

В диссертационный совет ФТИ 34.01.03
при ФГБУН «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Отзыв

официального оппонента,

профессора, доктора физико-математических наук, профессора

Цыбина Олега Юрьевича

на диссертацию

АНТОНОВА АНДРЕЯ СЕРГЕЕВИЧА

«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ МАЛОГАБАРИТНЫХ СТАТИЧЕСКИХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Диссертация Антонова А.С. посвящена совершенствованию методов расчета и анализа ионно оптических систем с магнитным полем и поиску новых решений, необходимых при разработке малогабаритных статических масс анализаторов с увеличенными значениями пропускания и разрешающей способности. Цель диссертационной работы связана с переходом области исследований масс-анализаторов от крупногабаритных магнитных ионно-оптических систем к малогабаритным. Достигнутое диссертантом совершенствование методов позволило Антонову А.С. осуществить в теоретическом плане: расчеты абберрационных характеристик в системе с большой величиной отношения межполюсного зазора магнита к радиусу отклонения оптической оси в магнитном поле; анализ коррекции абберраций в системе двумерных магнитных призм и секторных цилиндрических конденсаторов; разработку методик оптимизации пропускания при наличии аксиальных абберраций. Теоретические достижения позволили Антонову А.С. решить поставленные в диссертации задачи.

Актуальность исследования

Создание малогабаритных и мобильных масс-спектрометров, обладающих высокими значениями пропускания и разрешающей способности, является важной задачей в области науки и измерительной техники, в экологии, геологии, атомной промышленности, медицине. Значительные позиции могли бы принадлежать изотопным магнитным статическим масс-спектрометрам при условии реализации малогабаритных устройств.

Однако, разработка соответствующих ионно-оптических систем сдерживается из-за отсутствия необходимых методов расчета и анализа аберраций, обусловленных прохождением ионов в краевом магнитном поле при не малой величине отношения межполюсного зазора магнита d к радиусу поворота r оптической оси в его поле. Использованию общепринятой методики расчета аберраций ионно-оптической системы масс-спектрометра, обусловленных прохождением ионов в краевых магнитных полях, препятствует тот факт, что при снижении габаритов магнита нарушаются приближения, основанные на малости величины отношения d/r .

Совершенствование методики расчета ионно-оптических систем магнитных статических масс-спектрометров, связанное со снижением их габаритов, и, в первую очередь, габаритов электромагнита, с сохранением и улучшением основных аналитических характеристик масс-спектрометра, – разрешения и абсолютной чувствительности, – является важной и насущной задачей физической электроники.

В представленной диссертации найдены и реализованы корректные продуктивные подходы к решению указанных задач, что позволяет определить диссертационную работу Антонова А.С. как несомненно актуальную по ее целям и содержанию.

Научная новизна

В диссертационной работе Антонова А.С. впервые найдены физически обоснованные аналитические тождества, связывающие угловые и линейные компоненты аберрационных коэффициентов. На этой основе созданы новые теоретические положения. Тождества явились критериями точности расчета аберраций второго порядка при движении иона по траектории, проходящей в краевых полях статического магнита. В ионно-оптической системе с двойной фокусировкой, включающей двумерную магнитную призму и цилиндрический конденсатор, выявлена возможность полной коррекции всех слагаемых аксиальной аберрации второго порядка. Показано, что все компоненты аксиальной аберрации второго порядка тождественно обращаются в нуль для двух ионно-оптических каналов в симметричной трехкаскадной двухканальной ионно-оптической системе с двойной фокусировкой, содержащей магнитную призму и секторные цилиндрические конденсаторы. Для статического масс-анализатора, имеющего ненулевую аксиальную аберрацию второго порядка, разработана оригинальная методика оптимизации вертикального аксептанса, позволившая значительно увеличить его пропускание без ухудшения разрешающей способности. В частности, это показано для ионно-оптической

системы типа Маттауха-Герцога по полному набору мономассовых компонентов в рабочем диапазоне регистрируемых этим прибором массовых чисел.

Практическая ценность и предполагаемое использование

Полученные в диссертации Антонова А.С. научные результаты имеют практическую значимость для разработки и реализации перспективных малогабаритных масс-спектрометров.

