

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

A-809

7-83-176

**АРЗУМАНЯН**  
**Григорий Макичевич**

**ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ  
ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО  
МАСС-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ**

**Специальность: 01.04.01 – экспериментальная физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1983

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований и на кафедре физики твердого тела Московского инженерно-физического института.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор БЫКОВСКИЙ Ю.А.  
кандидат физико-математических наук, ст.н.с. БОГДАНОВ Д.Д.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор ЛЯПИДЕВСКИЙ В.К.  
кандидат химических наук, ст.н.с. КОВАЛЕВ И.Д.

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.

Защита состоится " " \_\_\_\_\_ 1983 года в " " час.  
на заседании Специализированного совета Д.047.01.05 при Лаборатории  
нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного  
института ядерных исследований (г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1983 года.

Ученый секретарь Специализированного совета ТАРАН Ю.В.

Актуальность темы. Для решения многих вопросов как фундаментального, так и прикладного характера необходимо проведение анализа состава вещества с высоким уровнем чувствительности. Получаемый на традиционных масс-спектрометрах концентрационный предел обнаружения на уровне  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  ат/ат уже сегодня является недостаточным, например, при получении сверхчистых веществ или проведении исследований по поиску сверхтяжелых элементов (СТЭ) в природе. Дальнейшее развитие масс-спектрометрического метода анализа вещества требует как совершенствования схемы анализа, так и развития техники ионных источников. Перспективным источником, получающим все большее распространение как в нашей стране, так и за рубежом, является лазерно-плазменный источник ионов (ЛПИИ)<sup>1/1</sup>.

Использование мощных световых потоков для ионизации анализируемых образцов обеспечивает лазерно-плазменному источнику ионов ряд важных преимуществ по сравнению с другими типами источников. Лазерный способ ионизации универсален, отличается высокой локальностью и эффективностью, бесфракционностью испарения и ионизации материала мишени. Выход ионизованных молекулярных соединений из ЛПИИ минимален, что обеспечивает высокое соответствие ионного пучка атомному составу исследуемого образца. Лазерная масс-спектрометрия позволяет на несколько порядков повысить абсолютную и относительную чувствительность измерений, сократить время анализа, исследовать более широкий класс веществ. Все эти достоинства делают ЛПИИ наиболее перспективным при решении важных прикладных и фундаментальных задач: создания ультрачистых материалов, определения масс изотопов, удаленных от линии стабильности, поиска сверхтяжелых элементов в природе, поиска двойного бета-распада и т.д. Поэтому продолжение исследований физических аспектов ЛПИИ, а также разработка его новых конструкций, обеспечивающих более высокую чувствительность, представляется актуальной проблемой на современном этапе развития лазерной масс-спектрометрии.

Цель работы заключалась в создании низкофонового лазерно-плазменного источника ионов для высокочувствительного масс-спектрометра. Достижение этой цели потребовало проведения экспериментальных исследований по изучению механизма образования молекулярных ионов в ЛПИИ и поиска возможных путей подавления фона от комплексных ионизованных соединений.

Научная новизна исследований состоит в следующем:

- 1) детально изучена низкоэнергетическая область ( $E < 30$  эВ) энергетического спектра атомных ионов при плотностях потока лазерного излучения до  $q \approx 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>;
- 2) впервые обнаружена сложная структура энергетического спектра однозарядных ионов, характеризующаяся двумя максимумами  $\sim 10$  эВ и  $\sim 1$  эВ, и на основании экспериментальных исследований предложены возможные механизмы их образования;
- 3) экспериментально установлено, что практически все наблюдаемые молекулярные ионы распределены в низкоэнергетической области с максимумом распределения  $\sim 1$  эВ, а их образование обусловлено, в основном, вторичными механизмами взаимодействия лазерно-плазменного сгустка с поверхностью мишени;
- 4) на основании проведенных исследований создан принципиально новый низкофоновый ЛПИИ с "энергетической селекцией".

