

УДК 537.533

## **ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**А. П. Еремин, В. Д. Смольянинов, А. М. Филачев**  
ГП НИИ электронной и ионной оптики, Москва, Россия

*Дан анализ тенденций развития ионно-лучевых источников для технологического ионно-плазменного оборудования. Рассмотрены характеристики разработанных в институте ионных источников и физические принципы, лежащие в основе их работы. Проанализированы особенности каждого ионного источника, определена область их применения.*

Ионное травление и ионно-лучевая обработка поверхностей различных материалов применяются практически во всех процессах, связанных с созданием новых технологий в различных направлениях.

Традиционное использование ионных пучков при нанесении тонкопленочных покрытий в микроэлектронике (ионное ассистирование) существенно повышает

адгезию пленок, улучшает ее состав и повышает удельную плотность. Широкое применение ионные источники нашли в оптической промышленности, где было установлено, что под действием ионной бомбардировки происходит распыление поверхности оптических материалов, и при этом качество исходной полированной поверхности удается сохранить или улучшить [1].

Метод ионно-лучевого ассистирования при нанесении оптических покрытий с предварительной ионно-лучевой очисткой подложек позволяет получать на холодной подложке пленки с более совершенной бесстолчатой (беспористой) микроструктурой, что повышает как оптические свойства, так и эксплуатационные характеристики: климатическую, механическую, радиационную устойчивость, а также стабильность оптических характеристик пленок. Плотность таких пленок значительно превышает плотность пленок, полученных обычным методом испарения в вакууме с нагревом подложек, и приближается к плотности монолитного материала. При этом даже пленкообразующие материалы с низкой температурой плавления выдерживают тест на влагостойкость и не имеют характерных для воды полос поглощения в области 3 мкм. Кроме того, указанный метод позволяет повысить производительность процесса нанесения покрытий на вакуумном напылительном оборудовании более чем в два раза за счет исключения из технологического цикла времени на прогрев подложек до 300 °С и последующее из охлаждение [2].

В последнее время в стране и за рубежом стали разрабатывать высокопроизводительное вакуумное технологическое оборудование для нанесения покрытий на архитектурные и автомобильные стекла.

В ГПНИИЭИО разработаны и изготовлены опытные образцы нескольких типов вакуумных высокопроизводительных установок для ионного травления и нанесения тонкопленочных покрытий. Установки оснащены разработанными специально для них ионными источниками. При разработках были проведены анализ существующего оборудования, а также теоретические и экспериментальные исследования [3].

Разработанные ионные источники генерируют интенсивные пучки заряженных и нейтральных частиц широкого спектра энергий, плотности ионного тока и геометрических размеров.

Параметры разработанных в ГПНИИЭИО ионных источников приведены в таблице.

Условное обозначение источника	Назначение	Способ получения плазмы	Размеры пучка ионов, мм	Равномерность, %	Энергия ионов, ток
ИОН-1	Ионное травление	Накаливаемый катод	Диаметр 100	79	0—4000 эВ, 50 мА
ИОН-2	Ионное травление в групповой обработке	Холодный катод	То же	Ленточный пучок	0—2500 эВ, 150 мА
ИОН-3	Ионная полировка и асферизация оптических деталей	То же	"	То же	0—2500 эВ, 200 мА
ИОН-4	Ионное травление, ионное ассистирование, ионная полировка и асферизация оптических деталей	"	Диаметр 200	75	0—2500 эВ, 700 мА
ИОН-Ф	Ионное травление, ионное распыление, ионная полировка, асферизация оптических деталей	"	Диаметр 40 ± 100	70	0—3000 эВ, до 5 мА/см
ИОН-5	Ионное травление, ионное распыление, ионная полировка, асферизация оптических деталей	"	Прямоугольник 350 x 500	70	0—2500 эВ, до 2 мА/см
ИОН-П	Ионное травление, ионное распыление, ионная полировка, асферизация оптических деталей, ионное ассистирование	"	То же 100 x 500; 100 x 1000	Ленточный пучок	0—33 500 эВ, до 1000 мА

За исключением ионного источника ИОН-1, все остальные источники имеют холодный катод, что позволяет эксплуатировать их более 800 ч без ремонта и использовать как инертные, так и химически активные газы.

Технологические возможности ионно-лучевого распыления поверхностей определяются конструктивными особенностями систем, в которых оно реализуется, видом и параметрами используемых ионных источников.

Конструкция систем в целом, конструкция и параметры ионного источника будут накладывать различные ограничения на скорость и разрешающую способность ионно-лучевой обработки, степень универсальности, управляемости и контролируемости процесса.

Ионный источник — главный узел технологической установки, и его характеристики определяют технологические возможности и эффективность работы установки в целом.

