

УДК 621.383

Электронно-ионно-плазменное технологическое оборудование для изготовления изделий микрофотоэлектроники и точного машиностроения

А. П. Еремин, В. Д. Смольянинов, А. Н. Козлов, А. Г. Уваев
Государственное предприятие "НИИ электронной и ионной оптики", Москва, Россия

А. М. Филачев
ФГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

Рассмотрено специальное электронно-ионно-плазменное технологическое оборудование для изготовления изделий микрофотоэлектроники, микроэлектроники и точного машиностроения. Оборудование предназначено для нанесения многослойных тонкопленочных покрытий, ионно-лучевого травления полупроводниковых материалов и микросварки изделий в вакууме. Приведены технические характеристики, состав и технологические возможности оборудования.

В России и за рубежом активно ведутся работы по разработке технологических процессов изготовления изделий микрофотоэлектроники с микронными и субмикронными размерами элементов [1—10].

Для технологического обеспечения решения той задачи необходимо специальное технологическое оборудование для ионного травления по-

лупроводниковых материалов, нанесения многослойных тонкопленочных покрытий из различных материалов, микросварки изделий в вакууме для повышения надежности при эксплуатации, осуществления контроля в процессе проведения ряда технологических операций в целях повышения процента выхода годных изделий.

Для этих целей в НИИ ЭИО создано специальное технологическое оборудование:

- установка, обеспечивающая в едином вакуумном процессе выполнение операций ионного травления, магнетронного напыления и резистивного испарения (УВН);
- установка "сухого" ионно-лучевого травления (УИЛТ);
- установка электронно-лучевой сварки (герметизации) вакуумных корпусов МФПУ (УЭЛС).

Установка вакуумного напыления

Предназначена для выполнения операций: ионной очистки, магнетронного распыления, резистивного испарения в едином вакуумном цикле. Низкая энергия ионов, бомбардирующих подложку, в процессе ионного травления, магнетронного напыления и резистивного испарения позволяет получать низкий уровень радиационных повреждений материала подложки и защищает от инверсии областей p -типа.

Реализуемые технологические процессы:

- магнетронное напыление тугоплавких материалов, в том числе молибдена;
- резистивное испарение материалов с низкой температурой плавления, в том числе индия;
- травление полупроводниковых материалов.

В состав установки входят вакуумная камера с системой откачки; внутрикамерная технологическая оснастка; магнетронная система напыления с блоком питания; система ионно-лучевого травления с блоком питания; устройство резистивного испарения; двухканальная система газонапуска; система управления технологическим процессом; система контроля толщины слоев.

Техническая характеристика

Предельное остаточное давление в камере, мм рт. ст., не хуже	5·10 ⁻⁶
Диаметр обрабатываемых пластин, мм.....	100, 150
Число обрабатываемых пластин.....	1
Глубина травления полупроводниковых материалов, мкм, не более	1
Толщина напыляемых пленок индия, мкм, не более.....	20
Неоднородность напыляемого материала, %.....	10
Контроль и стабилизация температуры подложкодержателя в диапазоне, °С	50—150
Точность, °С, не более	±10
Управление технологическим процессом:	
автоматическое	в рабочем режиме
ручное	в режиме отладки
Электропитание и максимальная потребляемая мощность, В; Гц; кВт	220/380, 50; 12

Компоновка установки

Вакуумная напылительная установка разработана на базе вакуумного поста, в который

встраиваются магнетронный распылитель, ионный источник, резистивный испаритель, внутрикамерная оснастка для размещения и поворота подложек, датчики системы кварцевого контроля толщины напыляемых материалов.

Применение специально разработанных ионного источника и магнетронного распылителя позволяет выполнить основное требование в производстве материалов для изготовления матричных фоточувствительных структур на КРТ — низкотемпературный режим формирования микроструктур и нанесения покрытий.

Блоки управления технологическим процессом, блок питания ионного источника, блок питания магнетрона, двухканальная система напуска газа, блок контроля и стабилизации температуры, система контроля толщины напыляемых слоев размещаются в отдельной стойке управления технологическим процессом.

Ионный источник и магнетронный распылители размещаются в герметичных кожухах с гибкими рукавами, через которые осуществляется подвод коммуникаций.

Обрабатываемая подложка располагается горизонтально в верхней части камеры на держателе подложки, который может перемещаться и устанавливаться на четыре позиции с радиусом поворота ~200 мм. При этом обеспечивается индивидуальная обработка подложки на позиции ионной очистки, магнетронного напыления и резистивного испарения.

Система управления обеспечивает контроль и стабилизацию температуры подложкодержателя в диапазоне температур 50—150 °С с точностью 10 °С.

На позициях резистивного испарения и магнетронного напыления встроены датчики прибора контроля толщины осаждения тонкопленочных слоев на подложке.

