

Электронные и ионные пучки

УДК 621.384.6

Источники ионов для операций ионно-лучевой технологии

Л. А. Гончаров

ООО «Фирма "Платар"», Москва, Россия

В. Г. Григорьян

Московский авиационный институт (Государственный технический университет), Москва, Россия

С помощью ионно-лучевой технологии проводят очистку поверхности перед нанесением покрытий, осуществляют травление интегральных микросхем и мозаичных структур с субмикронным разрешением, обрабатывают со сверхвысокой точностью оптические поверхности, наносят многослойные высококачественные покрытия, формируют рельеф опор газовых подшипников, получают сверхострые режущие кромки металлического и керамического медицинского инструмента и т. д. Для реализации этих процессов были разработаны и изготовлены различные типы ионных источников (Кауфмана, источники с "холодным" катодом, высокочастотные источники) и системы электропитания к ним.

В основе ионно-лучевой технологии (ИЛТ) лежит процесс распыления поверхности ионами высоких энергий. Интенсивность распыления зависит в основном от материала мишени, энергии и сорта ионов, но ограничений по твердости обрабатываемых материалов не существует, причем для реализации процесса в большинстве случаев потребуются только электрическая энергия и инертный газ, что делает эту технологию экологически чистой и привлекательной.

Инструментом для реализации операций ИЛТ является источник ускоренных ионов. С помощью источников, созданных под различные технологические процессы, были получены результаты, не достижимые для традиционных технологий. Очистка и активация поверхности перед нанесением тонкопленочного покрытия повышала адгезионные свойства в 1,2—2 раза. Предварительная обработка гранул молибдена позволила повысить прочность деталей, получаемых методом порошковой металлургии, в 1,5 раза. При использовании пучков с лопаток газотурбинных двигателей удался нагар без повреждения высокотемпературного защитного покрытия. Обработка опор газодинамических подшипников из нитрида вольфрама и карбида кремния сквозь молибденовую маску позволила сформировать на их поверхности необходимый рельеф глубиной 7 мкм. В микроэлектронике осуществлялось травление интегральных микросхем с субмикронным разрешением. Были получены оптические покрытия, состоящие из нескольких десятков наноразмерных слоев, и проведена финишная доводка лазерных зеркал. Обработка режущей кромки медицинского инструмента позволила уменьшить толщину его режущей

кромки до величины менее 0,1 мкм, причем использовался как металлический, так и керамический инструмент.

Естественно, что каждый технологический процесс предъявлял свои требования к источникам ионов. В результате обобщения этих требований было разработано семейство источников, позволяющих реализовать практически все операции ИЛТ.

Среди многочисленных источников ускоренных ионов можно выделить газоразрядные сеточные источники, в которых извлечение ионов из плазмы газового разряда и формирование их в пучки с нужной плотностью тока и энергией осуществляются с помощью густоперфорированных электродов (сеток) [1, 2].

К достоинствам таких источников можно отнести широкий диапазон независимого регулирования плотности тока (0,1—10 мА/см²) и энергии ионов (0,2—5 кэВ), высокую однородность плотности тока по сечению пучка, его моноэнергетичность, большие площади обработки, высокую газовую и энергетическую эффективность.

Принципиальная схема такого источника представлена на рис. 1. В газоразрядной камере тем или иным способом происходит ионизация газобразного рабочего тела. Извлечение ионов из плазмы газового разряда и их формирование в пучки с нужной энергией и плотностью тока осуществляются с помощью электростатической ускорительной системы (УС). Схема элементарной ячейки ускорительной системы и распределение потенциала в ней приведены на рис. 2. Эмиссионный 1 и ускоряющий 2 электроды имеют соосные отверстия, а выходной электрод 3 либо повторяет

их конфигурацию, либо выполняется в виде конуса, охватывающего весь пучок. Распределение потенциалов в ячейке реализует схему "ускорение—замедление". На участке 1—2 ионы ускоряются, на 2—3 — замедляются. Наличие отрицательного потенциала на ускоряющем электроде исключает проникновение электронов в объем ускорительной ячейки, и там существует униполярный пучок ионов. Граница плазмы газоразрядной камеры (ГРК) и ионного пучка по существу является плазменным эмиттером ионов. Плотность тока ионов J , приходящих из плазмы на эту границу, определяется соотношением Бома

$$J = 0,43en\sqrt{\frac{kT_e}{m}},$$

где e , T_e — заряд и температура электрона, соответственно;

n — концентрация плазмы;

k — постоянная Больцмана;

m — масса иона.

