Физическая аппаратура и её элементы

УДК 537.534.7

Новый подход к разработке ионно-оптических схем статических масс-спектрографов на основе неоднородных магнитных полей, однородных по Эйлеру

А. С. Бердников, И. А. Аверин

На фоне современных способов проведения масс-анализа статические масс-анализаторы иногда считаются безнадёжно устаревшими и пригодными для решения лишь узкоспецифичных задач. Однако новые технологические решения (в частности, использование сильных постоянных магнитов со сложными профилями наконечников, использование параллельных детекторов высокого пространственного разрешения типа микроканальных пластин и фотодиодных матриц, и т. п.) вполне способны придать новое дыхание этому направлению. В данной статье рассматриваются теоретические способы, как на основе неоднородных статических магнитных полей, однородных по Эйлеру, можно разрабатывать схемы статических масс-спектрографов нового типа. Важно, что указанные масс-спектрографы характеризуются большим диапазоном масс в спектре, обладают строго линейной линией фокусов и демонстрируют одинаково высокое качество фокусировки (а именно, двойную фокусировку второго порядка по углу, энергии и дополнительно по вертикальному смещению) в любой точке линии фокусов.

PACS: 41.85.-p, 41.85.Lc, 41.85.Qg, 41.90.+e

Ключевые слова: статические масс-анализаторы, масс-спектрографы, однородные по Эйлеру электромагнитные поля, двойная фокусировка, нелинейные магнитные поля.

Введение

Статические масс-спектрометры и масс-спектрографы [1—9] являются исторически первыми типами приборов для проведения масс-спектрометрического анализа вещества. Со времени появления первых статических масс-спектрометров прошел без малого век (первый масс-спектрометр построен А. Демпстером в 1918 г., а первый масс-спектрограф создал Ф. Астон в 1919 г.). Если же отсчитывать время с метода парабол Дж. Дж. Томсона — то и больше (принцип метода парабол открыт в 1907 г., первый полноценный прибор создан в 1912 г.) [1, 9—11]. За это время появились иные способы проведения анализа масс ионов, основанные на совершенно других принципах: квадрупольные масс-анализаторы, времяпролётные масс-анализаторы, приборы с ионциклотронным резонансом (масс-анализаторы Фурье), электростатические ловушки Orbitrap™ [8, 9]. На фоне этих новомодных направлений, да и на фоне ныне полузабытых альтернативных способов масс-анализа вроде радиочастотных и магнетронных масс-анализаторов [2, 10, 11], старые статические масс-спектрометры, выглядящие нынче допотопными громоздкими монстрами, определённо теряются. И это несмотря на то, что по-прежнему имеются классы задач, где статические масс-анализаторы являются незаменимыми (задачи ядерной и ускорительной физики, задачи изотопной масс-спектрометрии, задачи управления технологическими процессами атомной промышленности и др. [11]).

Бердников Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник[1].
Аверин Игорь Андреевич, младший научный сотрудник, аспирант[1,2].
[1] Институт аналитического приборостроения РАН.
Россия, 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26.
[2] Санкт-Петербургский Политехнический Университет им. Петра Великого.
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: agreer@bk.ru

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2015 г.

© Бердников А. С., Аверин И. А., 2016

Однако несомненным преимуществом статических масс-анализаторов является то, что (на сегодняшний день) это *единственный* класс масс-спектрометрических приборов, способный обеспечить 100 %-КПД работы непрерывного источника ионов, т. н. duty cycle. Ведь если ионный источник продолжает работать в то время, когда масс-анализатор занят анализом очередной порции ионов, поступивших на его вход, то превращаемое в ионы за это время вещество пробы очевидным образом теряется без пользы. Поэтому отношение времени, когда ионы поступают в собственно масс-анализатор, к полному времени однократного измерения масс-спектра — «рабочий цикл» — служит очень важной мерой коэффициента полезного использования пробы. Однако в настоящее время указанные новые способы проведения масс-анализа едва-едва достигают значения duty cycle в несколько процентов, и это почему-то считается очень хорошей характеристикой!

