

## ГЕЛИКОНОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

*С.Н. Мордик, В.И. Мирошниченко, Д.А. Нагорный, В.Е. Сторижко*  
*Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина*  
*E-mail: mordyk@ipflab.sumy.ua; Fax +38(0542)22-37-60*

Созданы геликоновые генераторы водородной/гелиевой/аргоновой плазмы для использования в инжекторах ионов, масс-спектрометрах с индуктивно связанной плазмой и атомно-эмиссионных спектрометрах с индуктивно связанной плазмой. Для создания продольного магнитного поля в генераторах плазмы применена компактная магнитная система с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами кольцевой формы. Получены следующие параметры генераторов: плотность плазмы  $10^{11} \dots 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при ВЧ-мощности, вводимой в плазму,  $< 350 \text{ Вт}$  ( $f_{\text{ВЧ}}=27.12 \text{ МГц}$ ) и рабочем давлении в разрядной камере  $10 \dots 100 \text{ мТорр}$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается бурное развитие новых приоритетных научно-технологических направлений (информационные и нанотехнологии, биотехнологии, новейшая медицина, геновая инженерия и др.), которые нуждаются в существенном усовершенствовании существующих и создании качественно новых методов анализа разных новых материалов, биовеществ и др. Разработки проводятся в направлениях создания "фабрик" пучков фотонов и нейтронов с использованием высокоэнергетических (до 1 ГэВ) первичных пучков электронов и ионов. Такие фабрики стоят несколько миллиардов долларов. Более доступные методы элементного анализа связаны с разработкой ядерных микросондов (ЯМЗ) на базе электростатических ускорителей (ЭСУ), масс-спектрометров и атомно-эмиссионных спектрометров с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, ИСП-АЭС). В развитых странах ныне задействованы сотни тысяч таких установок, но все они имеют тот недостаток, что базируются на плазменных генераторах с неадекватным использованием ВЧ-мощности, которая вводится в плазменный разряд. Существует резерв оптимизации ЯМЗ, ИСП-МС, ИСП-АЭС при использовании новых плазменных источников низкого давления с повышенной эффективностью индуктивного ВЧ-разряда во внешнем магнитном поле и лазерной атомизацией. Данное направление усовершенствования ЯМЗ, ИСП-МС, ИСП-АЭС есть перспективным с точки зрения повышения экономичности аналитического прибора [1,2].

Одним из наиболее перспективных направлений повышения яркости инжектора ионов ЯМЗ и ИСП-МС, светимости ИСП-АЭС за счет повышения плотности плазмы есть передача ВЧ-энергии генератора электронам плазмы в геликоновом диапазоне частот волн. Интерес к геликоновым разрядам вызван их необычно высокой степенью ионизации: плотность плазмы достигает величины на порядок выше плотности плазмы других источников при том же давлении и уровне ВЧ-мощности [3-6].

В данной работе предложены конкретные варианты реализации компактных плазменных генераторов с повышенной плотностью плазмы.

### 2. ИНЖЕКТОР ИОНОВ

#### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

В ИПФ НАН Украины разработан макет инжектора электростатического ускорителя на базе геликонового ВЧ-источника ионов с компактной магнитной системой с постоянными магнитами и ферритами кольцевой формы (Рис.1). 3D-изображение и фотография макета инжектора ионов ЭСУ представлены на Рис.2 и 3.