Блок-схема установки приведена на рис. 1.

Описание конструкции подложкодержателя

Подложкодержатель снабжен встроенным в конструкцию нагревателем пластин. Нагревательным элементом резистивного типа служит ленточная спираль, выполненная из молибдена толщиной 0,2 мм. Спираль размещена между изоляторами из стеклоткани и прижимается к столу, нагреваемому до заданной температуры. Контроль температуры осуществляется термопарой. Пластина поджимается к прокладке стола таким образом, чтобы между рабочей поверхностью стола и тыльной поверхностью пластин образовался зазор порядка 0,5 мм. Нагрев пластины производится за счет передачи тепла от нагретого стола к пластине через газовую "подушку", заключенную в этом объеме. Оптимальное давление в газовой "подушке" равно 6—10 мм рт. ст.

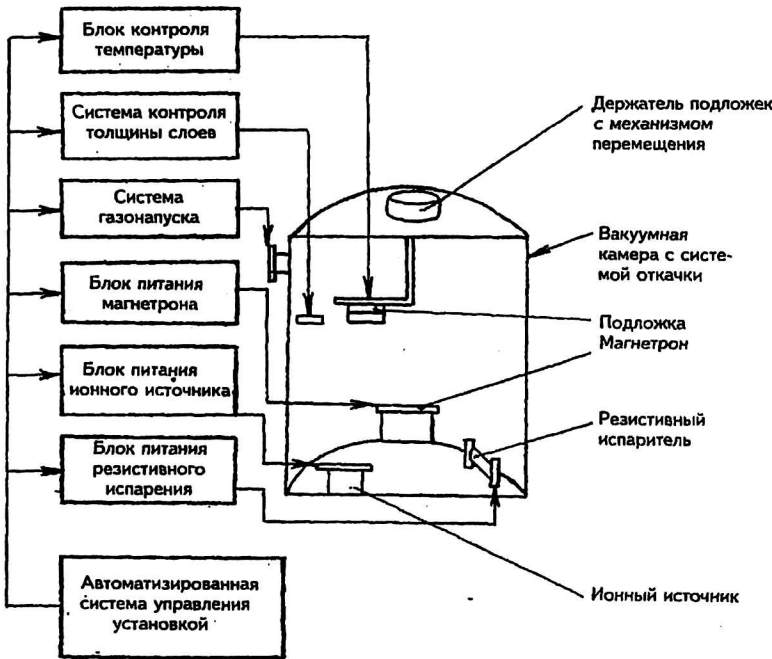


Рис. 1. Блок-схема установки вакуумного напыления

Для удобства обслуживания пластина перед установкой на подложкодержатель предварительно закрепляется на сменном подложконосителе. Фиксация последнего на подложкодержателе производится с помощью четырех поворотных подпружиненных упоров.

Для стабилизации температуры пластины на заданном уровне в случае поступления на нее дополнительного теплового потока от источников обработки предусмотрены отключение нагревателя, а также возможность охлаждения тыльной стороны стола сжатым воздухом.

Резиновые прокладки несущего фланца подложкодержателя защищены от перегрева каналом, охлаждаемым проточной холодной водой.

Конструкция подложкодержателя (рис. 2) выполнена универсальной для обработки кремниевых пластин диаметром 100 или 150 мм. Для переналадки подложкодержателя для обработки пластин альтернативного размера необходимо пользоваться подложкодержателями и деталями, предусмотренными в комплекте сменных частей.

