

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова
Российской академии наук (ИХС РАН)

_____ д.т.н. И.Ю. Кручинина
«__» _____ 2021 года

ОТЗЫВ

ведущей организации ИХС РАН на диссертацию Антонова Андрея Сергеевича по теме: «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.

Актуальность работы.

Корпускулярная оптика статических электромагнитных полей, теоретическим вопросам которой посвящена настоящая диссертация, изучает фокусирующие и диспергирующие свойства движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях, не изменяющихся во времени, и является особым разделом физической электроники. Её результаты используются во многих областях науки и техники, определяя базовые принципы и характеристики большого количества различных приборов. В частности, развитие методов статической и динамической масс-спектрометрии не было бы возможным без совершенствования теории фокусировки заряженных частиц в статических и динамических электростатических и магнитных полях.

Благодаря прогрессу в развитии динамических методов в масс-спектрометрии интерес к развитию корпускулярной оптики статических электромагнитных полей в последнее время заметно снизился, что в значительной мере связано с фундаментальными ограничениями, присущими корпускулярной оптике статических электромагнитных полей. К таким факторам относятся неизбежные абберрации, ухудшающие разрешение статических масс-спектрометров, относительно скромные дисперсионные способности, приводящие к необходимости применения громоздких и энергоёмких электромагнитов, техническая сложность реализации теоретических решений, направленных на коррекцию абберационного фона корпускулярно-оптического изображения и другие факторы.

Тем не менее, немало областей применения статической корпускулярной оптики, где она остается еще вне конкуренции, требуют ее совершенствования. Это, прежде всего,

изотопная масс-спектрометрия и, в частности, изотопные исследования водородно-гелиевых смесей с постоянно растущими требованиями по чувствительности и разрешению линий масс-спектра на супернизких уровнях высоты пиков, обеспечить которые в настоящее время могут лишь статические масс-спектрометры.

Поэтому выбор темы диссертации, нацеленной на поиск решений, направленных на уменьшение габаритов статических масс-анализаторов (СМА) и повышение их абсолютной чувствительности, является несомненно актуальным.

Выбранная тема выдвигает на первый план исследование вопросов, связанных с анализом искажений траекторий в краевых магнитных полях в условиях снижения габаритов электромагнита, который является основным элементом статических масс-спектрометров. Как показал автор диссертации, снижение габаритов электромагнита вызывает необходимость пересмотра общепринятой методики расчета аббераций, обусловленных прохождением ионами краевых магнитных полей. Очень важным остается и вопрос коррекции аббераций, ограничивающих разрешение и чувствительность статических масс-спектрометров, в особенности, в условиях снижения их габаритов.

Таким образом, актуальность темы диссертации А.С.Антонова и ее практическая важность в значительной степени обусловлены современными трендами в развитии и совершенствовании статических масс-спектрометров.

Содержание диссертационной работы.

Во **Введении** обосновывается актуальность и перспективность темы диссертации, сформулирована цель работы, перечислены ее основные результаты, обсуждается их новизна и практическая значимость.

В **первой главе** диссертации дан исторический обзор ионно-оптической теории статических масс-анализаторов, проведен анализ её современного состояния и перспектив развития, сформулированы цель и задачи настоящей диссертации и обосновывается ее актуальность.

Во **второй главе** выведен физически обоснованный критерий оценки точности расчета абберационных искажений траекторий ионов в краевых магнитных полях СМА, на основании которого проведена оценка погрешности общепринятого линейного приближения метода полевых интегралов в зависимости от величины отношения d/r , где d – межполюсный полузазор магнита, а r - радиус поворота оптической оси в однородной его части и показана оценка погрешности расчетных аббераций в зависимости от габаритных размеров магнита.

В третьей главе рассмотрен класс малогабаритных ионно-оптических систем СМА на основе двумерных магнитных полей и цилиндрических конденсаторов. Автор показал, что рассмотренные ионно-оптические системы в условиях фокусировки ионов по энергетическому разбросу характеризуются отсутствием аксиальных aberrаций 2-го порядка, которые в наибольшей степени ограничивают абсолютную чувствительность СМА секторного типа, нашедших наиболее широкое распространение.

Четвёртая глава посвящена поиску методов существенного снижения влияния аксиальных aberrаций СМА, в которых коррекция данных aberrаций невозможна. Описанный автором способ предполагает введение щелевой системы диафрагм, оптимизирующей пропускание СМА путем согласования эллиптического фазового контура, порождаемого коэффициентами аксиальной aberrации и вертикального аксептанса СМА.

