

# ПРОГРАММА СОЗДАНИЯ ИОННОГО МИКРОЗОНДА ДЛЯ ЯДЕРНОГО МИКРОАНАЛИЗА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Лагутин А.Е.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белгосуниверситета  
220064, г. Минск, ул. Курчатова 7, тел. + 375-17-2126812, e-mail: Lagutin@bsu.by

Успехи в развитии и внедрении новых технологий зависят от совершенствования имеющихся и разработки новых методов элементного и структурного анализа [1].

Новые возможности ядерно-физических методов анализа открываются при применении ионных пучков микронных размеров. Необходимость уменьшения размеров анализирующего пучка также вызвана технологической сложностью решаемых научно-технических задач: повышением плотности элементов на единицу площади в полупроводниковой технике и оптоэлектронике, изучением фазового и элементного состава на границах раздела двух сред с пространственным разрешением в несколько микрон и менее, решением вопросов, связанных со стабилизацией примесей на границах зерен в металлах и сплавах, изучением распределения легирующих добавок в имплантированных слоях изделия.

## 1. Ионный микрозонд для ядерного микроанализа

Получение реальных результатов физических измерений [2] на выведенном пучке ускорителя ЭСУ-2 позволяет рассмотреть возможности создания на основе электростатического ускорителя инфраструктуры микропучковых технологий. В данной работе обсуждаются необходимые шаги в подходе к созданию качественно новых для нас пучков с количественными параметрами, которые должны соответствовать требованиям ионного микрозонда (МЗ) для ядерного микроанализа.

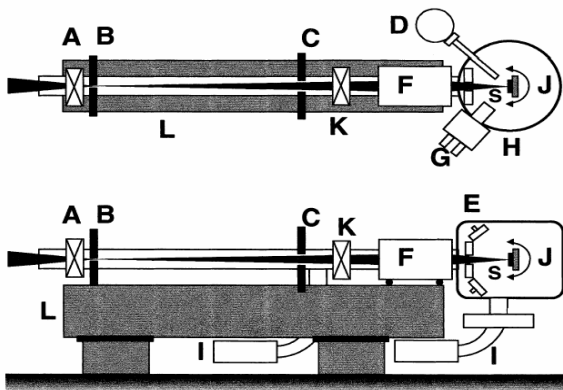


Рис. 1. Схема установки ионного микрозонда:

- A – корректирующая система;
- B – объектный коллиматор;
- C – апертурный коллиматор;
- D – детектор ХРИ;
- E – детекторы РОР;
- F – зондоформирующая система линз;
- G – оптический микроскоп;
- H – экспериментальная камера;
- I – вакуумные насосы;
- J – гониометр с образцом;
- K – система сканирования пучка;
- L – антивибрационный фундамент.

В лаборатории элионики НИИ ПФП БГУ за последние четыре года создан определенный научный задел [3-5], направленный на решение этой актуальной задачи. Были определены три наиболее значительные задачи для достижения в МЗ микронного разрешения при достаточно большом токе ( $I \geq 100$  pA) и энергии пучка протонов ( $E \leq 2$  MeV):

1. Модернизация ускорителя и источника ионов, используемых в МЗ.
2. Расчет оптимальной фокусирующей системы.
3. Трехмерный анализ краевых полей магнитных квадрупольных линз.

Сформулируем главные требования для создания МЗ: 1) ускоритель со стабильностью по энергии  $\Delta E/E > 10^{-4}$ ; 2) низкая вибрация установки  $< 0,1$   $\mu\text{m}$ ; 3) вакуум в системе лучше  $10^{-5}$  Pa.

Типичная конфигурация установки ионного микрозонда показана на рис.1.

## 2. Возможность повышения яркости ВЧ-источника микрозонда

Поскольку величина тока на мишени определяется произведением яркости пучка ионов на фазовый объем, задаваемый объектной и угловой диафрагмами зондоформирующей системы, то для получения большего тока при максимально достижимом фазовом объеме, в МЗ следует использовать источники ионов с наибольшей яркостью. По совокупности параметров ВЧ-источник ионов является одним из наиболее перспективных для использования в МЗ. Данный тип источника ионов имеет целый ряд достоинств: значительный срок службы (более 1000 часов), стабильность ионно-оптических параметров, высокую степень ионизации газа, компактность, достаточно большой ионный ток ( $1 - 100 \mu\text{A}$ ) и высокую яркость ( $B_n \sim 10^9 - 2 \cdot 10^{10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \text{ rad}^{-2}$ ) [6].

Необходимым условием получения высокой яркости пучка в ВЧ-источниках ионов является обеспечение высокой плотности плазмы источника. Развитая теория и проведенные эксперименты по созданию ICP (Inductively Coupled Plasma) источников плазмы с внешним магнитным полем подтверждают возможность получения в компактных системах плотности плазмы  $n \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  при величине вводимой ВЧ мощности  $P_{\text{вч}} < 500 \text{ W}$  [7].

Теоретический предел яркости протонного пучка при максимальной плотности плазмы  $n \sim n_+ \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , температурах электронов  $T_e \sim 5 \text{ eV}$  и ионов  $T_i \sim 0,1 \text{ eV}$  будет равен  $B_n \sim 0,72 \cdot 10^{14} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \text{ rad}^{-2}$ .

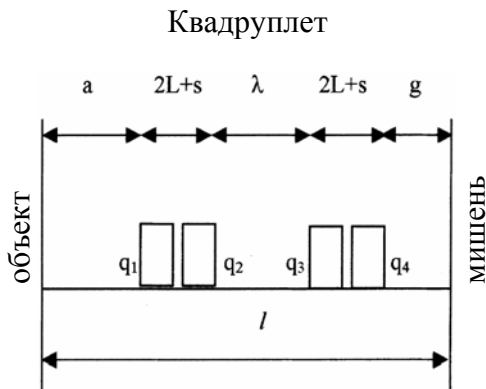
Одним из перспективных направлений повышения эффективности ввода ВЧ-мощности в плазму является возбуждение в плазме ВЧ-источника геликонных волн, которые могут поглощаться в плазме за счет столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами или параметрических неустойчивостей [8].

