

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННЫХ РАЗРЯДОВ

В.А. Никитинский, Б.И. Журавлев

Рубежанский филиал Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля, Рубежное, Украина
E-mail: contact@rfvnu.lg.ua

Разработаны источники ионов, предназначенные для ионнолучевых технологий в вакууме и обеспечивающие ускоренные пучки ионов с токами до 0,6 А и энергиями до 5 кэВ с равномерным распределением плотности тока ионов в поперечном сечении пучков площадями от 10^{-4} до $0,2 \text{ м}^2$.

Уникальные возможности ионнолучевых технологий в вакууме: избирательное распыление при изготовлении микросхем, фильтров ПАВ, ионная очистка ситалловых и поликорковых подложек перед напылением пленок, ионное распыление с целью подгонки сопротивлений тонкопленочных резисторов, регенерация подложек с повторным использованием, точная доводка поверхностей зеркал, дозирование содержания кислорода в сложных соединениях (оксиды титана, сверхпроводящие пленки), модификация поверхностных свойств материалов и др., – стимулируют работы по созданию и усовершенствованию оборудования для этих целей. Наиболее ответственным

требуемых энергий потоки ионов заданного поперечного сечения с равномерным распределением плотности тока по сечению. Выходные параметры источника ионов определяются типом разряда, генерирующего плазму, из которой производится отбор ионов. Для повышения эффективности генерации заряженных частиц в плазмотронах применяется контрагирование разряда отверстием в промежуточном электроде, что позволяет разделить область интенсивной генерации плазмы с более высоким давлением и область формирования эмиссионной границы с низким давлением. Двойной электрический слой (ДЭС), образующийся с катодной стороны контрагирования разряда между

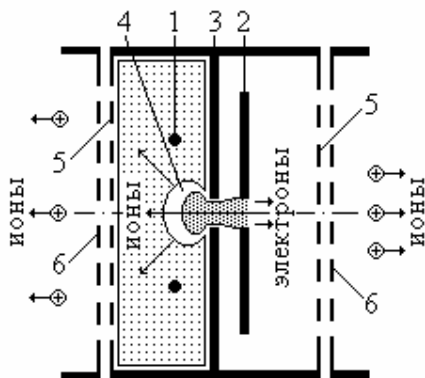


Рис. 1 Сравнение отбора ионов с катодной и анодной сторон контрагированного разряда
1 - термокатод, 2 - анод, 3 - промежуточный электрод, 4 - ДЭС, 5 и 6 - система извлечения

звеном такого оборудования, определяющего технико-экономические параметры, являются источники ионов, обеспечивающие ускоренные до

плотной анодной и редкой катодной плазмами (рис.1), создает ускоренные в противоположные стороны потоки электронов и ионов.

В плазматронах Арденне [1] используется амбиполярная диффузия ионов в направлении ускоренного потока электронов и отбор ионов производится с анодной стороны ДЭС. До настоящего времени параметры

рабочего газа (аргона) в обоих случаях производился со стороны, противоположной отбору ионов. Введение магнитного поля с радиальной составляющей относительно оси контрагирования увеличивает

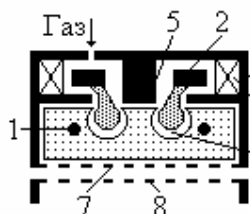


Рис. 2 Схема источника ионов на основе разряда в скрещенных полях
1 - термокатод, 2 - анод, 3 - промежуточный электрод, 4 - катушка, 5 - стержень, 6 - ДЭС, 7 и 8 - система извлечения

высоковольтных пучков ионов, формируемых в дуоплазматронах Арденне через одно эмиссионное отверстие, являются уникальными. Для технологических источников ионных пучков большой площади поперечного сечения требуемая энергия не превышает 5 кэВ и для получения интенсивных пучков ионов используются многоапертурные системы извлечения ионов, образованные эмиссионным 5 и ускоряющим 6 электродами (рис. 1). Фокусировка электронов двойным электрическим слоем в направлении контрагирования разряда является недостатком, т.к. приводит к большой неравномерности распределения плотности плазмы по радиусу и соответственно на обрабатываемой поверхности. Целесообразно использовать расфокусированный в ДЭС поток ионов при их отборе и формировании в пучек с катодной стороны контрагирования разряда.

напряжение дугового разряда и приводит к увеличению на порядок тока эмиссии ионов в обоих случаях.

