

## Краткие сообщения

12

### Исследование лазерно-плазменного источника ионов с системой постоянных кольцевых магнитов

© С.Н. Мордик, В.М. Ерёменко, А.Н. Бугай, С.А. Садовой, А.Н. Скрипченко, В.Е. Сторижко, А.В. Шелехов

Институт прикладной физики НАН Украины,  
40030 Сумы, Украина  
e-mail: mordyk@ipflab.sumy.ua

(Поступило в Редакцию 1 февраля 2016 г.)

Рассмотрен вопрос о возможности увеличения пространственно-временной длины ионного пакета и уменьшения доли многозарядных ионов пучка масс-спектрометра, образуемых при воздействии излучения лазера на исследуемый образец, путем использования магнитной ловушки в составе лазерно-плазменного источника ионов (ЛПИИ).

DOI: 10.21883/JTF.2017.05.44457.1748

Метод лазерной масс-спектрометрии [1] широко применяется в биологии и медицине, геологии и космохимии, материаловедении (для анализа) газов и примесей твердых веществ в металлах и сплавах, полупроводников и диэлектриков), микроэлектронике, атомной физике и атомном машиностроении.

Степень несоответствия зарегистрированных сигналов различных элементов их составу в анализируемом веществе напрямую зависит от дискриминации атомного состава пробы на всех основных стадиях образования масс-спектра: атомизации, ионизации, разлета плазмы, формирования пучка ионов, транспортировки, анализа по отношению массы к заряду и регистрации ионов.

Так, наличие в лазерной плазме (ЛП) многозарядных ионов является причиной наложений линий масс-спектра изотопов более тяжелых элементов на линии изотопов легких элементов, что затрудняет анализ многокомпонентных веществ методом лазерной масс-спектрометрии. Данная проблема связана с тем, что эффективность ионизации атомов разных элементов может различаться до 20 раз и определяется как свойствами самих атомов, так и рядом внешних параметров.

В настоящей работе предложен и описан новый способ формирования зарядового спектра ионных пакетов примесной компоненты путем подбора оптимальных физических условий ионо-образования при многоэлементном анализе, которые зависят от положения системы кольцевых магнитов (Nd-Fe-B) на трубке дрейфа ионно-оптической системы ЛПИИ.

Практическая реализация экспериментального образца лазерного масс-спектрометра была осуществлена на базе приборов: ЭМАЛ-2, МС 3103. Основным отличием разработанного масс-спектрометра от прибора, описанного в работе [2], является применение в лазерно-плазменном источнике ионов системы постоянных кольцевых магнитов [3].

На рис. 1 показана ионно-оптическая схема ЛПИИ, которая позволяет пояснить способ растяжки ионного пакета во времени и уменьшения доли многозарядных ионов в ЛП при определении элементного состава многокомпонентных веществ. Поставленная цель достигается путем размещения подвижной магнитной ловушки в области бесполевого пространства источника ионов и последующим измерением отношения интенсивностей однозарядных ионов изотопов к сумме интенсивностей многозарядных ионов тех же изотопов, как функцию положения указанной ловушки вдоль продольной оси бесполевой зоны трубы дрейфа.

Поскольку в результате лазерного облучения исследуемого образца 1 образуются преимущественно низкоэнергетические (меньше 1000 eV) ионы б и электроны 5, то при индукции магнитного поля на оси ловушки  $B_0 \sim 0.1$  Т имеет место замагничивание плазменного сгустка и, как следствие, образуется зона магнитного удержания плазмы 8, 9. При использовании ЛПИИ без магнитной ловушки такая зона отсутствует (рис. 1). Магнитная ловушка 2 удерживает как ионы б, так и электроны 5, за исключением тех частиц, которые в случае столкновений в зоне слабого поля меняют питч — углы орбиты таким образом, что рассеиваются в конус потерь (граница в виде конуса в пространстве скоростей) и соответственно могут покинуть ловушку 2.

