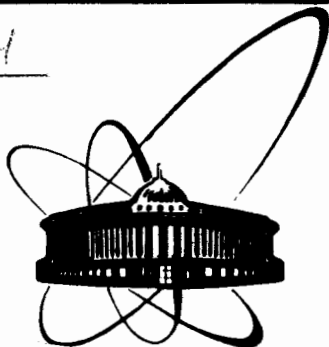


83-288

СЗБН



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4091/83

13-83-288

А.Лятушински, Д.Мончка, Ю.В.Юшкевич

КОМБИНИРОВАННЫЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Направлено в "ЖТФ"

1983

ВВЕДЕНИЕ

Результаты, получаемые в процессе ионного разделения или имплантации, в значительной мере зависят от конструкции ионных источников и условий их работы. Существующие публикации ^{/1,2/} показывают, что разработанные ионные источники недостаточно универсальны, т.е. обеспечивают возможность получения необходимых ионных пучков только некоторых химических элементов. Это подтверждается постоянным совершенствованием существующих типов ионных источников и созданием новых конструкций.

В данной работе описан новый источник, предназначенный для получения пучков ионов различных химических элементов. Конструкция источника представляет собой комбинацию термоионизационного источника и полого катода ^{/3,4,9/}.

В предлагаемой работе, кроме самой конструкции, дана упрощенная теория, описывающая принцип действия источника. Представлены также некоторые его характеристики.

1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКА

Устройство ионного источника и схема его электрического питания приводятся на рис.1. Основной частью прибора является цилиндрическая разрядная камера К, выполненная из тантала, которая в дуговом разряде выполняет роль катода. Обогрев камеры осуществляется бомбардировкой электронами, эмитируемыми вольфрамовой спиралью. При нагреве камеры до высокой температуры из ее внутренних стенок также эмитируются электроны, которые ускоряются электрическим полем между камерой и анодом А, изготовленным из танталовой трубки, и ионизируют рабочее вещество, поступающее в разрядную камеру. Полученная плазма занимает практически весь объем разрядной камеры. Образовавшиеся ионы вытягиваются электрическим полем через отверстие $E/\phi \approx 0,5$ мм/. При работе источника образуется определенный градиент температуры: перемещающаяся трубка Т, в которой находится рабочее вещество, можно регулировать температуру камеры испарения.

В данном источнике для получения ионов можно также использовать эффект термоионизации. Этот способ дает хороший результат при использовании химических элементов с относительно малым потенциалом ионизации. В таком варианте анод А и камера К находятся под одним потенциалом, а ионизация происходит в результате столкновений атомов рабочего вещества с горячей поверхностью источника.

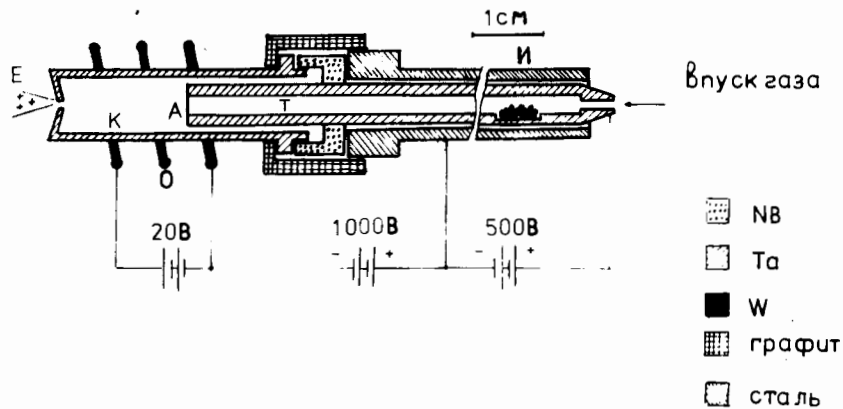


Рис.1. Схема ионного источника. К - разрядная камера /катод/, А - анод, Т - трубка для ввода рабочего вещества, О - вольфрамовая спираль, И - испаритель рабочего вещества, Е - отверстие для извлечения ионов.

2. ПРОЦЕСС ИОНИЗАЦИИ В ИСТОЧНИКЕ

а/ Ионизация в дуговом разряде

Электроны, эмитируемые с горячей поверхности, ионизируют атомы рабочего вещества, находящиеся в разрядной камере. Если давление паров в камере выше $p_{\text{мин.}}^{1/5}$, то образующаяся плазма занимает практически весь объем камеры. Только вблизи катода образуется тонкий слой объемного биполярного заряда, в котором локализовано почти все разрядное напряжение. Электроны, проходя этот слой, попадают в объем плазмы, где они ионизируют атомы. Пройдя плазму, электроны отражаются тормозящим полем слоя и снова ускоряются к центру объема плазмы. Иными словами, электроны могут осциллировать в объеме плазмы до тех пор, пока в результате столкновений не потеряют свою кинетическую энергию.

