

ГЕНЕРАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИОНОВ НА ВЫСОКОДОЗНОМ ИОННОМ ИМПЛАНТЕРЕ

*В.А. Батурин, С.А. Еремин, С.А. Пустовойтов, П.А. Литвинов,
А.Ю. Карпенко, В.И. Мирошниченко*

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина

E-mail: baturin@ipflab.sumy.ua; тел. +38(0542)33-22-50

Разработана установка для высокодозной имплантации металлических ионов в диапазоне энергий 20...500 кэВ. Использован газомagnetронный источник ионов металлов распылительного типа. Проведено компьютерное моделирование процессов экстракции ионного пучка из плазменной границы источника ионов и его транспортировки в ионно-оптической системе имплантера. Получены масс-спектры пучков ионов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия интенсивно развиваются работы по модификации материалов высокоэнергетичными ионными пучками (ионная имплантация). Область применения ионной имплантации очень разнообразна: микроэлектроника, космическое и ядерное приборостроение, обработка инструментов и деталей машин с целью изменения их физико-химических свойств и т. д. [1–3].

Одной из возможных областей использования ионно-лучевой обработки является исследование радиационной стойкости конструкционных материалов ядерной энергетики [4, 5]. Ускоренные тяжелые ионы имеют на несколько порядков большие значения поперечных сечений взаимодействия с атомами кристаллической решетки, чем реакторные нейтроны. Поэтому использование тяжелых ионов, особенно ионов металлов, позволяет за несколько часов создавать в материалах радиационные дефекты, которые в самых мощных ядерных реакторах достигаются в течение многих лет [6]. При этом исследуемые образцы практически не имеют наведенной радиоактивности, имеется возможность контроля и изменения в широких пределах температуры образцов и интенсивности потока ионов.

Кроме того, ионное облучение имеет два существенных преимущества перед нейтронным. Во-первых, для исследования радиационного распуха-

ния важно проводить облучение металлов ионами того же сорта, что у атомов облучаемой мишени. Во-вторых, это возможность введения в исследуемый материал практически любых элементов. Это открывает широкие перспективы для моделирования различных дефектов, обусловленных возникновением химических неоднородностей в материалах. В связи с этим, в последние годы значительно вырос интерес к физике тяжелых (металлических) ионов, что требует разработки соответствующего экспериментального оборудования для модификации поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В ИПФ НАН Украины ведутся работы по созданию установки для высокодозной и высокоэнергетичной имплантации ионов металлов. Имплантер строится на основе вакуумной системы и источников высоковольтного питания промышленного ионного имплантера «Везувий-5» [7]. Установка в имплантер разработанного нами источника металлических ионов позволяет проводить прецизионное облучение образцов в приемной камере как ионами металлов (Fe, Ni, Cr, Cu, Zr, Mo и др.), так и газовыми ионами (H_2 , He, N_2 , O_2 , Ar и др.) в диапазоне энергий 20...500 кэВ. Ток ионов металлов в приемной камере достигает 130 мкА, ионов газов – 200...300 мкА. На рис. 1 приведена общая схема экспериментальной установки.

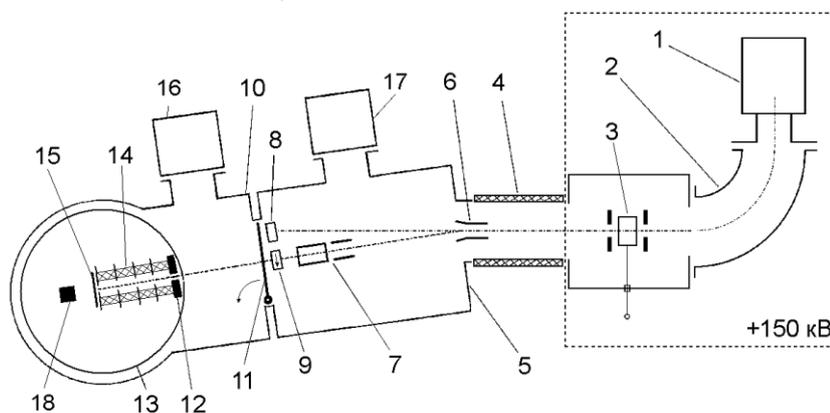


Рис. 1. Установка для модификации материалов металлическими ионами (вид сверху)

Пучок ионов металлов генерируется и формируется в инжекторе ионов 1. Напуск балластного газа в источник осуществляется с помощью механического игольчатого натекателя с шаговым двигателем. Поскольку источник ионов создает значительную газовую нагрузку на вакуумную систему установки, была осуществлена дифференциальная откачка источника с помощью турбомолекулярного насоса, находящегося под потенциалом земли и соединенного с источником через изолирующую капروطонную трубу. Энергия однозарядных ионов на выходе из источника устанавливается в интервале 5...20 кэВ.