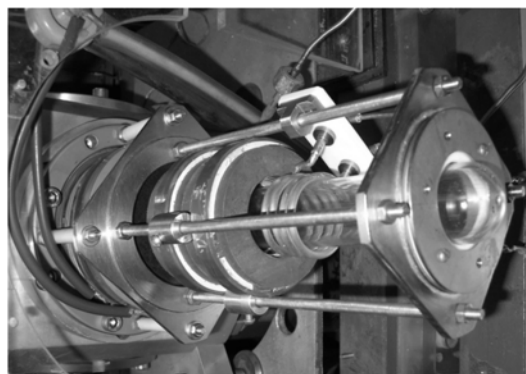


Рис.1. Фотография геликонового ВЧ-источника ионов

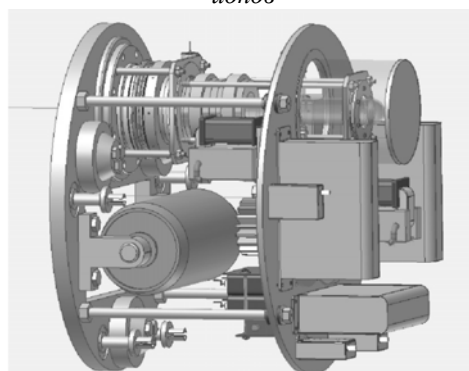


Рис.2. 3D-изображение и фотография макета инжектора ионов ЭСУ

Разработанный высокочастотный источник ионов [7] в сравнении с существующими источниками ионов, которые используются в качестве инжекторов электростатических ускорителей, имеет высокую плотность гелиевой/водородной плазмы ( $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), плотность тока пучка ( $10 \dots 130 \text{ мА/см}^2$ ) и яркость  $\sim 100 \text{ А/(м}^2 \text{ рад}^2 \text{ эВ)}$  при ВЧ-мощности ( $\sim 40 \dots 300 \text{ Вт}$ ).

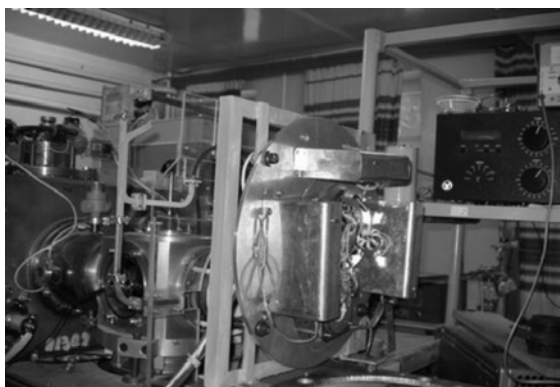


Рис.3. Фотография макета инжектора ионов

На Рис.4 показана зависимость величины средней плотности водородной и гелиевой плазмы вблизи эмиссионного отверстия системы экстракции источника ионов от вводимой в плазму мощности для рабочего давления в разрядной камере 10 мТорр.

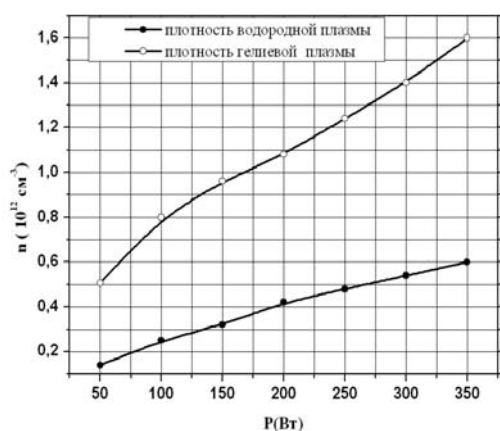


Рис.4. Зависимость плотности гелиевой и водородной плазмы от ВЧ-мощности ( $p=10$  мТорр)

Измерения средней плотности плазмы  $n_e$  ВЧ-источников проводились с помощью 8 мм СВЧ-интерферометра, разработанного в ИПФ НАН Украины [8]. В интерферометре применяется гомодинное преобразование частоты СВЧ-генератора в результате ее модуляции пилообразным напряжением. Интерферометр построен по схеме Маха-Цендера, в которой плазма находится в одном из двух плеч двухлучевого интерферометра. СВЧ-сигнал разделяется на две части, одна из которых поступает через опорный

канал на детектор, а другая его часть посредством передающей и приемной рупорных антенн проходит через плазму. Минимальный измеряемый фазовый сдвиг  $1,5^\circ$  соответствует плотности плазмы  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , сдвиг  $360^\circ$  – плотности плазмы  $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , погрешность измерения фазового сдвига не превышает 5%.

### 3. ИСТОЧНИК ИОНОВ ИСП-МС

Разработан макет геликонового ВЧ-источника ионов для использования в статическом масс-спектрометре с двойной фокусировкой. Проведены тестовые испытания источника ионов ИСП-МС. Традиционно в ИСП-МС в качестве рабочего газа используется аргон и гелий. На Рис.5 представлена зависимость величины средней плотности аргоновой плазмы вблизи эмиссионного отверстия системы экстракции геликонового источника ионов ИСП-МС от вводимой в плазму мощности для рабочих давлений в разрядной камере 10 и 100 мТорр.

