

4. Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A., Syresin E., Trubnikov G. The computer simulation of the particle dynamics in the storage ring with strong coupling of transverses modes: Proc. of EPAC, 2000.

5. Antropov V., Boltushkin E., Bykovsky V., et al. Particle dynamics in the Low Energy Positron Toroidal Accumulator, first experiments and results: Ibid, 2004.

6. Meshkov I., Sidorin A., Smirnov A., Syresin E. The particle dynamics in the low energy storage rings with longitudinal magnetic field: Ibid, 1998. P. 1067.

7. Мешков И. Н., Селезнев И. А., Сидорин А. О., Смирнов А. В., Сыресин Е. М., Трубников Г. В. Модифицированный бетатрон // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36. Вып. 5. С. 1071—1133.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

## Dynamics of charged particles in a magnetic field of the strelatron type

E. V. Boltushkin, V. F. Bykovsky, A. G. Kobets, Yu. V. Korotaev, V. I. Lokhmatov,  
V. N. Malakhov, I. N. Meshkov, R. V. Pivin, A. Yu. Rudakov, I. A. Seleznev,  
A. O. Sidorin, A. V. Smirnov, G. V. Trubnikov, S. L. Yakovenko  
Joint Institute for Nuclear Investigation, Dubna, Russia

*Commissioning of LEPTA storage ring with circulating electron beam was performed in September of 2004 year. Focusing of the circulating beam in the ring is provided by longitudinal magnetic field and additional helical quadrupole (stellarator) field. In such a focusing system the particle motion in the transverse planes is coupled. The ring is equipped with an electron cooling system. Inside the cooling section the positronium generation will be realized.*

УДК 537.533

## Вакуумное технологическое оборудование для производства изделий микрофотоэлектроники

A. Н. Козлов, И. С. Гайдукова, А. Г. Уваев, А. В. Щербаков, А. М. Филачев  
ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Представлен комплекс электронно-лучевого и ионно-плазменного оборудования для производства изделий микрофотоэлектроники. Установка вакуумного напыления (УВН) позволяет обеспечить в едином вакуумном процессе выполнение операций ионного травления, магнетронного распыления, резистивного испарения, что необходимо для создания многокомпонентного контакта к областям р-типа. Низкая энергия ионов, бомбардирующих подложку, в процессе ионного травления и очистки поверхности позволяет получать низкий уровень радиационных повреждений материала подложки и оберегает от инверсии областей р-типа. Установка ионно-лучевого травления (УИЛТ) предназначена для ионно-лучевого травления полупроводниковых и металлических материалов в среде инертных и реактивных газов в вакууме при изготовлении кремниевых МОП-мультиплексоров. Установка для электронно-лучевой сварки (УЭЛС) корпусов предназначена для сварки электронным лучом вакуумных корпусов матричного фотоприемного устройства (МФПУ).*

Вакуумное технологическое оборудование для производства современных приборов микрофотоэлектроники развивается в направлении повышения технологических возможностей — увеличение площади обрабатываемых пластин, обеспечение возможности нанесения и контроля толщины пленок вплоть до нанометрового диапазона, снижение уровня загрязнений и радиационных дефектов создаваемых структур, повышение производительности и расширение функциональных возможностей установок [1—4].

Выпускаемое промышленностью технологическое оборудование для ионного травления и магнетронного напыления общего назначения не позволяет обеспечить требования технологического процесса из-за возможного перегрева и радиационного повреждения обрабатываемых фоточувствительных структур.

Разработан комплекс электронно-лучевого и ионно-плазменного оборудования, предназначенного для укомплектования технологического маршрута для про-

изводства изделий микрофотоэлектроники, лишенных указанных недостатков.