Обычно электроны 5 покидают ловушку 2, в которой нет электростатического барьера 3, 4 быстрее, чем ионы б, так как частота столкновений у них выше. Время удержания электронов  $\tau_\phi$  в магнитной ловушке 2 с магнитными пробками в рамках модели, которая учитывает только кулоновские потери, при наличии электростатического барьера (сферической сетки 3) по порядку величины оказывается на два порядка больше от времени рассеивания  $\tau_e$  [4].

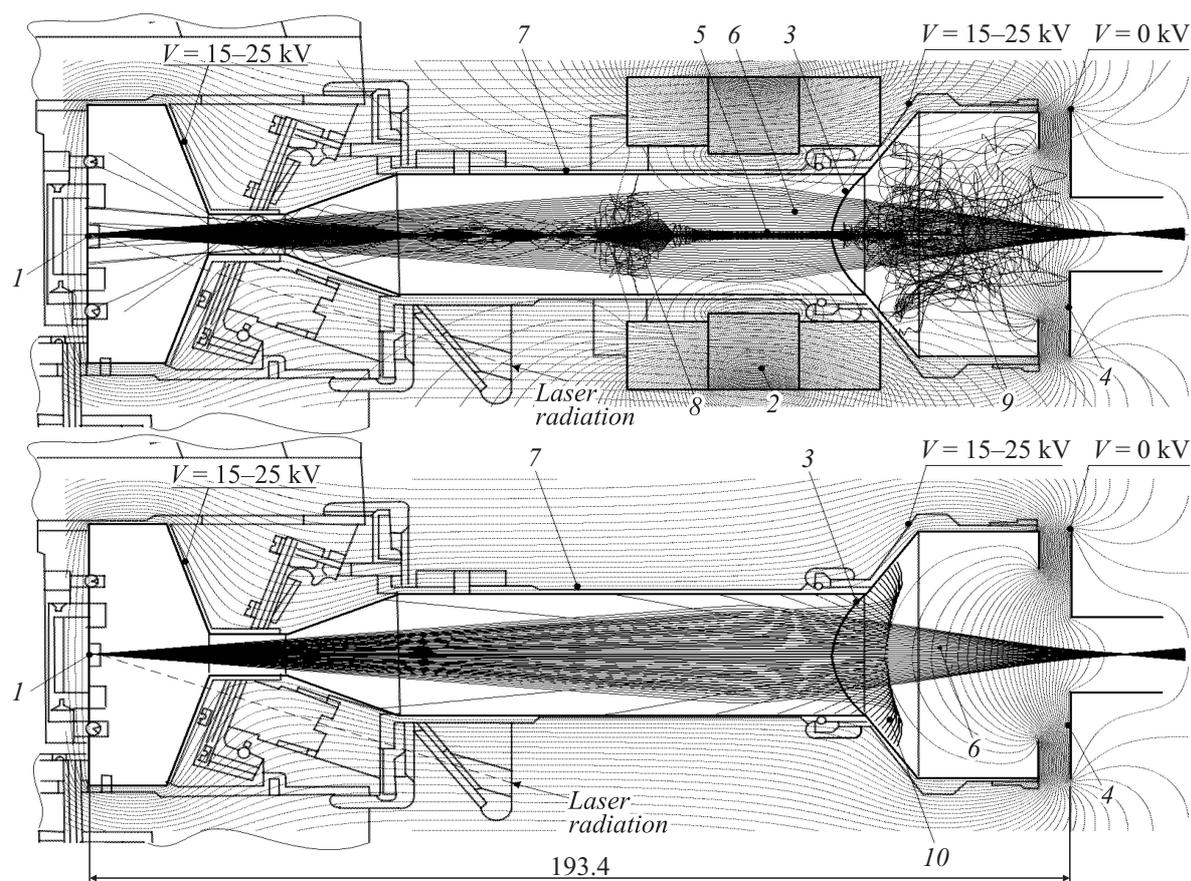


Рис. 1. ЛПИИ с системой постоянных кольцевых магнитов и без нее.

