

Электронные и ионные пучки

УДК 537.533

Использование ионных источников с широким пучком для решения задач микрофотоэлектроники

А. Н. Козлов, В. Д. Смольянинов, А. П. Еремин

Государственное предприятие "НИИ электронной и ионной оптики", Москва, Россия

А. М. Филачев

ФГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

Рассмотрены вопросы подачи газа при использовании ионных источников в технологических ионно-лучевых установках при комбинации с напылительным и другим технологическим оборудованием. Даны рекомендации по использованию промышленных ионных источников в технологических установках.

Процессы ионно-плазменной обработки в вакууме обеспечивают качественно высокий уровень решения многих технологических задач. В частности, в процессах формирования пленочных покрытий, модификации свойств поверхностных слоев пленок, травления пленок широко используются ионно-лучевая и плазменная обработки. Для эффективного применения этих методов следует обратить внимание на их особенности, связанные с физикой: взаимодействие ускоренных заряженных частиц в вакууме между собой и взаимодействие этих частиц с изделиями.

Ионно-лучевые процессы травления осуществляются с помощью ионно-лучевых источников, принцип действия и конструктивные особенности которых полностью определяют эффективность их использования. Наиболее перспективны для травления ионные источники, формирующие пучки большого диаметра (100 мм и более). Главной проблемой таких источников является обеспечение высокой равномерности плотности тока по сечению пучка.

Наиболее широкое распространение для технологических целей получили газоразрядные ионные источники [1, 3, 4], главными элементами которых являются:

- генератор плазмы газового разряда;
- система извлечения ионов из плазмы;
- система формирования ионного пучка.

Плазма низкого давления в среде инертного газа может создаваться с помощью эмиссии термоэлектронов (источник Кауфмана, источник с полым катодом), ВЧ- или СВЧ-полей. Для вытягивания ионов и формирования пучка могут применяться одно-, двух- или трехсеточные системы электродов. Каждая из них представляет собой тонкую пластину (толщиной 0,5—1,0 мм) с большим количеством отверстий диаметром до 2 мм, которые обеспечивают прозрачность электрода до 70 % [3]. В двухсеточной системе, наи-

более широко используемой, первая сетка, называемая эмиссионной, служит для вытягивания ионов из газоразрядной плазмы, вторая — имеет высокий отрицательный потенциал относительно эмиссионной сетки. Она называется ускоряющей. Ионный пучок в такой системе формируется из множества (до 500—1000) элементарных пучков, причем ускорение ионов происходит в промежутке между эмиссионной и ускоряющей сетками. В вакууме за плоскостью ускоряющей сетки ионы обычно движутся в свободном от полей пространстве.

Для различных технологических операций используются ионные источники в установках как индивидуально только для ионной обработки, так и совместно с напылительным и другим оборудованием.

Для этого ионный источник крепят на фланцах вакуумной камеры или встраивают внутрь, размещая между другим технологическим оборудованием (магнетроны, оснастка и т. д.).

Часто в погоне за большим спектром возможностей технологических установок пользователи не уделяют должного внимания каждому изделию, а решают задачу в комплексе. Например, в камеру подводят различные газы для напыления, травления и т. д., используя для этого различные вводы, не обращая внимание на течение газа и принимая, что вакуум абсолютный, а распределение газа равномерное.

Загромождение камеры оснасткой, убирая ионные источники "в карманы", приводит к резкому ухудшению параметров ионных источников.

Оценим реальные вакуумные условия применительно к использованию ионных источников. Область работы ионных источников при различных режимах лежит в пределах 10^{-5} — 10^{-2} мм рт. ст. (Торр).

Рассмотрим эти области вакуума с точки зрения распределения газа. Примем вакуумную ка-

меру за некий объем с линейными размерами и откачными средствами.

Различают три основных режима течения газа: вязкостный, молекулярный и молекулярно-вязкостный.