Сепарация ионов по массам осуществляется в 90-градусном секторном электромагните 2 с максимальным массовым числом $M/Z \sim 60$. После сепарации ионы вторично фокусируются одиночной линзой 3 и ускоряются до необходимой энергии в ускорительной трубке 4. Источник ионов, электромагнит, одиночная линза и их блоки питания находятся под высоким положительным потенциалом (до 150 кэВ). Охлаждение источника ионов и электромагнита осуществляется подачей дистиллированной воды по пластиковой трубке, намотанной на бакелитовый цилиндр.

Ускоренный пучок попадает в первую приемную камеру 5, находящуюся под потенциалом земли. Для отсекающей нейтральной составляющей пучка ионов на входе в камеру установлены пластины 6, отклоняющие ускоренный пучок в горизонтальной плоскости на небольшой угол. Отклоненный дефлектором пучок ионов попадает в систему сканирования 7 пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях (площадь сканирования составляет от 10×10 до 100×100 мм). В первой камере находятся также неподвижный 8 и подвижный 9 цилиндры Фарадея для измерения тока пучка ионов. Электростатические линзы в инжекторе ионов и на выходе масс-сепаратора, а также система сканирования пучка позволяют регулировать плотность ионного тока в плоскости исследуемого образца в широком диапазоне ($100 \dots 10^{-2}$ мкА/см²).

Далее пучок попадает во вторую камеру 10, соединенную с первой через высоковакуумный затвор 11. Во второй приемной камере расположена еще одна ускорительная трубка 14, на конце которой закреплен держатель облучаемых образцов 15. Он находится под высоким отрицательным потенциалом (до -100 кэВ), подаваемым с помощью высоковольтного блока питания ИВН-100. Таким образом, энергия однозарядных ионов, бомбардирующих образец, в итоге достигает 250 кэВ, а двузарядных – 500 кэВ. Electroды ускорительной трубки, а также держатель образцов соединены через делитель напряжения, причем таким образом, чтобы между держателем и крайним электродом трубки была разность потенциалов (1...2 кэВ), запирающая эмиссию вторичных электродов с образца.

Температура облучаемых образцов может регулироваться в интервале 100...600 °С с помощью нагревателя 18 на основе галогеновой лампы с водоохлаждаемым отражателем. Измерение температуры

образцов производится с помощью закрепленных на держателе термодпары и вольтметра (рис. 2).

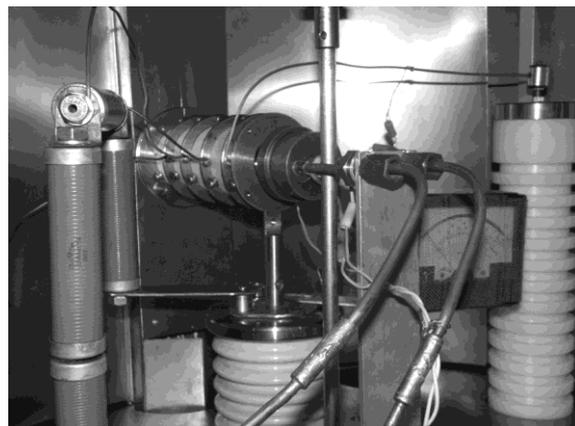


Рис. 2. Приемная камера №2

Доза облучения измеряется системой цилиндров Фарадея 12 и интегратором ионного тока. Имеющаяся в имплантере карусель для крепления облучаемых образцов 13 в данной конструкции используется для диафрагмирования и перекрытия пучка ионов. Откачка двух камер осуществляется диффузионными насосами 16, 17 с ловушками, охлаждаемыми жидким азотом. Остаточный вакуум в камерах достигает $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Разработанный в ИПФ НАН Украины источник металлических ионов позволяет генерировать пучки одно- и двузарядных ионов металлов на основе ионно-плазменного распыления [8]. Такой способ создания рабочей среды позволяет формировать атомарную концентрацию практически любых металлов без необходимости нагревать источник до высоких температур. Конструкция источника схематично показана на рис. 3.

