

УДК: 539.534.9

## Ионно-пучковые методики ускорительного комплекса HVEE-500 НИИЯФ МГУ

А.А. Шемухин, П.Н. Черных, В.С. Черныш, Ю.В. Балакшин, А.В. Назаров

*Приведено описание введенного в эксплуатацию экспериментального комплекса HVEE-500 НИИЯФ МГУ, позволяющего исследовать поверхности и тонкие пленки с разрешением по глубине вплоть до 1–2 монослоев. В комплексе предусмотрена возможность проведения *in situ* экспериментов по взаимодействию ионных пучков с покрытиями и исследования их с применением ионно-пучковых методик. Имплантация ионов от 1 до 250 атомной единицы массы проводится в мишени с размерами до 150x150 мм с однородностью дозы по этой площади не хуже 99%.*

PACS: 29.27.— a

*Ключевые слова:* ионная имплантация, резерфордское обратное рассеяние, спектроскопия рассеяния ионов средних энергий, модификация и анализ поверхности.

### Введение

На сегодняшний день существуют большие трудности, связанные с измерением и оценкой свойств наноматериалов. В связи с миниатюризацией элементов микросхем многие из существующих методик исследования имеют ряд недостатков, а именно, одни являются разрушающими, а другие имеют недостаточное разрешение распределения элементов по глубине.

Ионно-пучковые методики исследования лишены перечисленных выше недостатков. С их помощью определяют элементный состав покрытий и модифицированных твердых тел, изучают профили распределения по глубине примесных или имплантированных атомов, определяют структуры и толщин слоев в многослойных покрытиях а также процессы взаимодиффузии в этих слоях. Необходимо отметить, что для определения стехиометрического состава не требуется использование эталонных образцов, поскольку сечения рассеяния для различных элементов хорошо известны. Поэтому ионно-пучковые методы считаются абсолютными методами.

Шемухин Андрей Александрович, мл. научн. сотр.

Черных Павел Николаевич, ст. научн. сотр.

Черныш Владимир Савельевич, зав. лабораторией.

Балакшин Юрий Викторович, программист.

Назаров Антон Викторович, мл. научн. сотр.

Научно-исследовательский институт

им. Д.В. Скобелевца

Московского государственного университета

им. М.В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Тел.: 8 (926) 4275683. E-mail: shemuhin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2013 г.

© Шемухин А.А., Черных П.Н., Черныш В.С., Балакшин Ю.В., Назаров А.В., 2013

Целью данной статьи является презентация и описание возможностей уникального комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов с энергиями до 500 кэВ, созданного в лаборатории ионно-пучковых нанотехнологий НИИЯФ МГУ ([www.ionlab.ru](http://www.ionlab.ru)).

### Экспериментальный ускорительный комплекс

Комплекс (см. рис. 1) оснащен тремя исследовательскими линиями, а именно, ионной имплантации, методик обратного рассеяния и методики спектрометрии рассеяния ионов средних энергий (СРИСЭ).

### Линия ионной имплантации

Линия ионной имплантации позволяет проводить имплантацию ионов в диапазоне от 1 до 250 атомной единицы массы. Линия имплантации содержит системы фокусировки и сканирования формы ионного пучка, а также ловушку нейтральных частиц. Рабочее давление в камере не превышает  $10^{-4}$  Па.

Для обеспечения однородности плотности ионного тока по сечению во время экспериментов по ионной имплантации применяется специальная система сканирования ионного пучка. Система представляет собой два последовательных плоских конденсатора, при подаче высокого переменного напряжения на обкладки которых происходит раскачивание пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Система обеспечивает сканирование пучком ионов вдоль мишени по площади до 150x150 мм с однородностью дозы по этой площади не хуже 99% [1]. Для контроля амплитуды напряжения системы скани-