• Вязкостный режим течения газа наблюдается в области низкого вакуума, когда средняя длина свободного пути частиц газа значительно меньше размеров вакуумной камеры $\bar{\lambda} \ll d$.

В связи с малой длиной свободного пробега молекулы газа непрерывно сталкиваются друг с другом при своем движении и обмениваются энергиями. В результате этого обмена, а также обмена энергиями между молекулами газа и стенками камеры, при котором молекулы полностью теряют свою направленную скорость, газ движется с разной скоростью по поперечному сечению камеры.

• Молекулярный режим течения газа наблюдается в области высокого вакуума, когда средняя длина свободного пути частиц газа значительно больше размеров вакуумной камеры.

При молекулярном режиме молекулы газа движутся почти независимо друг от друга, подчиняясь законам хаотического теплового движения. Молекулы газа практически не сталкиваются друг с другом, между ними не происходит обмена энергиями, и понятие о вязкости газа в этом случае теряет смысл. Попадая на стенку камеры, молекулы газа некоторое время задерживаются на ней, затем слетают и двигаются в случайном направлении. Если на концах камеры будет существовать разность давлений газа и, следовательно, разность концентраций молекул, то в камере установится некоторое движение газа в направлении от большей к меньшей концентрации.

• В области среднего вакуума имеет место молекулярно-вязкостный режим течения газа.

Определим границу молекулярного режима, воспользовавшись формулой $dP_{\text{mid}} \leq 452 \cdot 10^{-5}$, где d дано в метрах и P — в Н/м^2 [5].

Возьмем вакуумную камеру с сечением $0,6 \times 0,6$ м (ВУ-1А):

$$0,6 \cdot 0,6 \cdot P \leq 452 \cdot 10^{-5}; \quad P \leq \frac{452 \cdot 10^{-5}}{0,6 \cdot 0,6} \leq$$

$$\leq 0,01255 \text{ Н/м}^2 \approx 9,4 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$$

Таким образом, молекулярный режим течения газа практически соблюдается только при давлениях газа ниже $9,4 \cdot 10^{-5} \div \sim 9,4 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

Аналогичным образом оценим границу между вязкостным и молекулярным режимами, воспользовавшись формулой $dP_{\text{mid}} \geq 1,446$ [5], откуда

$$P_{\text{mid}} \geq \frac{1,446}{0,6 \times 0,6} = 4,016 \text{ Н/м}^2 \sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$$

Следовательно, вязкостный режим течения газа соблюдается при давлениях выше $3 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

В нашем случае работа ионного источника приходится на область молекулярно-вязкостного режима.

Оценим длину свободного пробега молекул газа в этой области давлений, воспользовавшись оценочной формулой [5] (таблица).

$$\lambda = \lambda_0 \frac{T}{273} \cdot \frac{1}{P}$$

Газ	λ_{0M} (0 °С, 1 Н/м ²)	λ_{0M} (25 °С, 10 ⁻² Торр)	λ_{0M} (25 °С, 10 ⁻³ Торр)	λ_{0M} (25 °С, 10 ⁻⁴ Торр)
Воздух	$6,17 \cdot 10^{-3}$	$5,05 \cdot 10^{-3}$	$50,5 \cdot 10^{-3}$	0,505
N ₂	$6,07 \cdot 10^{-3}$	$4,97 \cdot 10^{-3}$	$49,7 \cdot 10^{-3}$	0,497
O ₂	$6,56 \cdot 10^{-3}$	$5,37 \cdot 10^{-3}$	$53,7 \cdot 10^{-3}$	0,537
Ar	$6,44 \cdot 10^{-3}$	$5,27 \cdot 10^{-3}$	$52,7 \cdot 10^{-3}$	0,527