Правда, для того, чтобы обеспечить 100%-duty cycle, статический масс-анализатор обязан работать в спектрографическом режиме, то есть, осуществлять параллельное определение всего масс-спектра, а не последовательное сканирование по массам [1, 2, 8, 9]. При этом классические методы детектирования заряженных частиц не дают возможности измерять непрерывный масс-спектр с должной плотностью (дискретностью) пространственных точек, ограничиваясь отдельными избранными массами. Появление же новых технологий наподобие микроканальных пластин и фотодиодных матриц, позволяющих с высоким разрешением осуществлять параллельное детектирование пространственно-диспергированных потоков заряженных частиц, даёт второе дыхание приборам такого типа [12—15].

Теория спектрографического режима работы для статических масс-анализаторов разработана давно и достаточно основательно [16—29]. На рис. 1 показана схема типичного статического масс-анализатора типа Маттауха-Герцога, осуществляющего параллельное детектирование сфокусированных потоков заряженных частиц с разными массами вдоль линии фокусов. Однако, к сожалению, строго прямая линия фокусов с одновременной фокусировкой заряженных частиц по энергии и по углу в каждой точке линии фокусов (т. н. «двойная фокусировка») осуществима только тогда, когда детектирование осуществляется внутри магнитного поля, причём в этом случае можно добиться не более чем первого порядка фокусировки по углу.

Казалось бы, при выносе линии детектирования за пределы магнитного поля (как на рис. 1) имеется возможность добиться фокусировки второго порядка (в принципе). Однако в реальности этого не происходит, поскольку неизбежное наличие краевого магнитного поля превращает прямолинейную линию фокусов с однородно-хорошей фокусировкой в криволинейную линию фокусов. Для этой линии фокусов фокусировка по углу второго порядка и фокусировка по энергии первого порядка (двойная фокусировка) осуществляются только в одной-единственной точке, тогда как во всех остальных точках линии фокусов имеется фокусировка по углу лишь первого порядка, а двойная фокусировка (по углу и по энергии) совсем отсутствует. Кроме того, относительно высокая пространственная дисперсия по массе у прибора с однородным магнитным полем не даёт возможность зафиксировать вдоль детектора разумной длины настолько длинный масс-спектр, как это требуется практическими задачами. Следовательно, для возрождения на новой современной технологической базе идеи статического масс-спектрографа со 100%-duty cycle требуются новые ионно-оптические решения.

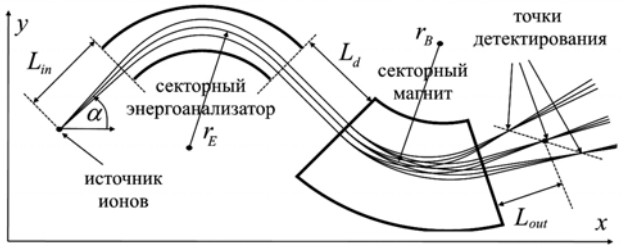

Рис. 1. Принципиальная схема статического масс-спектрографа типа Маттауха-Герцога с двойной фокусировкой.

В данной статье рассматриваются теоретические способы, как на основе неоднородных статических магнитных полей, однородных по Эйлеру, можно разрабатывать схемы статических масс-спектрографов нового типа, характеризующихся большим диапазоном масс в спектре, строго линейной линией фокусов и одинаково высоким качеством фокусировки (а именно, двойной фокусировкой второго порядка по углу, энергии и дополнительно по вертикальному смещению) в любой точке линии фокусов.

Магнитные поля, однородные по Эйлеру, и однокаскадные магнитные спектрографы

Магнитостатические поля, однородные по Эйлеру, и закон подобия траекторий заряженных частиц в этих полях [30] естественным образом обобщают соответствующие результаты, полученные ранее Ю. К. Голиковым и его учениками для движения заряженных частиц в электростатических полях, однородных по Эйлеру [31—38]. А именно, если пространственное распределение индукции $\vec{B}(x, y, z)$ магнитостатического поля