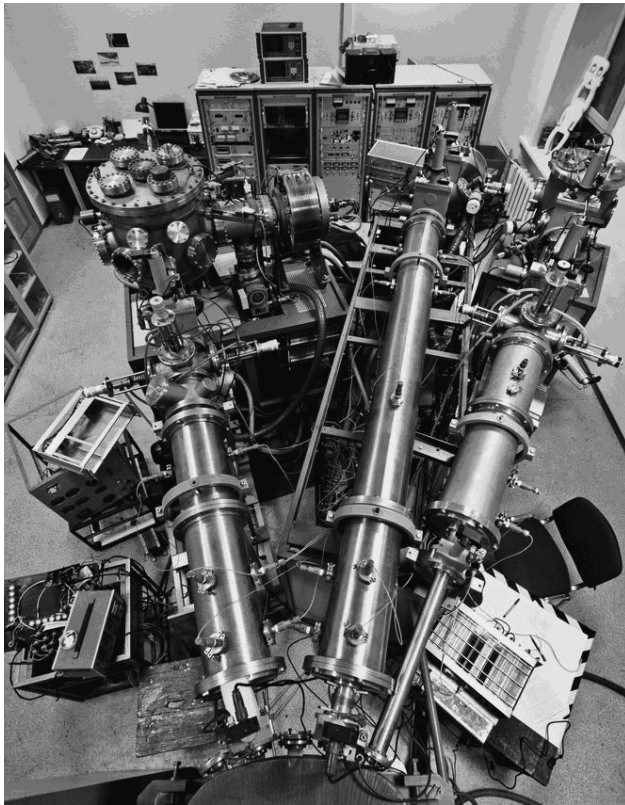


Рис. 1. Исследовательские линии экспериментального комплекса на базе ускорителя HVEE-500

рования ионного пучка во время экспериментов применяется спроектированный и реализованный компонент контроля на базе модуля понижения напряжения, сигнал которой через коммутационный блок BNC-2110 подается на плату PCI-6115 в компьютер. Визуализация и контроль амплитуды напряжения системы сканирования ионного пучка проводится с помощью разработанного программного комплекса, созданного с применением языка программирования LabVIEW.

Для проведения имплантации при температурах мишени в диапазоне от  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температуры жидкого азота) до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  спроектированы и созда-

ны дополнительные устройства. Контроль температуры проводится в автоматическом режиме.

### Линия методик обратного рассеяния

Исследовательская линия методик обратного рассеяния оснащена набором диафрагм от 1 до 5 мм, позволяющих проводить *in situ* эксперименты по взаимодействию ионных пучков с покрытием и исследованию с применением ионно-пучковых методик резерфордовского обратного рассеяния (РОР), ядерного обратного рассеяния (ЯОР) и спектрометрии ядер отдачи (СЯО).

Для исследования образцов с помощью методики РОР (рис. 2) устанавливаются диафрагмы с диаметром 1 мм. Расходимость пучка при этом не превышает  $0,06^{\circ}$ . Ускоренный пучок  $\text{He}^{+}$  после прохождения магнита фокусируется триплетной квадрупольной линзой (3) и коллимируется перед входом в камеру системой диафрагм (5). Прошедший через диафрагмы анализирующий пучок ионов рассеивается от мишени и регистрируется при помощи кремниевого поверхностно-барьерного детектора. С детектора сигнал усиливается и через анализатор выводится на компьютер. Рабочее давление в камере не превышает  $10^{-4}$  Па. Для проведения *in situ* экспериментов по имплантации устанавливаются 5 мм диафрагмы. Расходимость пучка при этом не превышает  $0,12^{\circ}$ .

Экспериментальная камера оборудована гониометрической системой, позволяющей проводить крепление и точное позиционирование исследуемого образца. Угловые перемещения производятся с помощью шаговых двигателей с шагом  $0,02^{\circ}$ , точность выполнения поворотов на большие углы составляет не хуже 1%.

В данной экспериментальной камере можно проводить исследования с помощью ЯОР и СЯО [2, 3]. Различие между РОР- и ЯОР-анализами за-