Практическая ценность диссертации заключается в том, что созданный низкофоновый лазерно-плазменный источник ионов позволяет достичь существенно более высокой чувствительности при проведении работ по масс-спектрометрическому анализу состава вещества по сравнению с имевшимися ранее лазерными источниками. Выход заряженных молекул по крайней мере в  $10^3$  раз меньше, что ведет к понижению концентрационного предела обнаружения и позволяет использовать масс-спектрометры с умеренным разрешением и тем самым приводит к сокращению времени анализа.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся:

- 1) результаты экспериментальных исследований энергетических, зарядовых и угловых распределений атомных и молекулярных ионов, образующихся в лазерно-плазменном источнике ионов;
- 2) установлено, что механизм образования молекулярных ионов отличается от механизма образования атомных ионов и практически полностью обусловлен вторичными процессами;
- 3) впервые созданный автором низкофоновый ЛПИИ для высокочув-

ствительной масс-спектрометрии и результаты экспериментального изучения нового источника.

Апробация работ

Основные результаты работы доложены на семинарах кафедры физики твердого тела МИФИ и Отдела исследования тяжелых ядер Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, на III Всесоюзной конференции по масс-спектрометрии в Ленинграде - 1981 г., на заседании Научного совета АН СССР по проблеме "Физикохимия и технология высокочистых веществ" в Москве - 1982 г., представлены на IX Международной конференции по масс-спектрометрии в Вене - 1982 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 115 страниц машинописного текста (включая рисунки), девять таблиц, 25 рисунков и список литературы из 109 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещается актуальность темы, сформулирована цель работы и излагается краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен обзор литературы и дана общая характеристика проблемы поиска сверхтяжелых элементов. Из-за низкой границы содержания СТЭ в веществе Солнечной системы ( $\approx 10^{-13}$  г/г), продолжение работ по поиску СТЭ в природе требует разработки и применения ультравысокочувствительных методик, позволяющих идентифицировать природные нуклиды по массовому числу или порядковому номеру. Столь низкий уровень концентрационной чувствительности с возможностью одновременной идентификации по массовому числу может быть достигнут, в частности, с помощью масс-спектрометрической методики с использованием эффективных источников ионизации атомов и современной техники детектирования ионов. На примере создаваемого для поиска СТЭ в ЛЯР ОИЯИ высокочувствительного масс-спектрометра ЛИДИИ<sup>5/</sup>, в котором планируется использование для анализа перезаряженной компоненты  $2^+ \rightarrow 1^+$  или  $3^+ \rightarrow 1^+$  и трехкаскадной системы очистки, проанализированы требования, предъявляемые к основным узлам и источнику ионов.

На основе анализа характеристик источников различного типа рассматривается возможность их применения в масс-спектрометре ЛИДИИ. Показано, что наиболее общим недостатком большинства источников является высокий выход ионизованных молекулярных соединений и селективность испарения и ионизации атомов исследуемого образца. В лазерном источнике ионов выход молекулярных ионов минимален по сравнению с

другими источниками и возможен режим бесфракционного испарения материала мишени.

Указанные преимущества, наряду с высоким выходом многозарядных ионов и возможностью анализа любого твердого вещества, независимо от его физико-химических свойств, делают лазерно-плазменный источник ионов наиболее перспективным в масс-спектрометрии и обосновывают правильность его выбора в задаче по поиску СТЭ.

Вторая глава посвящена описанию модельного лазерно-плазменного источника, экспериментальной установки, с помощью которой проводились исследования, а также методики эксперимента, применявшейся для изучения атомных и молекулярных ионов, образованных в ЛПИИ.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Основными узлами установки являются: оптический квантовый генератор, ЛПИИ, секторный магнит, детектор ионов с выходом на запоминающий осциллограф. В качестве источника лазерного излучения использовался твердотель-