За счет наличия в магнитном поле зоны удержания плазмы 8, 9 реализуется растягивание во времени ионного пакета однозарядных ионов и смещение его на шкале времени ионного тока. Формы импульсов ионного тока  $b$  с магнитной ловушкой 2 и без нее, регистрируемые в зоне границы электрического поля электростатического анализатора 7 (рис. 1), представлены на рис. 2.

Главным отличием работы масс-спектрографа с магнитной ловушкой 2 есть более длительное время существования плазменного сгустка как целого. А поскольку в зоне магнитного удержания плазмы 8, 9 отсутствует источник ионизации, то большая часть ионов  $b$  с зарядом  $Z > 1$  рекомбинируют в ионы с меньшим зарядом за счет их взаимодействия с электронами 5. Наиболее вероятными механизмами рекомбинационных процессов, происходящими в лазерной плазме согласно [1], являются: тройная рекомбинация  $A^{+Z} + e^- + e^- \rightarrow A^{+(Z-1)} + e^-$ , фоторекомбинация  $A^{+Z} + e^- \rightarrow A^{+(Z-1)} + h\nu$ , нерезонансная перезарядка атомов и ионов  $A^{+Z} + B^0 \rightarrow B^{+Z} + A^0 + \Delta E$ .

Также благодаря наличию магнитного поля системы кольцевых магнитов 2 (Nd-Fe-B) большинство заряженных частиц (как положительных  $b$ , так и отрицательных 5) движутся преимущественно по траекториям, близким к ионно-оптической оси системы, при этом

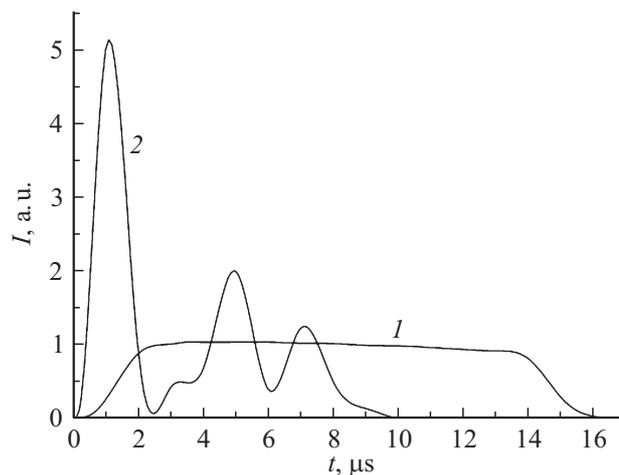


Рис. 2. Формы импульсов ионного тока с магнитной ловушкой (кривая 1) и без нее (кривая 2).

электроны с более высокой энергией ( $\sim 1000$  eV), отразившись от электростатического зеркала (сферической сетки 3), образуют обратный направленный поток который, взаимодействуя с многозарядными ионами  $b$ , приводит к снижению их концентрации и увеличению

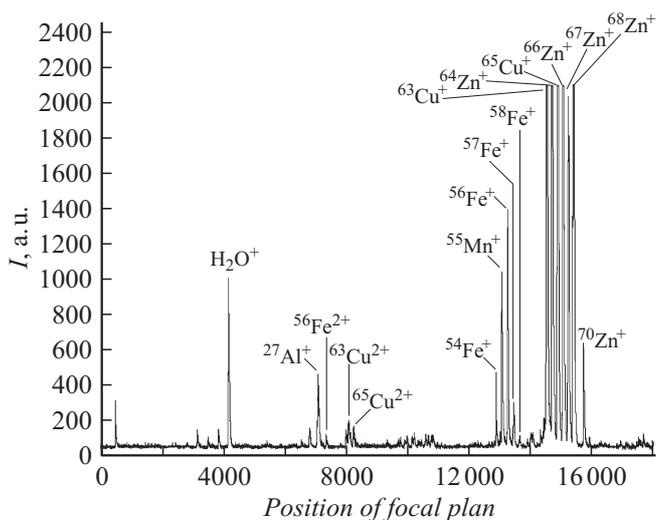


Рис. 3. Спектр стандартного образца М-163 при наличии магнитной ловушки.

