

## Особенности проектирования вакуумного технологического оборудования радиоэлектронной промышленности

© Авторы, 2011

**В. А. Васин**

*к.т.н., доц., Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет) (МИЭМ),  
Российское научно-техническое вакуумное общество (РВО)  
E-mail: vacuumwa@ya.ru, vacuumwa@list.ru*

**Е. Н. Ивашов**

*д.т.н., проф., Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет) (МИЭМ)*

**С. В. Степанчиков**

*к.т.н., доц., кафедра «Технологические системы электроники»,  
Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет) (МИЭМ)*

Рассмотрены особенности развития специального вакуумного технологического оборудования и проблемы снижения привносимых им загрязнений; приведены данные по минимальным размерам топологии микросхем и устройствам без узлов трения для современного вакуумного технологического оборудования; показано, что такой подход обеспечивает создание современной индустрии высоких вакуумных технологий в радиоэлектронной промышленности.

**Ключевые слова:** вакуумное технологическое оборудование.

Features of development of the special vacuum process equipment and problem of drop of pollution introduced by it are considered. Data on the minimum sizes of topology of microcircuits and devices without knots of a friction for the modern vacuum process equipment is cited. Such approach provides creation of the modern industry of high vacuum technologies in the radio-electronic industry.

**Keywords:** vacuum process equipment.

Одной из основных проблем в производстве изделий высокой степени интеграции, выпускаемых радиоэлектронной промышленностью, является снижение числа загрязняющих микрочастиц, которые могут попадать на технологические объекты в процессе их обработки, транспортировки и межоперационного хранения. В решении этой проблемы важнейшей задачей является создание специальных пространств со сверхчистой атмосферой и жестким контролем параметров внутрипроизводственной среды.

Поставленная задача может быть решена следующими основными способами:

- 1) созданием чистых производственных помещений и робототехнических систем для работы в них;
- 2) созданием герметизированных объемов для обработки, транспортировки и межоперационного хранения технологических объектов с передачей их из одного объема в другой;
- 3) созданием вакуумно-транспортных систем с полным технологическим циклом в условиях вакуума без выноса объектов на атмосферу.

По сравнению с созданием чистых производственных помещений последние два способа, являясь экономически более выгодными, требуют разработки специальных вакуумно-транспортных систем шлюзовых загрузочных устройств, герметизированных контейнеров вакуумных передающих и прецизионных манипуляторов и др.

Другим важнейшим фактором в решении этой задачи является способность оборудования формировать необходимые для соответствующих технологических процессов вакуумные условия и сохранять их стабильными в течение технологического цикла.

Сохранение «чистого» вакуума в процессе работы высоковакуумного автоматического оборудования с размещением в рабочих объемах вакуумных камер различных функциональных систем и устройств для ориентации и перемещения изделий относительно источников технологического воздействия в многомодульных системах является достаточно сложной комплексной задачей (см. рис.).

Рабочая камера служит основным рабочим пространством, в котором проводятся процессы ваку-

умных технологий. В ней создаются условия, необходимые для протекания технологического процесса по возможности с оптимальными режимами.