Примем, что объем плазмы равен объему камеры, разряд стабилен, то есть $p > p_{\text{мин.}}$, и экстракция ионов не влияет на процесс разряда. Введем также ряд допущений:

а/ электроны в плазме находятся в термическом равновесии и имеют температуру T_e ;

б/ при взаимодействии электронов с атомами образуются только положительные однозарядные ионы и электроны;

в/ вероятность ионизации возбужденных атомов мала.

Пусть N - количество атомов, подаваемых в единицу времени в разрядную камеру. Количество образующихся ионов

$$\frac{dn^+}{dt} = NQ, \quad /1/$$

где Q - вероятность ионизации

$$Q = 1 - \exp(-n_e \kappa t). \quad /2/$$

Здесь n_e - концентрация электронов в разряде; t - время пребывания атома в разряде; κ - коэффициент ионизации, который описывается выражением:

$$\kappa = \int v_e f(v_e) \sigma(v_e) dv_e, \quad /3/$$

где $f(v_e)$ - функция распределения скоростей электронов; $\sigma(v_e)$ - сечение ионизации атомов электронами.

Решение уравнения /1/ для заданной геометрии источника и максвелловского распределения скоростей атомов имеет вид:

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{3}{2} \pi r b n_0 \sqrt{\frac{2kT_g}{m}} R a, \quad /4/$$

где

$$R = 2r n_e \kappa \sqrt{\frac{m}{2kT_g}}; \quad /5/$$

r - радиус камеры источника; b - длина камеры источника; n_0 - концентрация нейтральных атомов; T_g - температура источника; m - масса атома рабочего вещества; a - коэффициент, учитывающий уменьшение концентрации нейтральных атомов в результате их ионизации.

В уравнении /4/ следует обратить внимание на параметр ионизации R . Этот безразмерный параметр главным образом определяет степень ионизации в объеме камеры. Чтобы определить плотность ионов в плазме, принимаем, что потери ионов равны количеству вновь образовавшихся ионов в объеме разряда. Потери ионов за счет рекомбинации невелики, так как при используемом давлении и плотности тока разряда число ионизируемых атомов намного больше числа столкновений, приводящих к рекомбинации^{/8/}. Существенным фактором потерь ионов является их диффузия из объема плазмы к стенкам разрядной камеры. Потери ионов определяются формулой:

$$-\frac{dn^+}{dt} = \frac{n^+}{4} \sqrt{\frac{kT_e}{m}} \pi r (r + 2b). \quad /6/$$

Сравнивая выражения /4/ и /6/ и учитывая диффузию ионов через мениск плазмы вблизи экстракционного отверстия источника, получаем, что ионный ток, извлекаемый из него:

$$I^+ = \frac{3rb}{r+2b} n_0 n_e e \kappa a S_M, \quad /7/$$

где S_M - площадь мениска плазмы вблизи экстракционного отверстия. Другой фактор, характеризующий ионный источник, а именно, его эффективность /отношение числа извлеченных ионов к числу всех атомов рабочего вещества/ выражается следующим образом:

$$\eta = \left(\frac{2\pi m}{kT_g} \right)^{1/2} \cdot \frac{I^+}{en_0 S_0}, \quad /8/$$

где S_0 - площадь экстракционного отверстия. Приведенные формулы /7/ и /8/ дают возможность оценить влияние разных параметров на условия работы ионного источника. Однако их использование для точного определения I^+ и η затруднено, так как некоторые параметры плазмы неизвестны /например, κ /, а другие трудно измерить /например, S_M /. Поэтому мы даем только качественное описание характеристик ионного источника.

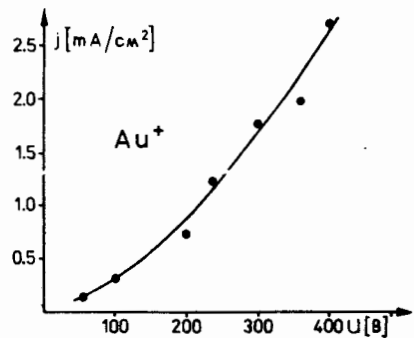


Рис.2. Зависимость плотности тока ионов Au^+ от напряжения разряда.

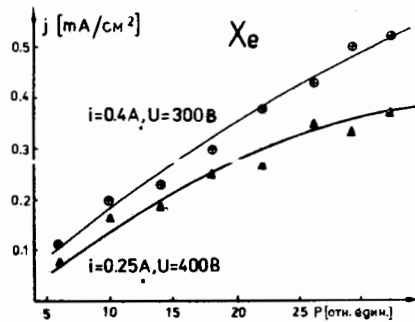


Рис.3. Зависимость плотности тока ионов Xe^+ от давления в источнике.