При отборе ионов с катодной стороны контрагирования разряда введение со стороны анода 2 ферромагнитного стержня 5 в контрагирующее отверстие приводит к образованию кольцевой контрагирующей щели (рис. 2). При этом индукцию магнитного поля в области контрагирования можно уменьшить на порядок по сравнению с дуоплазматронами до величин $\sim 0,1$ Тл и увеличить напряжение на разряде U_p до величин порядка 100 В, а также увеличить ток эмиссии ионов в несколько раз [3,4]. Увеличение индукции магнитного поля более 0,2 Тл (до 0,4 Тл), а также подбором геометрии щели (ширина 2 мм при среднем диаметре 12 мм) и катодной полости (диаметр более 80 мм и высота более 50 мм) позволили исключить термокатод и реализовать разряд с холодным полым

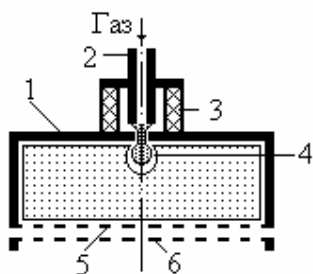


Рис. 3 Схема источника ионов на основе ППР
1 - катод, 2 - анод, 3 - изолятор, 4 - ДЭС, 5 и 6 - система извлечения

Сравнение эффективности отбора ионов с катодной и анодной сторон при геометрическом контрагировании разряда (рис. 1) показало, что она примерно одинакова [2]. Напуск

катодом за счет двухкаскадного последовательного объемного размножения электронов [5 ÷ 8] при разрядных токе $I_p \sim 1$ А и напряжении $U_p \sim 300$ В (схема источника на рис 2,

термокатод 1 отсутствует, а промежуточный электрод находится под потенциалом катода).

Реализован и исследован пучково-плазменный разряд (ППР), контрагированный отверстием в холодном полом катоде, при $I_p \sim 1$ А и напряжении $U_p \sim 400$ В (рис. 3) [9,10]. В этом разряде также имеет место двухкаскадное последовательное объемное размножение электронов.

Параллельно с источниками ионов разрабатывались сварочные электронные пушки на основе дугового контрагированного разряда с холодным магниевым катодом [11] и горячим самокалящимся капиллярным полым катодом с LaB_6 [12, 13]. Отбор электронов производился с анодной стороны контрагирования разряда.

Используя накопленный опыт экспериментальных и теоретических исследований разрядов была разработана базовая конструкция разрядной камеры для получения интенсивных пучков ионов и электронов большого поперечного сечения различной формы (круг, прямоугольник, эллипс [14]).

Разделение разряда на 3 части [15], сообщающиеся между собой через контрагирующие отверстия в промежуточном электроде (рис. 4) с напуском газа в герметизированную камеру с катодом 2 и в другую герметизированную камеру с анодом 3, – позволяет поддерживать разряд через вакуумный объем, ограниченный промежуточным электродом, при давлениях порядка $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па ($\sim 5 \cdot 10^{-5}$

мм рт.ст.), благодаря созданию синтезированной плазмы 4 из ускоренных двойными электрическими слоями потоков электронов из катодной и ионов из анодной камер, что позволяет при том же разрядном токе удвоить ток эмиссии ионов. При размещении катодной и анодной камер с одной стороны, противоположной общему многоапертурному эмиссионному электроду 5, возможно обеспечение пучков произвольной формы поперечного сечения с равномерным распределением плотности тока ионов по сечению за счет увеличения числа анодных камер. На рис. 5 схематически представлена конструкция источника ионов на основе дугового контрагированного разряда [15,16]. Разрядная камера включает катодный и анодный узлы, расположенные по одну сторону от промежуточного электрода 1, что облегчает охлаждение электродов и подключение их к источнику питания.

Основным узлом, определяющим работоспособность источника ионов, является катодный. Сравнение двух катодов: горячего молибденового катода с капиллярным каналом диаметром 0,2 мм, внешним диаметром 3 мм и внутренней полостью диаметром 2 мм с расположенной в ней крошкой из гексаборида лантана и холодного магниевового катода с пленкой окиси на его поверхности, – показало, что для разборных технологических вакуумных установок магниевый катод проще в изготовлении, дешевле и удобнее в эксплуатации.

