

10; 12

© 1992

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЕ СВОЙСТВА АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ ИОНОВ

А.А. С ы с о е в, В.Б. А р т а е в,
П.С. М е т а л ь н и к о в

Наряду с масс-рефлектроном, предложенным и развитым Б.А. Мамыриным [1], интерес представляют времяпролетные масс-анализаторы на основе аксиально-симметричных полей [2-4]. Возросшее в последнее время к ним внимание связано, главным образом, с рядом уникальных характеристик таких анализаторов, обеспечивающих возможность их применения с разными типами источников ионов для различных задач.

Основы теории времяпролетных аксиально-симметричных масс-анализаторов с использованием полипараметрических рядов были заложены в [3, 5] и наиболее детально проработаны в [6]. В [7] изучены пределы ограничений созданной теории. В настоящей работе представлены результаты экспериментальной апробации нескольких моделей анализаторов, построенных с использованием выводов данной теории.

На основе двух новых ионно-оптических схем были апробированы три модели анализаторов. Одна из них с углом отклонения ионов в поле $\Psi = 4.433$ рад и радиусом средней траектории ионов $r_c = 150$ мм описана в [8], вторая и третья модели с удвоенным углом отклонения имели средний радиус траектории $r_0 = 150$ и 100 мм соответственно. Разрешающая способность R анализаторов определяется формулой

$$R = t/2\Delta t,$$

$$\Delta t = (r_0/v_0) \left[T_0 + \sum_{i=1}^5 T_i \alpha_i + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^j T_{ij} \alpha_i \alpha_j \right],$$

где t – время пролета ионов в анализаторе; r_0 – радиус средней траектории; α_1, α_2 – тангенсы углов расходимости траектории ионов из выходной щели источника ионов в радиальном и аксиальном направлениях; α_3, α_4 – половины ширины и высоты выходной щели источника в единицах r_0 ; α_5 – относительный начальный разброс энергий ионов; T_0 – относительное время пролета ионов с нулевыми значениями α_i по средней траектории; T_i и T_{ij} – абберрационные коэффициенты первого и второго порядков соответственно; v_0 – средняя скорость ионов, двигающихся по средней траектории.

Сравнительные данные суммарных aberrаций для различных моделей аксиально-симметричных анализаторов

Тип анализатора	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	Ион	τ , нс	t , мкс	R теор	$R_{50\%}$ эксп
1	0.017	0.017	0.007	0.007	0.05	$^{63}\text{Cu}^+$	24	24	500	430
2	0.017	0.017	0.013	0.013	0.005	$^{133}\text{Cs}^+$	16	69	2150	1900
3	0.008	0.017	0.004	0.02	0.05	$^{63}\text{Cu}^+$	7	32	2300	1000

Первым, важнейшим выводом теории являлась возможность получить удовлетворительные для практических целей значения разрешающей способности при удовлетворительных начальных разбросах ионных пакетов. Реально это означает, что aberrационные коэффициенты первого порядка $T_1 = T_3 = T_5 = 0$ ($T_2 \equiv T_4 \equiv 0$), а второго порядка — минимизированы. В таблице даны теоретические значения суммарных aberrаций τ , а также связанные с ними ограничения разрешающей способности $R_{\text{теор}}$, и экспериментально полученные значения $R_{50\% \text{ эксп}}$.

Данные для $R_{\text{теор}}$ и $R_{\text{эксп}}$ приведены совместно только для ориентировки в возможности моделей. При их сравнении необходимо учитывать ряд факторов, которые не поддаются точной оценке (например, время разрушения плазмы в 1-й и 3-ей моделях, где применялись искровой и лазерный источники ионов соответственно). Для примера на рис. 1 приведен масс-спектр изотопов Cu , полученный с помощью анализатора 3-го типа с лазерным источником ионов.

Вторым важным достоинством анализаторов рассматриваемого типа является высокая пропускная способность. В них отсутствуют сетки на пути пролета ионов, и следовательно, исключается один из источников потерь ионов. Нет также замедления ионов до близких к нулевым значениям энергий и связанных с этим отрицательных эффектов. Кроме временной фокусировки первого порядка по трем параметрам, аксиально-симметричные анализаторы имеют возможность обеспечения двойной геометрической фокусировки первого порядка по углам и координатам в радиальном направлении, а анализатор 1-го типа дополнительно и по аксиальным углам и координатам. Расчетные значения коэффициента пропускания для выбранных схем составляли 95%. Измерения, выполненные для анализатора 2-го типа, дали значения 30%.

Третьим важным достоинством обсуждаемых анализаторов является возможность получения высоких значений относительной чувствительности. Ее оценки проводились по масс-спектру ионов K

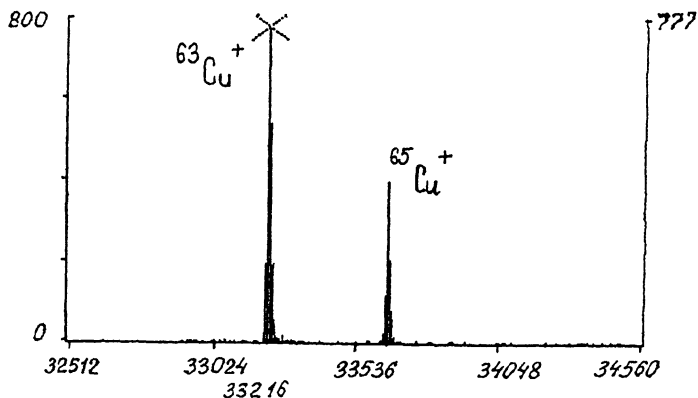


Рис. 1. Масс-спектр изотопов меди.