Разработанный комплекс специализированного технологического ионно-плазменного оборудования включает в себя:

- специализированную автоматизированную ионно-плазменную установку, позволяющую в едином вакуумном цикле производить ионную и ионно-химическую очистку поверхности фотоприемных структур без радиационных и температурных повреждений и наносить на них требуемые покрытия с высокой адгезией и необходимыми электрическими свойствами;
- установку прецизионного ионно-лучевого травления полупроводниковых материалов, обеспечивающую высокую равномерность плотности ионного тока по всей поверхности пластины при достаточно низкой энергии ионов для высокоточного травления полупроводниковых структур через маску, в целях точного обеспечения топологии;
- автоматизированную установку электронно-лучевой сварки (герметизации) корпусов матричных фотоприемников в вакууме (оборудование этого класса в России не выпускается).

Методы, используемые для очистки подложек полупроводниковых структур перед напылением, и последующие операции, такие как катодное распыление, плазменное травление, нагревание до высокой температуры, импульсная термообработка, не удовлетворяют требованиям обработки материалов фотоприемных устройств из-за нарушения температурного режима, а также из-за достаточно высокого уровня минимальных радиационных повреждений.

Для процессов ионного травления и ионной очистки необходимо использование источников ионов, не вносящих примеси металлов на обрабатываемую подложку, имеющих энергию ионов до 1 кэВ, плотность ионного тока до 2 мА/см<sup>2</sup>, а также слабо расходящийся пучок для формирования вертикальных структур.

Ионно-плазменное травление является методом анизотропного травления с высоким разрешением и позволяет обеспечить высокую равномерность обработки при минимальном внесении загрязнений и достаточную воспроизводимость скорости ионно-лучевого травления при необходимом уровне контроля состава остаточной среды в рабочей камере.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, для решения технологических задач производства матричных фотоприемных устройств является применение ионных источников в качестве систем очистки и последующей обработки поверхности функциональных узлов, реализующих "холодную" ионную и ионно-химическую технологию очистки.

С целью оптимальности принимаемых технических решений нами был проведен сравнительный анализ возможности реализации требуемых параметров с помощью известных типов ионных источников: источника Кауфмана, ионных источников с холодным катодом "Ион-2" и "Ион-4" и т. д.

Источники Кауфмана, имеющие вытягивающие и формирующие пучок сетки, подвергаемые ионному распылению и вносящие примеси металлов на обрабатываемую подложку, не удовлетворяют этим требованиям. Кроме того, эти источники неперспективны для ионного травления обрабатываемых пластин большой площади ввиду сложности в изготовлении и сборке сеток большого диаметра, что затрудняет формирование пучка ионов большой площади с равномерной плотностью ионного тока по сечению.

Использование ионных источников с холодным катодом типа "Ион-4" и подобных затруднено для формирования вертикальных структур из-за значительной расходимости пучка. Ионы в таких источниках испытывают двойные и тройные соударения под разными углами на пути от источника до подложки. За счет этого ионы падают на подложку с большим разбросом по углу, что не позволяет вытравливать вертикальные каналы, а возросший энергетический разброс ионного пучка снижает эффективность процесса травления. Использование ионных источников типа "Ион-2" нецелесообразно ввиду высокой неравномерности плотности тока пучка по сечению в плоскости подложки.

Жестким требованиям, предъявляемым к параметрам ионного пучка, для осуществления травления полупроводниковых пластин в производстве изделий микрофотоэлектроники в большей степени удовлетворяют источники ионов с холодным катодом в виде подложки цилиндра. В таких источниках возможно получение ионного пучка большой площади с высокой равномерностью и достаточно малой расходимостью.