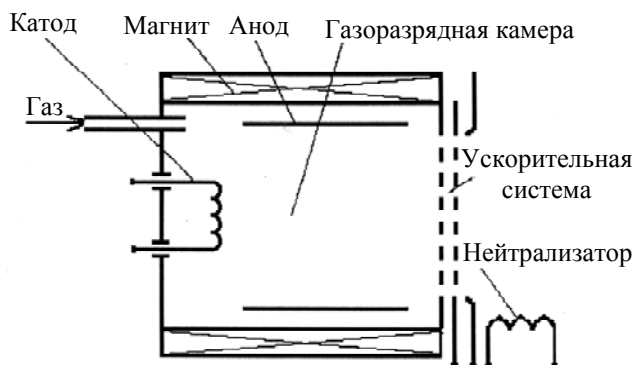


Рис. 1. Источник ионов с накаливаемым катодом

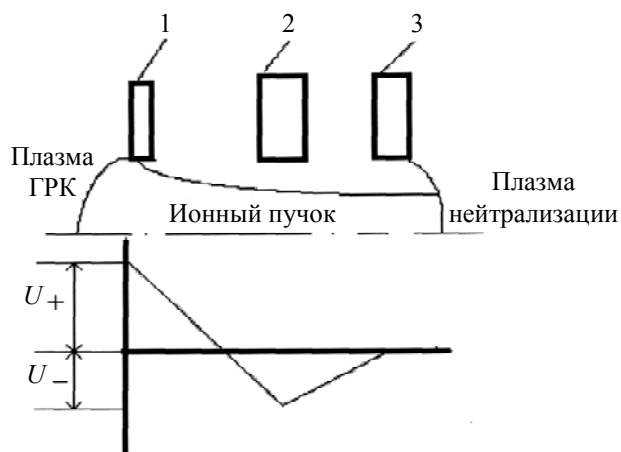


Рис. 2. Элементарная ячейка ускорительной системы

Другими словами, плотность тока эмиссии ионов определяется концентрацией плазмы. Частицы, выпадающие на плазменный эмиттер, должны быть сфокусированы в пучок с нужным углом расходимости. Конфигурация пучка зависит от значения потенциалов на электродах, формы и

размера отверстий, величины межэлектродного зазора. Поэтому режим работы газоразрядного источника плазмы должен быть согласован с параметрами ускорительной системы. Можно сказать, что в конструктивном отношении этот источник является достаточно сложным, но наличие узлов, в которых доминирует один физический процесс (ионизация в ГРК, ускорение в УС), позволяет наиболее полно изучить его и реализовать с необходимыми характеристиками.

Совершенно справедливо отмечается ограниченность пропускной способности электростатической УС объемным зарядом униполярного ионного пучка и сложность обеспечения стабильности величины межэлектродного зазора при работе источника, поскольку из-за возникающих термических напряжений происходит деформация электродов. Стабильность межэлектродного зазора можно обеспечить, используя электроды, имеющие форму сегмента сферы с большим радиусом [3]. Наличие отдельного узла, формирующего ионный пучок, позволяет осуществлять дополнительное воздействие на его форму. Поскольку поток ускоренных ионов, покидающий источник, формируется множеством единичных пучков, то за счет профилирования электродов можно получать необходимые распределения плотности ионного тока на обрабатываемой поверхности. Так, вогнутые электроды диаметром 100 мм позволяют иметь плотность тока до 20 мА/см² в зоне диаметром 40 мм с однородностью не хуже 5%. Выпуклые электроды того же диаметра позволяют обрабатывать зону диаметром 180 мм с такой же однородностью при плотностях тока 1 мА/см².

Для получения газоразрядной плазмы в источниках могут реализоваться различные способы ионизации атомов электронным ударом.

Наиболее известными и простыми являются источники типа Кауфмана с накаливаемым катодом, в которых плазма образуется в дуговом разряде, горящем между термокатодом и анодом (см. рис. 1). Иногда вместо накаливаемого катода используется полярный катод. Здесь усложнение конструкции в какой-то степени компенсируется существенным увеличением ресурса.

Использование химически активных газов (кислорода, хлора, фторсодержащих газов) делает неприемлемым использование указанных катодов.

В этом случае можно применять источники с так называемым холодным катодом (рис. 3, а). Источником электронов для газоразрядной камеры является тлеющий разряд, горящий в магнитном поле специальной конфигурации. Это позволяет существенно снизить температуру эмиссионной поверхности и, следовательно, использовать химически активные газы в качестве плазмообразующего вещества.