Физической основой принципа действия источника являются два последовательных разряда – модернизированный магнетронный M и классический пеннинговский P , которые делят газоразрядную камеру источника на две последовательные зоны.

В магнетронном разряде реализуются подготовительные процессы:

- эффективное образование аргоновой плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях;
- обогащение этой плазмы на выходе из магнетрона атомами металла из распыляемой прикатодной вставки;
- протягивание плазмы, горящей в газопаровой среде, на вход пеннинговского разряда.

В пеннинговском разряде происходит завершение этой цепочки элементарных процессов:

- повышение парциального давления атомов металла за счет распыления вставки в антикатоде и локализация их в эмиссионной области;
- ионизация приосевых атомов эмиссионной области аномально быстрыми электронами, осциллирующими по оси пеннинговского разряда.

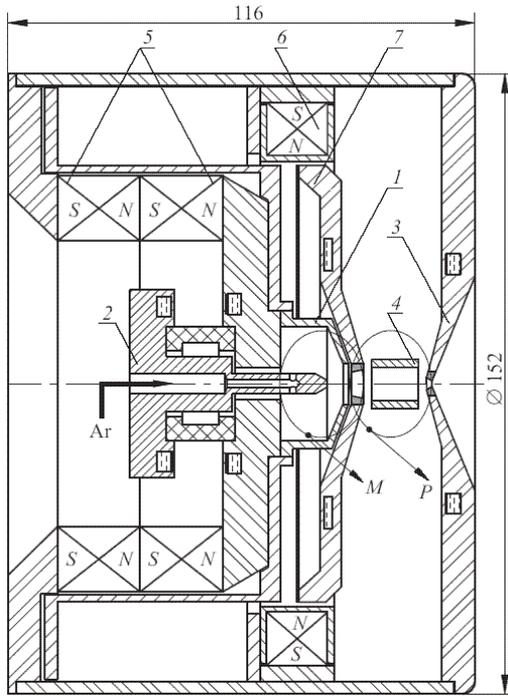


Рис. 3. Схема источника металлических ионов

Балластным газом, подаваемым в источник, является аргон. Инверсный газомagnetрон состоит из холодного катода 1, изготовленного из молибдена или графита, и укороченного медного анода 2. Ток разряда составляет около 3 А при разности потенциалов 400 В. Катодом пеннинговского разряда является плазма, генерируемая в магнетроне, антикатодом – электрод 3, а анодом – теплоизолированный молибденовый электрод 4. Антикотод выполняет функцию эмиссионного электрода системы экстракции. На выходе из магнетрона и в приосевой области антикатада расположены распыляемые вставки (выделены сплошной заливкой).

Магнитная система источника включает в себя постоянные магниты и магнитопровод (выделен штриховкой STEEL). Основные магниты 5, возбуждающие магнитное поле ($\sim 0,1$ Тл) в газоразрядной камере источника, установлены в его тыльной части. Корректирующие магниты 6 с радиальной намагниченностью и дополнительный магнитный полюс 7 увеличивают напряженность магнитного поля в пеннинговской разрядной ячейке до 0,2 Тл, что

обеспечивает повышенную концентрацию плазмы в зоне экстракции. Характерной особенностью пеннинговского разряда является наличие на его оси аномально быстрых осциллирующих электронов.

При формировании рабочей среды в разрядной камере путем распыления можно выделить два основных канала потерь атомов металла: во-первых, в результате того, что скорость диффузионного ухода из разряда атомов значительно превышает скорость их ионизации электронным ударом; во-вторых, в результате конденсации паров на холодной окружающей поверхности. В источнике ионов первый канал потерь минимизируется вследствие эффективной ионизации атомов быстрыми осциллирующими электронами в месте распыления атомов, а конденсация паров предотвращается тем, что теплоизолированный анод Пеннинга имеет рабочую температуру около 1600 °С.

На рис. 4 показаны гистограммы распределения токов I_{fr} отдельных фракций пучка, отнесенных к общему току пучка I_{b0} , полученных на стенде для испытаний источников ионов в импульсном режиме работы (h.f. – суммарный ток ионов тяжелых фракций $M/Z > 100$).