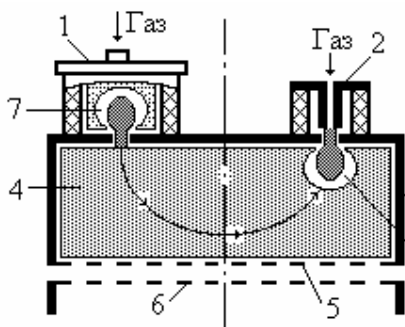


Рис. 4 Схема источника ионов с разворотом разряда на 180
1 - катод, 2 - анод, 3 - промежуточный электрод, 4 - ДЭС, 5 - синтезированная плазма, 6 и 7 - система извлечения

Катодный узел (электроды 1÷4) с магниевым катодом 2 закреплен в держателе катода 3. Тонкая пленка окиси на поверхности магниевго катода способствует инициированию катодного пятна при ее пробое. Работа

атмосферой или кислородным баллоном.

Низкий стартовый ток самостоятельной дуги (порядка 1 А), такой же по величине как и в случае с горячим капиллярным катодом,

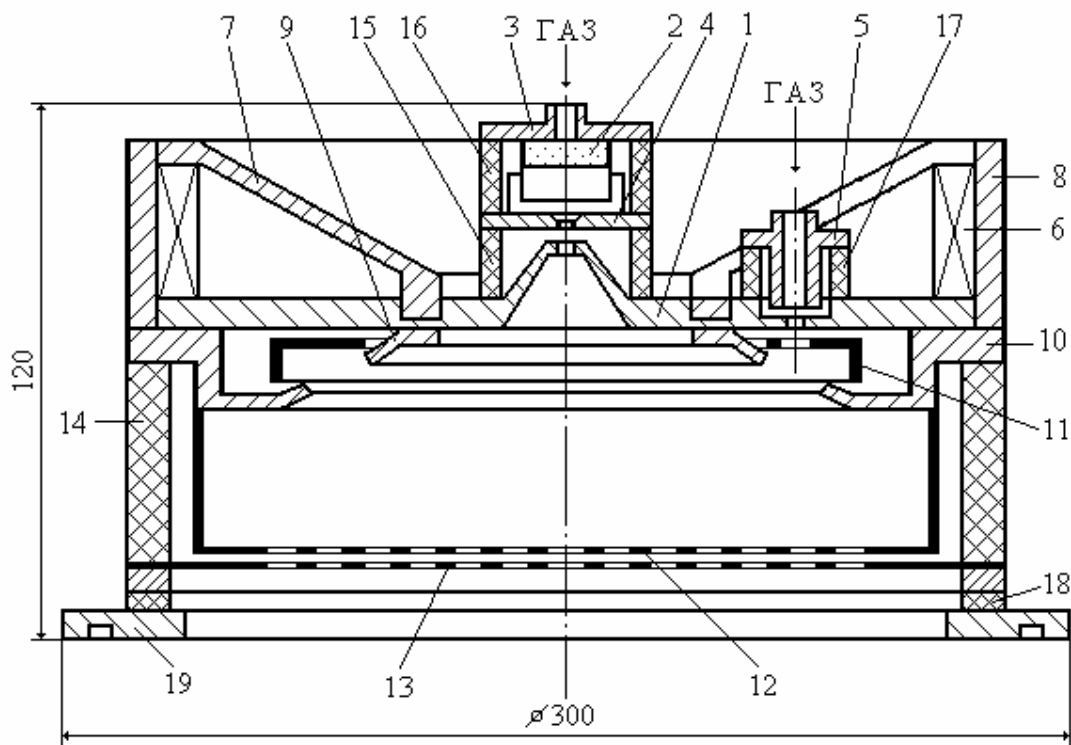


Рис. 5 Конструкция источника ионов

1-промежуточный электрод, 2-катод, 3-держатель катода, 4-поджигающий анод, 5-аноды, 6-катушка, 7 и 8-магнитопроводы, 9 и 10-полюса электромагнита, 11-анодное кольцо, 12-эмиссионный электрод, 13-ускоряющий электрод, 14+18-изоляторы, 19-фланец

катода на инертном газе (аргон) за несколько десятков минут приводит к очистке катода от пленки окиси и дуга гаснет. Для регенерации пленки окиси магния в режиме постоянного дугового разряда в катодный узел подается смесь аргона с кислородом в соотношении 9:1. Увеличение процентного содержания кислорода приводит к возникновению на рабочей поверхности катода толстых окисных образований и кратеров, что в свою очередь вызывает нестабильность тока дуги и разрушение катода в виде отдельных макрочастиц. Практическая подготовка смеси газов в устройстве осуществлялась с помощью калиброванной течи из пористого никеля, которая сообщалась с

реализуется на холодном катоде только на магнии, что вероятно обусловлено небольшой разницей между температурами плавления и кипения магния.