Для анализа работы ионных источников на рабочих газах исследовалась величина критического давления в диапазоне разрядных напряжений 1000—3000 В и тока солениода 1—3 А. Величина критического давления находилась в области $6 \cdot 10^{-2} \leq P \leq 9 \cdot 10^{-2}$ Па. При режиме, когда давление выше $P_{\text{ср}}$, происходит зажигание разряда во всей технологической камере, что приводит к взаимодействию плазмы со стенками камеры и резкому увеличению концентрации ионов, в том числе и паразитных. В пучковом режиме при увеличении давления плотность ионного тока плавно и почти линейно растет до значения $P_{\text{ср}}$. Как показали эксперименты, величина кинетического давления зависит от вида рабочего газа, напряжения разряда, тока солениода и способа подачи рабочего газа.

Помня о том, что область давлений работы ионного источника — это молекулярно-вязкостный режим, полагаем следующее.

• При высоком вакууме $\sim 10^{-4}$ Торр преобладает молекулярный режим. Молекулы газа равномерно заполняют объем, нет явно выраженного течения газа. Длина свободного пробега молекул газа и ионов газа соизмерима с габаритами вакуумной камеры. Ионы газа доходят до обрабатываемого изделия, не претерпевая столкновений с молекулами газа, и обладают начальными энергией и зарядом, которые получили в ионном источнике ионных пучков с максимальной энергией.

• С ростом давления к молекулярному режиму добавляется вязкостный режим течения газа. Вязкостный режим определяет направленное движение молекул газа от области большей концентрации (давления) в область меньшей концентрации (давления), от точки выхода газа в вакуумную камеру к фланцу подключения насоса. Если на пути этого потока расположена разрядная область ионного источника, то он частично используется в процессе образования ионов, но этот поток газа дает неравномерность по сечению ионного пучка, так как скорость молекул газа здесь, а соответственно давление газа в середине потока выше, чем по краям (рис. 1, а). Это приводит к повышению неравномерности по сечению ионного пучка.