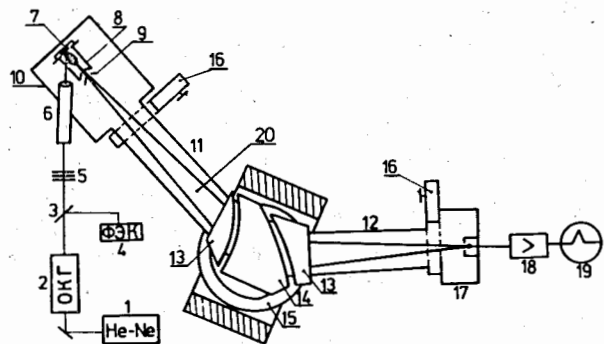


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - настроечный гелий-неоновый лазер, 2 - лазер ЛТИ-ПЧ-8/1/, 3 - разделительная пластина, 4 - фотоэлемент ФЭК-09/1/, 5 - нейтральные светофильтры, 6 - оптический узел, 7 - мишень, 8, 9 - формирующий и ускоряющий электроды, 10 - ЛПИИ, 11, 12 - входной и выходной патрубки магнита, 13 - магнитные экраны, 14 - полюс магнита, 15 - секторный магнит, 16 - шибберные затворы, 17 - детектирующее устройство, 18 - усилитель, 19 - осциллограф, 20 - ионный пучок.

ный оптический квантовый генератор ЛТИ-ПЧ-8, работающий в режиме электрооптической модуляции добротности. Генерируемая лазером энергия составляла 60 мДж в импульсе длительностью 12нс. С помощью разделительной пластины небольшая часть излучения отводилась на фотоэлемент

ФЭК-09, электрический сигнал с которого использовался для синхронизации запуска развертки осциллографа с импульсом излучения лазера. Основной поток излучения фокусировался оптическим узлом на поверхность исследуемой мишени, находящейся в ЛПИИ. Диаметр фокального пятна составлял 300 мкм, максимальная плотность мощности  $7 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

Конструктивно ЛПИИ представляет собой вакуумную камеру размером (230 x 400 x 300) мм<sup>3</sup> с входящими в нее функциональными узлами: оптическим узлом с подвижной линзой, мишенью с устройством сканирования, системой формирования и ускорения ионного пучка и узлом подачи высокого напряжения на электроды. Схематически конструкция ЛПИИ представлена на рис. 2.

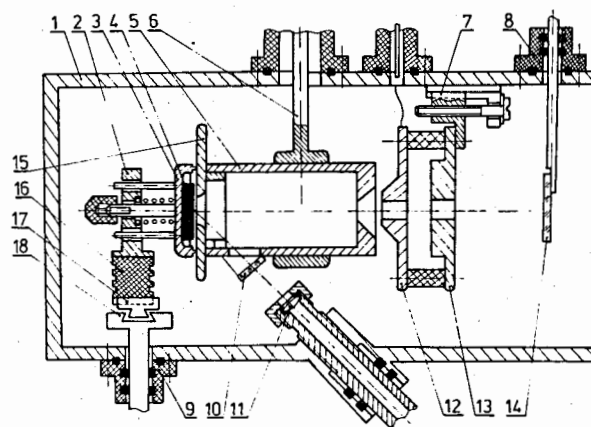


Рис. 2. Лазерно-плазменный источник ионов: 1 - корпус источника, 2 - прижимное устройство, 3 - чашка мишени, 4 - мишень, 5 - экспандер, 6 - высоковольтный ввод, 7 - мостик перемещения электродов, 8 - вакуумный ввод для лкминофора, 9 - шток вертикального сканирования, 10 - стеклянная пластина, 11 - фокусирующая линза, 12, 13 - второй и третий электроды, 14 - лкминофор, 15 - задняя стенка экспандера, 16 - 18 - элементы сканирующего устройства.