По способу формирования ионных пучков больших размеров в поперечном сечении различают многоапертурные ионные и поликанальные ионные источники.

Многоапертурные ионные источники — это такие, в которых ионно-оптическая система выполнена в виде сеток с большим количеством отверстий, из которых выходят отдельные слаборасходящиеся пучки. На некотором расстоянии пучки сливаются в один общий.

В поликанальных ионных источниках с холодным катодом формируются ленточные пучки ионов трубчатого или прямоугольного сечения, причем в одном источнике может быть один или несколько аксиально-расположенных пучков.

Существенная особенность ионных источников с холодным катодом — осцилляция электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях, при которой электроны движутся в разрядном пространстве по спиралеобразным траекториям, что приводит к значительному повышению эффективности ионизации рабочего газа. Характерной его особенностью является образование анодного соля замкнутым холловским током, в котором сосредоточивается практически все приложенное напряжение.

Одна из основных характеристик технологического процесса заключается в том, что скорость травления зависит от параметров ионного источника — энергии и плотности ионного тока, которые, в свою очередь, зависят от характеристик разряда, определяющих режим работы ионного источника: напряжения разряда, тока разряда, величины индукции магнитного поля и рабочего давления. Величина и стабильность этих параметров, которые взаимно связаны между собой, определяют величину и стабильность скорости травления, производительность установки и воспроизводимость получаемых результатов [4].

Из таблицы видно, что энергия ионов лежит в пределах 0—4000 эВ.

Рассмотрим влияние энергии ионов на эффективность ионно-лучевой обработки материалов [2]. Одним из основных показателей производительности данного процесса является скорость распыления при постоянной плотности мощности, переносимой ионным потоком на мишень. Постоянная величина плотности мощности определяется требованиями технологии и бывает ограничена, например  $(1-3) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Скорость ионного распыления задается известным выражением

$$G = \frac{1}{6,025 \cdot 10^{23} e} A S j_i,$$

где  $G$  — скорость катодного распыления, кг/см<sup>2</sup>;

$e$  —  $1,60 \cdot 10^{-19}$  — электрический заряд однократно ионизированного иона, Кл;

$A$  — атомный вес вещества мишени, кг;

$S$  — коэффициент катодного распыления, являющийся нелинейной функцией энергии бомбардирующих ионов или напряжения ускорения и не зависящий от плотности ионного тока, атом/ион;

$j_i$  — плотность потока ионов,  $A/m^2$ .

Учитывая, что  $W = j_i U_y = \text{const}$ , получаем

$$G = 1,03 \cdot 10^{-4} AW S / U_y.$$

Здесь  $U_y$  — напряжение ускорения ионов, В.

Из анализа последнего выражения следует, что при условии постоянства мощности, выделяемой на единице площади мишени, максимум скорости распыления будет достигнут при максимальном значении величины  $S/U_y$ .

Ускоряющее напряжение, обеспечивающее максимальную скорость распыления, является оптимальным для процесса ионной бомбардировки.

В результате проведенных расчетов получено, что максимальная скорость распыления и высокая производительность ионной обработки поверхности ожидаются в области низких ускоряющих напряжений  $U_y = 150-300$  В.

Расчет проведен для случая, когда энергия иона и ускоряющее напряжение совпадают.

В ГПНИИЭИО были созданы и применены для экспериментальных исследований стенды для определения энергии ионов, генерируемых ионными источниками в реальном масштабе времени. Для получения зависимости энергии ионов от параметров ионного источника использован трехсуточный цилиндр Фарадея. Интегральные значения ионного тока в зависимости от величины запирающего напряжения численно дифференцировались, в результате чего получены энергетические спектры ионных пучков при различных ускоряющих напряжениях. На рис. 1 показаны интегральные значения плотности ионного тока. Распределение ионов по энергиям при различных ускоряющих напряжениях для ионного источника ИОН-4 показано на рис. 2.

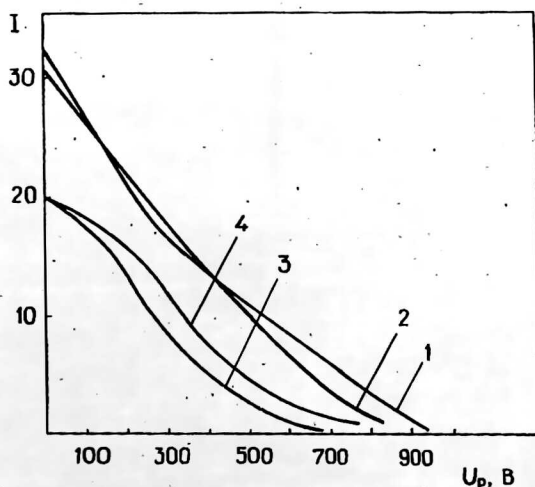


Рис. 1. Интегральные значения плотности тока ионного источника ИОН-4:

1 —  $U_p = 2,5$  кВ;  $I_c = 5$  А;

2 —  $U_p = 2,2$  кВ;  $I_c = 5$  А;

3 —  $U_p = 2,7$  кВ;  $I_c = 4,5$  А;

4 —  $U_p = 2,2$  кВ;  $I_c = 4,5$  А

Видно, что энергетические пики распределения лежат в области низких энергий (100—300 эВ) и имеют один максимум, причем пропорциональны разрядному напряжению. Эти обстоятельства выглядят предпочтительными при ионной обработке материалов с повышенной чувствительностью к радиационным повреждениям, что особенно важно при модификации поверхности и технологии микроэлектроники. Для управления энергией ионов в узком диапазоне энергий в ионном источнике ИОН-4 предусмотрен управляющий электрод, позволяющий отсекал "паразитные хвосты" в энергетическом распределении ионов, что очень важно для создания моноэнергетических пучков. Такой электрод позволяет влиять на равномерность ионного пучка в прилегающей к электродам области, а также настраивать энергию пучка на значение, необходимое для проведения заданного технологического процесса.

Энергия ионов, извлеченных из плазмы разряда с холодным катодом, составила 0,7EU.

На рис. 2 показана зависимость энергии ионов в ионном источнике ИОН-4 от напряжения разряда.

На рис. 3—6 представлены электрофизические параметры ионного источника ИОН-4.

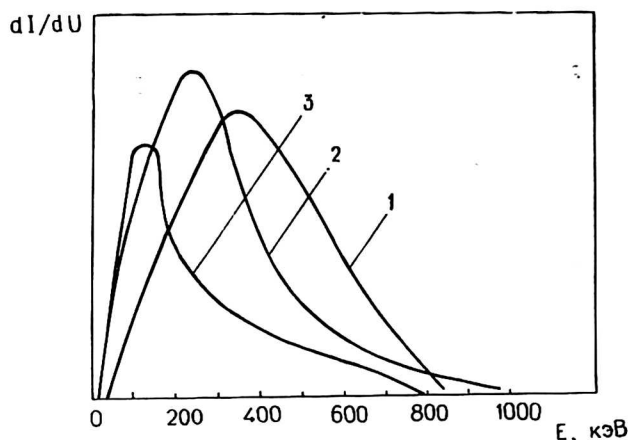


Рис. 2. Распределение ионов по энергиям в ионном источнике ИОН-4:

- 1 —  $U_p = 2,7$  кВ;
- 2 —  $U_p = 2,5$  кВ;
- 3 —  $U_p = 2,2$  кВ

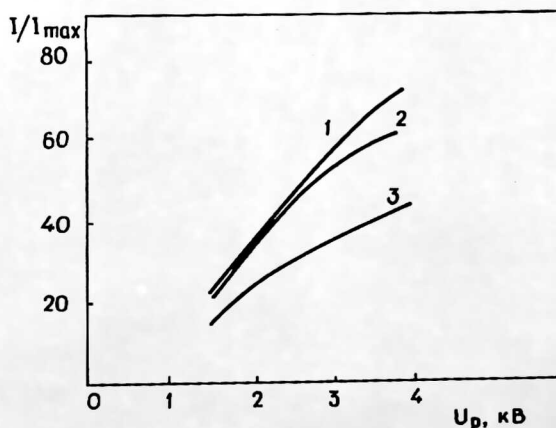


Рис. 3. Зависимость тока пучка от напряжения разряда: 1 —  $I_c = 5$  А;

- 2 —  $I_c = 3,5$  А; 3 —  $I_c = 1,5$  А;

Рис. 4. Зависимость тока пучка от тока соленоида возбуждения:  
 1 —  $U_p = 4,2$  кВ; 2 —  $U_p = 3,8$  кВ;  
 3 —  $U_p = 3,0$  кВ; 4 —  $U_p = 2,3$  кВ;  
 5 —  $U_p = 1,5$  кВ

