

**В.И. Возный, В.Е. Сторижко, В.И. Мирошниченко,
В.В. Токмань, Е.А. Миронец, Е.А. Батура**

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы

ИОННЫЙ ИНЖЕКТОР ПОЛЕВОГО ТИПА



С целью повышения пространственного разрешения установок с фокусированными ионными пучками разработан ионный инжектор полевого типа. Измерения параметров инжектора проводятся на высоковакуумном стенде с давлением остаточных газов порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Па. Ионный инжектор состоит из газового полевого ионного источника иглы-капиллярного типа, фокусирующей одиночной линзы и компактного фильтра Вина на постоянных магнитах. Конструкция полевого источника предусматривает возможность охлаждения вольфрамовой иглы до температуры жидкого азота. В настоящее время измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) ионного источника, работающего при комнатной температуре. Получен полевой ионный ток $(1-5) \cdot 10^{-12}$ А при напряжении экстракции 2–5 кВ.

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, яркость, газовый полевой ионный источник, эмиссия.

Ускорительные установки, в которых используются фокусированные ионные пучки (ФИП), являются одним из основных инструментов для проведения анализа состава и структуры различных материалов. Установки ФИП широко применяются в полупроводниковой промышленности, материаловедении, литографии, микро- и нанотехнологии. В качестве источников ионов в ФИП-системах обычно используются высокочастотные (ВЧ) источники вследствие их простоты и надежности. Приведенная яркость применяемых ВЧ-источников обычно равна $1-30 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рад}^{-2} \times \text{эВ}^{-1}$ [1], что обеспечивает пространственное разрешение установок на уровне 1 мкм [2]. Приведенная яркость B_p источника определяется как [3]: $B_p = I / (S\Omega E)$, где I – ионный ток, S – площадь зоны эмиссии, E – энергия пучка. В Институте прикладной физики (ИПФ) НАНУ успешно функционирует ФИП-установка – ядерный сканирующий микронзонд,

выполненный на базе электростатического ускорителя Ван де Граафа [4]. Для повышения разрешающей способности микронзонда и перехода в субмикронную область исследований необходимо принять ряд мер, одной из которых является повышение яркости ионного источника. Расчеты показывают, что для повышения пространственного разрешения микронзонда на один порядок необходимо увеличить яркость ионного источника на 2–5 порядков [2, 5]. Единственными источниками, обладающими столь высокой яркостью ($\sim 10^7 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \times \text{рад}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$), являются полевые эмиссионные источники: газовый полевой ионный источник (ГПИИ) и жидкометаллический ионный источник (ЖМИИ) [6]. В настоящее время ЖМИИ широко используются в ускорителях ФИП, но этим источникам присущ такой недостаток, как загрязнение исследуемых образцов ионами ЖМИИ, в частности ионами галлия. Ионы галлия не только изменяют электрические свойства полупроводниковых образцов, но могут также влиять на их магнитные характеристики [8], к тому же проведение не-

© В.И. ВОЗНЫЙ, В.Е. СТОРИЖКО,
В.И. МИРОШНИЧЕНКО, В.В. ТОКМАНЬ,
Е.А. МИРОНЕЦ, Е.А. БАТУРА, 2010

разрушающего элементного анализа на микрозонде методами PIXE, RBS и NRA выполняется на легких ионах с массой не более 4.

Относительно газовых полевых источников ионов следует сказать, что, несмотря на давний к ним интерес [7], надежно работающего источника еще не создано [8]. Основная трудность заключается в том, что для получения высокого ионного тока необходимо подвести достаточно большое количество газа к вершине иглы без повышения давления газа в оптической колонне. Одним из методов решения этой проблемы, который применяется в данной работе, является охлаждение полевого эмиттера до криогенных температур и локальный подвод газа к острию полевого эмиттера. Другой трудностью, возникающей при использовании газового полевого источника в ФИП-ускорителях, является необходимость очень низкого давления остаточного газа в камере полевого источника. При типичном для ФИП-систем вакууме порядка 10^{-4} Па в полевым источнике происходит ионизация молекул не только рабочего газа, но и молекул остаточного газа. В этом случае задача получения пучка ионов нужного сорта может быть решена при использовании филь-

тра Вина, который выделяет из общего пучка необходимые ионы.

Таким образом, возникает необходимость в разработке инжектора легких ионов для использования в установках ФИП. В данной статье представлены предварительные результаты разработки ионного инжектора полевого типа, приведены описания газового полевого ионного источника и высоковакуумного стенда, смонтированного для измерения основных ионнооптических характеристик ионного инжектора.