удовлетворяет тождеству для однородных функций Эйлера $\vec{B}(\lambda x, \lambda y, \lambda z) \equiv \lambda^s \vec{B}(x, y, z)$ с показателем однородности, равным s, то тогда траектории заряженных частиц, выпущенных под одним и тем же углом из центра однородности с разными начальными импульсами будут геометрически подобны с коэффициентом пространственного масштабирования $\lambda = \chi^{1/(s+1)}$ (где χ — коэффициент пространственного масштабирования начальных импульсов заряженных частиц). Это означает, что если траектории с одним и тем же начальным импульсом, выпущенные из центра однородности магнитного поля под некоторым углом, фокусируются по углу в какой-то точке пространства, то траектории с масштабированным начальным импульсом, выпущенные из той же точки пространства и под тем же углом вылета, будут иметь масштабированную форму и тем самым будут фокусироваться в масштабированной точке пространства, причём порядок фокусировки сохранится. При этом линия фокусов будет иметь строго прямолинейную форму, что важно с технологической точки зрения. Подробности математических выкладок, обосновывающих данный эффект, можно найти в [30].

Тем самым неоднородные магнитостатические поля, однородные по Эйлеру, могут служить хорошей базой для разработки магнитостатических масс-спектрометров нового типа [30]. На рис. 2 показана схема криволинейных полюсов статического магнита с наклонным магнитным экраном, имеющим клиновидную щель, которые создают неоднородное (в физическом смысле) магнитостатическое поле, которое будет однородной (в математическом смысле) функцией в соответствии с определением этого понятия у Л. Эйлера. За счёт изменения параметра s, характеризующего однородность по Эйлеру используемого магнитного поля, можно эффективно ужимать масс-спектр большого интервала масс так, чтобы он детектировался линейным детектором нужной длины (конечно, ценой перестройки профиля магнитных полюсов и магнитного экрана, а также ценой одновременного уменьшения пространственной дисперсии по массе у такого прибора).