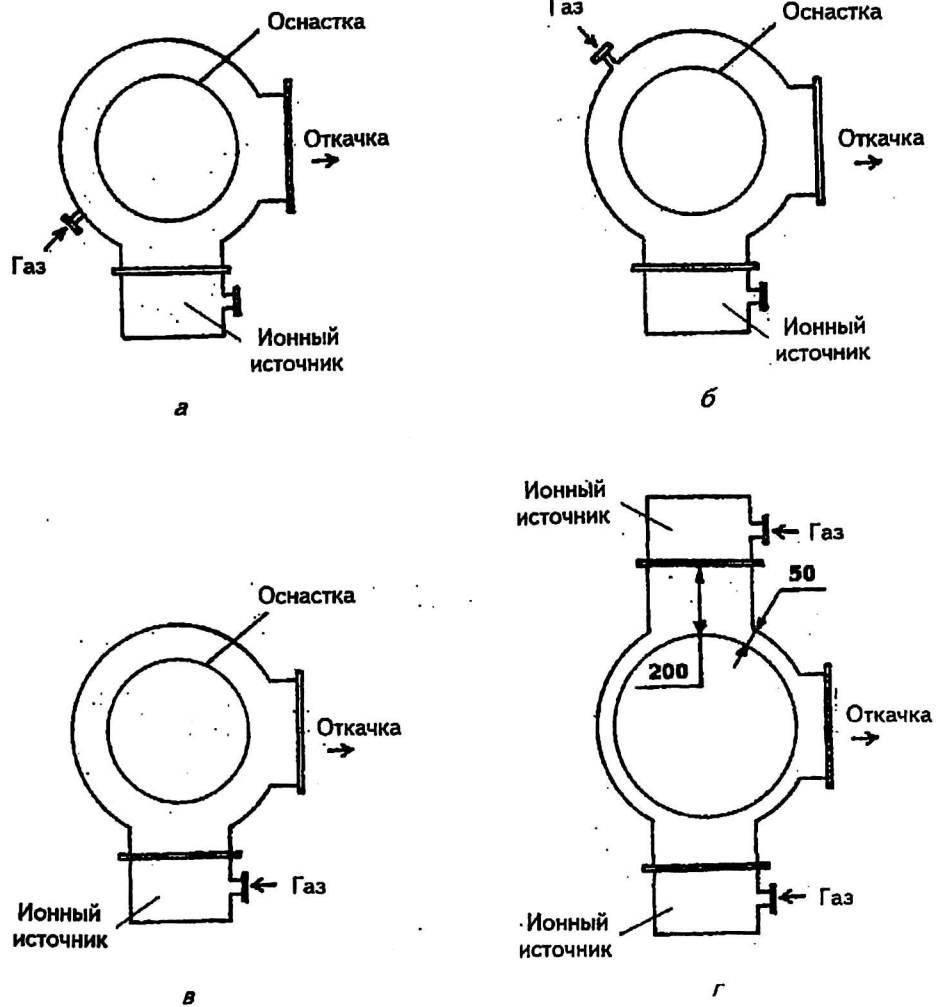


Рис. 1. Режимы течения газа:
а, б, в, г

Если поток газа не проходит через разрядную область ионного источника, то фактически эта часть газа не используется в процессе образования ионов и только нагружает откаченные средства (рис. 1, а).

Хорошо, когда весь газ выходит в вакуумную камеру через разрядную область ионного источника (рис. 1, б). В такой системе вероятность ионизации газа значительно выше, чем при случае напуска газа в вакуумную камеру рядом с ионным источником (первые два случая).

При работе ионных источников в диапазоне давлений, близких к 10^{-3} мм рт. ст., длина свободного пробега молекул газа приближается к 50 мм. Таким образом видно, что даже если подложка расположена на расстоянии 50 мм от ионного источника, то в этом диапазоне давлений молекулы газа и ионы начинают испытывать соударения еще до подложки.

Эти соударения дают потерю энергии ионного пучка; вязкостный режим течения газа меняет ионный пучок, уменьшая плотность ионного тока и энергию по краям ионного пучка с ухудшением давления.

Из всего этого следует, что при давлении в области 10^{-3} мм рт. ст. ионный пучок начинает сжиматься по краям, уменьшая плотность тока и энергию пучка. В середине пучка происходит

дополнительная ионизация газа ионами и как следствие — увеличение плотности тока и уменьшение энергии ионного пучка. Чем больше диаметр ионного пучка, тем эта зависимость сильнее выражена.

Применяя ионные пучки больших диаметров (размеров) для различных технологических операций, необходимо помнить о течении газа при выборе конструкторских решений. Так, например, в одной установке травления на базе вакуумного поста ВУ-1А (см. рис. 1, г) расположены два ионных источника $\varnothing 200$ мм симметрично от диффузионного насоса на вваренных фланцах. В середине камеры установлен водоохлаждаемый барабан с подложками. Зазор между стенкой камеры и барабаном 5 см, расстояние от барабана до ионного источника 20 см. Таким образом, образовалась полость между барабаном и ионным источником, которая откачивается через щель. Щель ухудшает откачку из полости. Если оценить режим течения газа, то получим, что при откачке через щель с $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. наступил молекулярный режим течения газа, т. е. при этом вакууме откачные средства не откачивают полость ионного источника, и газ из полости поступает в вакуумную камеру за счет движения от большей концентрации к меньшей.

Возникает разность давлений в вакуумной камере и полости, поток газа через ионный источник уменьшается, а вакуумные условия способствуют образованию потока газа с вытекающими последствиями: повышение неравномерности плотности ионного тока, фактическое уменьшение диаметра пучка и т. д.

Поэтому, чтобы сохранить параметры ионного источника в таком включении, необходимо предусмотреть такую конструкцию фланца, которая могла бы сохранить поток газа через ионный источник и не ухудшать его работы, т. е. обеспечить сечение со стороны откачки.