КОНСТРУКЦИЯ ПОЛЕВОГО ИОННОГО ИНЖЕКТОРА

Ионный инжектор состоит из газового полевого источника, фокусирующей одиночной линзы и компактного фильтра Вина на постоянных магнитах. Общая схема инжектора приведена на рис. 1. Источником ионов является газовый полевой источник игольчато-капиллярного типа, принцип действия которого предложен в работах [10, 11]. В такой конструкции источника полевой эмиттер располагается коаксиально внутри тонкого капилляра. Капилляр применяется для локального ввода рабочего газа в область вершины иглы. При



Рис. 1. Схема полевого инжектора и экспериментального стенда

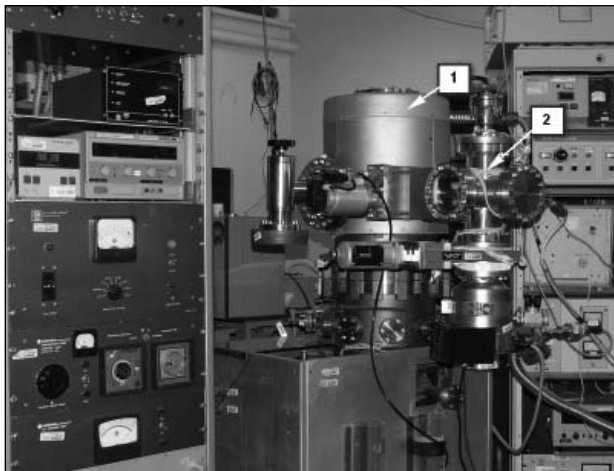


Рис. 2. Внешний вид высоковакуумного стенда полевого ионного инжектора

такой инжекции повышается давление газа вблизи вершины эмиттера и увеличивается ток полевой эмиссии. При этом вакуум в диагностической камере инжектора остается достаточно высоким (10^{-4} Па) для нормальной фокусировки и транспортировки ионного пучка.

Полевым эмиттером служит тонкий вольфрамовый провод диаметром 0,15 мм с очень острым концом (радиус кривизны <100 нм), который образуется в результате электрохимического травления [12]. Эмиттер размещается коаксиально внутри керамического капилляра с внутренним диаметром 0,3 мм. Вершина острия устанавливается в плоскости выходного среза капилляра, откуда газ истекает в вакуумную камеру. Полевой источник собран на стандартном фланце CF-100, присоединяемый к диагностической камере (2) высоковакуумного стенда (рис. 2).

Положительное напряжение 4–20 кВ подводится к острию полевого эмиттера в области высокого вакуума для предотвращения развития тлеющего разряда. Для ограничения тока электрических пробоев по газу, которые могут возникать между эмиттером и вытягивающим электродом, в цепи полевого эмиттера установлено сопротивление 2 ГОм. Вытягивающим электродом, находящимся под нулевым потен-

циалом, является сетчатая диафрагма диаметром 5 мм с размером ячеек 25×25 мкм.

Конструкция полевого источника предусматривает возможность охлаждения вольфрамовой иглы до температуры жидкого азота. Капилляр источника с игольчатым эмиттером механически закреплен на металлическом резервуаре объемом 60 см^3 с жидким азотом. Контроль температуры полевого эмиттера осуществляется с помощью термопары, установленной в основании держателя капилляра. Поскольку капилляр с игольчатым эмиттером находится под высоким напряжением, то для электрической развязки заземленного резервуара и капилляра последний соединяется с резервуаром через лейкосапфировую трубку длиной 10 мм и внешним диаметром 2 мм. При температуре жидкого азота теплопроводность лейкосапфира превышает теплопроводность меди, при этом лейкосапфир остается хорошим изолятором.

Для фокусировки образующегося пучка ионов применяется одиночная линза длиной 25 мм и диаметром крайних и среднего цилиндра 8,5 и 14 мм соответственно. Линза установлена на расстоянии 10 мм от вытягивающего электрода полевого источника. Оба крайних цилиндра линзы заземлены, а на средний электрод подается положительное фокусирующее высокое напряжение.

Компактный фильтр Вина выполнен на постоянных магнитах Nd-Fe-B, имеет диаметр 60 мм и длину 20 мм. Зазор между разноименными полюсами магнитов равен 14 мм, при этом магнитное поле в зазоре равно 0,2 Тл. Электростатические пластины фильтра Вина имеют размер 16×8 мм и установлены на расстоянии 10 мм друг от друга. Для выделения ионов в диапазоне $\text{H}^+ - \text{Ag}^+$ к пластинам фильтра необходимо приложить напряжение от 1500 до 250 В соответственно.