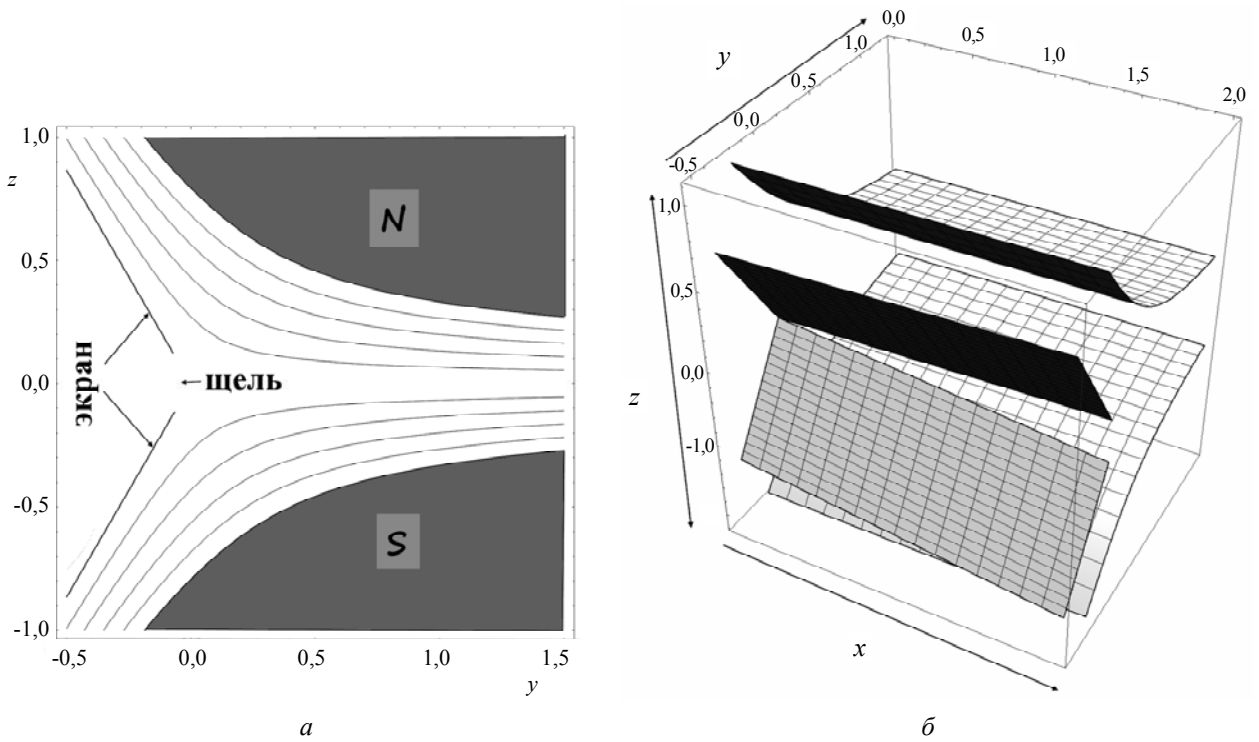

Рис. 2. Форма полюсных наконечников и магнитного экрана с клиновидной щелью для почти двумерного магнитного поля, однородного по Эйлеру с показателем однородности s = 1/2: а — сечение в плоскости x = const с эквипотенциальными линиями скалярного магнитного потенциала, б — трёхмерный вид.

Двухкаскадный масс-спектрограф с магнитным полем, однородным по Эйлеру, и с двойной фокусировкой

Из результатов работы [30] остаётся неясным, возможно ли построить на базе магнитостатических полей, однородных по Эйлеру, двухкаскадный прибор по типу Маттауха-Герцога, обеспечивающий режим двойной фокусировки по углу и по энергии вдоль всей линии фокусов. Анализ в самом общем виде абстрактного двухкаскадного прибора, состоящего из электростатического кас-

када с электрическим полем и магнитостатического каскада с магнитным полем, однородным по Эйлеру, показывает, что для этого должны быть выполнены следующие условия на аберрационные коэффициенты электрического и магнитного каскадов (обозначения аберрационных коэффициентов следуют обозначениям работ [3, 8]):

$$(X, x)_M = 0\,,\ (A, \alpha)_E = 0\,,$$
$$(X, \alpha)_M (A, \gamma)_E + \frac{1}{2s+2} X_M = 0\,,$$

где нижний индекс E соответствует электрическому каскаду, а нижний индекс M — магнитному. Эти соотношения являются обобщением на случай неоднородного магнитного поля, удовлетворяющего условиям однородности по Эйлеру, классических условий Маттауха-Герцога: первое условие означает, что магнитный каскад должен фокусировать в точку входной параллельный пучок ионов, второе условие — что электрический каскад должен преобразовывать точечный источник ионов в параллельный пучок на входе магнита, а третье условие — что дисперсии по энергии в электрическом каскаде и в магнитном каскаде должны вычитаться друг из друга, давая в сумме ноль (то есть, обеспечивая в итоге нулевую дисперсию по энергии, она же фокусировка по энергии в конечной точке детектирования на линии фокусов). Аналогичным образом получаются условия для аберрационных коэффициентов электрического и магнитного каскадов, обеспечивающие фокусировку второго порядка по углу и по энергии, а также обращающие в ноль аберрацию второго порядка для положения изображения в зависимости от вертикального размера пуска частиц:

$$(X, x)_M = 0\,,\ (X, xx)_M = 0\,,\ (X, x\alpha)_M = 0\,,$$
$$(A, \alpha)_E = 0\,,\ (A, \alpha\alpha)_E = 0\,,\ (A, \alpha\gamma)_E = 0\,,$$
$$(A, \gamma)_E = -\frac{1}{(2n+2)} \frac{X_M}{(X, \alpha)_M}\,,$$
$$(A, \gamma\gamma)_E =$$
$$= \frac{(2n+3)}{(2n+2)^2} \frac{X_M}{(X, \alpha)_M} \left[1 - \frac{1}{(2n+3)} \frac{X_M (X, \alpha\alpha)_M}{\left[(X, \alpha)_M\right]^2} \right],$$
$$(Y, y)_E = 0\,,\ (A, yy)_E = -\frac{(X, \beta\beta)_M}{(X, \alpha)_M} \left[(B, y)_E\right]^2.$$

Обсуждение результатов

В настоящий момент данная работа имеет чисто теоретический характер. Построение конкретных ионно-оптических схем, для которых выполнены приведённые выше соотношения для аберрационных коэффициентов, требует дополнительной работы, которая в настоящий момент не закончена.