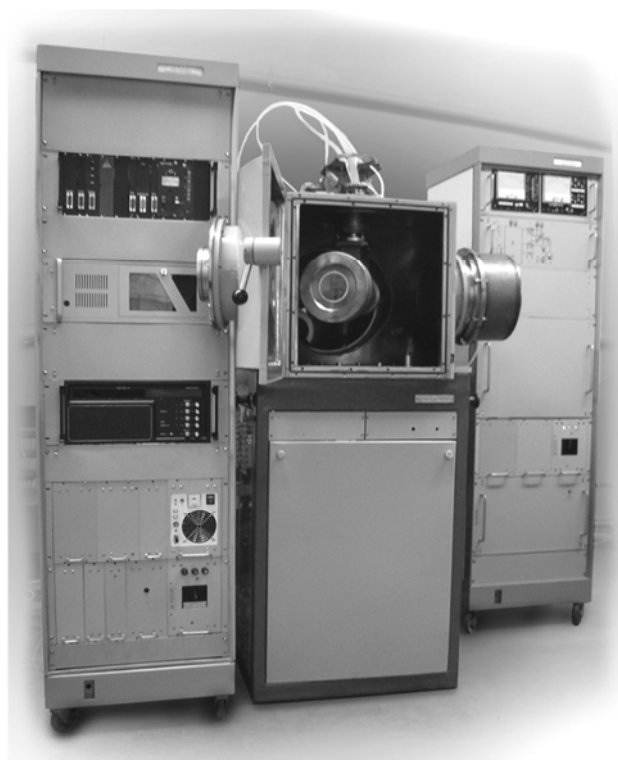
Высокая равномерность достигается за счет большого числа одинаковых разрядных промежутков. Для формирования ионного пучка диаметром 100 мм необходимо создать 37 разрядных промежутков, а для формирования равномерного ионного пучка диаметром 200 мм их требуется уже 139.

В ионных источниках этого типа силовые линии магнитного поля направлены вдоль вектора напряженности электрического поля и участвуют в удержании электронов в разрядном промежутке, значительно повышая степень ионизации. Степень влияния магнитного поля на формирование ионного пучка достаточно мала. Траектории движения ионов, вылетевших из разрядного промежутка, прямолинейные, не пересекающиеся.

На основе разработанного ионного источника с холодным катодом изготовлена вакуумная установка ионного травления (рис. 1, а). В нее входят ионный источник, формирующий пучок ионов диаметром 200 мм, специальная внутрикамерная оснастка, система стабилизации температуры подложки, четырехканальная система подачи газа и система визуального наблюдения. Установка снабжена криогенной откачкой и компьютерным управлением.

Вторая вакуумная комплексная установка для технологической линейки изготовления матричных фоточувствительных структур на КРТ представляет собой специализированную автоматизированную ионно-плазменную установку, позволяющую в едином вакуумном цикле проводить ионную и ионно-химическую

очистку поверхности фотоприемных структур без радиационных и температурных повреждений (см. рис. 1, б). Она состоит из вакуумной системы с диффузионным насосом, источника ионов, формирующего ионный пучок диаметром 100 мм для очистки подложек перед напылением, магнетронного распылителя и резистивного испарителя, а также подложкодержателя с термостабилизацией, кварцевого измерителя толщины пленок, двухканальной системы подачи газа и системы компьютерного управления.



а



б

**Рис. 1. Установка:**

а — ионно-лучевого травления; б — вакуумного напыления

Процессы, происходящие при нанесении тонких пленок при резистивном испарении, во многом определяются степенью вакуума в рабочих камерах, характе-

ризуемой средней длиной свободного пути частиц осаждаемого вещества. Скорость испарения большинства химических элементов составляет  $10^{-4}$  г/см<sup>2</sup>·с. Для получения приемлемых скоростей роста пленки, а также экономного расходования испаряемого материала следует создавать условия движения частиц преимущественно по направлению к подложке. При этом необходим достаточно глубокий вакуум, при котором исключаются столкновение молекул остаточного газа с молекулами вещества и рассеивание их потока на пути к подложке.

Длина свободного пути молекул  $\lambda$  при различных давлениях рассчитывается из выражения

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-1} / P,$$

где  $P$  — давление, Па.

При давлении  $P = 10^{-2}$  Па средняя длина свободного пробега молекул  $\lambda = 500$  мм, что превышает реальное расстояние от испарителя до подложки, равное 300 мм.

Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление порядка  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Па. В этом случае поток испаренного вещества, состоящий из молекул (атомов), не претерпевающих на своем пути столкновений и рассеяний и движущихся прямолинейно, называют молекулярным потоком. Основная цель при нанесении тонкопленочных покрытий — обеспечение равномерности толщины пленки на подложке. В установке применяется индивидуальная обработка подложек диаметром 100 и 150 мм. Оптимальное расстояние от испарителя до подложки составляет 300 мм, в этом случае неравномерность толщины пленки не превышает 10 %.

Резистивные испарители позволяют наносить пленки диэлектриков и металлов, в том числе и тугоплавких с температурой испарения до 2000 °С.

Резистивный испаритель комплексной установки напыления имеет следующие конструктивные особенности: охлаждаемый проточной водой токовод испарителя выполнен из меди и герметизируется с помощью вакуумных прокладок, а от плиты вакуумной камеры изолируется текстолитовыми кольцами; лодочка испарителя может устанавливаться на различном расстоянии от оси камеры параллельно плите. Напряжение питания испарителя составляет 12 В, максимальный допустимый ток — 300 А.

Причиной создания специализированной установки вакуумного напыления была потребность в оборудовании для напыления индиевых столбиков высотой до 10 мкм. Установки резистивного напыления не позволяют однозначно воспроизводить индиевые пленки одинаковой плотности. Это объясняется различной скоростью испарения индия от процесса к процессу. Стабилизацией тока резистивного испарителя решить проблему стабилизации скорости испарения не удалось ввиду изменения массы испаряемого материала в процессе работы. Для контроля над ходом технологического процесса установка оснащена датчиком скорости напыления индия в виде нихромовой проволоки, расположенной по краю зоны испарения. Часть испаряемого вещества

оседает на проволоке и изменяет ее сопротивление. Последнее линейно зависит от толщины напыляемого материала. Скорость изменения сопротивления есть параметр, однозначно характеризующий скорость напыления и, соответственно, плотность напыляемой пленки (рис. 2).

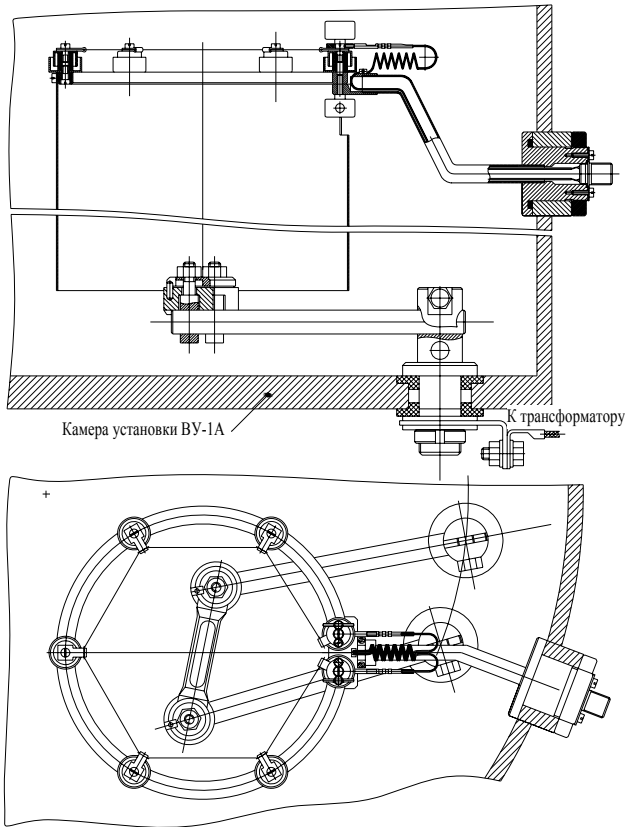
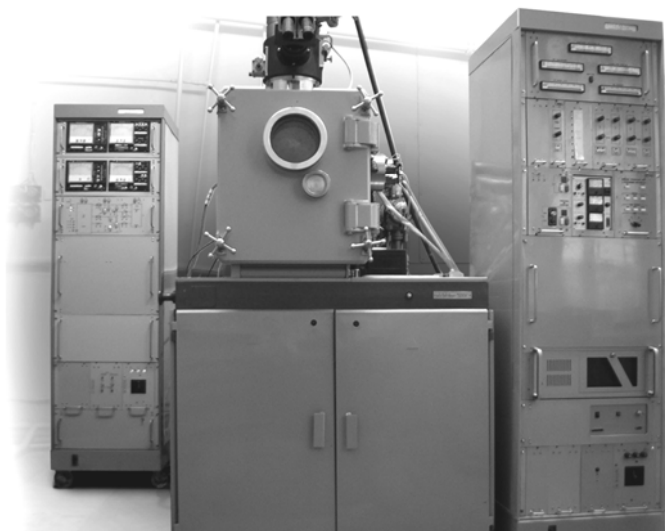


