^2}{4\mu_0 e \dot{z}_0}. \quad (14)$$

Оценим величину I/m . Для III области стабильности параметров a, q (на рис. 1) максимальное значение $a_0 = 2.06 \cdot 10^{-3}$. Скорость \dot{z}_0 , соответствующая массе иона $m = 40$ а. е. м. и энергии 1 кэВ, равна $1.4 \cdot 10^5$ м/с. Типичное значение $\rho = 4$ см. Приемлемая рабочая частота для данной области составляет 100 кГц. Исходя из указанных параметров, получим $I/m =$

= 1.5 мА/а. е. м., т. е. при работе в диапазоне массовых чисел 1—1000 а. е. м. максимальное значение токов, пропускаемых через стержни, соответствует 1.5 А.

Пропускание такой величины тока через стержни анализатора технически реализуемо.

Из (14) следует, что при наличии магнитного поля, величина разрешающей способности квадрупольного фильтра масс изменяется как за счет энергии ионов, так и величины тока. В случае, когда на электроды подается постоянная составляющая напряжения, доля ее величины от переменной составляющей $\lambda = U/V \leq a_0/2q_0 = 2.5 \cdot 10^{-5}$ очень мала, поэтому поддержание величины λ со стабильностью $< 10^{-3}$ представляет техническую трудность.

Возможность сепарации ионов с энергиями в сотни электронвольт обусловлена чрезвычайной узостью ($q_0/\Delta q = 5000$) по оси q III области стабильности.

Влияние магнитного поля небольшой величины на траектории ионов в третьей области стабильности существенно вследствие большой величины отношения параметров q_0/a_0 , а также из-за больших значений энергий ионов.

Выводы

1. Предложен способ формирования магнитного поля в квадрупольном фильтре масс, величина которого линейно растет с координатой. Показана возможность использования плоского магнитного поля в режиме работы в III области стабильности параметров a , q уравнения Матве. Получено, что требуемое значение тока на 1 а. е. м. массы иона составляет единицы миллиампер.

2. Сепарация ионов по массам в режиме работы III области стабильности критична к внешним магнитным полям.

Литература

- [1] Dawson P. H., Yn. Bingo // Int. J. Mass. Spectr. and Ion Phys. 1984. Vol. 56. P. 25—39.
- [2] Vehida Y., Miwa T., Hattory S. Mass. Spectr. 1982. Vol. 30. N 3. P. 219—226.
- [3] Dawson P. H., Bingo Yn. // Int. J. Mass. Spectr. and Ion Phys. 1984. Vol. 56. P. 41—50.
- [4] Чупахин М. С. Зондовые методы в искровой масс-спектрометрии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 109 с.
- [5] Fetterolf D. P., Yost R. A. // Int. J. Mass. Spectr. and Ion Phys. 1982. Vol. 44. P. 37—50.

Поступило в Редакцию
26 октября 1987 г.

В окончательной редакции
2 марта 1988 г.

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД СО СКАЧКОМ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОХРОМИЗМЕ В ПЯТИОКСИ НИОБИЯ

В. В. Белозеров, Ю. И. Малюк, Л. И. Скотков

Исследованы особенности электрохромизма в поликристаллической пятиокиси ниобия (Nb_2O_5). Полученные результаты позволяют интерпретировать электрохромный процесс в Nb_2O_5 как совместное действие двух механизмов: а) инжекции в оксид электронов, заряд которых компенсируется внедрением в Nb_2O_5 протонов и экстракцией из образца анионов кислорода, а также б) фазового перехода со скачком поглощения, инициируемом структурными искажениями в Nb_2O_5 при разупорядочении в анионной подрешетке оксида.

Впервые электрохромный эффект (ЭХЭ) был исследован в пятиокиси ниобия [1], где рентгендифрактометрическими методами была показана роль инжекции в оксид протонов из электролита, что позволило в дальнейшем [2] объяснить ряд особенностей электрохромизма в оксидах переходных металлов (ОПМ).

Предложенная модель, в общем удовлетворительно интерпретировавшая природу электрохромизма ОПМ, тем не менее оказалась противоречивой в отдельных деталях. В частности, не нашел объяснения факт отсутствия ЭХЭ в пленках Ta_2O_5 , структура которого близка к структуре Nb_2O_5 [3] и способна «принять» весьма значительное количество протонов при фотохромном эффекте [4]. Оценочный анализ количественных зависимостей указывает на