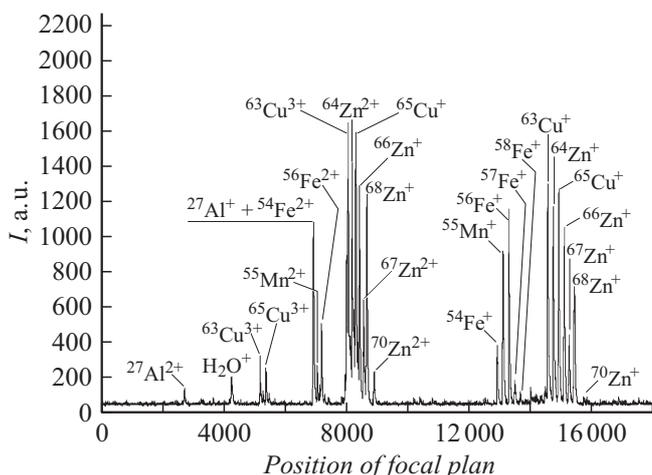


Рис. 4. Спектр стандартного образца М-163 без магнитной ловушки.

концентрации однозарядных ионов. При использовании ЛПИИ без магнитной ловушки происходит потеря электронов  $10$ , двигающихся в обратном направлении, на элементах конструкции  $7$  (рис. 1).

При наличии магнитной ловушки  $2$  количество многозарядных (высокоэнергетических) ионов  $6$  ЛПИ значительно снижено. Это хорошо видно из масс-спектра стандартного образца М-163 ГСО1260-77, зарегистрированного в фокальной плоскости прибора (рис. 3).

Для сравнения на рис. 4 приведен тот же спектр без магнитной ловушки. Из сопоставления масс-спектров видно, что доля многозарядных ионов существенно ниже, а величина пиков однозарядных ионов увеличилась. Пик изотопа  $^{27}\text{Al}^+$  на рис. 4 практически совпадает с пиком  $^{54}\text{Fe}^{2+}$ , и для их отличия нужна разрешающая способность  $\sim 3000$ , в то время как вклад ионов  $^{54}\text{Fe}^{2+}$  в сигнал пика  $^{27}\text{Al}^+$  на рис. 3 мал, и им можно пренебречь.

В работе предложен способ увеличения светосилы, управления зарядовым спектром и длиной ионных пакетов примесной компоненты при многоэлементном анализе путем подбора оптимальных условий, которые зависят от положения системы кольцевых магнитов (Nd–Fe–B) на трубке дрейфа ионно-оптической системы ЛПИИ. Проведена юстировка масс-спектрометра при исследовании элементного состава твердых веществ со сложным составом.

Предложенный способ формирования зарядового спектра пучков ионов позволил повысить чувствительность и правильность масс-спектрометрического анализа масс-спектрографа с ЛПИИ, увеличить количество статистических данных для каждого отдельного ионного пакета, учитывая ограниченную частоту регистрации детектором (PSD) в 1 МГц, упростить процесс автоматизации юстировки масс-спектрографа и процедуру измерений.

## Список литературы

- [1] Быковский Ю.А., Неволин В.Н. Лазерная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [2] Борискин А.И., Еременко В.М., Мордик С.Н. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 7. С. 111.
- [3] Mordyk S.M., Voznyy V.I., Miroshnichenko V.I., Storizhko V.E., Sulkio-Cleff B., Shulha D.P. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sect. B. 2005. Vol. 231. P. 37–42.
- [4] Чен Ф. Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987.