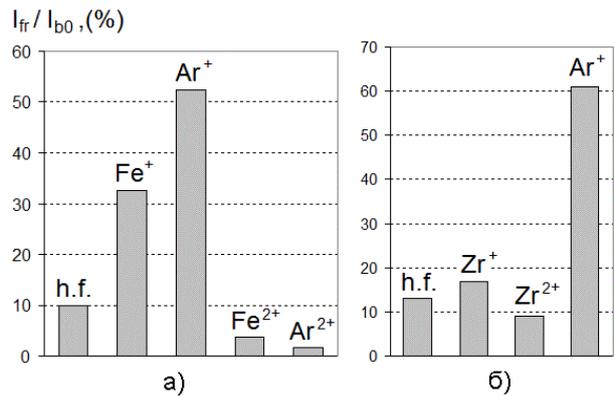
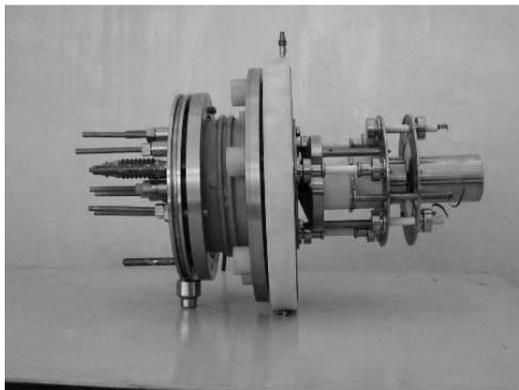


Рис. 4. Массовый состав пучка при распылении железа (а) и циркония (б)

Конструкция ионного источника позволяет работать как с магнитными, так и немагнитными распыляемыми материалами. Возможна оптимизация источника на получение многозарядных металлических ионов невысокой ($Z = 2, 3$) кратности. Фотографии ионного инжектора показаны на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Ионный инжектор отдельно (а) и в составе экспериментальной установки (б)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для определения оптимальной геометрии и потенциалов элементов ионно-оптической системы установки проведено компьютерное моделирование процесса транспортировки пучка тяжелых ионов. Данное моделирование включает в себя два этапа:

- нахождение формы плазменной границы (мениска) в источнике ионов металлов, влияющей на расходимость пучка на выходе из источника;
- моделирование прохождения пучка в последующих элементах ионного тракта установки.

Для моделирования процесса формирования плазменной границы в ионном источнике с аксиальной симметрией разработано соответствующее программное обеспечение Plasma2D. Программа создана в среде Delphi 7 и занимает объем около 1 Мбайт [9]. Ее структурная схема показана на рис. 6.

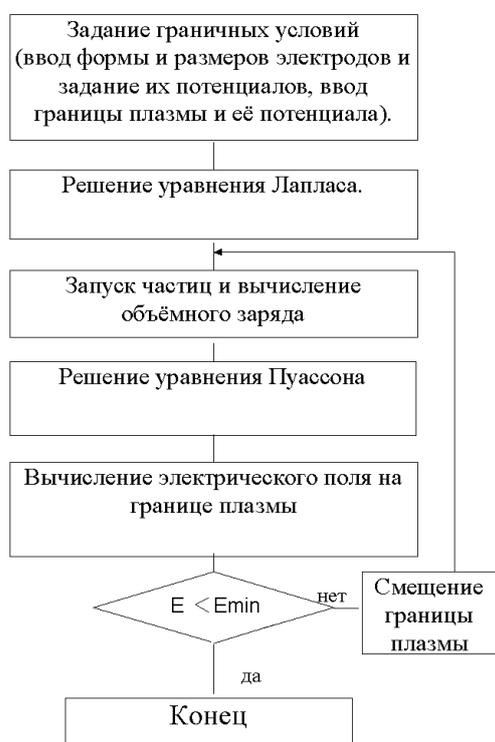


Рис. 6. Схема общего алгоритма программы для моделирования извлечения пучка ионов из плазмы

Расчет электрического поля U в рассматриваемой области производится путем численного решения уравнения Пуассона в цилиндрических координатах (r, φ, z) с учетом аксиальной симметрии распределения потенциала:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ρ – объемная плотность заряда, ε_0 – электрическая постоянная. Решение находится методом итераций по конечно-разностной схеме при заданных граничных условиях и шаге сетки.