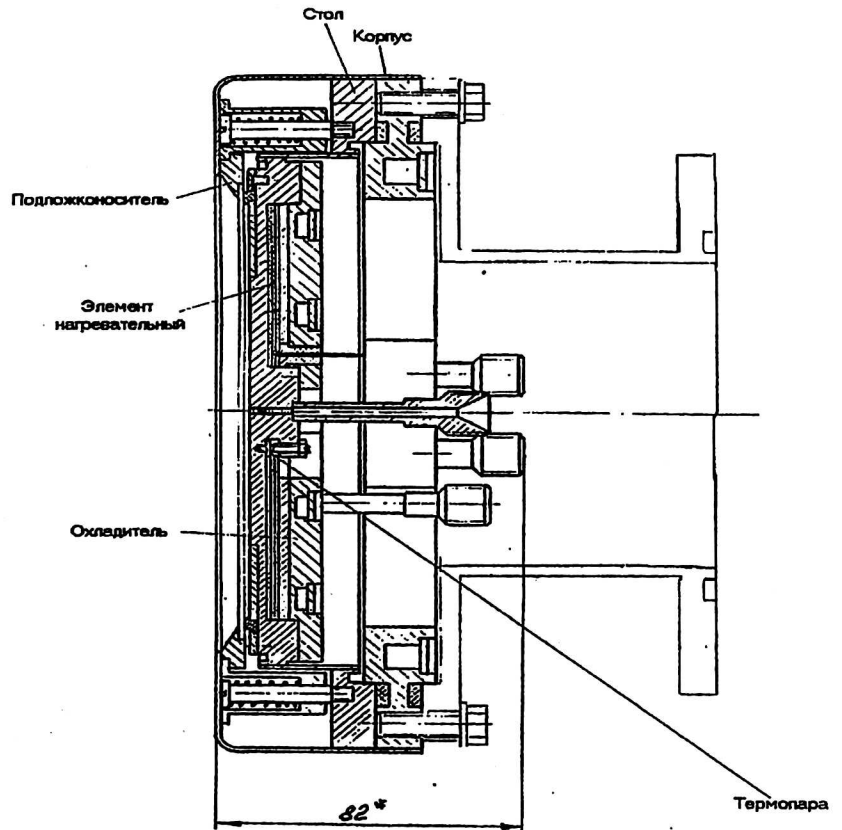


Рис. 2. Подложкодержатель

Равномерность напыления при использовании резистивного и магнетронного испарителей

Неравномерность напыления резистивного испарителя (пленки) на подложку определялась для различных значений диаметра подложки и ее смещения относительно оси испарителя ΔX и ΔY . Результаты представлены в таблице.

Смещение, мм		Диаметр подложки, мм	
ΔX	ΔY	100	150
0	0	2,1 %	4,7 %
50	0	8,3 %	12,6 %
0	50	8,3 %	12,6 %

Наиболее простым способом получения равномерного покрытия на неподвижных пластинах при магнетронном распылении является использование круглого планарного магнетрона при условии грамотного проектирования геометрии распылительной системы.

Относительная неравномерность толщины покрытий δ (мм), напыляемых круглым планарным магнетроном на неподвижную подложку диаметром 150 мм, зависит от положения центра зоны эрозии на поверхности мишени (и ее формы) и расстояния до подложки. Положение зоны распыления на поверхности мишени определяется размерами мишени (диаметр D_M , мм) и геометрией магнитной системы, формирующей зону распыления на ее поверхности. Рис. 3 показывает, как изменяется относительная неравномерность толщины покрытий для мишеней различного диаметра 100, 130, 180 и 220 мм по мере увеличения расстояния до подложки в интервале значений 30–100 мм. Для пластин диаметром 150 мм требуемое в микроэлектронике значение $\delta < \pm 5\%$ достигается при использовании магнетрона, имеющего мишень диаметром 220 мм.

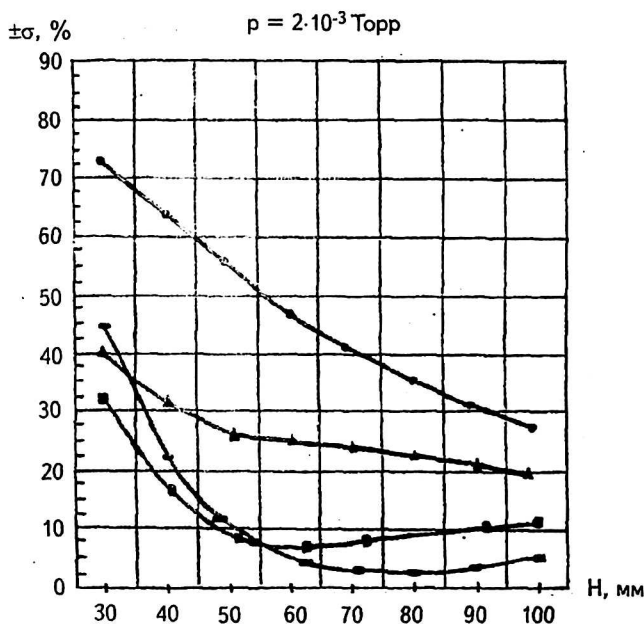


Рис. 3. Зависимость относительной неравномерности напыления покрытий от диаметра мишени и расстояния до неподвижной подложки диаметром 150 мм:
 —●— $D_M = 100$ мм; —▲— $D_M = 130$ мм;
 —■— $D_M = 180$ мм; —■— $D_M = 220$ мм

Автоматизированная система управления технологическим процессом УВН

Целью автоматизации установки являются:

- увеличение производительности;
- увеличение выхода годных изделий;
- вакуумная и технологическая дисциплина.

Предъявляемые высокие требования к повторяемости параметров покрытий накладывают жесткие требования к поддержанию электрических параметров и исполнению технологической дисциплины в производственном процессе, чтобы максимально устранить возможность ошибок по вине оператора. Большая цена обрабатываемых деталей, а также длительность полного технологического цикла производства в интервалах межоперационного контроля в свою очередь требуют обеспечения работы установки с высоким уровнем автоматизации всех электрических технологических величин.