## 3. К вопросу о выборе фокусирующей системы микрозонда

Поперечные размеры пучка на мишени, т.е. разрешение МЗ, во многом определяется параметрами системы формирования. В последнее десятилетие в МЗ нового поколения широко использовались зондоформирующие системы, в которых магнитные квадрупольные линзы распределены вдоль оптического тракта.

Такая конфигурация линз характеризуется промежуточными кроссоверами пучка и обеспечивает высокие коэффициенты уменьшения для длинных систем ( $l \sim 9 \text{ м}$ ) [9], либо при умеренных коэффициентах  $D \sim 20$  позволяет уменьшить длину зондоформирующих систем ( $l \sim 2 \text{ м}$ ) [10].

Моделирование нелинейной динамики пучков в ионно-оптических системах методом матрицантов [11] позволяет провести сравнительный анализ различных зондоформирующих систем. В нелинейных эффектах учитываются хроматические, паразитические и собственно до третьего порядка включительно aberrации магнитных квадрупольных линз. Проведенное численное моделирование чувствительности элементов оптического канала МЗ к механическим и электрическим возмущениям показало преимущества квадруплетной схемы



**Рис. 2.** Геометрические параметры и схема расположения линз вдоль оптического тракта квадрупольной зондоформирующей системы:

- a – объектное расстояние;
- g – рабочее расстояние;
- l – длина системы;
- L – длина линзы;
- q<sub>n</sub> – порядковый номер линзы;
- λ, s – расстояния между линзами.

фокусировки (рис. 2) и возможность ее практической реализации.

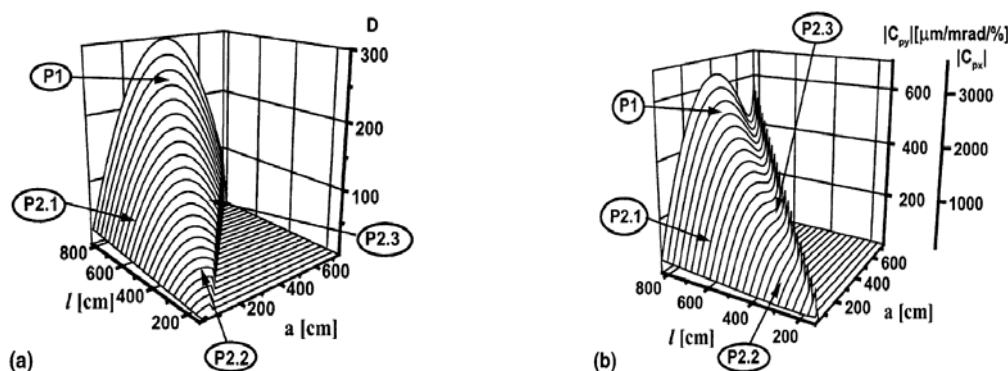


Рис. 3. Ионно-оптические свойства квадруплета

На рис. 3а представлена зависимость величин коэффициента уменьшения, объектного расстояния, длины системы. На рис. 3б представлена зависимость величин хроматической aberrации  $C_{px}, C_{py}$ , объектного расстояния, длины системы. Первая область P1 содержит системы с высокими коэффициентами уменьшения и большими aberrациями. Области P2.i ( $i = 1, 2, 3$ ) содержат системы с умеренными коэффициентами уменьшения и приемлемыми aberrациями: P2.1 – длинные системы с малым объектным расстоянием, P2.2 – короткие системы, P2.3. – длинные системы с большим объектным расстоянием.

Таким образом, на основании анализа можно выбрать оптимальную зондоформирующую систему, у которой коэффициенты уменьшения и aberrации сбалансированы.

#### Список литературы

1. Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Ташлыков И.С. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. Минск, «Университетское», 1987, 256 с.
2. Комаров Ф.Ф., Камышан А.С., Леонтьев А.В., Мартынов И.С., Лагутин А.Е. Труды XIV Международной конференции по ЭСУ и пучковым технологиям, г. Обнинск, РФ, с. 5, 2001.
3. Камышан А.С., Лагутин А.Е., Карват Ч. Материалы V международной конференции ВИТТ- 2003, Минск, с. 357.
4. Камышан А.С., Купчишин А.И., Лагутин А.Е. Материалы V международной конференции ВИТТ- 2003, Минск, с. 359.
5. Комаров Ф.Ф., Камышан А.С., Лагутин А.Е., Романов В.А., Бажал С.В. Труды XV Международной конференции по ЭСУ и пучковым технологиям, г. Обнинск, РФ, с. 246, 2003.
6. Лагутин А.Е., Романов В.А., Комаров Ф.Ф., Камышан А.С. Вестник БГУ, Мн., № 1, с. 60, 2005.
7. V. I. Miroshnichenko, S. N. Mordik, V. V. Olshansky, K. N. Stepanov, V. E. Storizhko, B. Sulkio-Cleff and V. Voznyy. Nucl. Instr. and Meth. B 201, 630 (2003).
8. A.I. Akhiezer, V.S. Mikhailenko, K.N. Stepanov. Physics Letters A 245, 117 (1998).
9. T. Butz. Nucl. Instr. and Meth. B 161-163, 324 (2000).
10. S. Lebed. Nucl. Instr. and Meth. B 152, 145 (1999).
11. A. Dymnicov and R. Hellborg. Nucl. Instr. and Meth. A 334, 343 (1993).