Образованная на поверхности мишени лазерная плазма свободно расширялась внутри первого электрода-экспандера (длина 100 мм, диаметр 35 мм) и попадала в узел формирования и ускорения ионного пучка, представляющего собой систему из трех щелевых электродов, сконструированную на основе фримановской оптики. Высокое напряжение +40 кВ подавалось на экспандер через проходной керамический изолятор, расположенный на верхнем фланце камеры источника. Потенциал второго электрода в наших экспериментах не оказывал существенного влияния на

расходимость пучка. Поэтому все измерения проводились при заземленном втором и третьем электродах. Полное количество извлекаемых ионов составляло  $\sim 10^{11}$  ионов/импульс, коэффициент ионизации составлял десятки процентов. Сформированный и ускоренный ионный пучок анализировался секторным магнитом и попадал в приемное устройство масс-спектрометра. В фокальной плоскости спектрометра устанавливались различного типа мониторы, токовый сигнал с которых, пройдя через усилитель, записывался на экране запоминающего осциллографа.

В качестве мишеней в экспериментах использовались, в основном, металлы и их окислы, а также некоторые сложные соединения.

Работа источника в режиме импульсной ионизации позволяла использовать времяпролетную методику для изучения энергетического спектра ионов. Это достигалось за счет измерения времени пролета ионов на базе от плоскости мишени до выходной щели ЛПИИ. Последующее ускорение и использование магнитного анализа позволяли проводить эти исследования раздельно для ионов с выбранными  $z$  и  $A$ .

В третьей главе приведены результаты исследования зарядового, энергетического и углового спектра атомных и молекулярных ионов, образованных при воздействии лазерного излучения наносекундной длительности на твердую мишень. Используемая в работе времяпролетная методика в сочетании с магнитной сепарацией позволила изучать как ионный состав, так и энергетическое распределение ионов различной зарядности. Особое внимание в исследованиях было уделено низкоэнергетической части спектра, поскольку эта область энергетического распределения представляется недостаточно изученной.

Исследование зарядового распределения ионов лазерной плазмы проводилось в диапазоне плотностей потока лазерного излучения  $(2 + 7) \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> для мишеней из элементов в широком массовом диапазоне от С до РЬ. В экспериментах были зарегистрированы ионы с максимальной кратностью ионизации до  $z = 6^+$ . В таблице I представлены данные по зарядовому распределению ионов ряда мишеней, измеренные при интенсивности лазерного излучения  $5 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Из таблицы видно, что выход двух- и трехзарядной компоненты высок, и для различных мишеней составляет соответственно (12 - 55)% и (2 - 12)% от полного числа извлеченных ионов. Отметим, что для элементов с  $A < 70$  максимум зарядового спектра приходится на двухзарядные ионы, и их выход составляет около 50%. В области средних и тяжелых масс в ионном пучке начинают доминировать однозарядные ионы, хотя выход ионов с  $z = 2^+$  и  $3^+$  остается по-прежнему высоким. Уменьшение относительной доли компонент с  $z = 2^+$  и  $3^+$  с ростом массового числа элемента мишени связано с растущим вкладом в формирование зарядового спектра

ТАБЛИЦА I

Относительный выход ионов различной зарядности из лазерной плазмы.

	AgBr		Mo		In		CsI		Ta	Pb
	Fe	Cu	Br	Ag	I	Cs				
1 <sup>+</sup>	0,33	0,42	0,81	0,79	0,70	0,80	0,73	0,75	0,68	0,86
2 <sup>+</sup>	0,55	0,49	0,15	0,16	0,23	0,16	0,22	0,20	0,25	0,12
3 <sup>+</sup>	0,12	0,09	0,04	0,05	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	0,02

рекомбинационных процессов.

Исследования зарядового спектра тяжелых элементов, присутствующих в виде примеси в легкой матрице, показали, что происходит своеобразная "закалка" многозарядных ионов тяжелой примеси в плазменном ступке легкой матрицы и увеличение выхода ионов с  $z = 2^+$ ,  $3^+$  приблизительно в 2 раза. Это связано с более быстрым прекращением процесса рекомбинации из-за высоких скоростей разлета лазерной плазмы. Наблюдаемая "закалка" существенна при поисках СТЭ в природе, так как основные типы пород земной коры содержат главным образом элементы с  $A < 60$ , то есть имеют легкую матрицу, более благоприятную для многократной ионизации редких тяжелых элементов.