Очевидно, что достаточно легко можно будет добиться выполнения условий первого порядка, если использовать обычный электростатический сектор в качестве первого каскада и двухполюсный магнит с криволинейными полюсами и магнитным экраном с клиновидной щелью (реализующий неоднородное магнитостатическое поле, однородное по Эйлеру) в качестве второго каскада. Однако практическое воплощение условий второго порядка (что представляет наибольший практический интерес) может натолкнуться на непредвиденные трудности: количество степеней свободы у имеющихся традиционных оптических элементов может оказаться недостаточным, чтобы обеспечить выполнение столь длинного списка ограничений на аберрационные коэффициенты системы.

Электростатический сектор, даже и тороидального типа [3, 4, 8], явно не имеет достаточного количества степеней свободы, чтобы обеспечить выполнение всех требуемых аберрационных условий. Но это ограничение легко обойти, если заменить электростатический сектор на трёхэлектродное или даже четырёхэлектродное трансаксиальное зеркало [5, 39—45], у которого степеней свободы в выборе параметров будет более чем достаточно.

Не так обстоит дело для магнитного каскада. В требуемом списке ограничений на аберрационные коэффициенты условия $(X, x)_M = 0$, $(X, xx)_M = 0$, $(X, x\alpha)_M = 0$ никак не связаны со свойствами электрического каскада; их выполнение можно обеспечить лишь за счёт правильного выбора параметров магнитного каскада. Однако свободных параметров у магнитного каскада (в частности, у каскада с постоянным магнитным полем) не слишком-то много. Если, например, условия $(X, x)_M = 0$ и $(X, xx)_M = 0$, по всей видимости, можно обеспечить правильным подбором входного угла у параллельного пучка заряженных частиц и дрейфового расстояния на выходе из магнитного поля, то для выполнения условия $(X, x\alpha)_M = 0$ остаётся только краевое поле магнита, которого может оказаться недостаточно для достижения поставленной цели.

Заключение

В данной статье рассматриваются теоретические способы, как на основе неоднородных статических магнитных полей, однородных по Эйлеру, можно разрабатывать схемы статических масс-спектрографов нового типа. Важно, что указанные

масс-спектрографы характеризуются большим диапазоном масс в масс-спектре, детектируемом за одно измерение, обладают строго линейной линией фокусов и демонстрируют одинаково высокое качество фокусировки (а именно, двойную фокусировку второго порядка по углу, энергии и дополнительно по вертикальному смещению) в любой точке линии фокусов.

В настоящий момент данная работа имеет чисто теоретический характер. Построение конкретных ионно-оптических схем, для которых выполнены приведённые выше соотношения для аберрационных коэффициентов, требует дополнительной работы, которая в настоящий момент не закончена.

Несмотря на очевидные трудности, поставленная задача представляется необычайно интересной как с теоретической точки зрения, так и с практической. Данные исследования будут нами продолжены, и хочется надеяться, что они приведут, в конечном счёте, не только к появлению новых красивых теоретических результатов в оптике заряженных частиц, но и к практическому выпуску отечественной промышленностью статических масс-спектрографов нового типа, обладающих рекордными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Астон Ф. Б.* Масс-спектры и изотопы. — Москва: Гос. изд-во иностранной литературы, 1948.

2. *Рафаэльсон А. Э.,* Шерешевский *А. М.* Масс-спектрометрические приборы. — Москва: Атомиздат, 1968.

3. *Вольник Г.* Оптика заряженных частиц. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992.

4. *Хокс П., Каспер Э.* Основы электронной оптики. Т. 1. — Москва: Мир, 1993.

5. *Кельман В. М., Карецкая С. П., Федулина Л. В., Якушев Е. М.* Электронно-оптические элементы призменных спектрометров заряженных частиц. — Алма-Ата: Наука, 1979.

6. *Кельман В. М., Родникова И. В., Секунова Л. М.* Статические масс спектрометры. — Алма-Ата: Наука, 1985.

7. *Сысоев А. А., Самсонов Г. А.* Теория и расчёт статических масс-анализаторов. Учебное пособие. — М.: Московский инженерно-физический институт, 1972.

8. *Yavor M. I.* Optics of Charged Particle Analyzers. — Elsevier, 2009.