Задание конкретной геометрии системы экстракции ионов и начального положения плазменной границы производится путем загрузки в программу растрового изображения (в формате .gif), предварительно созданного в графическом редакторе пользователем и представляющего собой сечение, прохо-

дящее через ось системы. При этом принимается, что белые пиксели соответствуют вакуумному промежутку, черные – электродам, а красные – плазменному мениску. После этого пользователь задает потенциалы электродов и плазмы, и программа приписывает соответствующим узлам сетки введенное значение потенциала. При этом каждому пикселю изображения соответствует свой узел сетки.

Построение траекторий частиц в рассчитанном электрическом поле производится путем численного интегрирования дифференциального уравнения движения при заданных начальных условиях (координатах, энергиях и углах вылета частиц). Для повышения точности шаг интегрирования по времени меняется с учетом скорости и ускорения частицы.

Далее решается самосогласованная задача со смещением границы плазмы на каждом этапе исходя из величины напряженности электрического поля E на поверхности плазмы. Для сглаживания шероховатости плазменной поверхности, полученной в результате сдвига, она аппроксимируется полиномом степени N , задаваемой пользователем. Критерием окончания вычислительного процесса является среднеквадратичное отклонение потенциалов узлов сетки, примыкающих к ее поверхности, от потенциала плазмы, которое не должно превышать заданной пользователем величины.

Еще одной возможностью программы является построение фазового портрета пучка и вычисление эмиттанса на определенном расстоянии от поверхности плазмы.

В процессе моделирования определены оптимальные потенциалы элементов системы экстракции пучка ионов (рис. 7,а), при которых расходимость пучка на выходе из инжектора минимальна. Потенциал эмиттера (поз. 1) составил 12 кВ, экстрактора (поз. 2) равен -20 кВ, фокусирующего электрода (поз. 3) – 10 кВ при заданном токе пучка ионов Fe^+ 1,5 мА. Диаметр отверстия в эмиттере составлял при этом 1,5 мм, экстрактора – 3 мм, зазор между эмиттером и экстрактором – 5 мм, а шаг сетки был выбран равным 0,03 мм.

Для проверки полученных результатов было проведено еще одно моделирование с использованием бесплатной библиотеки IBSimu v.1.0.5 [10] при тех же параметрах и геометрии экстракции (см. рис. 7,б). Как видно из рисунков, наблюдается хорошее соответствие траекторий частиц пучка. Форма плазменного мениска в обоих случаях близка к плоской.

После этого было проведено компьютерное моделирование транспортировки пучка ионов железа в ионно-оптической системе имплантера до системы сканирования пучка (рис. 8). При этом использовались оптимальные параметры инжектора, определенные ранее. Ускорительная трубка, как видно на рисунке, формирует кроссовер пучка в области системы сканирования. Одиночная линза, находящаяся перед ускорительной трубкой, позволяет стабилизировать положение кроссовера при изменении напряжения на трубке.