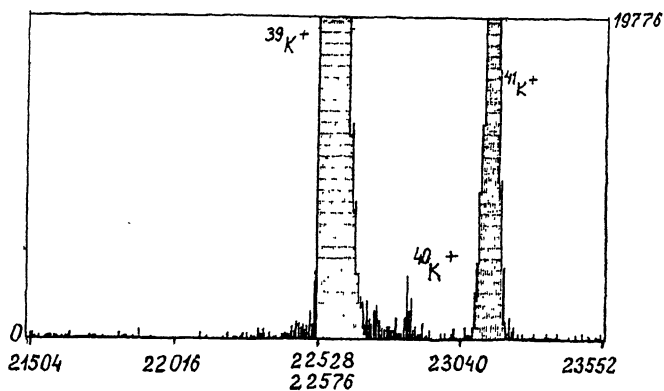


Рис. 2. Масс-спектр изотопов калия.

(рис. 2), регистрацию которых осуществляли с помощью многоканального временного анализатора с шагом дискретизации 1,25 нс и с возможностью регистрации 126 стоп-импульсов на один стартовый (запускающий) импульс.

Интегральный средний фон за время измерений составил 3,6 импульсов в районе массы $M=38$ а. е. м. и 4,2 импульсов в районе $M=40$ а. е. м. Полный ток ионов наиболее распространенного изотопа $^{39}\text{K}^+$ за время измерения составляет $1,07 \cdot 10^6$ импульсов. Отсюда оценка изотопической чувствительности дает значение $S_{38} = 3 \cdot 10^{-6}$ для $M=38$ а. е. м. и $S_{40} = 3,9 \cdot 10^{-6}$ для $M=40$ а. е. м. Если же из интегрального фона вычесть собственные шумы детектора (вторично-электронного умножителя ВЭУ-7), то будем иметь следующую оценку для изотопической чувствительности: $S_{38} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ и $S_{40} = 2,1 \cdot 10^{-6}$. При удалении от основной

линии на 2 а. е. м и более шумы практически сводятся к уровню шумов ВЭУ, а оценка относительной чувствительности после их учета дает еще примерно на порядок лучшие значения.

Полученные на основе экспериментальных результатов оценки позволяют сделать два принципиальных для времяпролетной масс-спектрометрии вывода. Во-первых, полученная изотопическая чувствительность практически такая же, как и для магнитных масс-спектрометров, но, что является исключительным, достигается она при значительно больших давлениях в камере анализатора – не менее $(1-2) \cdot 10^{-4}$ Па. При таких давлениях изотопическая чувствительность магнитных приборов не превышает $5.7 \cdot 10^{-5}$ [9]. Второе – обсуждаемые анализаторы позволяют достигнуть уровня чувствительности приборов типа ЭМАЛ-2, причем их предельные возможности далеко не исчерпаны. При этом наряду с таким достоинством, как электрическая регистрация (в приборах ЭМАЛ-2 применяют фоторегистрацию) времяпролетные масс-спектрометры могут иметь на порядок меньшие габариты и вес.

Рассматриваемый принцип построения анализаторов времяпролетных масс-спектрометров обеспечивает удовлетворительные метрологические характеристики приборов. Погрешность измерений, получаемая с такими анализаторами, проверялась по изотопным отношениям Cu и K . В обоих случаях относительная погрешность измерения изотопных отношений не хуже 1% для основных изотопов

В заключение отметим, что обсуждаемые здесь анализаторы применялись, кроме как с лазерным и искровым источниками ионов, также с источниками с поверхностной ионизацией, с ионизацией осколками деления ядер $Cf-252$. Они могут также применяться при соответствующих условиях практически с любыми импульсными источниками ионов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] М а м ы р и н Б.А., К а р а т а е в В.И., Ш м и к к Д.В., З а г у л и н В.А. // ЖЭТФ. 1973. Т. 64. В. 1. С. 82–89.
- [2] P o s c h e n r i e d e r W.P. // Int. J. Mass Spectrom. and Ion Phys. 1972. V. 9. N 4. P. 357–373.
- [3] С ы с о е в А.А., Ч е б а е в с к и й Б.Ф., Н и к о л а е в Б.И., Д о р о ф е е в В.И. Физическая электроника. В.3. М.: Атомиздат. 1966. С. 29–43.
- [4] S a k u r a i T., M a t s u o T., M a t s u d a M. // Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc. 1985. V. 63. P. 273–279.
- [5] С ы с о е в А.А., Н и к о л а е в Б.И. Физическая электроника. В. 3. М.: Атомиздат. 1966. С. 20–28.
- [6] О л е й н и к о в В.А., С ы с о е в А.А. Методика расчета и исследование фокусирующих по времени пролета свойств секторных аксиально-симметричных статических полей. ВИНТИ, № 2971–80, деп. от 11.07.80.

- [7] С ы с о е в А.А., М у с а т о в В.В., А р т а е в В.Б.
Тезисы докладов республиканского семинара по методам рас-
чета электронно-оптических систем. 1988, Ташкент. 122 с.
- [8] С ы с о е в А.А., Р а м е н д и к Г.И., П е к а л ь н А.Л.
и др. // Научные приборы. Бюлл. № 38. 1985. С. 34-43.
- [9] П а в л е н к о В.А., П л и с с Н.С., С о к о л о в Б.И.,
Щ е р б а к о в А.П. // Вопр. атомн. науки и техники. Сер.:
Радиационная техника. 1986. № 1(32). С. 20-25.

Московский
инженерно-физический
институт

Поступило в Редакцию
5 мая 1992 г.