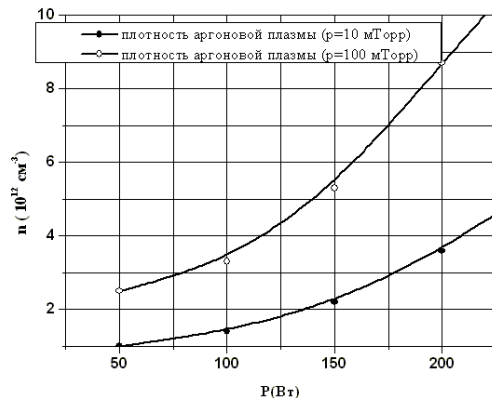


Рис.5. Зависимость плотности аргоновой плазмы от ВЧ-мощности

Функциональная схема геликонового ВЧ-источника ионов с индуктивно связанной плазмой и лазерным испарителем показана на Рис.6. Применение магнитной системы с постоянными магнитами позволило повысить экономичность источника ионов ИСП-МС, в частности, снизить ВЧ-мощность и снизить затраты рабочего газа в несколько раз для обеспечения тех же аналитических характеристик прибора.

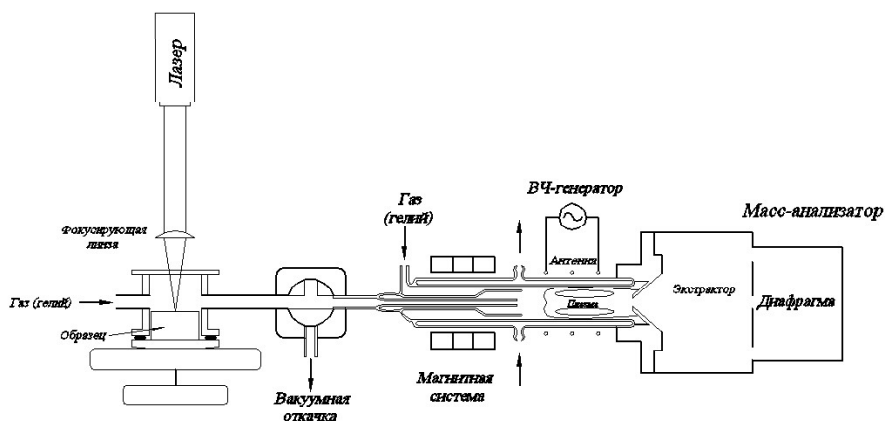


Рис.6. Функциональная схема ВЧ-источника ионов с индуктивно связанной плазмой и лазерным испарителем

#### 4. ГЕНЕРАТОР ПЛАЗМЫ ДЛЯ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Проведено конструкторское, технологическое проработывание и изготовление основных узлов макета атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой (Рис.7), в частности:

- ВЧ-источника плазмы;
- оптического спектрометра на базе промышленного прибора С 115-ПКС;
- системы измерения плазменных характеристик;
- вакуумной системы.

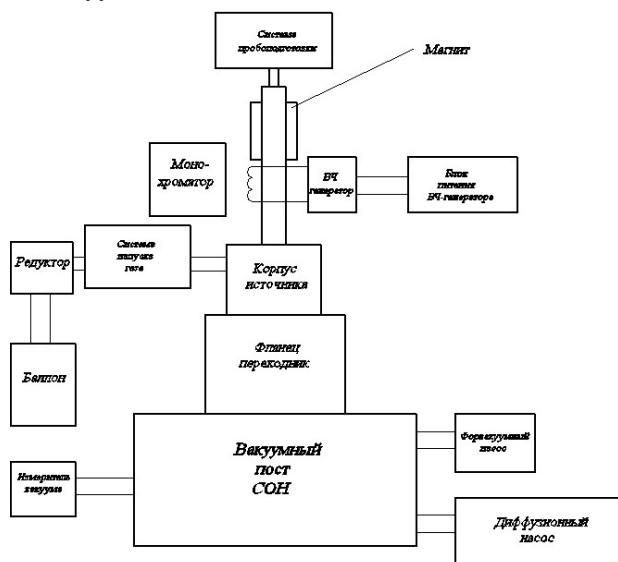


Рис.7. Функциональная схема макета атомно-эмиссионных спектрометров с индуктивно связанной плазмой