Информация об энергетическом спектре извлекалась из времени дрейфа ионов от мишени до вытягивающей щели источника. В ходе экспериментов было обнаружено, что для всех исследованных мишеней временное распределение импульса тока однозарядных ионов имеет сложную структуру, в которой можно выделить три группы ионов. Для примера, на рис. 3 показана осциллограмма импульса тока однозарядных ионов серебра  $A = 107$ . Поскольку время пролета ускоренных ионов в масс-спектрометре одинаково для всех трех компонент, различие во временах задержки связано с различием времени дрейфа в экспандере. Основная часть однозарядных ионов относится к первой энергетической группе (левый пик на осциллограмме) и распределена в интервале энергий (30 - 600) эВ. Максимум тока соответствует энергии  $100 \pm 10$  эВ. Такое энергетическое распределение типично для ускоренных ионов лазерной плазмы.

Характерным для энергетической области  $E < 30$  эВ является наличие двух максимумов при энергиях около 10 эВ и 2 эВ (второй и третий пики на рис. 3). Выход низкоэнергетических ионов зависит от материала исследуемой мишени и варьируется в пределах от 0,5% до 40% от выхода ускоренных ионов лазерной плазмы. На рис. 4 представлен энергетичес-

кий спектр однозарядных ионов серебра. Видно, что в низкоэнергетической области наблюдается максимум выхода при энергиях ионов около 10 эВ и после некоторого спада продолжается плавный рост выхода до энергии 0,5 эВ. Наблюдаемая структура энергетического спектра связана со вторым и третьим пиками времяпролетного спектра. Низкие значения энергий ионов второй и третьей группы указывают на то, что механизм их образования отличается от механизма образования ионов в лазерном факеле. С целью выяснения возможных механизмов образования низкоэнергетических ионов были исследованы зависимости выхода ионов с  $E < 30$  эВ от потенциала ионизации элемента мишени и от интенсивности лазерного излучения. Полученные результаты представлены на рис. 5, 6.

Видно, что с ростом потенциала ионизации относительный выход медленной компоненты заметно падает, что свидетельствует о низкотемпературном механизме образования этих ионов.

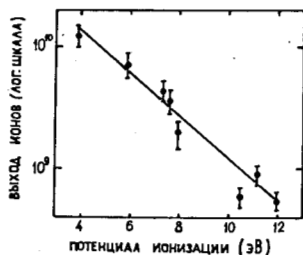


Рис. 6. Зависимость выхода однозарядных ионов Ni и Рb от интенсивности лазерного излучения: 1 — ионы с энергией 100 эВ, 2 — 10 эВ, 3 — 1 эВ.

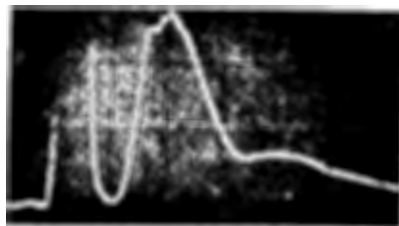


Рис. 3. Оциллограмма импульса тока однозарядных ионов серебра ( $A = 10^7$ ).

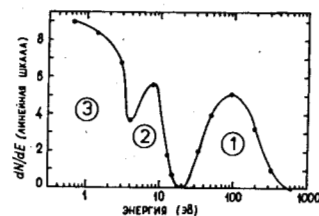
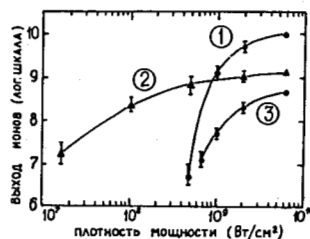


Рис. 4. Энергетический спектр однозарядных ионов серебра.

Рис. 5. Зависимость выхода однозарядных ионов с  $E < 30$  эВ от потенциала ионизации.