Рис. 2. Измеритель скорости напыления

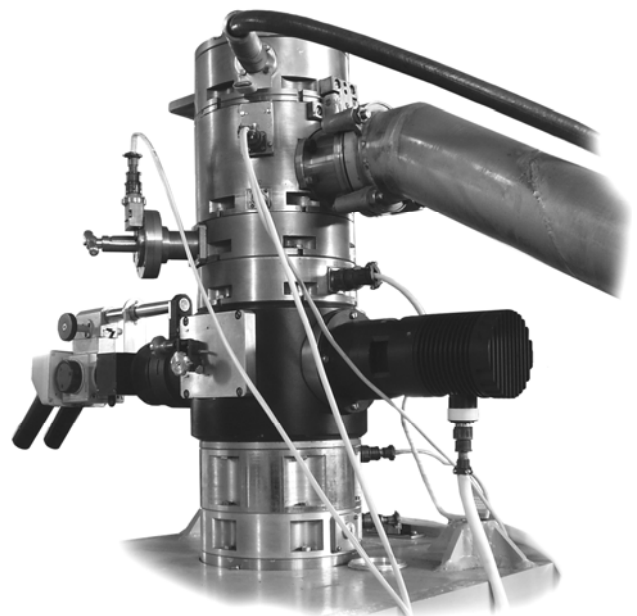
На датчик скорости напыления получено а. с. ПМ №43959 от 30.06.2004 г.

Установка оснащена ионным источником для предварительной очистки подложки перед напылением и магнетронным испарителем для напыления адгезионного подслоя из молибдена, титана или другого тугоплавкого материала. Такая конфигурация установки позволяет наносить индиевые слои с заданными достаточно жесткими параметрами. Кроме того, предусмотрена стабилизация температуры подложки при ионной очистке и напылении через подложкодержатель так же, как в установке ионно-лучевого травления. Двухканальная система подачи газа позволяет осуществлять эффективную ионную очистку и напыление адгезионного подслоя с учетом расположения технологических источников в вакуумной камере. Кварцевый датчик толщины дает возможность быстро настроить необходимые рабочие режимы, а компьютерное управление позволяет воспроизводить установленные технологические режимы и вести непрерывный контроль параметров в течение всего процесса.