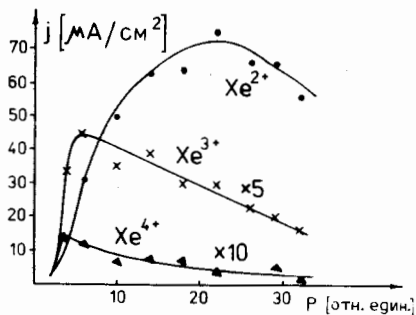


Рис.4. Зависимость плотности тока многозарядных ионов Xe от давления в источнике.

На рис.2 представлена зависимость плотности ионного тока Au^+ от напряжения разряда. Несоответствие зависимости сечения ионизации от энергии первичных электронов свидетельствует о том, что в образование ионов Au^+ существенный вклад вносят также столкновения с вторичными электронами. Только тогда коэффициент ионизации κ имеет максимум при других, более высоких напряжениях разряда, чем те, что использовались в эксперименте. На рис.3 показана зависимость плотности ионного тока Xe^+ от давления в камере источника. Согласно формуле /7/, эта зависимость должна быть в первом приближении линейна, что и показывают экспериментальные данные. Другой вид имеют зависимости плотности токов многозарядных ионов Xe от давления в камере /рис.4/. Вначале, при низких давлениях, плотность тока возрастает, затем, с ростом давления, начинает спадать из-за ионных потерь, обусловленных процессом перезарядки ионов.

б/ Поверхностная термоионизация

На рис.5 показана температура камеры ионного источника при различных мощностях токов электронной бомбардировки. Эти диаграммы характеризуют работу ионного источника в режиме поверхностной термоионизации, то есть тогда, когда в камере нет разряда. Образование ионов происходит при столкновениях атомов с горячей

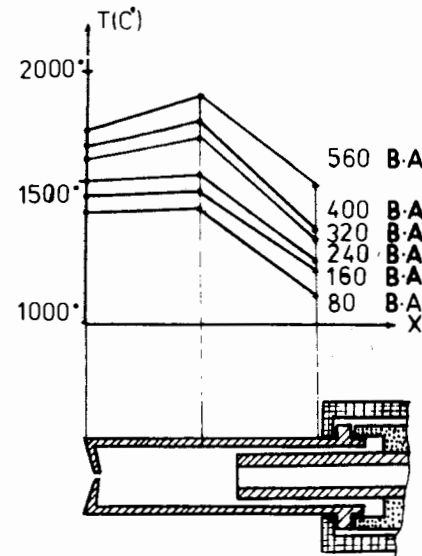


Рис.5. Распределение температуры вдоль источника при различных мощностях электронной бомбардировки.

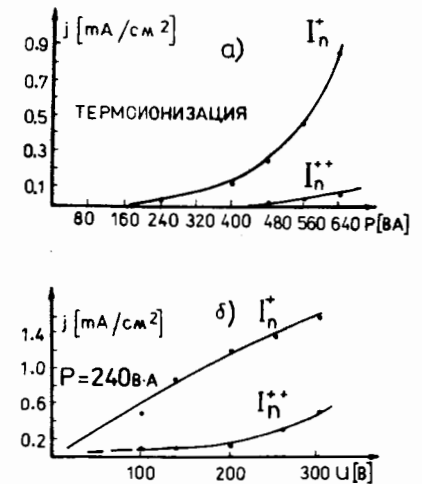


Рис.6. Зависимость плотности токов ионов In^+ и In^{2+} : а/ от мощности электронной бомбардировки; б/ от напряжения разряда.

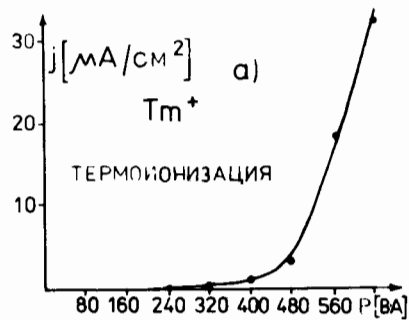


Рис.7. Зависимость плотности тока ионов Tm^+ : а/ от мощности электронной бомбардировки; б/ от напряжения разряда.

поверхностью камеры источника. Аналогичный тип источника разработан Байером^{/3/} и Джонсоном^{/4/}. Теоретические и экспериментальные исследования процессов, происходящих в источнике данного типа, описаны в ряде работ^{/8,9/}. В этих работах показано, что ионный ток, извлекаемый из такого источника, в первом приближении выражается формулой:

$$I^+ = \frac{AT^2}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{m_e}{m}} \cdot S_0 \cdot \exp\left(\frac{V_u^*}{kT}\right), /9/$$

где $V_u^* = V_u - k \cdot T \cdot \ln A$ - скорректированная величина 1-го потенциала ионизации, V_u - 1-й потенциал ионизации, A - соотношение статистических весов ионного и атомного состояний элемента, k - постоянная Больцмана, T - температура ионного источника, которая зависит от прилагаемой мощности.