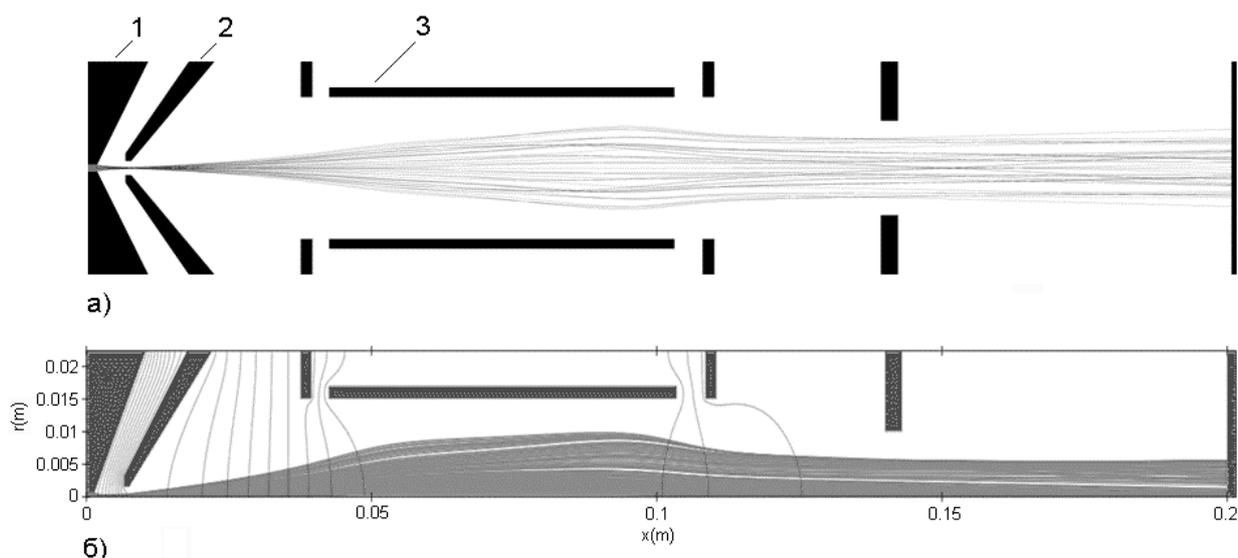


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования экстракции ионов железа из плазменной границы источника: а – программа Plasma2D, б – IBSimu v.1.0.5

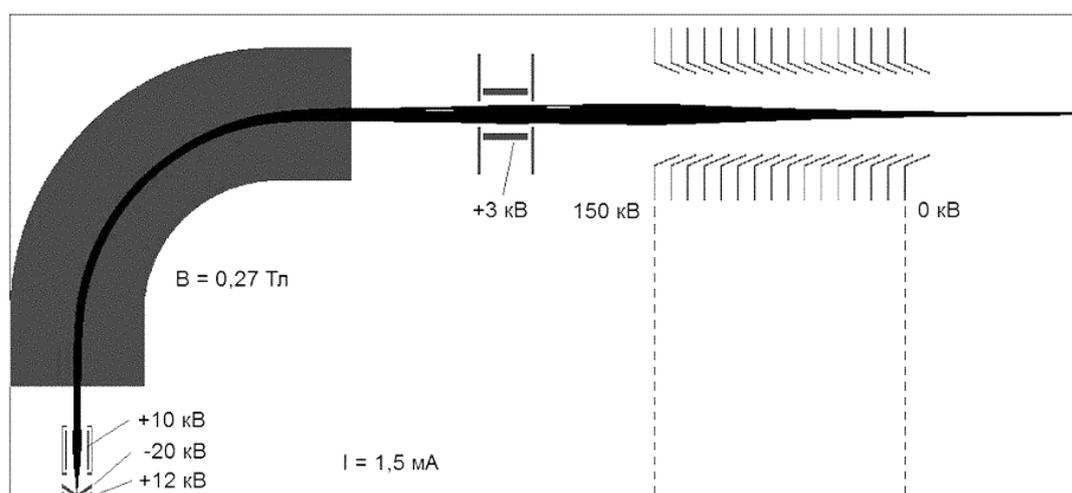


Рис. 8. Результат компьютерного моделирования транспортировки пучка ионов железа в ионно-оптической системе имплантера

На рис. 9 приведена гистограмма распределения токов отдельных фракций пучка, измеренных цилиндром Фарадея в первой приемной камере.

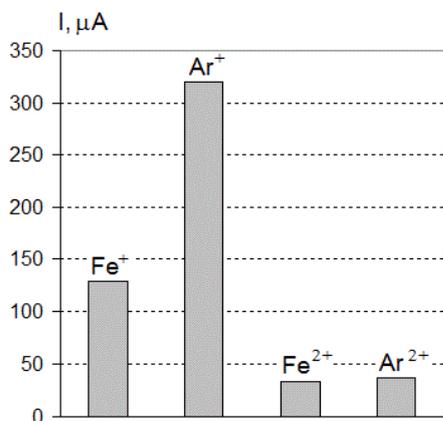


Рис. 9. Распределение тока пучка по фракциям при распылении железа

Параметры ионно-оптической системы имплантера соответствовали рис. 8. Ток двузарядных ионов железа составляет примерно 25% от тока однозарядных. В пучке, генерируемом источником, могут присутствовать также тяжелые ионы с $M > 100$ (например, кластеры Fe_2^+ , Fe_3^+), которые невозможно зарегистрировать из-за ограниченного диапазона массового сепаратора.