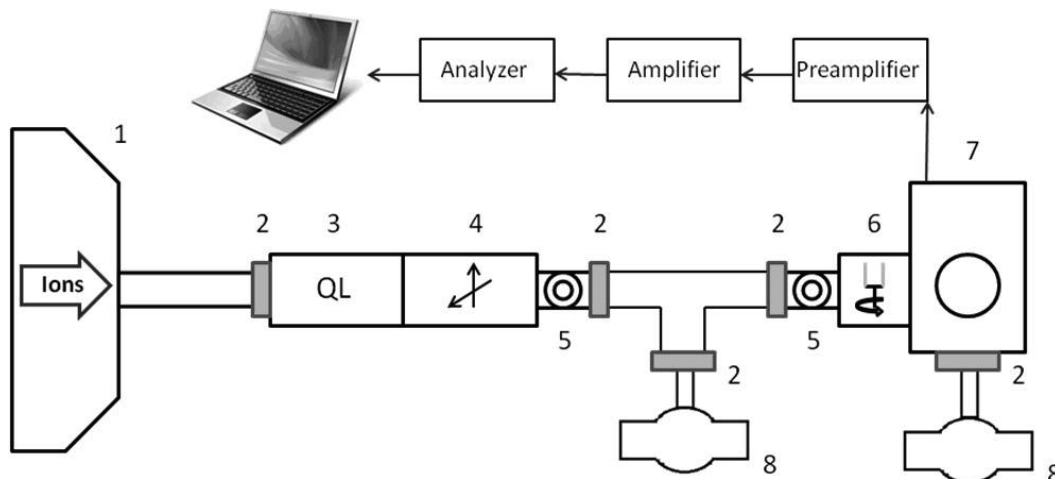


Рис. 2. Схема экспериментальной линии: 1 — электромагнитный анализатор; 2 — вакуумные затворы; 3 — квадрупольная линза; 4 — отклоняющие электроды; 5 — диафрагмы; 6 — система контроля числа падающих ионов; 7 — экспериментальная камера; 8 — система вакуумной откачки

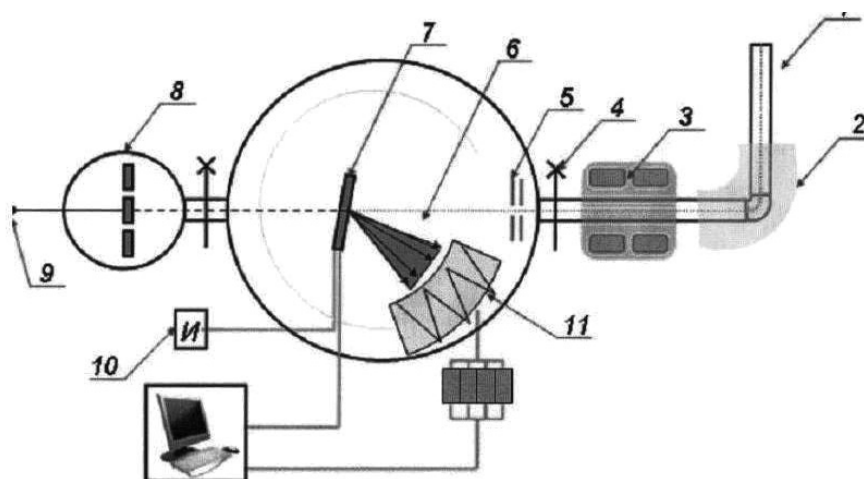


Рис. 3. Экспериментальный комплекс СРИСЭ: 1 — пучок ионов, 2 — электромагнитный анализатор, 3 — система квадрупольных линз, 4 — вакуумная задвижка, 5 — система диафрагм, 6 — обратнорассеянные ионы, 7 — исследуемый образец, 8 — камера смены образцов, 9 — шток, 10 — интегратор тока на мишени, 11 — тороидальный электростатический анализатор и позиционно-чувствительный детектор, 12 — блок обработки сигнала с детектора.

ключается в сечениях ион-атомного и ион-ядерного рассеяния  $ds/d\Omega$ . В случае РОР-анализа сечение пропорционально  $Z^2$  и поэтому мало для легких элементов, подобных углероду. Для протонов с энергией более чем 1 МэВ сечение упругого процесса может быть намного выше, чем сечение резерфордского рассеяния, из-за вклада сечения ядерного упругого процесса, откуда и следует название анализирующей методики — ЯОР

Распределение и количество водорода вблизи поверхности для твердых тел вызывает интерес для очень большого количества научных и технических аспектов. При упругих соударениях рассеяние назад отсутствует, если масса налетающей частицы больше или равно массе атома мишени. Кинетическая энергия налетающей частицы, в основном, передается атому отдачи — более легкому атому мишени. Энергию атомов отдачи можно измерить с помощью полупроводникового детектора. Спектрометрия ядер отдачи (СЯО), вылетающих вперед, является методом неразрушающего анализа распределения легких элементов по глубине в твердых телах.