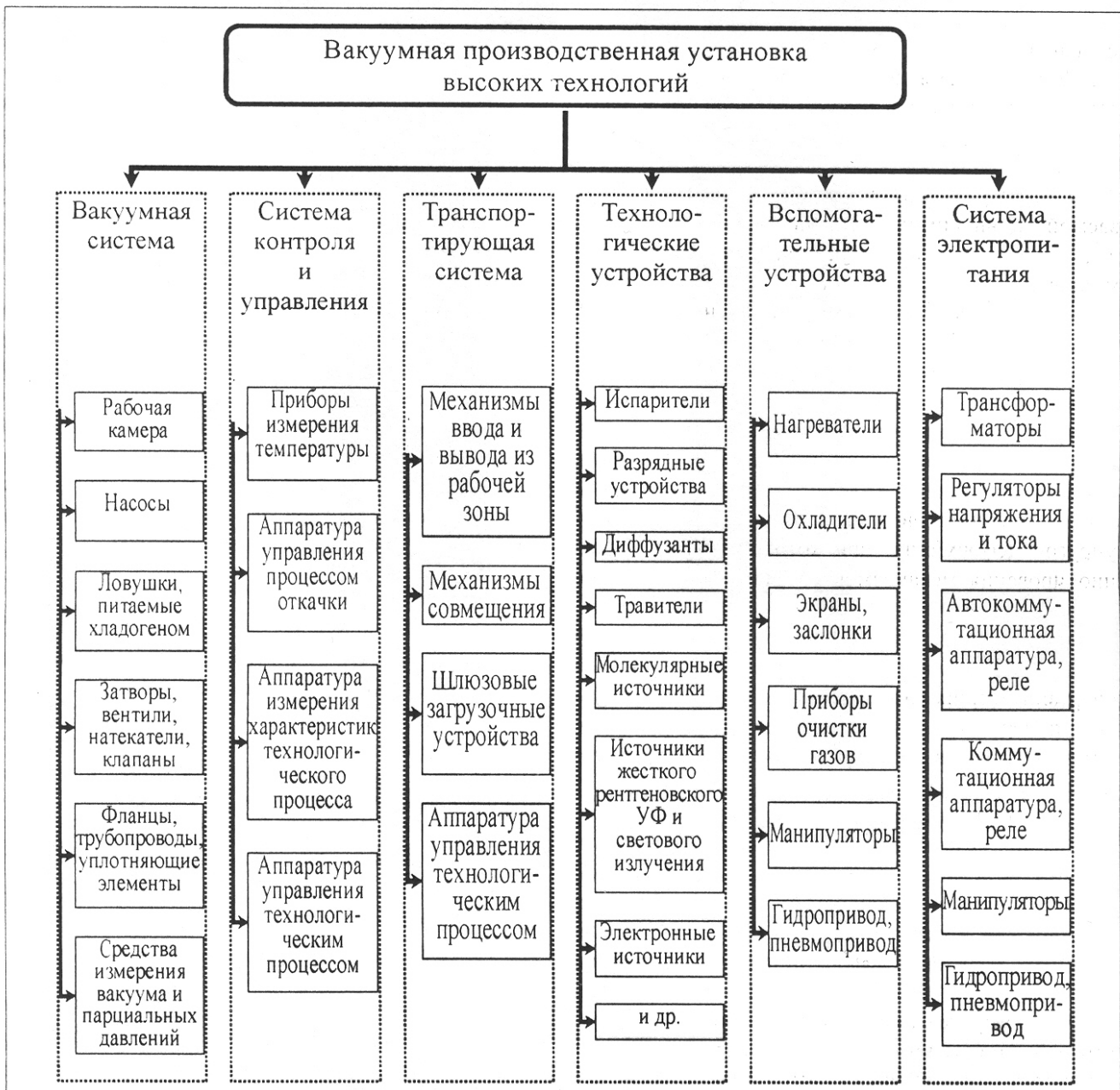
Узлы источника материала, распыляемых частиц и крепления подложек с системами их нагрева являются важнейшими узлами, во многом определяющими эффективность технологического процесса. Они могут иметь различные конструктивные решения в зависимости от тех задач, которые выполняет данная установка.

Откачная и газораспределительная системы состоят из насосов, натекаелей, клапанов, лову-

шек, фланцев и крышек, а также средств измерения разрежения или скоростей газовых потоков (см. рис.). Эти устройства должны обеспечивать высокую производительность откачки при высокой герметичности систем, не допускающей «натекания» при отключении средств откачки.

Системы электропитания и блокировки обеспечивают надежное и стабильное электропитание всех энергетических устройств аппарата и активную блокировку всех рабочих узлов.

Система контроля и управления состоит из набора датчиков, связанных через управляющий ком-



Состав вакуумной производственной установки высоких технологий

пьютер с исполнительными механизмами и информационными системами. Как правило, измеряются и регулируются следующие технологические параметры: скорость осаждения и толщина пленок, температура осаждения и отжига, физические свойства пленок, состав остаточных газов и др.

Система вспомогательных устройств и технологической оснастки состоит из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и пневмоприводов, устройств очистки газов (см. рис.).

Транспортирующие устройства состоят из механизмов ввода и вывода подложек из рабочей камеры, шлюзовых устройств, механизмов совмещения.

В то же время автоматизация сложных технологических процессов требует размещения в рабочих объемах высоковакуумных камер ряда механизмов, которые во многих случаях могут стать источниками генерации «загрязнений», так называемой привносимой дефектности вакуумной среды, в том числе наиболее опасным их видом – микрочастицами износа при наличии в составе функциональных механизмов узлов внешнего трения скольжения или качения.