На рис. 6 показана зависимость выхода однозарядных ионов Ni и Рb от интенсивности лазерного излучения. Такая картина характерна для всех исследованных мишеней. Видно, что пороговые значения интенсивности излучения для первой и третьей энергетических групп совпадают, а порог образования ионов второй группы значительно ниже. Низкие значения энергий ионов третьей группы  $\sim 0,5$  эВ и совпадение порога их образования с порогом образования ускоренных ионов плазмы позволяет предположить, что механизм их возникновения связан со вторичным взаимодействием лазерно-плазменного сгустка с поверхностью мишени. Значительное различие порогов образования ионов с энергиями  $\sim 10$  эВ и ускоренных ионов лазерной плазмы свидетельствует об отсутствии связи между этими ионами. С учетом наблюдаемой корреляции между выходом низкоэнергетических ионов и потенциалом ионизации исследуемого элемента можно заключить, что данная группа ионов является ионизованной частью нейтральной компоненты, образованной в результате термического испарения атомов поверхности образца.

Отметим, что для ионов с  $Z = 2^+, 3^+$  и выше мы не наблюдали сложной временной структуры импульса тока, а максимум энергетического распределения, как и следовало ожидать, сдвигался в область энергий, больших 100 эВ.

В экспериментах с мишенями из оксидов металлов наблюдались молекулярные ионы типа  $MeO^+$  на уровне  $10^{-3}$  от полного ионного тока. Исследования энергетического распределения молекулярных ионов показали, что их спектр резко отличается от энергетического спектра атомных ионов. Молекулярная ионная компонента распределена в энергетическом интервале (0,5 – 10) эВ, с максимумом выхода при энергиях  $\sim 1$  эВ. Схожесть временной и энергетической структуры молекулярных ионов и атомных ионов третьей энергетической группы, а также совпадения пороговых значений интенсивности лазерного излучения для образования указанных компонент свидетельствуют об одинаковом механизме их образования, связанном со вторичными процессами.

Были проведены исследования по угловому распределению молекулярных ионов. Оно оказалось близким к изотропному. Это также подтверждает предположение о вторичной природе их образования.

В экспериментах не наблюдались молекулярные ионы с зарядностью  $Z = 2^+$  и выше на уровне чувствительности  $5 \times 10^{-6}$  от полного ионного тока.

Четвертая глава посвящена описанию устройства и рабочих характеристик низкофонового ЛПИИ с энергетической селекцией. Обсуждается вопрос о возможности применения такого источника в проекте ЛИДИА.

Обнаруженное в экспериментах различие энергий атомарных и моле-

кулярных ионов позволяет существенно улучшить характеристики ЛПИИ за счет уменьшения доли молекулярных ионов в извлекаемом пучке. Наиболее простым и эффективным нам представляется способ предварительной энергетической селекции ионов в замедляющем электрическом поле при свободном разлете лазерной плазмы. В новой конструкции ЛПИИ экспандер был изготовлен в виде двух электрически изолированных друг от друга частей, соединенных между собой через фторопластовый изолятор. Части экспандера подсоединены к различным полюсам низковольтного источника напряжения, причем положительный полюс подсоединен к торцевой части экспандера, расположенной у вытягивающего электрода. Тем самым внутри экспандера создается электрическое поле и производится отбор ионов по энергии. Обе части экспандера находятся под потенциалом +40 кВ.

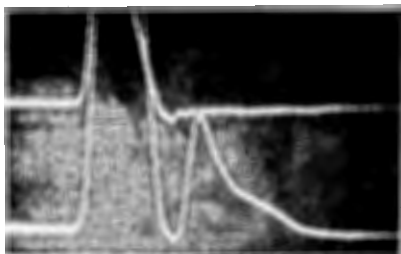


Рис. 7. Оциллограммы импульса тока однозарядных ионов свинца при поданном и отсутствующем потенциале запирающего.