Стенд полевого ионного инжектора состоит из прогреваемой высоковакуумной системы 1 Varian VT-102 объемом ~ 100 л и диагностической вакуумной камеры 2 объемом ~ 5 л

(рис. 2). Все вакуумные соединения в камерах выполнены в стандарте «конфлат» с медными уплотнениями. В камере вакуумной системы 1 установлены магниторазрядный триодный насос IZ 230 Varian со скоростью откачки 220 л/с и сублимационный титановый насос VT 922 Varian (скорость откачки 800 л/с), обеспечивающие вакуум в системе порядка 10^{-8} Па. Полевой ионный инжектор установлен в диагностической камере 2, которая присоединяется к вакуумной системе через шиббер VAT CF-100. Начальный вакуум в этой камере обеспечивается турбомолекулярным насосом Turbovac 361 Leybold со скоростью откачки 360 л/с. После прогрева камер до 150°C и откачки в течение нескольких суток в камере ионного инжектора достигается вакуум $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ Па.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего была проверена работоспособность газового полевого источника. Для того чтобы убедиться, что механизмом ионизации является полевая ионизация и ионы образуются в области вершины иглы, была проведена визуализация ионного пучка. Источник работал на остаточном воздухе при давлении $3 \cdot 10^{-4}$ Па. Для усиления малого ионного тока (10^{-12} А) применялся вторично-электронный умножитель с коэффициентом усиления 10^6 ($U_{MCP} = 1,95$ кВ). Умножитель ВЭУ-7 с люминесцентным экраном устанавливался сразу за ионным источником, и на экране наблюдалось изображение тени вытягивающей сеточной диафрагмы. На полевой эмиттер подавалось как отрицательное, так и положительное напряжения, и ионный источник работал в режиме электронной или ионной эмиссии. Было установлено, что отношение напряжений ионной и электронной эмиссии приблизительно равно 5 для воздуха. Эта величина находится в хорошем согласии с известными результатами полевой ионной микроскопии [13], что подтверждает полевой механизм ионизации молекул газа вблизи вершины эмиттера.

Были измерены ВАХ нескольких полевых игольчатых эмиттеров. Ионный ток измерялся цилиндром Фарадея, сигнал с которого поступал на пикоамперметр «Keithley-6485» и на компьютер. Цилиндр Фарадея располагался на расстоянии 5 мм от источника. Измерения показали, что форма зависимости ионного тока I от ионизирующего напряжения U имеет два отчетливых участка: крутой участок, соответствующий малым напряжениям, описывается степенной функцией $I = 3,8 \cdot 10^{-10} U^{30}$, а пологий участок, отвечающий рабочим напряжениям, хорошо описывается функцией $I = 0,05 + 5 \cdot 10^{-3} U^3$. Такая форма ВАХ является типичной для процессов полевой ионизации различных газов [14], что также подтверждает механизм полевой ионизации газа в ионном источнике.

При измерении ионного тока полевого источника было установлено, что ток равен $(1-5) \cdot 10^{-12}$ А в зависимости от изготовления полевого эмиттера. Временная нестабильность тока, вызванная присутствием в рабочем газе молекул других газов, не превышает 4 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстрое развитие микро- и нанотехнологий требует повышения разрешающей способности установок ФИП и перехода в субмикронную область исследований. С этой целью в ИПФ НАН Украины разработан ионный инжектор на основе газового полевого источника ионов. Измерения параметров инжектора проводятся на высоковакуумном стенде с давлением остаточных газов на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ Па. В настоящее время проведены эксперименты по извлечению ионного тока из полевого источника ионов, работающего при комнатной температуре. Получен полевой ток на уровне $(1-5) \cdot 10^{-12}$ А при напряжении экстракции 2–5 кВ. Стабильный ионный ток с временными флуктуациями $< 4\%$ наблюдался в течение нескольких дней. Для получения полной характеристики ионного инжектора необходимо провести дальнейшие эксперименты по из-

меренню тока пучка при охлаждении полевого эмиттера до температуры жидкого азота, а также измерить массовый состав пучка.