Катодный узел автономно обеспечивает поток электронов в вакуум с током от 1 до 10 А с энергией порядка 20 эВ следующим образом.

После подачи рабочего вещества и напряжения от блока питания разряда сначала зажигается самостоятельный дуговой разряд с катодным пятном между катодом 2 и поджигающим электродом 4. Из-за ограничения тока балластным сопротивлением в цепи электрода 4 разряд через контрагирующее отверстие диаметром

1,5 мм в этом электроде перебрасывается на электрод 1. Электрический слой, образующийся с катодной стороны контрагирующего отверстия, ускоряет и фокусирует электроны в выходное отверстие в электроде 1. Фиксация анодной части дуги контрагирующим отверстием обеспечивает постоянство потока электронов в вакуум независимо от положения катодного пятна [17].

Для генерации направленных в вакуум потоков ионов в промежуточном электроде 1 имеется несколько контрагирующих отверстий и против них соосно устанавливаются анодные узлы, включающие аноды 5 и изоляторы 17. Ограничение тока в цепи промежуточного электрода балластным сопротивлением перебрасывает разряд на аноды 5. Против анодов образуются сгустки плазмы, диаметром порядка 10 мм, отделенные от синтезированной в вакууме плазмы электрическими слоями. Генерация частиц в сгустках обусловлена пучково-плазменными взаимодействиями электронов, ускоренных в слое [9]. Ионы, ускоренные в слоях до энергий порядка 10 эВ поступают в вакуум расходящимися потоками. Из катодного узла через выходное отверстие в вакуум также поступают ионы вслед за электронами за счет амбиполярной диффузии. Расположение анодов 5 вокруг катодного узла и их число определяется технологическими условиями. Для получения равномерной плотности потока против катодного узла в вакууме ставится специальный экран (на рисунке не показан).

Для повышения степени ионизации атомов и энергии ионов, ускоренных электрическими слоями из плотной плазмы у анодов, вводится радиальное магнитное поле с помощью ферромагнитных полюсов 9 и 10, катушки 6 и магнитопроводов 7 и 8 или введением ферромагнитного стержня в каждый анод. В этом случае электрод 1 выполняется из немагнитного металла. Кольцо 11, имеющее потенциал анодов,

служит для организации замкнутого дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Расположение между разрядом и обрабатываемыми изделиями многоапертурной системы извлечения (эмиссионный 12 и ускоряющий 13 электроды) позволяет формировать потоки ионов или электронов с большим поперечным сечением и энергиями в несколько килоэлектронвольт [16]. Эмиссионный электрод 12 располагается в вакууме с противоположной стороны от промежуточного электрода 1.

После зажигания разряда в камере у эмиссионного электрода образуется синтезированная плазма, из которой при подаче напряжения между ускоряющим 13 и эмиссионным 12 электродами производится отбор соответствующего типа частиц (ионов или электронов) и формирование их в пучок. Данный источник позволяет получать пучки ионов любых газов, включая кислород, пары ацетона. При использовании плоской системы извлечения (электроды 12 и 13), получены пучки ионов аргона с токами I_n до 0,6 А при ускоряющих напряжениях от 0,5 до 5 кВ с неравномерностью распределения плотности тока ионов до 10% в поперечных круглом или прямоугольном сечениях пучков площадью 0,04 м². Площадь поперечного сечения пучка уменьшалась до 10⁻⁴ м² при использовании вогнутой в сторону разряда сферической системы извлечения и размещении обрабатываемого изделия вблизи центра сферы [14]. Площадь поперечного сечения пучка увеличивалась до 0,2 м² при изменении вогнутости системы извлечения на противоположную и размещении обрабатываемого изделия на расстоянии порядка 0,6 м от устройства.

Был разработан внутривакуумный вариант источника ионов без принудительного охлаждения с

капиллярным самокалящимся катодом с крошкой LaB₆.

Нейтрализация заряда ионов в пучке обеспечивается без использования термокатада [18].

В таблице приведены конкретные технологические назначения, под которые разрабатывались рассмотренные в статье источники ионов, и некоторые выходные параметры этих источников.