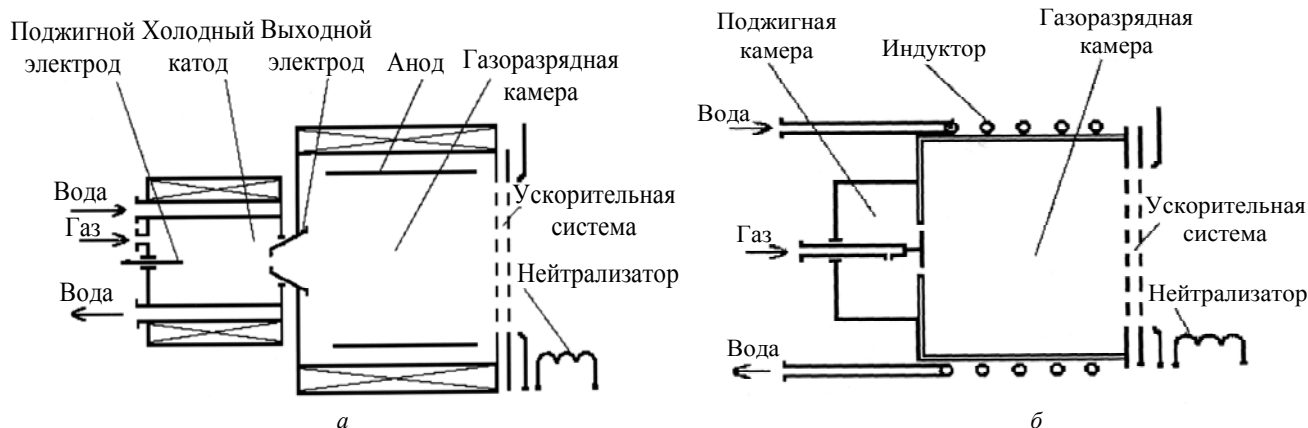


Рис. 3. Источник ионов:
 а — с холодным катодом; б — с высокочастотным разрядом

Химически активные газы можно использовать в источниках с высокочастотным и сверхвысокочастотным разрядом, когда энергия, необходимая для ионизации, передается электронам ВЧ- или СВЧ-полями. При этом разряд горит в кварцевой ГРК, размещенной внутри индуктора (см. рис. 3, б). Основное достоинство этих источников заключается в отсутствии высокотемпературных элементов конструкции. К недостаткам ВЧ-источников следует отнести низкую газовую эффективность, что приводит к повышению мощности откачных средств, и меньшие плотности тока пучка.

В ряде случаев, например при обработке диэлектрических материалов, необходимо осуществ-

лять компенсацию положительного заряда ионного пучка. Для этого используется либо накальный нейтрализатор (термокатод), либо плазменный источник электронов. Плазменные источники электронов функционируют при некотором расходе газа (обычно аргона), пропускаемого через него, благодаря чему их можно использовать при работе источника ионов на химически активных газах.

Фирма "Платар" разрабатывает и выпускает все вышеперечисленные типы источников ускоренных ионов, характеристики которых приведены в табл. 1 и 2, при необходимости оснащает их плазменными источниками электронов, а также производит блоки электропитания этих устройств.

Таблица 1

Характеристика	Модель		
	КЛАН-52М	КЛАН-53М	КЛАН-54
Тип ГРК	С термокатодом	С холодным катодом	ВЧ 13,56 МГц
Рабочий газ	Инертные газы	Инертные и химически активные газы	Инертные и химически активные газы
Диаметр пучка, см	1—5	1—5	1—5
Энергия ионов, эВ	50—1600	50—1600	50—1600
Ток пучка, мА	До 120	До 100	До 100
Расход газа, см ³ /с	2—4	3—6	3—7
Охлаждение	Естественное	Принудительное	Принудительное
Ускорительная система	Двух- и трехсеточные, плоские, фокусирующие, дефокусирующие		
Нейтрализатор	Накальный, плазменный		
Максимальный диаметр, мм	99,8	99,8	99,8

Таблица 2

Характеристика	Модель		
	КЛАН-103М	КЛАН-104М	КЛАН-105
Тип ГРК	С термокатодом	С холодным катодом	ВЧ 13,56 МГц
Рабочий газ	Инертные газы	Инертные и химически активные газы	Инертные и химически активные газы
Диаметр пучка, см	3—10	3—10	3—10
Энергия ионов, эВ	50—1600	50—1600	50—1600
Ток пучка, мА	До 300	До 300	До 300
Расход газа, см ³ /с	4—8	5—10	5—10
Охлаждение	Естественное	Принудительное	Принудительное
Ускорительная система	Двух- и трехсеточные, плоские, фокусирующие, дефокусирующие		
Нейтрализатор	Накальный, плазменный		
Максимальный диаметр, мм	149,5	149,5	149,5

Источники монтируются на стандартных фланцах вакуумных установок или же реализуется индивидуальная привязка внутри вакуумной камеры.

Л и т е р а т у р а

1. Kaufman H. R. // J. of Vacuum Science and Technology, 1978. V. 15. P. 2—7.

2. Габович М. Б., Плишивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. — М.: Энергоиздат, 1986.

3. Bassner H., Berg H.-P. // 1st Russian-German Conference on Electric Propulsion Engines and Their Applications. 1992. RGC-92—14.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

Ion sources for ion-beam technology operations

L. A. Gontcharov

Platar Ltd, Moscow, Russia

V. G. Grigorian

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

With the help of ion-beam technology one can realize the following operations: surfaces' cleaning before coating, microchips and mosaic structures etching with submicron size, high-accuracy processing of optical surfaces, coating of multi-layer covers, gas bearings' supports relief forming, super sharp cutting edges of metal and ceramic medical equipment forming, etc. For all mentioned above operations there were develop and fabricated different kinds of ion sources (like Kaufman, sources with "cold" cathode, sources with high-frequency discharge) and power supplies for them.

* * *