При работе ионных источников больших сечений в области высоких давлений, где сказывается вязкостный режим течения газа, возможно улучшение равномерности ионного пучка по сечению с помощью системы напуска газа. Помня, что вязкостный режим течения газа — это поток молекул газа, в середине которого находится область повышенного давления, система напуска газа в ионных источниках делается с градиентом проходных отверстий по сечению ионного источника.

При использовании ионных источников для напыления пленок из газовой среды, например алмазоподобных пленок, особое внимание необходимо уделять системе подачи газа, так как от равномерности потока частиц, однородности пучка зависят воспроизводимость и качество напыляемой пленки.

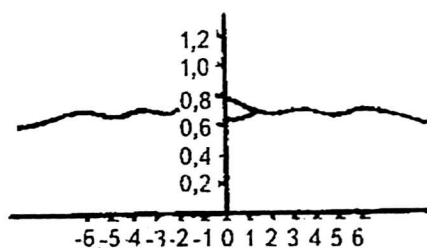
В настоящее время в ФГУП «НПО "Орион"» разработаны различные конструкции ионных источников с холодным катодом. С помощью этих источников решаются задачи оптики, электроники и микрофотоэлектроники.

Эффект ионного распыления используется для решения задач оптического производства и производства фотоприемников, для очистки поверхностей, модификации свойств поверхностного слоя, высокоточной размерной обработки, создания структур высокого разрешения, нанесения тонкопленочных покрытий.

Ионные источники «Ион-2» (рис. 2) и «Ион-3» формируют пучок диаметром 100 мм с двумя коаксиально расположенными разрядными промежутками; имеют ускоряющее напряжение 1–4 кВ, плотность ионного тока 0,9–1,4 мА/см².

«Ион-3» отличается от источника «Ион-2» тем, что аноды запитаны от разных источников питания и системы напуска газа в отдельные в каждом разрядном промежутке, это позволяет регулировать размер и энергию пучка, его равномерность. Газ подается через анод прямо в разрядный промежуток. Количество и диаметр отверстий рассчитаны исходя из условий наилучшей равномерности ионного пучка.

Ионный источник «Ион-Ф» формирует ионный пучок высокой плотности, диаметром 100 мм (рис. 3).



Распределение плотности тока пучка в ионном источнике с центральной разрядной ячейкой

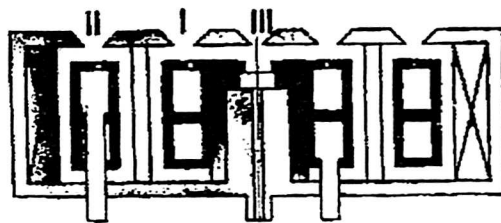


Схема ионного источника с двумя кольцевыми разрядными промежутками и центральной ячейкой Пеннинга;
I, II — кольцевые разрядные промежутки;
III — ячейка Пеннинга

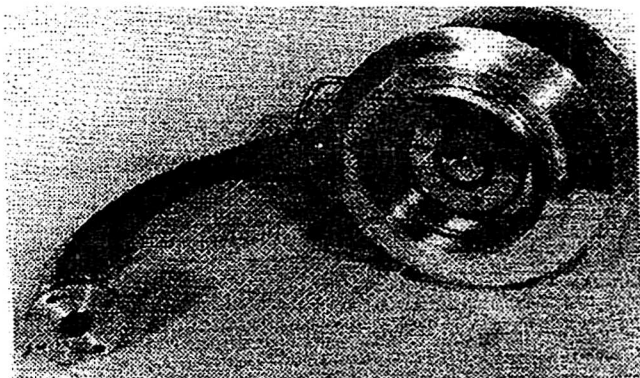


Рис. 2. Ионный источник «Ион-2»