Удовлетворить этим требованиям по качеству и надежности установка может только в случае обеспечения ее системой автоматики, которая способна устранить влияние ошибок оператора и гарантировать четкое выполнение последовательности заданного технологического процесса.

Система управления обеспечивает работу УВН в следующих режимах: наладочном, ручном и автоматическом.

Система управления установкой выполнена по двухуровневой схеме. В верхнем контуре управления, выполненном на базе IBM PC общего применения и являющимся рабочим местом оператора, решаются следующие задачи:

задание и передача параметров технологических процессов, производимых на установке, в контроллер нижнего уровня управления в любой момент времени;

отображение хода технологического процесса на мнемосхеме установки в графическом виде, в цифровом виде по каждой технологической операции в отдельности в виде таблиц (заданное и текущее состояние параметра);

отображение диагностических сообщений о работоспособности устройств установки, а также о состоянии их в любой момент времени;

ручное управление каждым элементом СУ в режиме "Наладка", а также полуавтоматический режим для отработки техпроцесса по каждой технологической операции;

просмотр входных и выходных сигналов СУ как дискретных, так и аналоговых, а также изменение выходных сигналов наладчиком в любой момент времени;

сбор данных в верхнем контуре управления о ходе технологического процесса с запоминанием на "жестком" диске и дальнейшим протоколированием.

Нижний контур управления выполнен на базе промышленного контроллера ROBO-2000, ведет

управление исполнительными объектами (источники питания, система напуска газа, двигатель привода стола, система стабилизации температуры) в реальном масштабе времени, а также непосредственный сбор данных с первичных источников информации. Все электрические цепи связи с объектами управления имеют гальваническую развязку. Связь контроллера нижнего уровня с компьютером осуществляется по интерфейсу RS-232, а при наличии в объектах управления собственных контроллеров (PLC) — по интерфейсу RS-485 по согласованным протоколам.

В системах управления установками предусмотрен источник бесперебойного питания, к которому подключаются следующие устройства СУ: монитор, системный блок верхнего уровня, а также контроллер нижнего уровня. Наличие источника бесперебойного питания обеспечивает защиту от провалов сетевого питания, а также возможность “регламентированного” отключения компьютеров обоих контуров управления.

Установка “сухого” ионно-лучевого травления

Предназначена для “сухого” ионно-лучевого травления полупроводниковых и металлических материалов в среде инертных и реактивных газов при изготовлении кремниевых МОП-мультиплексов. Технология “сухого” травления в сочетании с проекционной фотолитографией позволит снизить проектные нормы мультиплексов до 1,0 мкм.

Применение специально разработанной системы ионно-лучевого травления с диаметром ионного пучка 200 мм и регулируемой энергией ионов в пучке обеспечивает минимальные “тепловые” нагрузки при прецизионной обработке полупроводниковых материалов.

В состав установки входят: вакуумная камера с системой откачки, система визуального контроля процесса травления, система прецизионного ионно-лучевого травления, блок питания источника ионов, система газонапуска, вакуумная откачная система, система управления установкой.

Блок-схема установки представлена на рис. 4.