Устранить генерацию микрочастиц износа трущихся пар можно только в случае их полного исключения из конструкций функциональных механизмов. Одной из таких возможностей является создание различных исполнительных устройств и систем с использованием принципа управляемой упругой деформации, при которой эффект функционирования механизмов создается в результате внутреннего трения. Механизмы этого типа основаны на использовании герметичных полых трубчатых элементов различного геометрического очертания (приводов) различной формы нормального поперечного сечения и ориентации друг относительно друга в составе законченного устройства или системы.

Для приведения в действие приводов в каждый из них независимо подается газообразный или жидкий энергоноситель, создающий в герметичной полости приводов необходимое давление для деформации их в упругой области. Значениями и создаваемых давления и деформации легко управлять.

В качестве газообразных источников давления используется сжатый воздух заводских магистралей при условии стабилизации давления, а также автономные пневмоисточники, в числе которых наиболее привлекательным является приме-

нение термосорбционных компрессоров, создаваемых на основе водородно-гидридной технологии.

Могут использоваться также встроенные малоинерционные обратимо действующие термосорбционные системы, использующие для стимулирования процессов сорбция – десорбция термоэлектрические эффекты, например эффект Пельтье.

Наряду с этим для создания чистого безмасляного вакуума разработано направление форвакуумных насосов, действие которых основано на принципе управляемой упругой деформации.

Современное автоматизированное оборудование высоких вакуумных технологий требует особого подхода к созданию функциональных устройств различного назначения.

Несмотря на общность задач, связанных с автоматизацией производственных процессов, в различных отраслях промышленности возникают технические трудности при решении проблем создания специального автоматизированного вакуумного оборудования.

Очевидно, что дальнейшее развитие технологий производства изделий микро- и нанoeлектроники потребует еще более высокой чистоты технологических вакуумных сред с исключением наиболее опасного вида загрязнения – микрочастицами износа, распространяющимися из пар трения функциональных механизмов.

Число микрочастиц износа, образующихся при формировании  $i$ -го слоя от  $j$ -го узла трения в единицу времени, определяется по формуле

$$N_{ij} = \frac{J_{nij} v_{ск.ij} S_{nij}}{W_{ij}},$$

где  $J_{nij}$ ,  $v_{ск.ij}$ ,  $S_{nij}$ ,  $W_{ij}$  — интенсивность изнашивания, скорость скольжения, номинальная площадь трения и средний объем микрочастицы соответственно при формировании  $i$ -го слоя от  $j$ -го узла трения.

В свою очередь, вероятность появления привносимой дефектности имеет вид

$$P_{ij} = P_{1ij} P_{2ij} P_{3ij}.$$

Вероятность вылета микрочастиц из зоны трения определяется как

$$P_{1ij} = S_{3ij} / S_{nij},$$

где  $S_{3ij}$  – площадь зазора в  $j$ -й паре при формировании  $i$ -го слоя.

Вероятность попадания на поверхность подложки микрочастиц из зоны трения

$$P_{2ij} = S_{nij} / (S_{kij} K).$$

Здесь  $S_{nij}$  – площадь подложки;  $S_{kij}$  – площадь днища вакуумной камеры;  $K$  – число кристаллов на подложке.

Вероятность того, что частица удержится на поверхности подложки, определяется по формуле

$$P_{3ij} = \cos \alpha_{ij} \cos \beta_{ij},$$

где  $\alpha_{ij}$  – угол между нормалью к поверхности подложки и направлением движения частицы;  $\beta_{ij}$  – угол наклона подложки к горизонтали.

Одним из методов создания функциональных механизмов, предназначенных для работы в вакууме и воспринимающих его дестабилизирующее влияние без снижения надежности, является использование для формирования усилий и перемещений приводов управляемой упругой деформации, особенно — гарантирующих высокую точность позиционирования.

Появление нового класса механизмов обусловлено необходимостью не только снижения, но и полного исключения продуктов износа элементов механизмов.

В таблице приведены данные по минимальным размерам топологии микросхем и соответствующим критическим размерам микрочастиц загрязнений, достигнутых рядом ведущих мировых фирм в 2000 и 2005 гг.