Возможность дистанционного изменения запирающего потенциала без снятия высокого напряжения позволяла проводить прямое сравнение выхода заряженных окислов при поданном и отсутствующем потенциале запирающего. Для всех мишеней на уровне чувствительности  $5 \times 10^{-6}$  от полного ионного тока мы не наблюдали заряженных молекул при  $U_{\text{зап}} = 20$  В.

Проведенное в §2 четвертой главы сравнение характеристик разработанного низкофонового ЛПИИ с требованиями, предъявляемыми к источнику ионов в масс-спектрометре ЛИДИИ, показывает, что с его использованием возможно достижение относительной чувствительности на уровне  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  ат/ат в области СТЭ.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

На рис. 7 приведены оциллограммы импульса тока однозарядных ионов свинца с подачей запирающего напряжения 25 В (верхняя оциллограмма) и без нее (нижняя оциллограмма).

Видно, что уже при  $U_{\text{зап}} = 25$  В низкоэнергетичная область однозарядных атомных ионов отсутствует в токовом импульсе ускоренных ионов.

С помощью источника с энергетической селекцией нами был изучен выход заряженных молекул из окисных мишеней при  $U_{\text{зап}} = 10 - 20$  В.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Детально изучена низкоэнергетичная область ( $E < 30$  эВ) энергетического распределения атомных ионов.

2. Впервые обнаружена сложная структура энергетического спектра однозарядных ионов, характеризующаяся двумя максимумами  $\sim 10$  эВ и  $\sim 1$  эВ и на основании экспериментальных исследований предложены возможные механизмы образования низкоэнергетичных ионов.

3. При интенсивностях лазерного излучения  $q = n \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> подробно исследовано зарядовое распределение ионов с  $z = 1^+, 2^+, 3^+$ .

4. Изучены выход, энергетическое и угловое распределения молекулярных ионов типа  $MeO^+$ .

5. Экспериментально установлено, что практически все наблюдаемые молекулярные ионы распределены в низкоэнергетичной области с максимумом выхода при (0,5 - 2) эВ.

6. На основании проведенных исследований создан принципиально новый низкофононовый лазерно-плазменный источник ионов для ультрачувствительного масс-спектрометра ЛИДИИ с высоким выходом ионов с  $z = 2^+, 3^+$  и практически полным отсутствием молекулярных ионов в пучке.

## ПУБЛИКАЦИИ

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Арзуманян Г.М., Богданов Д.Д., Быковский Ю.А., Родин А.М., Сильнов С.М., Тер-Акопян Г.М. Лазерный источник ионов для масс-спектрометра. - Дубна, 1981. - 7с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P7-81-744).
2. Арзуманян Г.М., Богданов Д.Д., Быковский Ю.А., Родин А.М., Сильнов С.М., Тер-Акопян Г.М. Особенности низкоэнергетической части спектра ионов лазерной плазмы. - Дубна, 1982. - 4с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P7-82-552).
3. Арзуманян Г.М., Богданов Д.Д., Быковский Ю.А., Родин А.М., Сильнов С.М., Тер-Акопян Г.М. Масс-спектрометрическое исследование атомных и молекулярных ионов, образованных при воздействии лазерного излучения на твердую мишень. - Дубна, 1982. - 12с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P7-82-749).
4. Arzumanyan G.M., Bogdanov D.D., Bykovsky Yu. A., Rodin A.M., Silnov S.M., Ter-Akopian G.M. Study of the charged molecule yield from a laser ion source. - In: Proc. of 9-th Intern. Mass Spectrometry Conf., Vienna, Austria, 1982, p.6/4.

5. Ter-Akopian G.M., Arzumanyan G.M., Bogdanov D.D.,  
Bykovsky Yu.A., Flerov G.N., Kozlowski Z., Rodin A.M.,  
Silnov S.M., Stepantsov S.V. The high-sensitivity mass-  
spectrometer "LIDIA".--In: Proc. of 9-th Intern. Mass-  
Spectrometry Conf., Vienna, Austria, 1982, p. 1/51.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 марта 1983 года.