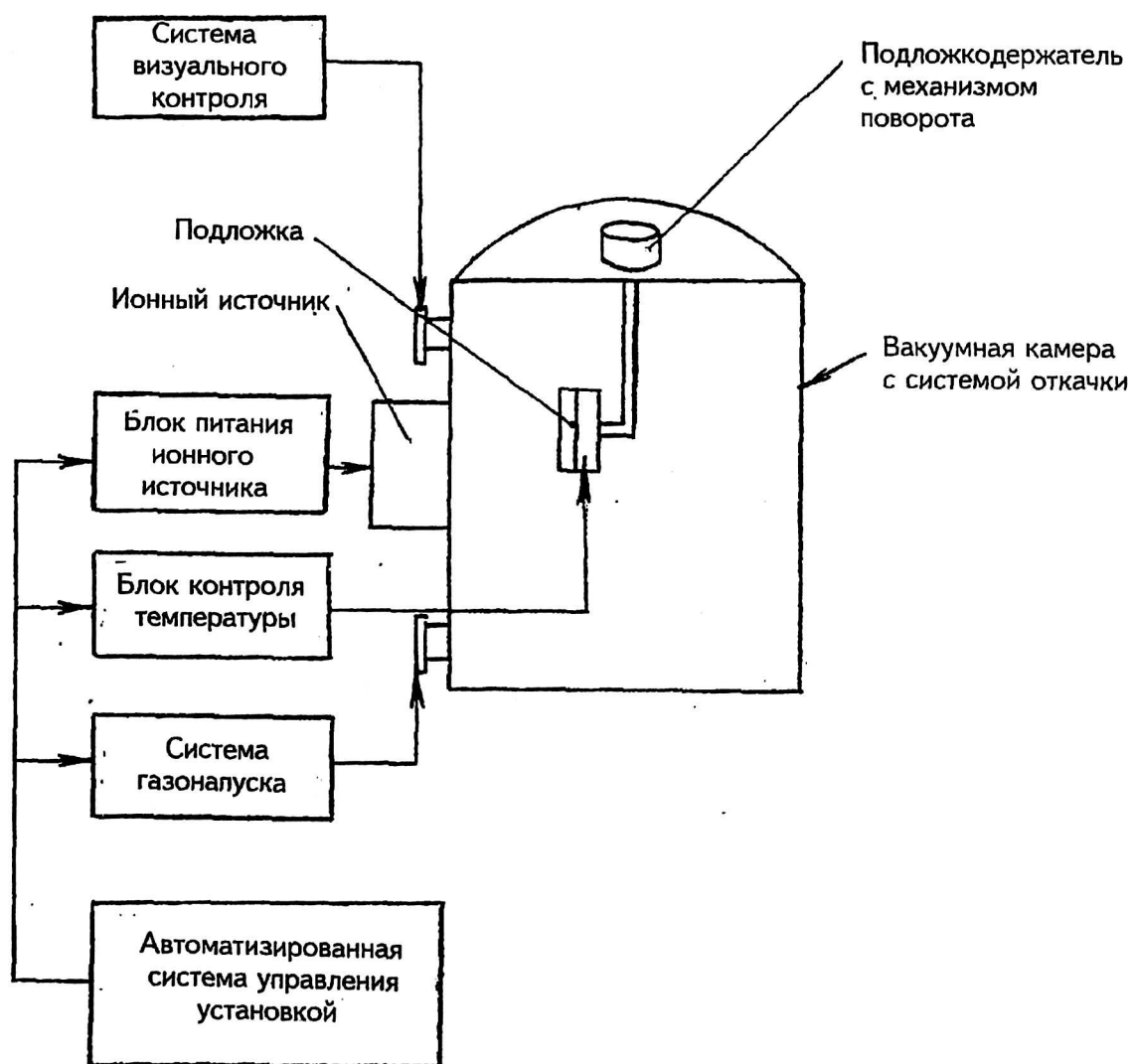


Рис. 4 Блок-схема установки ионно-лучевого травления

Техническая характеристика

Предельное остаточное давление в камере, мм рт. ст., не хуже	5·10 ⁻⁶
Диаметр ионного пучка в рабочей зоне, мм, не менее	150
Диаметр обрабатываемой подложки, мм	100, 150
Глубина травления полупроводниковых материалов, мкм, не более	12
Неравномерность травления полупроводниковых материалов, %	±5
Контроль и стабилизация температуры подложкодержателя в диапазоне, °С	20—80
Точность, °С, не более	±3
Управление технологическим процессом:	
автоматическое	в рабочем режиме
ручное	в режиме отладки
Электропитание и максимальная потребляемая мощность, В; Гц; кВт	220/380; 50; 10

Компоновка установки

В вакуумной камере УИЛТ устанавливается внутрикамерная оснастка для размещения и поворота подложки, располагающейся вертикально. Ионный источник и система визуального контроля поверхности подложки закрепляются на боковых фланцах вакуумной камеры.

К вакуумной камере подсоединяются криогенный насос и форвакуумный агрегат.

Блоки управления технологическим процессом, блок питания ионного источника, блок контроля и стабилизации температуры, четырехканальная система газонапуска размещаются в отдельной стойке управления технологическим процессом.

УИЛТ предназначена для индивидуальной обработки ионным пучком в стационарном режиме поверхностей подложек диаметром 100 или 150 мм.

Обрабатываемая подложка располагается вертикально на подложкодержателе, который может поворачиваться на 90° вокруг своей оси. При этом обеспечивается необходимая точность установки подложкодержателя относительно ионного источника и, при необходимости, размещение подложкодержателя перпендикулярно оси объектива системы визуального контроля.

Система управления обеспечивает контроль и стабилизацию температуры подложкодержателя в диапазоне температур 20—80 °С с точностью ±3 °С.

Конструкция подложкодержателя аналогична конструкции подложкодержателя установки вакуумного напыления.

Автоматизированная система управления технологическим процессом выполнена по двухуровневой системе управления, как и в установке вакуумного напыления.