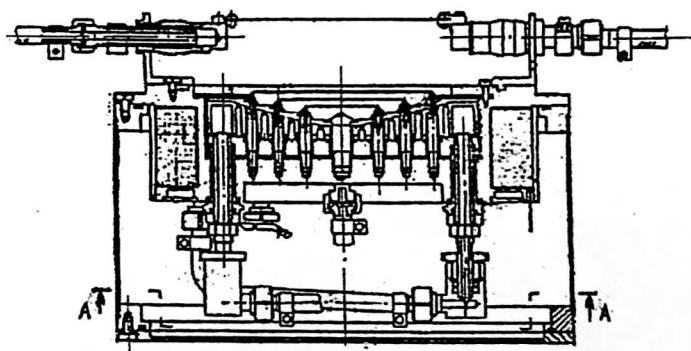


Рис. 3. Схема ионного источника «Ион-Ф»

Он разработан для проведения процессов ионного травления металлических пленок, оптических материалов с высокой скоростью распыления; формирует пучок ионов инертных и химически активных газов с энергией 500–3000 эВ и плотностью тока до 4 мА/см². В основу конструкции ионного источника заложена идея аксиального мультиплицирования разрядных промежутков с выравниванием магнитной индукции в магнитных зазорах с помощью магнитных шун-

тов. Достижение высокой плотности ионного тока на подложке достигается за счет увеличения количества кольцевых разрядных промежутков до 4. Газ подается через анод в каждый разрядный промежуток; диаметр отверстий и количество рассчитаны исходя из наилучшей равномерности ионного тока.

Изготавливаются две модификации "Ион-Ф" — один с плоским анодом, другой с конусообразным анодом для большей фокусировки ионного пучка.

Источник ионов с холодным катодом "Ион-поток" (рис. 4) формирует пучок ионов диаметром 100 мм с низкими энергиями 20—1500 эВ и плотностью тока 0,1—1,0 мА/см². Он разработан для ионной очистки и травления ионами инертных и химически активных газов материалов, имеющих сложную структуру и низкую (до 150 °С) температуру обработки.

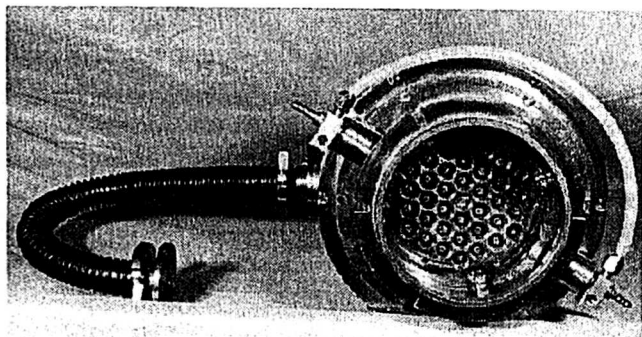


Рис. 4. Общий вид источника "Ион-поток"

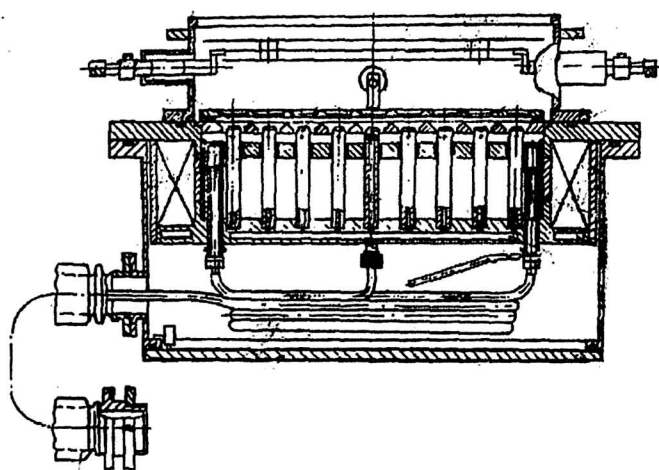
В этой конструкции ионного источника с холодным катодом 37 разрядных ячеек расположены гексагонально по поверхности. Магнитная система состоит из корпуса, многостырьевой матрицы с совмещенным с ней многоячейстым фланцем, выполненным из магнитомягкого материала.