Полученные аналитические тождества, связывающие угловые и линейные компоненты абберационных коэффициентов, позволили оценить корректность и границы применимости существующих методов расчета абберационных составляющих траекторий ионов в краевых магнитных полях статических масс-анализаторов.

Применение методики оптимизации вертикального аксептанса ионно-оптической системе типа Маттауха-Герцога показало возможность увеличения пропускания ионов более чем на порядок по всему диапазону регистрируемых линий масс-спектра без ухудшения их разрешения.

В ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН результаты диссертации использованы при разработке опытного образца компактного изотопного масс-спектрометра, предназначенного для анализа водородно-гелиевых смесей, а также представляются полезными для модернизации медицинского масс-спектрометра выдыхаемой парогазовой смеси.

Содержание диссертации

Диссертация Антонова А.С. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 141 страницу текста, включая 1 таблицу, 34 рисунка.

Во введении обоснована актуальность темы, научная и практическая значимость результатов, их достоверность, сформулированы выносимые на защиту положения, цель и задачи исследования. В главе 1 показаны предпосылки для создания малогабаритных статических масс-спектрометров с разрешением и чувствительностью, не уступающими соответствующим характеристикам крупногабаритных приборов. Показано, что для развития статических масс-анализаторов необходимо добиться уменьшения размеров и веса магнита, обеспечить коррекцию аббераций 2-го и более высоких порядков, точный расчёт действия краевых полей магнитных элементов при относительно больших величинах межполюсного зазора, оптимизацию аксептанса в фазовом пространстве. В главе

2 изложен физически обоснованный критерий оценки точности расчета абберационных искажений траекторий ионов в краевых магнитных полях и проведена оценка погрешности общепринятого линейного приближения метода полевых интегралов в зависимости от величины отношения d/r . Логику созданной теории составляет высказанное автором положение: «В магнитных элементах ионно-оптических систем с прямолинейными границами полюсных наконечников в пренебрежении несущественных искажений, обусловленных конечной длиной торцов полюсов, можно считать распределение краевых полей двумерным, что обеспечивает сохранение проекции обобщённого импульса заряженных частиц в области, включающей краевое поле, и обуславливает фундаментальную связь между угловыми и линейными компонентами абберационных коэффициентов в указанной области.» (стр.43-44). Получены аналитические тождества, связывающие угловые и линейные компоненты абберационных коэффициентов, являющиеся критерием корректности расчёта абберационных составляющих траекторий ионов в краевых областях магнитных элементов статических масс-анализаторов. Тождества могут быть приняты в качестве критериев оценки погрешности вычисления аббераций в краевых магнитных полях статических масс-анализаторов. Их эффективность, погрешности и удобство использования на практике показаны на примере реальной ионно-оптической системы с малогабаритными магнитами. Показано, что даже при одинаковом значении d/R в разных системах ошибка в определении абберационных коэффициентов второго порядка может отличаться на несколько порядков. Установлена некорректность применения линейного приближения метода полевых интегралов при расчете абберационных составляющих траекторий ионов в краевых полях магнитных элементов с характерной для малогабаритных статических масс-анализаторов величиной отношения межполюсного зазора к радиусу отклонения оптической оси в области однородного поля. Впервые показано, что ошибка при расчете малогабаритных ионно-оптических систем, основанном на использовании линейного приближения метода полевых интегралов, может быть сопоставима по величине с масштабом значения аксиальной абберации.

В главе 3 рассмотрен класс малогабаритных ионно-оптических систем на основе двумерных магнитных полей и цилиндрических конденсаторов в условиях угловой и координатной фокусировки ионов по энергетическому разбросу. Рассмотрена коррекция сферической абберации 2-го порядка в ионно-оптических системах с двойной фокусировкой по углу и энергии. Предлагается сочетание двух цилиндрических конденсаторов и компактной двумерной магнитной призмы для создания высокопрецизионных мобильных малогабаритных статических масс-спектрометров со

значениями разрешающей способности и чувствительности не хуже, чем у крупногабаритных аналогов.

В 4й главе описаны способ и алгоритм увеличения вертикальной составляющей эмиттанса ионного тока и повышения интенсивности детектируемых линий масс-спектра, дополненные численным моделированием одиночных масс-спектральных пиков в широком диапазоне масс.