Установка электронно-лучевой сварки (герметизации) вакуумных корпусов МФПУ

Предназначена для сварки электронным лучом вакуумных корпусов МФПУ. Электронный

пучок генерируется и формируется с заданными пространственно-энергетическими характеристиками. Энергия сфокусированного на изделии пучка электронов при их торможении в материале обрабатываемого изделия преобразуется в тепловую, которая обеспечивает расплавление материала изделия и сварку деталей. Проведение процесса обработки в вакууме обеспечивает надежную защиту зоны обработки от вредного воздействия окружающей среды, а также высокое качество и надежность соединения деталей, недостижимое другими методами сварки.

В состав установки входят следующие функциональные узлы: вакуумная рабочая камера со средствами откачки, электронно-лучевая пушка, высоковольтный источник питания, внутрикамерная оснастка, стойка управления технологическим процессом.

Техническая характеристика

Предельное остаточное давление в камере, мм рт. ст., не хуже	5·10 ⁻⁶
Ускоряющее напряжение, кВ	30—50
Ток электронного пучка, мА	0—20
Минимальный диаметр электронного пучка, мм	0,3—0,4
Частота вращения обрабатываемых корпусов, об/мин	0—30
Размер свариваемых корпусов (диаметр×высота), мм, не более	40×120
Управление технологическим процессом:	
автоматическое	в рабочем режиме
ручное	в режиме отладки
Электропитание и максимальная потребляемая мощность, В; Гц; кВт	220/380; 50; 10

Компоновка установки

В качестве рабочей камеры используется вакуумная камера прямоугольной формы. На передней стенке располагается смотровое окно диаметром 160 мм из стекла марки ТФ105, толщиной 50 мм и защитного стекла, обеспечивающего защиту от напыления продуктами обработки. На верхней стенке камеры расположен фланец, согласованный с посадочным местом электронно-оптической колонны, на задней стенке — фланец для подсоединения вакуумной системы.

Вакуумная система поддерживает давление 5·10⁻⁵ мм рт. ст. При разгерметизации камеры электронная пушка с помощью клапана отсечки остается под вакуумом.

На рабочую камеру устанавливается электронно-оптическая колонна и своим патрубком стыкуется с вакуумной системой, которая обеспечивает рабочий вакуум в полости электронной пушки.

В отдельной стойке располагается система управления вакуумной системой, а в стойке управления технологическим процессом — устройство управления приводом стола и технологической оснасткой, блок управления лучом, система управления технологическим процессом.

Блок-схема установки представлена на рис. 5.