Магнитный поток возбуждается соленоидом и равномерно распределяется между разрядными ячейками, образуя в них магнитные поля с одинаковым значением магнитной индукции.

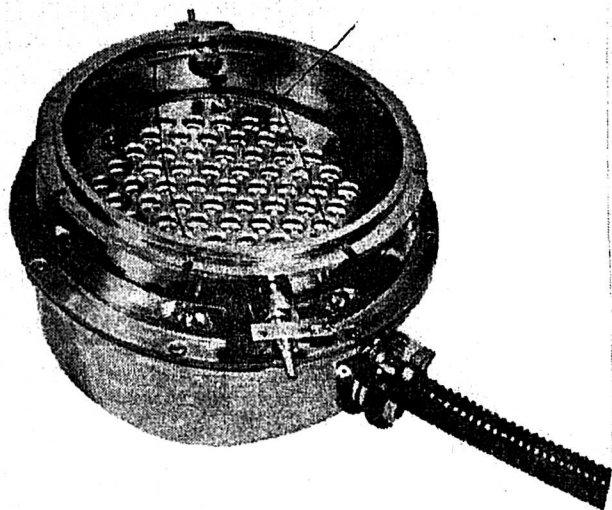
Анодная матрица расположена между дном источника и многоячейстым катодным фланцем и имеет отверстия, через которые проходят штыри магнитной системы. Подача рабочего газа в области разряда осуществляется через отверстия в штырях магнитной системы, он распределяется равномерно по каждой разрядной ячейке. Для получения ионов низких энергий в источнике имеется дополнительный электрод, выполненный из нержавеющей стали. На этот электрод подается напряжение, позволяющее в широких пределах управлять энергией ионов в пучке. При достижении на управляющем электроде напряжения $U_{\text{оск}}$ ионный пучок запирается, и на подложку ионный ток не подается. Этот

режим можно применять для быстрого окончания процесса травления.

Ионный источник "Ион-4" (рис. 5) имеет 64 разрядные ячейки, расположенные гексагонально на поверхности $\varnothing 200$ мм; диапазон ускоряющих напряжений 1,0—4,0 кВ, максимальная плотность тока 2 мА/см².



а



б

Рис. 5. Ионный источник "Ион-4":
а — схема; б — общий вид

В ионном источнике протяженного типа на постоянных магнитах для перемещающихся при обработке изделий газ в разрядный промежуток подается через отверстия в аноде, рассчитанные для каждого конкретного применения.

Литература

1. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. — М.: Атомиздат, 1972.
2. Штулингер Э. Ионные двигатели для космических полетов. — М.: Воениздат, 1966.
3. Лабунов В. А., Данилович Н. Н., Громов В. В. Многопучковые ионные источники для систем ионного распыления — травления // Зарубежная электротехника, 1984. Вып. 4.

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

5. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. — М.: Высшая школа, 1967.

Use of ion sources with a wide beam for the decision of microphotoelectronics tasks

A. N. Kozlov, V. D. Smolyaninov, A. P. Eremin
Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

A. M. Filachev
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The processes of ion-plasma processing in vacuum provide qualitatively high level of the decision of many technological tasks. For formation of film coverings, updating properties of superficial layers, etching, the ion-beam and plasma processing is widely used. For effective application of these methods it is necessary to pay attention to their features connected to physics. First, interaction accelerated, charged particles in vacuum among themselves, secondly, interaction of these particles with products. The efficiency of use of ion-beam sources is completely determined by their principle of action and design features. The forming beams of the large diameter (100, 200 mm and more) are most perspective ion sources. In work the questions of submission of gas are considered at use ion sources in technological ion-beam machine, at a combination with coating and other process equipment. The recommendations of use industrial ion sources in technological machine are given.