9. *Галль Л. Н.* Физические основы масс-спектрометрии и ее применение в аналитике и биофизике. — СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2010.

10. *Галль Р. Н., Галль Л. Н.* // Научное приборостроение. 2002. Т. 12. № 3. С. 6.

11. *Галль Л. Н. /* Тезисы. докл. VI Съезда ВМСО и V Всеросс. конф. «Масс-спектрометрия и её прикладные проблемы», 8–11 октября 2013 г., Москва. С. 15.

12. *Sinha M. P., Langstaff D. P., Narayan D. J., Birkinshaw K.* // Int. Journal of Mass Spectrometry. 1998. Vol. 176. No. 1–2. P. 99.

13. *Коган В. Т., Гладков В. Ю., Викторова О. С.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 4. С. 130.

14. *Коган В. Т., Маннинен С. А., Лебедев Д. С., Викторова О. С., Аманбаев И. Т.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 6. С. 121.

15. *Cheong K. H., Khursheed A.* // Nuclear Instruments and Methods A. 2011. Vol. 645. No. 1. P. 221.

16. *Mattauch J., Herzog R.* // Zeitschrift für Physik. 1934. Bd. 89. S. 786—795.

17. *Mattauch J.* // Physical Review. 1936. Vol. 50. P. 617.

18. *Demster A. J.* // Proceedings of the American Philosophical Society. 1935. Vol. 75. P. 755.

19. *Demster A. J.* // Physical Review. 1937. Vol. 51. P. 67.

20. *Herzog R., Hauk V.* // Annalen der Physik. 1938. Bd. 33. S. 89.

21. *Bieri R., Everling F., Mattauch J.* // Zeitschrift für Naturforschung. 1955. Bd. 10a. S. 659.

22. *Johnson E. G., Nier A. O.* // Physical Review. 1953. Vol. 91. P. 10.

23. *Hintenberger H., Wende H., Konig L.* // Zeitschrift für Naturforschung. 1955. Bd. 10a. S. 344—352.

24. *Robinson C. F.* // Review of Scientific Instruments. 1957. Vol. 28. P. 777.

25. *Хинтенбергер Х., Кениг Л.* Масс-спектрометры и масс-спектрографы с коррекцией аберраций изображения. В книге: Успехи масс-спектрометрии. — М.: ИЛ, 1963.

26. *Duckworth H. E., Ghoshal S. N.* In Book: Mass Spectrometry. Ed. by C. A. McDowell. McGraw-Hill, New York, 1963. P. 201.

27. *Малов А. Ф.* Сборник «Некоторые вопросы инженерной физики». Вып. 2. — М.: Гостехиздат, 1959. С. 54.

28. *Малов А. Ф.* Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. — Москва, ИАЭ им. И. В. Курчатова / МИФИ, 1961.

29. *Burgoyne T. W., Hieftje G. M.* // Mass Spectrometry Reviews. 1996. Vol. 15. P. 241.

30. *Бердников А. С., Аверин И. А., Голиков Ю. К.* // Масс-спектрометрия. 2015. Т. 12. № 4. С. 272.

31. *Голиков Ю. К., Краснова Н. К.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 2. С. 9.

32. *Краснова Н. К.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 6. С. 97.

33. *Голиков Ю. К., Краснова Н. К.* Теория синтеза электростатических энергоанализаторов. — СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2010. — 409 с.

34. *Габдуллин П. Г., Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Давыдов С. Н.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 2. С. 91.

35. *Габдуллин П. Г., Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Давыдов С. Н.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 3. С. 44.

36. *Краснова Н. К.* Диссертация д-ра физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет, 2014.

37. *Аверин И. А.* / Тезисы. докл. VII Съезда ВМСО и VI Всеросс. конф. «Масс-спектрометрия и её прикладные проблемы», 2-17 октября 2015 г., Москва. С. 132.

38. *Аверин И. А.* // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 3. С. 35.

39. *Карецкая С. П., Федулина Л. В.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 4. С. 740.

40. *Карецкая С. П., Федулина Л. В.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 4. С. 735.

41. *Karetskaya S. P., Glickman L. G., Beizina L. G., Goloskokov Yu. V.* // Advances in Electronics and Electron Physics. 1994. Vol. 89. P. 391.