Разработанный геликоновый ВЧ-источник плазмы в сравнении с существующими источниками, которые используются в ИСП-АЭС, работает в режимах низкого давления (100 мТорр...1 Торр), имеет высокую плотность аргоновой плазмы ( $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>), ионную температуру на уровне 10000 К при ВЧ-мощности  $\sim 300$  Вт. Основное отличие разрабатываемого источника плазмы для атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой от существующих [1,2] заключается в применении компактных магнитных систем для создания индуктивного разряда во внешнем

магнитном поле. Применение внешнего продольного магнитного поля в ВЧ-источнике с индуктивно связанной плазмой позволяет создавать разряд с необходимой структурой светимости, а также уменьшить энергетические затраты за счет более эффективной ионизации и удержания плазмы.

#### ВЫВОДЫ

Созданы компактные генераторы плазмы с высокой плотностью плазмы  $5 \cdot 10^{11} \dots 10^{13}$  см<sup>-3</sup> для использования в ядерных микрозондах на базе электростатического ускорителя, масс-спектрометрах и атомно-эмиссионных спектрометрах с индуктивно связанной плазмой.

Проведенные исследования показали, что существуют реальные возможности повышения плотности плазмы в ВЧ-источниках за счет оптимизации структуры и величины как магнитного, так и ВЧ-поля, а также снижения потерь заряженных частиц на элементах конструкции плазменного генератора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. Hayashi, I. Ohe, T. Tanaka, M. Hiraide // *Analytical sciences*. 2002, v.18, p.1387.
2. T. Nagayasu, H. Hayashi, M. Hiraide // *Analytical sciences*. 2005, v.21, p.1411.
3. R.W. Boswell and R.K. Porteous // *Appl. Phys. Lett.* 1987, v.50, p.1130.
4. F.F. Chen, I.D. Sudit and M. Light // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1996, v.5, p.173.
5. K.P. Shamrai and V.B. Taranov // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 1994, v.36, p.1717.
6. V.I. Miroshnichenko, S.M. Mordyk, V.V. Olshansky, K.N. Stepanov, V.E. Storizhko, B. Sulkio-Cleff, V.I. Voznyy // *Nucl. Instr. And Meth.* 2003, v.B201, p.630.
7. V. Miroshnichenko, S. Mordyk, D. Shulha, V. Storizhko, V. Voznyy // *Nucl. Instr. And Meth.* 2007, v.B260, p.39-44.
8. Д.А. Нагорный, А.Г. Нагорный, В.И. Возный // *Приборы и техника эксперимента*. 2005, №2, с.98-100.

Статья поступила в редакцию 08.05.2008 г.

#### HELICON PLASMA GENERATOR FOR ANALYTICAL APPLICATION

S.M. Mordyk, V.I. Miroshnichenko, D.A. Nagorny, V.E. Storizhko

Helicon hydrogen/helium/argon plasma generators for ion injectors, ICP-MS, ICP-AES have been developed. The compact magnetic system is applied to creation of a longitudinal magnetic field in plasma generators with constant magnets (NdFeB) and the ring form ferrite. Following parameters of generators are received: plasma density of  $10^{11} \dots 9 \cdot 10^{12}$  cm<sup>-3</sup>, pressure of 10...100 mTorr, and RF power input into the plasma  $< 350$  W ( $f_{RF}=27.12$  MHz).

#### ГЕЛІКОНОВІ ГЕНЕРАТОРИ ПЛАЗМИ

ДЛЯ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ

С.М. Мордик, В.І. Мирошніченко, Д.А. Нагорний, В.Ю. Сторіжко

Створені геліконові генератори водневої/гелієвої/аргонової плазми для використання в інжекторах іонів, мас-спектрометрах з індуктивно зв'язаною плазмою та атомно-емісійних спектрометрах з індуктивно зв'язаною плазмою. Для створення поздовжнього магнітного поля в генераторах плазми застосована компактна магнітна система з постійними магнітами (NdFe) і феритами кільцевої форми. Отримано наступні параметри генераторів плазми: щільність плазми  $10^{11} \dots 9 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> при ВЧ-потужності, що вводиться у плазму,  $< 350$  Вт ( $f_{ВЧ}=27.12$  МГц) і робочому тиску в розрядній камері 10...100 мТорр.