

SCIENCE

НАУКА



РАН

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ
ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

М.В. АПАЦКАЯ, Е.В. МАМОНТОВ, М.Ю. СУДАКОВ

МОНОГРАФИЯ

М.В. Апацкая
Е.В. Мамонтов
М.Ю. Судаков

**МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ
ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ
ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ**

МОНОГРАФИЯ

Москва
КУРС
2018

УДК 621.384.82(075.4)
ББК 22.344я73
А76

ФЗ
№ 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 4 ст. 11

Рецензенты:

Н.Р. Галь — д-р физ.-мат. наук, профессор Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург);

Н.В. Конёнков — д-р физ.-мат. наук, профессор Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина

Алацкая М.В., Мамонтов Е.В., Судаков М.Ю.

А76 Масс-спектрометрические приложения теории движения ионов в электрических полях : монография / М.В. Алацкая, Е.В. Мамонтов, М.Ю. Судаков. — М.: КУРС, 2018. — 184 с. — (Серия «Наука»).

ISBN 978-5-907064-05-8

Посвящена вопросам приложения теории движения заряженных частиц в статических и динамических электрических полях при решении проблем транспортировки, удержания, фрагментации и масс-разделения ионов в масс-спектрометрических устройствах и системах. Приложения теории движения ионов в трехмерных ВЧ-полях включают историю создания, развития и современные применения ионных ловушек. Рассмотрены особенности работы трехмерных ловушек в режимах масс-селективной нестабильности, масс-селективного резонансного вывода с нелинейными искажениями поля и импульсного ВЧ-питания. Обсуждается проблема объемного заряда в ловушках Пауля и ее решение в линейных ионных ловушках, в том числе с треугольными электродами и импульсным ВЧ-питанием. Описаны устройства ввода заряженных частиц в масс-анализаторы с ионными воронками и коврами, а также системы транспортировки ионов квадрупольными и мультипольными проводниками, с бегущей волной потенциала и эффективного потенциала. Приложениям теории движения ионов в статических полях в масс-спектрометрии посвящен раздел «Времяпролетные масс-спектрометры» (ВПМС). Рассмотрены классические ВПМС с двухстадийными зеркалами, а также многопроходные и многоотражательные масс-анализаторы высокого разрешения. Содержит два приложения.

Для специалистов, научных работников, работающих в области аналитических методов исследования вещества, руководителей и экспертов инновационных и венчурных компаний; будет полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

УДК 621.384.82(075.4)
ББК 22.344я73



ISBN 978-5-907064-05-8

© Алацкая М.В., Мамонтов Е.В.,
Судаков М.Ю., 2018
© КУРС, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ В ТРЕХМЕРНЫХ ВЧ-ЛОВУШКАХ	4
1.1. Введение. История создания и использования ловушек Пауля. Современные применения ловушек	4
1.2. Особенности работы нелинейных ловушек в режиме масс-селективной нестабильности	14
1.2.1. Нелинейные искажения поля ловушек и уравнения движения частиц	14
1.2.2. Теория возмущений и континуальное приближение для описания движения ионов в процессе масс-селективной неустойчивости	19
1.2.3. Влияние нелинейных искажений поля на работу ловушек в режиме масс-селективной неустойчивости	23
1.3. Режим масс-селективного резонансного вывода ионов в ловушках с нелинейными искажениями поля	29
1.4. Особенности работы ловушек с питанием прямоугольными импульсами. Разработка «цифровой» ловушки с внешним источником питания типа электроспрей (Digital Ion Trap project)	36
1.4.1. Введение. Движение ионов при питании ловушки прямоугольными импульсами. Диаграмма стабильности	36
1.4.2. Эффективность захвата ионов в ловушке DIT при непрерывном вводе ионов	42
1.4.3. Реализация режима резонансного вывода ионов путем сканирования частоты в ловушке DIT	47
1.4.4. Достижение высокого разрешения при резонансном выводе ионов в ловушке DIT за счет использования электрода подстройки поля	52
1.5. Выводы	57
Глава 2. ЛИНЕЙНЫЕ ЛОВУШКИ	58
2.1. Введение. Проблема объемного заряда в ловушках Пауля	58
2.2. Виды линейных ловушек	65
2.3. Особенности работы линейной ловушки с треугольными электродами и питанием прямоугольными импульсами	71
2.3.1. Анализ поля T-Trap	72
2.3.2. Оптимизация геометрии электродов	74
2.3.3. Повышение амплитуды ВЧ и замедление скорости сканирования	79
2.3.4. Направление эжекции ионов. Зависимость от фазы резонансного возбуждения	83
2.3.5. Влияние переходных полей. Моделирование ловушки в трех измерениях	86
2.4. Выводы	92
Глава 3. ПРОВОДНИКИ ИОННЫХ ПУЧКОВ И ИОННЫЕ ВОРОНКИ	96
3.1. Введение	96

3.2.	Квадрупольный проводник ионов.....	99
3.3.	Мультипольные ионные проводники.....	104
3.4.	Ионные воронки и ковры.....	111
	3.4.1. Ионные ковры.....	114
3.5.	Ионные проводники с бегущей волной потенциала.....	115
3.6.	Ионные проводники с бегущей волной эффективного потенциала.....	123
Глава 4. ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ (ВПМС).....		131
4.1.	Введение.....	131
4.2.	Импульсные источники ионов и ВПМС с двухстадийным зеркалом.....	132
4.3.	Идеальный рефлектрон с двухстадийным зеркалом.....	134
4.4.	Прибор AXIMA-QIT.....	137
4.5.	Многоотражательные ВПМС.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		159
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....		161
ПРИЛОЖЕНИЕ 1		
Интерполяция гармоническими полиномами высокого порядка в программе SIMAX.....		166
	Случай двумерных полей.....	166
	Случай трехмерных полей.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 2		
Расчет кулоновских взаимодействий ионов в программе SIMAX.....		179