На рис.6а и 7а представлена типичная зависимость плотности ионных токов Ip и Tm , извлекаемых из источника, от прилагаемой мощности. Характер кривых согласуется с формулой /9/. Интенсивность этих токов может быть значительно увеличена при наличии в камере дугового разряда /рис.6б и 7б/, потребляемая мощность при этом увеличивается всего на 30 В·А. Кривые показывают, что для Ip и Tm данный режим работы источника более предпочтителен. Однако при использовании химических элементов, имеющих относительно низкий потенциал ионизации, например, К и Na, наблюдается снижение ионных токов, когда в камере источника происходит дуговой разряд.

3. ВЫВОДЫ

Описанный ионный источник используется в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и в Институте физики Люблинского университета/в рамках темы MR -1.5/ для получения моноизотопных образцов при спектроскопических исследованиях, для имплантаций в полупроводники, а также для получения поверхностных контактных слоев.

Характерной чертой источника является его универсальность, он позволяет получать с относительно высокой эффективностью ионы широкого круга химических элементов, значительно отличающихся между собой физико-химическими свойствами, например, Au, В, Al, He, Ne, Xe, Li, Ga, Cu, Ag, Ta, In, Hg, Pb, Mo. Это стало возможным благодаря конструкции источника, которая позволяет выбрать более эффективный способ ионизации определенного химического элемента, а именно - электронным ударом, поверхностной термоионизацией или и тем и другим вместе. Источник позволяет достигать высоких температур /до 3000 К/ при хорошей герметизации, что ведет к уменьшению потерь ионов рабочего вещества за счет конденсации /это особенно важно при работе с тугоплавкими элементами/.

В некоторых случаях для источника характерна малая потребляемая электрическая мощность, например, при работе с газами; можно совсем убрать нагрев камеры электронной бомбардировки, тогда ионный источник потребляет мощность всего 20 В·А /40 В; 0,5 А/. Такой режим работы удобен при длительных экспозициях, порядка нескольких десятков часов. Эти факты свидетельствуют о возможности применения данного источника в системе "он-лайн" при изучении короткоживущих радиоактивных нуклидов и на имплантатах ионов.

Некоторым недостатком работы источника является возможность возникновения большого локального тока электронной бомбардировки, что приводит к выходу разрядной камеры из строя. Поэтому авторы планируют замену обогрева камеры электронной бомбардировки прямым нагревом электрическим током.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. of the Third Inter.Conf. on Ion Implantation Equipment and Techniques, Kingston, Nucl.Instrum. and Methods, 1981, v. 189.
2. Proc. of the 10th Inter.Conf. on EMIS, Zinal., Nucl.Instrum. and Methods, 1981, v. 186.
3. Sidenius G., Proc.Inter.Conf. on EMIS, Marburg, F.R.G., 1970, p. 423.
4. Beyer G. et al. Nucl.Instrum. and Methods, 1971, v. 96, p. 437.
5. Koch J. et al. Electromagnetic isotope separators and applications of electromagnetically enriched isotopes, North-Holland Publ.Co.Amsterdam, 1958.
6. Johnson P.G., Bolson A., Henderson C.M. Nucl.Instrum. and Methods, 1973, v. 106, p. 83.
7. Latuszynski A., Raiko V.I. Nucl.Instrum. and Methods, 1975, v. 125, p. 61.

8. Афанасьев В.П., Обухов В.А., Райко В.Ю. ОИЯИ, Р6-10031, Дубна, 1976.
9. Bystrov V.A. et al. JINR, E13-6672, Dubna, 1972.

Лятушински А., Мончка Д., Юшкевич Ю.В. 13-83-288
Комбинированный ионный источник

Описаны конструкция и принцип действия нового ионного источника, представляющего собой комбинацию термоионизационного источника и полого катода. С его помощью получены ионы широкого круга химических элементов, значительно отличающихся между собой физико-химическими свойствами. Разработана упрощенная модель действия источника, а также приведены некоторые его характеристики.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Latuszynski A., Mażka D., Yushkevich Yu.V. 13-83-288
Combined Ion Source

A new ion source has been developed for the production of ions of species with various chemical and physical properties. The source construction represents the combination both the surface ionization source and the hollow-cathode source. A simple theoretical model of the source operation is described. A limited review of the source characteristics is also given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 мая 1983 года.