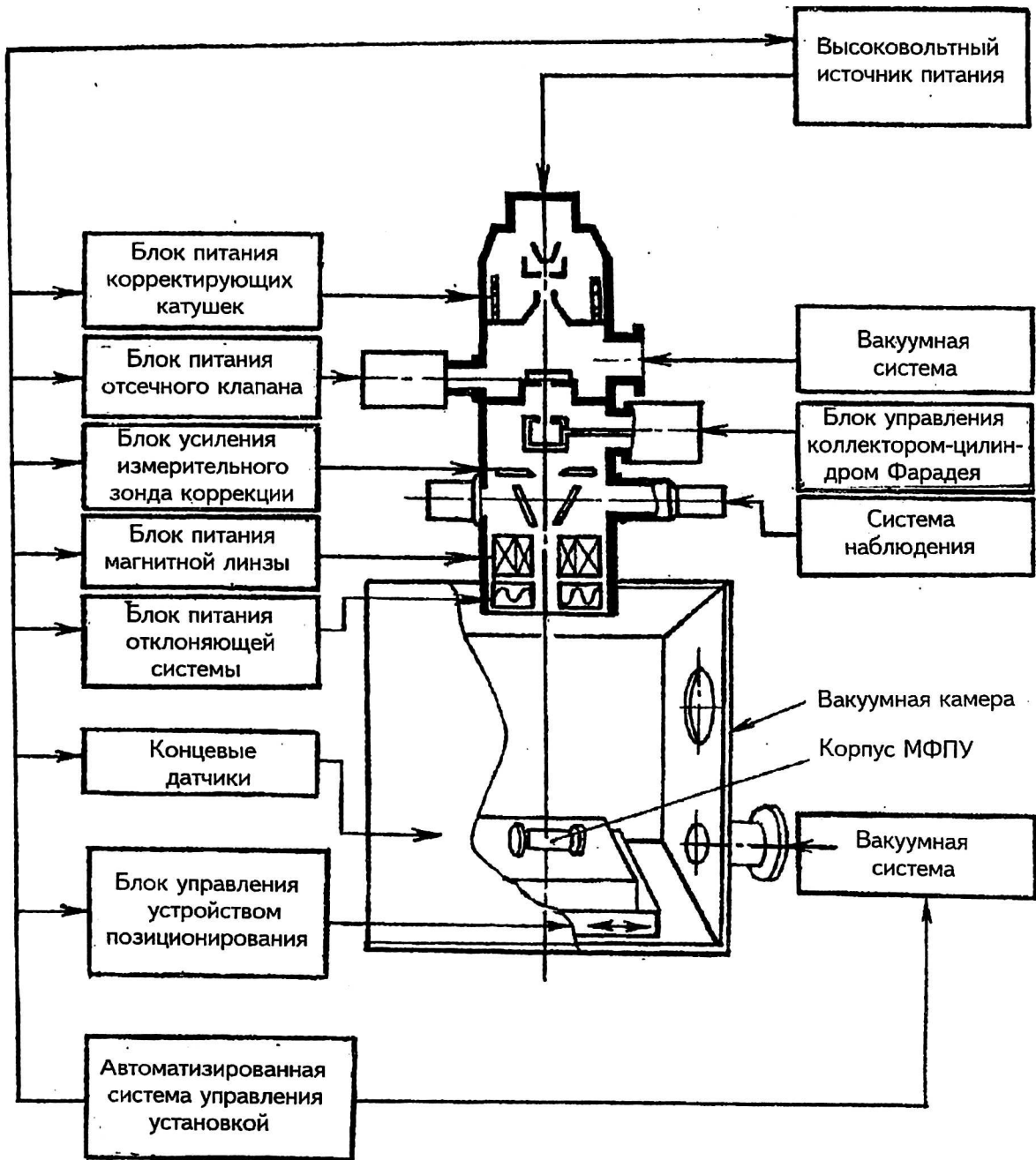


Рис. 5. Блок-схема установки электронно-лучевой сварки

Электронно-оптическая колонна

Электронно-оптическая колонна (рис. 6) содержит в своем составе: электронную пушку, корпус, в котором располагается клапан отсеки пушки, оптическую систему наблюдения и узел защиты от напыления, фокусирующую линзу с отклоняющей системой, датчик отраженных электронов. Электронная пушка генерирует пучок электронов и ускоряет его до заданной энергии. Клапан отсеки разделяет вакуумную полость пушки от камеры. Оптическая система наблюдения позволяет наблюдать за процессом обработки изделий и местоположением пучка на изделии.

Узел защиты обеспечивает защиту оптики от продуктов распыления материалов при обработ-

ке. Фокусирующая линза позволяет осуществлять фокусировку пучка электронов в требуемой плоскости, в пространстве, где находится изделие. Отклоняющая система обеспечивает отклонение электронного пучка по двум взаимно перпендикулярным направлениям, а также развертку пучка. Датчик, располагающийся на нижнем конце колонны, выполняет функцию коллектора электронов, сигнал с которого идет в систему наведения электронного пучка на обрабатываемое изделие.

Блок формирования электронного пучка, юстировочный блок, блок фокусировки электронного пучка обеспечивают формирование и транспортировку электронного пучка с заданными параметрами от катода до мишени.