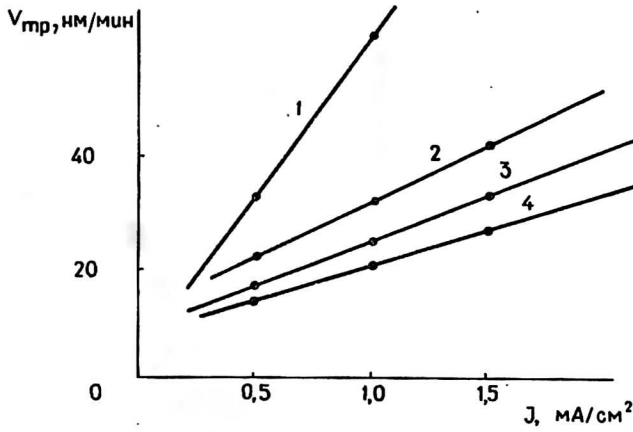
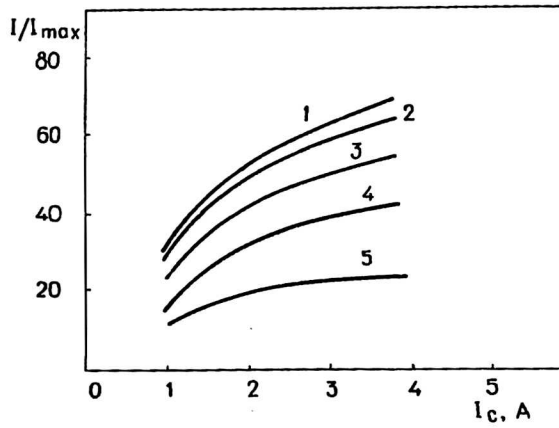


Рис. 5. Зависимость скорости съема от плотности ионного тока:  
 1 — германий; 2 — К-8; 3 — кварц; 4 — кремний

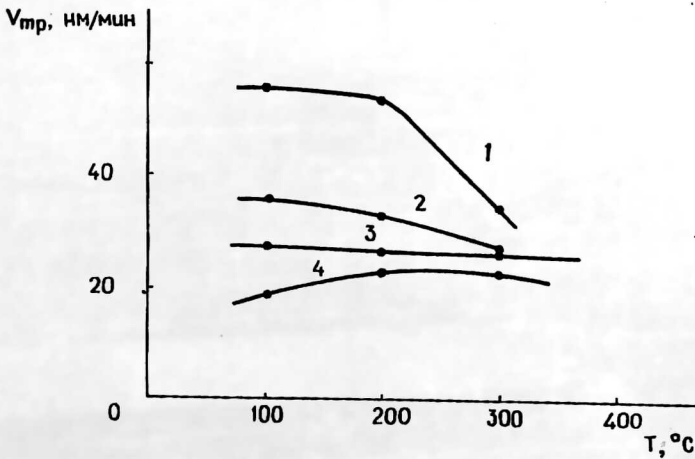


Рис. 6. Зависимость скорости съема от температуры образца:  
 1 — германий; 2 — К-8; 3 — кварц; 4 — кремний

Полученные экспериментальные данные позволяют выбрать оптимальный режим обработки в каждом конкретном случае любого технологического процесса.

Таким образом, показано, что в ГПНИИЭИО разработан ряд технологических ионных источников для применения в самых различных областях: в оптике для ионной полировки и модификации поверхности; в электронике для нанесения покрытий с новыми свойствами и улучшения параметров существующих покрытий; в архитектурной промышленности для создания теплосберегающих покрытий в составе стеклоблоков и стеклопакетов.

## Л и т е р а т у р а

1. Гришин С. Д., Косоголов А. В. и др. Обработка поверхности низкоэнергетичными ионами плазменных ускорителей // ОМП, 1979. № 11.
2. Нанесение высокопрочных многослойных оптических покрытий методом вакуумного напыления с ионным ассистированием / Е. Ю. Васильева, В. А. Горшков и др.: Матер. семинара "Технология изготовления прецизионных оптических элементов", 1996. — С.-Петербург, НТЦ Информтехника, АОТ ЛОМО.
3. Вакуумное высокопроизводительное оборудование для нанесения оптических покрытий на крупногабаритные подложки / В. И. Волчков, А. П. Еремин, В. Д. Смольянинов, А. И. Филачев: Матер. семинара "Технология изготовления прецизионных оптических элементов", 1996. — С.-Петербург, НТЦ Информтехника, АОТ ЛОМО.
4. Данилин В. С., Киреев В. Ю. Вакуумно-плазменные процессы травление-микроструктур // ЭТ. Сер. 6. 1983. Вып. 8(181).

## ION SOURCES FOR TECHNOLOGICAL ION-PLASMA EQUIPMENT

*A. P. Eremin, V. D. Smoljaninov, A. M. Filachev*  
Research institute for electron and ion Optics, Moscow, Russia

*Analysis of tendency development of ion-beam sources for technological ion-plasma equipment and their application was done. In this particle describes characteristics of ion sources, which was work out in the institute, presents physical principles, lying in the base of them work.*