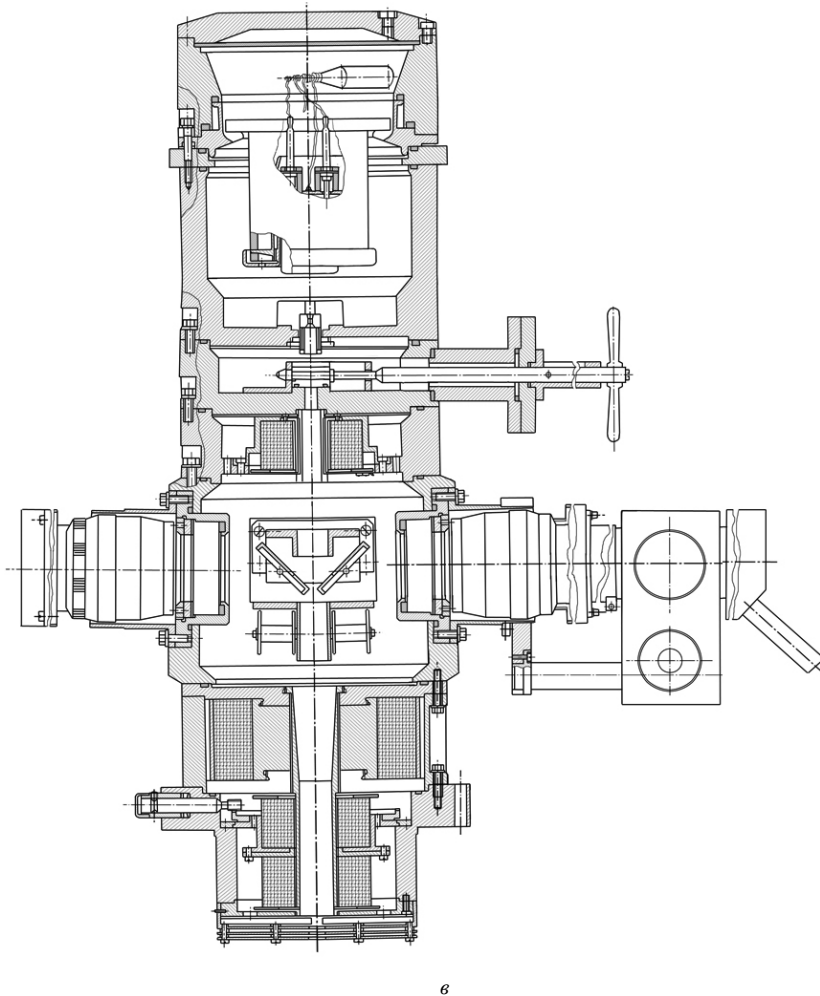
Завершает технологическую линейку производства фотоприемников разработанная специально для этой цели установка электронно-лучевой сварки корпусов фотоприемников (рис. 3), которая позволяет осуществлять микросварку нескольких вакуумно-плотных швов корпуса фотоприемника из кобальта с толщиной стенки до 0,1 мм.



а



б



**Рис. 3. Установка электронно-лучевой сварки корпусов фотоприемников:**  
*а* — общий вид; *б* — колонна электронно-оптическая;  
*в* — устройство колонны электронно-оптической

Установка электронно-лучевой сварки корпусов фотоприемников (см. рис. 3, *а*) состоит из вакуумной системы с диффузионным насосом, электронно-лучевой пушки, внутрикамерной оснастки, системы компьютерного управления. Эмиссионная система сварочной электронно-лучевой установки формирует пучок электронов мощностью до 1 кВт при ускоряющем напряжении 50 кВ. Потенциал запирания — 1000 В. При потенциале запирания 200—300 В ток пучка составляет 10—20 мА. Диаметр пучка в плоскости обработки составляет 0,2 мм. Плотность мощности в пучке при этом достаточна для сварки корпусов фотоприемников из комбинации различных металлов (например кобальта и меди) с толщиной стенки до 0,1 мм.

Данный способ сварки в вакууме позволил осуществлять герметичную сварку корпуса с фотоприемником внутри без его повреждения. На рис. 3, *б* и *в* представлена электронно-оптическая система электронно-лучевой установки для сварки корпусов фотоприемников.

Для питания электронно-лучевой пушки используется источник питания инверторного типа с преобразованием на частоте 44 кГц. Источники питания смещения и накала выполнены так, что необходимые выходные напряжения определяются согласующим трансформатором. Эти источники находятся под высоким потенциалом. В блоке питания ЭЛУ реализована схема автосмещения для задания потенциала управляющего электрода эмиссионной системы. При задании тока электронного луча

за счет обратной связи, снимаемой с датчика тока, находящегося под потенциалом земли, автоматически регулируется напряжение смещения, и ток электронного пучка поддерживается на заданной величине.