Робота виконана в рамках Програми научного приборостроєння НАН України, тема № 371-07.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Szymanski R., Jamieson D.N.* Ion source brightness and nuclear microprobe applications // Nucl. Instrum. Meth. B. — 1997. — V.130. — P. 80–85.
2. *Jamieson D.N.* New generation nuclear microprobe systems // 7 Intern. Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications. — France. 10 September. 2000. — MF-01. — P. 1–16.
3. *Lejeune C. and Aubert J.* Emittance and brightness: definitions and measurements. Advances in Electronics and Electron Physics. — part 13A. — Septier: New York, 1980. — P. 159–259.
4. *Storizhko V.E., Ponomarev A.G. et al.* The Sumy scanning nuclear microprobe: Design features and first tests // Nucl. Instrum. Meth. B. — 2007. — V. 260. — P. 49–54.
5. *Legge G.J.F., Moloney G.R., Colman R.A. and Allan G.L.* High velocity ion microprobes and their source requirements // Rev. Sci. Instrum. — 1996. — V. 67. — No. 3. — P. 909–914.
6. *Bell A.E., Jousten K. and Swanson L.W.* High-field ion sources // Rev. Sci. Instrum. — 1990. — V. 61. — No.1. — P. 363–365.
7. *Orloff J.H. and Swanson L.W.* Study of a field-ionization source for microprobe applications // J. Vac. Sci. Technol. — 1975. — V. 12. — P. 1209–1213.
8. *Tondare V.N.* Quest for high brightness, monochromatic noble gas ion sources // J. Vac. Sci. Technol. A. — 2005. — V. 23. — No. 6. — P. 1498–1508.
9. *Edinger K., Yun V., Melngailis J., Orloff J., Magera G.* Development of a high brightness gas field ion source // J. Vac. Sci. Technol. B. — 1997. — V. 15. — No. 6. — P. 2365–2368.
10. *Konishi M., Takizawa M. and Tsumori T.* Characteristics of a helium field ion gun // J. Vac. Sci. Technol. B. — 1988. — V. 6. — P. 498–501.
11. *Salancon E., Hammadi Z., Morin R.* A new approach to gas field ion sources // Ultramicroscopy. — 2003. — V. 95. — P. 183–188.
12. *Mikhailovskij I.M., Wanderka N., Storizhko V. et al.* A new approach for explanation of specimen rupture under

high electric field // Ultramicroscopy. — 2009. — V. 109. — P. 480–485.

13. *Muller E.W., Tsong T.T.* Field Ion Microscopy, Principles and Applications. — Elsevier: New York, 1969. — P. 314.
14. *Король Э.Н., Лобанов В.В., Назаренко В.А., Покровский В.А.* Физические основы полевой масс-спектрометрии. — К.: Наук. думка, 1978. — С. 195.

*В.І. Возний, В.Є. Сторіжко, В.І. Мирошніченко,
В.В. Токмань, Є.А. Міронець, Є.О. Батура*

ІОННИЙ ІНЖЕКТОР ПОЛЬОВОГО ТИПУ

З метою підвищення роздільної здатності установок з фокусованими іонними пучками розроблено іонний інжектор польового типу. Вимірювання параметрів інжектора проводяться на високовакуумному стенді з тиском залишкових газів на рівні $5 \cdot 10^{-7}$ Па. Іонний інжектор складається з газового польового іонного джерела голчато-капілярного типу, фокусної одиночної лінзи та компактного фільтра Віна на постійних магнітах. Конструкція польового джерела передбачає можливість охолодження вольфрамової голки до температури рідкого азоту. В даний час виміряні ВАХ іонного джерела, що працює при кімнатній температурі. Отримано польовий іонний струм $(1-5) \cdot 10^{-12}$ А при напрузі екстракції 2–5 кВ.

Ключові слова: фокусований пучок іонів, яскравість, газове польове іонне джерело, емісія.

*V. Voznyi, V. Storizhko, V. Miroshnichenko,
V. Tokman, E. Mironets, E. Batura*

FIELD TYPE ION INJECTOR

To improve the spatial resolution of FIB systems, field type ion injector has been developed. Measurements of the injector parameters are performed on the high-vacuum stand with a residual pressure about $5 \cdot 10^{-7}$ Pa. Ion injector consists of a needle-in-capillary type gas field ion source, focusing einzel lens and compact Wien filter with permanent magnets. The field ion source design provides the possibility of cooling the tungsten needle to a liquid nitrogen temperature. Current-voltage characteristics of the ion source operating at room temperature have been measured. Ion field emission current up to $(1-5) \cdot 10^{-12}$ A at 2–5 kV emission voltage is obtained.

Key words: focused ion beam, brightness, gas field ion source, emission.

Надійшла до редакції 18.06.10