Новизна исследований и полученных результатов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается, в следующем:

1. Впервые найдены тождества, связывающие угловые и линейные компоненты aberrационных коэффициентов, служащие критериями точности расчета aberrационных элементов матриц переноса 2-го порядка в краевых полях магнитного элемента ионно-оптической системы (ИОС).
2. Обнаружено, что в ИОС с двойной фокусировкой, включающих двумерную магнитную призму и цилиндрический конденсатор, имеется возможность обеспечить полную коррекцию всех слагаемых аксиальной aberrации 2-го порядка. В частности, обнаружено, что в ИОС с двойной фокусировкой, содержащей магнитную призму и расположенные симметрично от нее секторные цилиндрические конденсаторы, все компоненты аксиальной aberrации 2-го порядка тождественно равны нулю одновременно для двух ионно-оптических каналов.
3. Разработана оригинальная методика оптимизации вертикального аксептанса статического масс-анализатора, имеющего ненулевую аксиальную aberrацию 2-го порядка, позволяющая значительно увеличить его пропускание без ухудшения разрешающей способности. Показано, что для ИОС типа Маттауха-Герцога данная методика позволяет значительно увеличить пропускание ионного пучка по всем его мономассовым компонентам, регистрируемым в масс-спектрографическом режиме.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Полученные аналитические тождества, связывающие угловые и линейные

компоненты абберационных коэффициентов, позволяют оценить корректность расчета абберационных составляющих траекторий ионов в краевых магнитных полях статических масс-анализаторов при уменьшении габаритов магнита.

2. Возможность полной коррекции геометрических аббераций 2-го порядка в ИОС, включающую в себя двумерную магнитную призму и цилиндрические конденсаторы, позволяет разработать на базе таких ИОС малогабаритные статические масс-спектрометры с высоким разрешением. Так, результаты численного моделирования одной из таких ИОС показали возможность достижения предельной разрешающей способности порядка 100 000 на 0.1% уровне масс-спектрального пика, что достигалось до настоящего времени в крупногабаритных статических масс-анализаторах. Данный вариант ИОС лег в основу разработки в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН опытного образца компактного изотопного масс-спектрометра, предназначенного для анализа водородно-гелиевых смесей.

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

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании современных мобильных статических масс-спектрометров в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить следующие:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с современными потребностями в развитии масс-спектрального приборостроения, в частности, в области разработок компактных мобильных статических масс-анализаторов, и представляет научный и практический интерес. Автором применены надежные методы расчета и моделирования изучаемых свойств, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы выполненной работы.

В диссертации предложены эффективные пути значительного увеличения пропускания и разрешающей способности статических масс-анализаторов при малых габаритах магнита. Увеличение параметров достигнуто в результате полной коррекции геометрических аберраций 2-го порядка и показано на примере малогабаритной ИОС, включающей двумерную магнитную призму и два цилиндрических конденсатора. Для статических масс-анализаторов, в которых полная коррекция аберраций 2-го порядка невозможна, в диссертации разработана методика оптимизации аксептанса, обеспечивающая значительное повышение чувствительности без ухудшения разрешающей способности.

Замечания по диссертационной работе.

1. К сожалению, автор не уделил внимания в диссертации анализу влияния аберраций, обусловленных неизбежным энергетическим разбросом ионов, возникающим в процессе формирования ионного пучка. Учет данных аберраций позволил бы более полно оценить достоинства приведенных конкретных вариантов ионно-оптических систем масс-анализаторов.
2. Автор в диссертации также не уделил внимание вопросу кривизны линии фокусов, которая возникает в ионно-оптических системах типа Маттауха-Герцога и обусловлена действием неоднородного краевого магнитного поля. Данная кривизна может в значительной мере повлиять на характеристики прибора.
3. Речь идёт о малогабаритных статических магнитных масс-спектрометрах, но нигде не говорится о размерах магнитов и межполюсном зазоре, который используется при разложении в ряд по малым величинам d/R . Каковы реально эти размеры?
4. Существует ли какая-либо граница применимости предложенного автором диссертации критерия? И как она определяется?

Заключение.

Диссертационная работа Антонова Андрея Сергеевича на тему: «Разработка методов

увеличения пропускания и разрешающей способности малогабаритных статических масс-анализаторов», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04. – физическая электроника, является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая существенное значение для современной физической электроники – предложены и обоснованы эффективные решения, позволяющие значительно улучшить основные параметры статических масс-анализаторов - их пропускание и разрешающую способность, при малых габаритах магнитного элемента. Полученные результаты опубликованы в научных журнал, входящих в список, рекомендованный ВАК. Результаты имеют, несомненно, научную и практическую ценность. Отмеченные замечания, не являются существенными для общей положительной оценки выполненной работы.

Считаем, что уровень диссертации и полученные в ней результаты соответствуют всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным в “Положении о присуждении ученых степеней”, утверждённом постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года с внесенными изменениями от 13 октября 2018 года, а соискатель, Антонов Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании семинара лаборатории Высокотемпературной химии гетерогенных процессов ИХС РАН, протокол №3 от 26 марта 2021 г.

Отзыв подготовил:

Главный научный сотрудник,
И.о. зав. лаб. Высокотемпературной химии гетерогенных процессов,
чл.-корр. РАН, профессор, д.х.н. Столярова В.Л.

Председатель заседания:

Главный научный сотрудник,
И.о. зав. лаб. Высокотемпературной химии гетерогенных процессов,
чл.-корр. РАН, профессор, д.х.н. Столярова В.Л.