Привод для перемещения детали в вакуумной камере под электронным пучком разработан на базе шаговых двигателей ДШИ-200. Установка электронно-лучевой сварки корпусов оснащена системой автоматического управления на базе промышленного компьютера ROBO 2000.

Проведение процесса обработки в вакууме обеспечивает надежную защиту зоны обработки от вредного воздействия окружающей среды, а также высокое качество и надежность соединения деталей, недостижимые другими методами сварки.

Создаваемое современное автоматизированное ионно-плазменное и электронно-лучевое специальное технологическое оборудование предназначено для изготовления нового поколения элементной базы тепловизионных систем матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе фотодиодов из полупроводниковых соединений "кадмий—ртуть—теллур" (КРТ). Использование оборудования позволит создавать охлаждаемые кремниевые схемы предварительной обработки сигналов матричных фотоприемных устройств.

#### Литература

1. Еремин А. П., Смольянинов В. Д., Козлов А. Н., Уваев А. Г., Филачев А. М. Электронно-ионно-плазменное технологическое оборудование для изготовления изделий микрофотоэлектроники и точного машиностроения// Прикладная физика. 2004. № 1.

2. Еремин А. П., Смольянинов В. Д., Филачев А. М. Ионные источники для технологического ионно-плазменного оборудования// Там же. 1997. № 2—3.

3. Минайчев В. Е. Вакуумное оборудование для нанесения пленок// М.: Машиностроение, 1978.

4. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. — М.: Высш. шк., 1967.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

## Vacuum technological equipment for microphotoelectronic production

A. N. Kozlov, I. S. Gaidoukova, A. G. Uvaev, A. B. Scherbakov, A. M. Filachev  
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The paper presents a series of electron-beam and ion-plasma installations for microphotoelectronic industry. The vacuum film deposition installation allows conducting unbreakable process of ion-beam etching, magnetron sputtering, and resistance-heated evaporation aimed to make a multi-component contact with the p-type semiconductor regions. Using the low-energy ions for substrate cleaning and etching reduces radiation damage of the substrate material and helps to avoid p-region inversion. The ion-beam etching installation is designed to etch semiconductor and metal materials in either inert or reactive gas environment to produce silicon MOS multiplexors. The electron-beam welding installation is designed for sealing the evacuated cases of photodiode array detectors.*

УДК 537.533

## Автоматизированный контроль технологических параметров вакуумного оборудования как обеспечение непрерывного контроля качества

А. Н. Козлов, Д. Э. Гринфельд, А. В. Щербаков, А. М. Филачев

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*При производстве изделий микрофотоэлектроники применяются установки вакуумного напыления, ионно-лучевого травления и электронно-лучевой сварки. Это оборудование сложно в эксплуатации, а ввиду высокой стоимости изделий проблема появления брака является актуальной. Для решения этой проблемы проведен анализ технологических процессов. Рассмотрены вопросы выбора контролируемых параметров. Намечены тенденции развития контроля качества при производстве изделий микрофотоэлектроники.*

При производстве изделий микроэлектроники и микрофотоэлектроники применяются вакуумные технологические установки ионно-плазменного напыления, ионно-лучевого травления и другое вакуумное оборудование [1, 2], а также установки электронно-лучевой сварки. Это оборудование достаточно сложно в эксплуатации и при работе на нем в ручном режиме возникает проблема квалификации оператора. В любом случае, даже при работе в полуавтоматическом режиме, проблема появления брака остается актуальной, а анализ причин брака порой очень сложен.

Для решения этой проблемы был проведен анализ воспроизводимости и повторяемости технологических

процессов. В ходе анализа стало ясно, что технологические параметры следует разделить на две связанные между собой группы:

- 1 — режимы вакуумной системы;
- 2 — режимы техпроцесса.

Также было очевидно, что необходимо: разделить системы управления и системы исполнения;

отделить систему сбора информации от системы исполнения.

В результате мы получили легкоперестраиваемую систему с возможностью паспортирования техпроцесса.