42. *Гликман Л. Г., Голоскоков Ю. В., Карецкая С. П.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 7. С. 189.

43. *Гликман Л. Г., Голоскоков Ю. В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 10. С. 87.

44. *Bimurzaev S. B., Bimurzaeva R. S., Aldiyarov N.* // Physics Procedia. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 291.

45. *Бимурзаев С. Б., Якушев Е. М.* // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 60.

A new approach to development of ion-optical systems for static mass spectrographs on the basis of the non-uniform Euler's homogeneous magnetic fields

A. S. Berdnikov[1] *and I. A. Averin*[1,2]

[1] Institute of Analytical Instrumentation of the RAS
26 Rizskiy pr., St. Petersburg, 190103, Russia

[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnical str., St. Petersburg, 195251, Russia
E-mail: agreer@bk.ru

Received December 28, 2015

As compared with modern methods of mass analysis, static mass analyzers are sometimes considered hopelessly outdated and suitable for a narrowly-specific tasks only. However, new technological solutions — in particular, the use of strong permanent magnets with complex profiles of tips, the use of parallel detectors of high spatial resolution such as microchannel plates and photodiode arrays, etc. — are able to give new impetus to this direction. This article discusses the theoretical methods, how it is possible to design optical schemes for static mass spectroqraphs of a new type based on non-uniform static Euler's homogeneous magnetic fields. It is important that these mass spectrographs are characterized by a large mass range of the spectrum, have a strictly linear foci line and demonstrate the same high quality of focusing (namely, second-order double focusing in angle, energy and vertical displacement) at any point of the foci line.

PACS: 41.85.-p, 41.85.Lc, 41.85.Qg, 41.90.+e

Keywords: static mass analyzers, mass spectrographs, Euler's homogeneous electromagnetic fields, dual focusing, nonlinear magnetic fields.

REFERENCES

1. F. B. Aston, *Mass Spectra and Isotopes* (London, 1942; Gos. Izdat. Inostr. Literatur. Moscow, 1948).

2. A. E. Rafal'son and A. M. Shereshevskii, *Mass-Spectrometric Devicess* (Atomizdat, Moscow, 1968) [in Russian].

3. G. Wollnik, *Optics of Charged Particles* (Elsevier, Academic Press, Orlando, 1987; Energoatomizdat, SPb, 1992).

4. P. W. Hawkes, E. Kasper. *Principles of Electron Optics. Vol. 1, 2.* (Academic Press, 1989).

5. V. M. Kelman, S. P. Karetskaya, L. V. Fedulona, and E. M. Yakushev, *Electron-Optical Elements of Prism Spectroscopes of Charged Particles* (Nauka, Alma-Ata, 1979) [in Russian].

6. V. M. Kelman, I. V. Rodnikova, and L. M. Sekunova, *Static Mass Spectrometers* (Nauka, Alma-Ata, 1985) [in Russian].

7. A. A. Sysoev and G. A. Samsonov, *Theory and Calculation of Static Mass-Analyzers* (MEPhI, Moscow, 1972) [in Russian].

8. M. I. Yavor, *Optics of Charged Particle Analyzers*. (Elsevier, 2009).

9. L. N. Gall, *Physical Foundations of Mass Spectrometry* (Politekh. Univer., SPb, 2010) [in Russian].

10. R. N. Gall and L. N. Gall, Nauchnoe Priborostroenie (Scientific Instrumentation) **12** (3), 6 (2002).

11. L. N. Gall, in *Proc. VI Meeting of VMSO and V All-Russian Conf. "Mass-Spectrometry and Its Applied Problems"* (October 8–11, 2013, Moscow). P. 15.

12. M. P. Sinha, D. P. Langstaff, D. J. Narayan, and K. Birkinshaw, Int. Journal of Mass Spectrometry. **176** (1–2), 99 (1998).