Предложены два варианта систем типа Маттауха-Герцога, обеспечивающих режимы фокусировки 2-го порядка по углу, для которых проведена оптимизация вертикального аксептанса при фиксированной вдоль всей линии фокусов разрешающей способности.

В заключении автор диссертации Антонов А.С. отмечает, что найденные эффективные решения позволяют значительно улучшить основные параметры малогабаритных статических масс-анализаторов, а именно их пропускание и разрешающую способность.

Достоверность результатов, публикации и апробация работы

Предложенные Антоновым А.С. решения хорошо аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Антонов А.С. предложил собственный критический анализ положений, существующих в современной научно-технической литературе по вопросам, близким к изучаемым в диссертации. В работе диссертант корректно использовал известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Анализируя содержание диссертационной работы Антонова А.С. в целом, можно констатировать, что высокая степень обоснованности полученных в диссертации результатов и выводов обеспечена математической корректностью использованных методов и формул, подтверждена сравнением данных, полученных аналитическим путем, с результатами численного моделирования для нескольких тестовых примеров, а также согласием с известными результатами, опубликованными другими авторами. Можно заключить, что научные положения, выводы и рекомендации работы Антонова А.С. достаточно обоснованы и достоверны, они подтверждены также публикациями в высокорейтинговых международных и российских журналах. Среди них 12 статей, рецензируемых в РИНЦ, и 6 статей, рецензируемых в Web of Science. Результаты были представлены в четырех докладах на VII (2017г.) и VIII (2019г.) Всероссийских конференциях с международным участием «Масс-спектрометрия и её прикладные проблемы», Москва. Автореферат отражает основные результаты и выводы диссертации.

Апробации и рецензируемые публикации Антонова А.С. свидетельствуют о значительном личном вкладе автора диссертации в физическую электронику. Тема и содержание диссертации полностью соответствуют паспорту ВАК по научной специальности 01.04.04 – физическая электроника, а именно формуле специальности, т.к. в работе выполнено исследование физических явлений, составляющих основу для разработок и создания новых электронных приборов и устройств, а также соответствующих п.3 паспорта ВАК, в котором ионные оптические системы обозначены как область исследований.

Замечания по диссертационной работе

По некоторым формулировкам работы Антонова А.С. можно высказать замечания.

В главе 2 при выводе тождеств, связывающих угловые абберационные характеристики траекторий ионов после прохождения краевого поля магнитной системы, принимается, что имеется такая область на ионной траектории, в которой магнитное поле не зависит от координаты Z . Соответственно, должны быть приведены количественные требования, которым в анализируемой малогабаритной магнитной системе должны удовлетворять параметры полюсных наконечников: высота зазора вдоль оси Y , отклонения параллельности плоскостей и их перпендикулярности к оси Y , длина вдоль оси X , отклонения взаимной параллельности граней вдоль оси X . Кроме высказанного требования прямолинейности границ полюсных наконечников магнита, следовало бы определить допустимые значения их протяженности вдоль оси X и отклонения от этого направления. Важно также задать допустимые отклонения взаимной параллельности входной и выходной границ, при которых можно принимать одну и ту же систему координат X, Y, Z на входной и выходной областях магнита, обозначить закон, по которому принимается в теории падение магнитного поля в краевых областях, а также уточнить, для каких магнитных систем выбранное представление X, Y, Z координат является корректным, в том числе для изображенных на рис.2.1-2.2, 3.1-3.2. Как связано требование прямолинейности границ с цилиндрическими границами магнита на рис. 2.2?

Требуется раскрыть видимое противоречие соотношения (2.2), которое состоит в том, что на входной и выходной границах значение вектор-потенциала равно нулю, но Z -компонента импульса иона при этом не равна нулю.

Целесообразно показать, что имеются такие доступные современные магниты, которые могут удовлетворить сформулированным условиям для малогабаритных ионно-оптических систем.

Отмеченные недостатки не оказывают принципиального влияния на главные теоретические и практические результаты диссертации, и не препятствуют положительной оценке диссертационной работы Антонова А.С.

Заключение

Диссертация Антонова А.С. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Она является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития важных разделов физической электроники. Диссертация удовлетворяет пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842. Автор диссертации Антонов А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент,
профессор Института физики, нанотехнологии и телекоммуникаций СПбПУ Петра Великого, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника, профессор

Цыбин О.Ю.

29.03.2021