Тип источника ионов	Назначение	I _п , А	S _п , см ²
Разряд с горячим катодом			
1. На основе разряда с вольфрамовым катодом [4]	Ионнолучевое травление фотошаблонов и пленок	0,3	80
2. На основе разряда с капиллярным катодом с LaB ₆ [12]	субмикронных интегральных микросхем, очистка подложек перед напылением пленок	0,2	200
Разряд с холодным катодом			
3. На основе разряда, контрагированного в скрещенных полях [8]	Дополнительно к перечисленному выше: ионнолучевое травление фоторезистов фотошаблонов, подгонка сопротивлений пленочных резисторов, доокисление оптических покрытий, корректировка состава сверхпроводящих пленок пучком ионов кислорода, точная доводка поверхностей	0,15	80
4. На основе ППР [10]		0,05	80
5. На основе разряда с магниевым катодом с четырьмя анодами [15]: - без магнитного поля; - с магнитным полем		0,2 0,6	400 до 2000

Список литературы

[1] M. Ardenne. // Tabellen der Electronenphysik, Ionenphysik und Übermicroscopie. – Berlin. – 1956. – P. 654.

[2] Никитинский В.А., Захаров А.С., Ковалев В.В. Два способа извлечения ионов из контрагированного разряда // Труды Новочеркасского политехнического института. – Новочеркасск. – 1976. – Т. 324. – С. 78.

[3] Никитинский В.А., Захаров А.С. Выход ионов в вакуум из разряда, контрагированного в скрещенных электрическом и магнитном полях // Журнал технической физики. – 1974. – Т. 44, № 6. – С. 1333.

[4] Журавлев Б.И., Никитинский В.А., Захаров А.С. Источник ионов на основе разряда, контрагированного в скрещенных полях // Журнал «Приборы и техника эксперимента». – 1977. – № 4. – С.204-206.

[5] Никитинский В.А., Журавлев Б.И. Разряд, контрагированный в скрещенных полях, с холодным полым катодом // Журнал технической физики. – 1980. – Т. 50, № 2. – С. 440-441.

[6] Никитинский В.А., Журавлев Б.И. Условия существования разряда с холодным катодом, контрагированного в скрещенных полях // Журнал технической физики. – 1982. – Т. 52, № 5. – С. 880-883.

[7] Никитинский В.А., Журавлев Б.И., Гапоненко А.Т. Двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 55, № 8. – С. 1637-1639.

[8] Журавлев Б.И., Никитинский В.А., Гапоненко А.Т. Газоразрядный источник ионов с холодным катодом // Журнал «Приборы и техника эксперимента». – 1985. – № 4. – С.157-158.

- [9] Стогний А.И., Никитинский В.А., Журавлев Б.И. Двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления без иагнитного поля // Журнал технической физики. – 1988. – Т. 58, № 5. – С. 993-995.
- [10] Журавлев Б.И., Прилепский В.В., Горлатов В.С. Технологический источник ионов // Журнал «Приборы и техника эксперимента». – 1993. – № 3. – С. 215-218.
- [11] Никитинский В.А., Лозовой Б.С. и др. Геометрия проплавления сварного шва с помощью плазменного источника электронов // Сварочное производство. – 1980. – № 5. – С. 17.
- [12] Патент №1568793 России. Источник заряженных частиц // В.А.Никитинский, С.И.Объедков и др. – 1995. – Б.И. № 9.
- [13] Никитинский В.А., Богатырев О.А. Высоковольтный разряд с катодным пятном при постоянном напряжении на электродах // Письма в журнал технической физики. – 1988. – Т. 54, № 4. – С. 347.
- [14] Патент №1210607 России. Устройство для ионнолучевой обработки // В.А.Никитинский, Б.И.Журавлев и др. – 1995. – Б.И. № 8.
- [15] Патент №1616412 России. Источник заряженных частиц // В.А. Никитинский, О.А. Богатырев, С.И. Объедков. – 1995. – Б.И. № 10.
- [16] Никитинский В.А., Гапоненко А.Т., Объедков С.И. Источники ионов непрерывного действия // Журнал «Приборы и техника эксперимента». – 1992. – № 4. – С.244.
- [17] Nikitinsky V.A., Kreindel Yu.E. The constricted discharge of low pressure with the cathode spot in magnetic field // 10-th international Conf. Phenomena Ioniz. Gases. – Oxford. – 1971.– P. 217.
- [18] Журавлев Б.И., Никитинский В.А., Гапоненко А.Т. Компенсация заряда пучка ионов без использования термокатода // Журнал технической физики. – 1987. – Т. 57, № 9. – С. 1826-1828.