13. V. T. Kogan, V. Yu. Gladkov, and O. S. Viktorova, Tech. Phys. **71** (4), 130 (2001).

14. V. T. Kogan, S. A. Manninen, D. S. Lebedev, O. S. Viktorova, I. T. Amanbaev, Tech. Phys. **75** (6), 121 (2005).

15. K. H. Cheong and A. Khursheed, Nuclear Instruments and Methods A. **645,** 221 (2011).

16. J. Mattauch, R. Herzog. Zeitschrift für Physik, Bd. 89, 786 (1934).

17. J. Mattauch, Physical Review **50,** 617 (1936).

18. A. J. Demster, Proceedings of the American Philosophical Society **75,** 755 (1935).

19. A. J. Demster, Physical Review **51,** 67 (1937).

20. R. Herzog, V. Hauk, Annalen der Physik, Bd. 33, 89 (1938).

21. R. Bieri, F. Everling, J. Mattauch, Zeitschrift für Naturforschung, Bd. 10, 659 (1955).

22. E. G. Johnson and A. O. Nier, Physical Review **91,** 10 (1953).

23. H. Hintenberger, H. Wende, Zeitschrift für Naturforschung, Bd. 10a, 344 (1955).

24. C. F. Robinson, Review of Scientific Instruments **28,** 777 (1957).

25. H. Hintenberger and L. Konig, *Mass Spectrometers and Mass-Spectrographs with Correction of Aberration. In Book: Advances in Mass Spectrometry* (IL. Moscow, 1963) [in Russian].

26. H. E. Duckworth and S. N. Ghoshal, in *Book: Mass Spectrometry.* Ed. by C. A. McDowell. (McGraw-Hill, New York, 1963). P. 201.

27. A. F. Malov, in *Book: Certain Questions of Engineering Physics. Issue 2.* (Gostekhizdat, Moscow, 1959). P. 54 [in Russian].

28. A. F. Malov, Candidate's Dissertation on Mathematics and Physics. Abstract. (Moscow, Kurchatov IAE/MEPhI, 1961).

29. T. W. Burgoyne and G. M. Hieftje, Mass Spectrometry Reviews **15,** 241 (1996).

30. A. S. Berdnikov, I, A. Averin, and Yu. K. Golikov, Mass-Spectrometria **12,** 272 (2015).

31. Yu. K. Golikov and N. K. Krasnova, Tech. Phys. **81** (2), 9 (2011).

32. N. K. Krasnova, Tech. Phys. **81** (6), 97 (2011).

33. Yu. K. Golikov and N. K. Krasnova, *Theory of Synthesis of Electrostatic Energy Analyzers* (Politech. Univ., St. Perersburg, 2010) [in Russian].

34. P. G. Gabdullon, Yu. K. Golikov, N. K. Krasnova, and Davydov, Tech. Phys. **70** (2), 91 (2000).

35. P. G. Gabdullon, Yu. K. Golikov, N. K. Krasnova, and Davydov, Tech. Phys. **70** (3), 44 (2000).

36. N. K. Krasnova, Doctoral Dissertation on Mathematics and Physics. Abstract. (St. Petersburg, Politech. Univ., 2014) [in Russian].

37. I. A. Averin, in *Proc. VII Meeting VMSO and VI All-Russian Conf. "Mass Spectrometry and Its Applied Problems"* (October 2-17, 2015, Moscow). P. 132 [in Russian].

38. I. A. Averin, Nauchnoe Priborostroenie (Scientific Instrumentation) **25** (3), 35 (2015).

39. S. P. Karetskaya and L. V. Fedulina, Tech. Phys. **52** (4), 740 (1982).

40. S. P. Karetskaya and L. V. Fedulina, Tech. Phys. **52** (4), 735 (1982).

41. S. P. Karetskaya, L. G. Glickman, L. G. Beizina, and Yu. V. Goloskokov, Advances in Electronics and Electron Physics **89,** 391 (1994).

42. L. G. Glickman, Yu. V. Goloskokov, and S. P. Karetskaya, Tech. Phys. **66** (7), 189 (1996).

43. L. G. Glickman and Yu. V. Goloskokov, Tech. Phys. **71** (10), 87 (2001).

44. S. B. Bimurzaev, R. S. Bimurzaeva, and N. Aldiyarov, Physics Procedia **1** (1), 291 (2008).

45. S. B. Bimurzaev and E. M. Yakushev, Prikladnaya Fizika, No. 2, 60 (2012).

* * *