**Линия анализа приповерхностных слоев материалов и наноразмерных объектов с применением методики спектрометрии рассеяния ионов средних энергий**

В связи с постоянным уменьшением размеров элементов интегральных схем, диктуемого требованиями современных технологий, традиционные ионно-пучковые методики (РОР, ЯОР и СЯО) не всегда позволяют исследовать такие объекты с необходимым разрешением по глубине. Созданная в нашей лаборатории линия методики спектроскопии ионов средних энергий (Medium

Energy Ion Spectrometry, MEIS, СРИСЭ) позволяет исследовать состав и толщину границ разделов многослойных структур с более высоким разрешением. Разрешение по глубине реализованной методики достигает одного—двух атомных слоев (порядка 6 ангстрем) [4]. Применение методики СРИСЭ существенным образом расширяет возможности традиционных методов в исследовании ультратонких и многослойных покрытий.

Экспериментальная линия состоит из ионпровода, исследовательской камеры, и шлюзовой камеры для смены образцов (рис. 3). Массесепарированный пучок ионов из ускорителя (1) после поворота в магните (2) на  $15^\circ$  проходит через щелевой прибор и систему квадрупольных линз (3). На входе в камеру установлена система диафрагм (5), после которой пучок попадает на исследуемый образец. Рабочее давление в камере не превышает  $10^{-6}$  Па. Гониометрическая система позволяет осуществлять вращение образца вокруг трёх осей. Вращение гониометра производится с помощью шаговых двигателей. Диаметр пучка ионов на мишени составляет 1 мм. В экспериментальной камере установлен тороидальный электростатический анализатор с системой микроканальных пластин и позиционно чувствительным детектором.

Отметим, что в России данная методика нигде больше не представлена, а в мире насчитывается не более десяти работающих установок.

**Заключение**

Исследовательский комплекс HVEE-500 лаборатории ионно-пучковых нанотехнологий НИИ-ЯФ МГУ позволяет применять широкий спектр ионно-пучковых методик для создания, модифи-

кации и исследования покрытий для задач микро- и наноэлектроники, задач материаловедения и других исследовательских задач. Особую актуальность и ценность для решения материаловедческих задач представляет возможность проведения исследований в режиме *in situ*, а также применение методики СРИСЭ для исследования ультратонких и многослойных покрытий. Использование СРИСЭ открывает новые возможности в создании принципиально новых тонкопленочных материалов с уникальными свойствами.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-02-31780*

### Литература

1. Шемухин А.А., Балакишин Ю.В., Черныш В.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 19. С. 83
2. Pei Y.T., Chechenin N.G., Chernykh P.N., et al. // Scripta Materialia. 2009. V. 61. No. 3. P. 320
3. Chechenin N.G., Chernykh P.N., Kulikauskas V.S., et al. // Journal of Physics D. Applied Physics. 2008. V. 41. No. 8. P. 7
4. Шемухин А.А., Балакишин Ю.В., Черных П.Н., Черныш В.С. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 4. С. 25

## Ion-beam methods of the accelerator complex HVEE-500 SINP MSU

*A.A. Shemukhin, P.N. Chernykh V.S. Chernysh, Y.V. Balakshin, and A.V. Nazarov*

Skobeltsyn Institute for Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University,  
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: shemuhin@gmail.com

***Description of commissioned experimental complex HVEE-500 SINP MSU, allowing to explore the surface and thin films with a resolution by the depth of up to 1–2 monolayers. The complex provides for the possibility of in situ experiments on the interaction of ion beams with coatings and study them with the use of ion beam techniques. Implantation of ions from 1 to 250 atomic mass units is performed in the target dimensions up 150x150 mm with homogeneity dose of this area no less 99%.***

PACS: 29.27.— a

***Keywords:*** ion implantation, Rutherford back-scattering, Medium Energy Ion Spectrometry, modification and surface analysis.

***Bibliography*** — 4 references

*Received November 7, 2013*