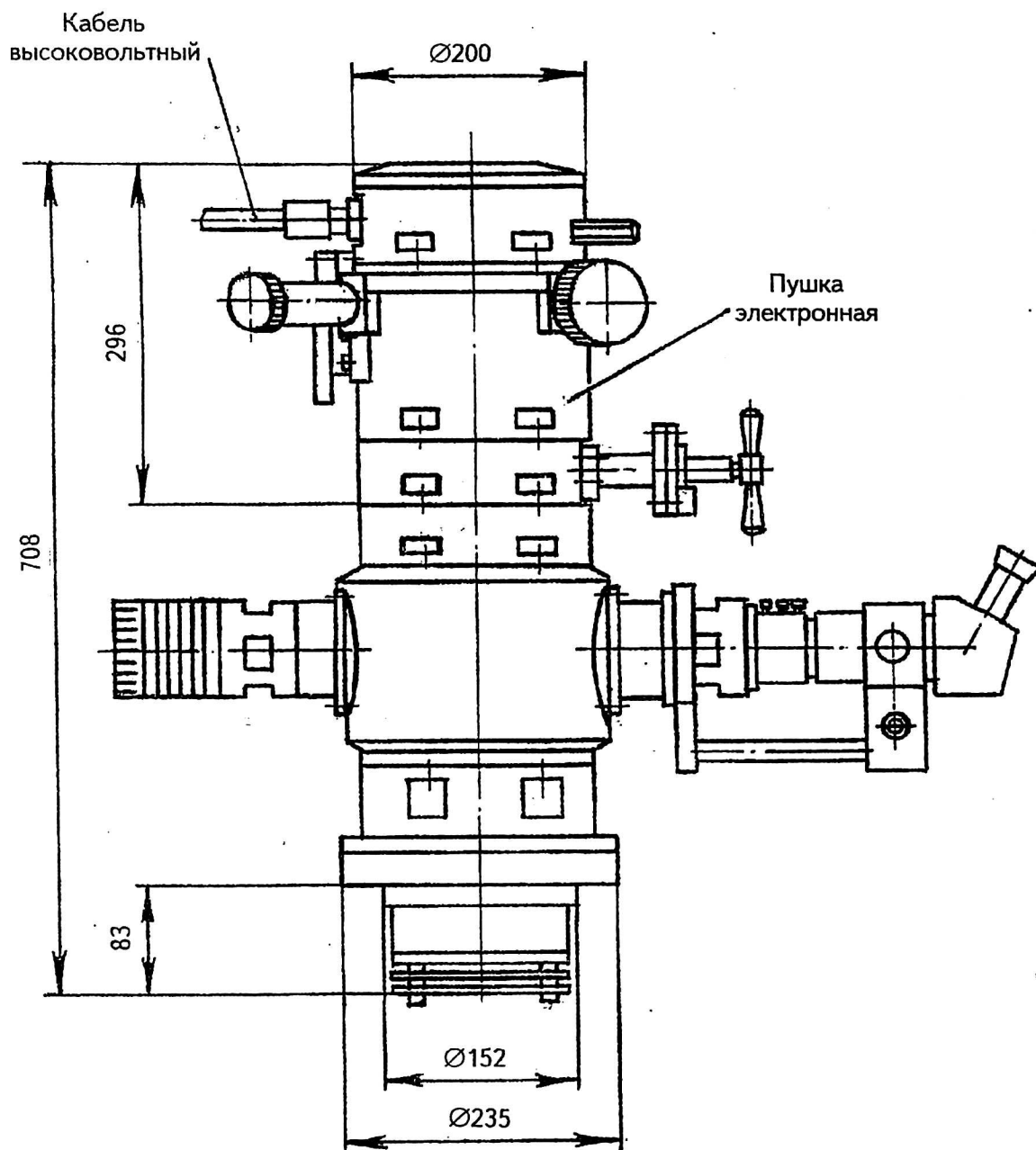


Рис. 6. Колонна электронно-оптическая

Автоматизированная система управления технологическим процессом выполнена по двухуровневой системе управления, как в установках вакуумного напыления и ионно-лучевого травления.

Таким образом, созданное современное автоматизированное ионно-плазменное и электронно-лучевое технологическое оборудование служит для изготовления нового поколения элементной базы матричных фотоприемных устройств на основе фотодиодов из полупроводниковых соединений "кадмий—ртуть—теллур", при условии обеспечения минимальных "тепловых" нагрузок.

Технологическое оборудование является универсальным и может быть использовано в оптической промышленности, микроэлектронике,

авиационной промышленности и точном машиностроении.

Литература

1. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982.
2. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986.
3. Еремин А. П., Смольянинов В. Д., Филачев А. М. Ионные источники для технологического ионно-плазменного оборудования // Прикладная физика. 1997. № 2—3.
4. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980.
5. Вакуумная техника: Справочник. — М., 1992.
6. Филачев А. М., Андреев С. В., Белуга И. Ш., Гайдукова И. С., Монастырский М. А., Муравьев А. Г., Тарасов В. А. Разработка вычислительных методов и пакета прикладных программ для моделирования электронно-лучевых технологических установок // Прикладная физика. 1998. № 2.

7. Волчков В. И., Еремин А. П., Смольянинов В. Д., Филачев А. М. Применение методов электронной оптики в разработке тонкопленочных ионно-плазменных устройств // Оборонно-технический комплекс — техническому прогрессу России. 1996, № 3.

8. Волчков В. И., Еремин А. П., Смольянинов В. Д., Филачев А. М. Вакуумная установка для нанесения тонкопленоч-

ных покрытий на крупногабаритные плоские подложки // Научно-технические достижения. 1996. № 3.

9. Козлов А. Н., Смольянинов В. Д., Еремин А. П., Филачев А. М. Устройство контроля профиля пучка заряженных частиц // Прикладная физика. 2002. № 3.

10. Козлов А. Н., Смольянинов В. Д., Еремин А. П., Филачев А. М. Система контроля энергетического спектра ионных пучков // Там же.

Electron-ion-plasma production equipment for manufacture of workpieces of microphotoelectronics and precise machine industry

A. P. Eremin, V. D. Smolyaninov, A. N. Kozlov, A. G. Uvaev

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

A. M. Filachev

ORION Research-and-Productions Association, Moscow, Russia

The special electron-ion-plasma production equipment for manufacture of workpieces of microphotoelectronics, microelectronics and precise machine industry is surveyed in the paper. The equipment is intended for drawing the structural thin-film coats, ion-beam etching the semiconductor materials and microwelding the workpieces in vacuum. Given are characteristics, composition and technological opportunities of equipment.