Расчеты показывают, что скорость набора дозы при облучении образцов ионами железа с энергией до 500 кэВ находится в интервале 0,1...0,01 сна/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследований в области радиационного материаловедения в ИПФ НАН Украины создана установка по облучению материалов ионами металлов/газов. Оптимизация режима работы ионного источника позволяет получить повышенное содержание двузарядных ионов и, таким образом, в 2 раза увеличить их максимальную энергию. Проведенное компьютерное моделирование и

оптимизация ионно-оптического тракта установки дает возможность управлять положением кроссовера ионного пучка при изменении сорта ускоряемых ионов и их энергии. Это позволяет сохранять размер ионного пучка на мишени при изменении энергии в диапазоне 20...500 кэВ. Параметры пучка ионов обеспечивают скорость набора дозы на уровне 0,1...0,01 сна/с. При этом температура облучаемых образцов регулируется в диапазоне 100...600 °С.

Авторы выражают благодарность В.Е. Сторижко и В.Н. Воеводину за постановку задачи и постоянное внимание к работе.

Работа выполнена при поддержке гранта НАН Украины №К-9-69/2013.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Х. Риссел, И. Руге. *Ионная имплантация*. М.: «Наука», 1983, 362 с.
2. А.Ф. Грищенко. *Ионное легирование в микроэлектронике*. М.: «Высшая школа», 1985, 47 с.
3. Дж.М. Поут. *Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками*. М.: «Машиностроение», 1987, 424 с.
4. О.В. Бородин, В.В. Брык, В.Н. Воеводин, А.С. Кальченко и др. Радиационное набухание ферритно-мартенситных сталей ЭП-450 и НТ-9 при облучении металлическими ионами до сверхвысоких доз // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2011, №2, с. 10-15.
5. В.В. Брык, В.Н. Воеводин, А.С. Кальченко, В.В. Мельниченко и др. Распухание дисперсно-упроченной оксидами иттрия стали 0X18H10T, облученной тяжелыми ионами // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2013, №2, с. 23-30.
6. И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, В.Ф. Зеленский. Имитация структурно-фазовой эволюции при помощи ускорителей и радиационное сопротивление материалов для ядерных реакторов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2009, №4, с. 7-16.
7. В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин. *Процессы и установки электронно-ионной технологии*. М.: «Высшая школа», 1988, 255 с.
8. П.А. Литвинов, В.А. Батурин, С.А. Пустовойтов. Разработка и исследование источника ионов металлов для технологических ускорительных установок // *ЖТФ*. 2014, т. 84, №4, с. 126-131.
9. С.А. Пустовойтов, В.А. Батурин, С.А. Ерёмин, А.Ю. Карпенко. Программа для численного моделирования системы извлечения ионного пучка в плазменном источнике ионов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, №4, с. 280-282.
10. T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Ärje. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // *Review of Scientific Instruments*. 2010, v. 81, N02B703.

Статья поступила в редакцию 01.07.2014 г.

ГЕНЕРАЦІЯ ТА ФОРМУВАННЯ ПУЧКІВ МЕТАЛЕВИХ ІОНІВ НА ВИСОКОДОЗНОМУ ІОННОМУ ІМПЛАНТЕРІ

В.А. Батурін, С.О. Єрьомін, С.О. Пустовойтов, П.О. Літвінов, О.Ю. Карпенко, В.І. Мирошніченко

Розроблено установку для високодозної імплантації металевих іонів у діапазоні енергій 20...500 кеВ. Використано газоманетронне джерело іонів металів розпилювального типу. Проведено комп'ютерне моделювання процесів екстракції іонного пучка з плазмової границі джерела іонів та транспортування пучка в іонно-оптичній системі імплантера. Отримано мас-спектри пучків іонів.

GENERATION AND FORMATION OF METAL ION BEAMS ON HIGH-DOSE ION IMPLANTER

V.A. Baturin, S.A. Yeryomin, S.A. Pustovoytov, P.A. Litvinov, A.Yu. Karpenko, V.I. Miroshnichenko

Installation for high-dose implantation of metal ions with energies of 20...500 keV was designed. Gas magnetron metal ion source of sputter type was used. Computer simulation of processes of ion beam extraction from plasma boundary of the ion source and beam transporting in the ion-optic system of the implanter was made. Mass-spectra of ion beams were obtained.