Минимальные размеры топологии микросхем и соответствующие им критические размеры микрочастиц загрязнения, мкм

Фирма	Разрешение (по поверхности/эффективное)		Критический размер микрочастиц	
	2000 г.	2005 г.	2000 г.	2005 г.
FUJITSU	0,25/0,18; 0,35/0,28; 0,5/0,45	0,060	0,022; 0,032; 0,048	0,007
HITACHI	0,18/0,15; 0,2/0,18; 0,35/0,28; 0,4/0,35	0,065	0,016; 0,019; 0,032; 0,038	0,006
LG SEMICON	0,4/0,3	0,12	0,038	0,010
National Semiconductor	0,22/0,18	0,1	0,02	0,010
SIEMENS	0,25/0,22; 0,35/0,25; 0,5/0,3	0,1	0,023; 0,035; 0,05	0,009
Taiwan Semiconductor Manufacturing (TSMC)	–	0,080; 0,065	–	0,010; 0,008
Texas Instrument	0,23/0,18; 0,32/0,22 0,42/0,35	0,080	0,02	0,008
® INTELL	–	0,045	–	0,005

Известно, что при наличии в составе функциональных механизмов пар трения образовавшиеся микрочастицы износа в большинстве случаев приобретают электрический заряд, благодаря которому могут мигрировать в вакуумных объемах и осаждаться на обрабатываемых полупроводниковых пластинах, снижая коэффициент выхода годных микросхем, который по параметру  $\eta$  «привносимой дефектности» выражается зависимостью [1]

$$\eta_r = \exp[-DA\nu P(d_c - d_{кр})],$$

где  $D$  – доза привносимой дефектности;  $A$  – площадь кристалла;  $\nu$  – доля площади кристалла, занятая микроструктурами;  $P(d_c - d_{кр})$  – доля попавших на кристалл микрочастиц с размером  $d_c$ , большим  $d_{кр}$ ;  $d_c$  и  $d_{кр}$  – средний и критический размеры микрочастиц.

Отсюда выражение для дозы привносимой дефектности имеет вид

$$[D] = \frac{\ln(1/\eta_r)}{A\nu \exp(d_{кр}/d_c)}.$$

Если в вакуумных камерах оборудования работают механизмы, генерирующие привносимую дефектность в виде микрочастиц износа, то, очевидно, и надежность оборудования должна оцениваться с учетом этого фактора. Вероятность безотказной работы оборудования

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) U[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}].$$

Здесь  $N$  – число механизмов;  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го механизма в составе оборудования, размещенного в вакуумной камере;  $[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}]$  – текущее и допустимое значения уровня привносимой дефектности;  $U[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}]$  – функция при  $\Phi(t) = \Phi_{\text{доп}}$  принимает нулевое значение и соответственно  $P(t) = 0$ .

Таким образом, в случае превышения уровня (дозы) привносимой дефектности  $D$  по отношению к допустимому значению при достижении некоторого времени вероятность безотказной работы оборудования принимает нулевое значение и его дальнейшая эксплуатация становится бессмысленной, т.е. наибольший эффект повышения надежности вакуумного оборудования может быть достигнут в случае полного исключения привносимой дефектности со стороны действующих функциональных механизмов, устройств и систем.

Так, общую идеологию разработки и создания вакуумных устройств и систем можно кратко представить в форме четырех основных направлений, предложенных проф. А.Т. Александровой [2]:

- 1) возможное упрощение структуры и оптимизация геометрии вакуумных систем;
- 2) максимальный вынос оборудования из технологической вакуумной среды и его экранирование, в том числе сильфонами и гибкими оболочками;
- 3) применение форвакуумных и высоковакуумных насосов без узлов трения движения и сильных магнитных полей (криогенные и модернизированные турбомолекулярные), замена трехступенчатой системы откачки на двухступенчатую или одноступенчатую, по возможности на данном уровне развития техники;
- 4) устранение на всех исполнительных и коммутационных устройствах узлов трения движения и замена их приводами управляемой упругой деформации.

С ростом требований к чистоте технологической среды первые три пункта данной идеологии применяются ведущими зарубежными и отечественными производителями вакуумной техники. В настоящее время наиболее популярна концепция «сухого» вакуума.

Применение приводов на основе управляемой упругой деформации в высоком вакууме позволя-

ет создать герметичные механизмы различного назначения с полным исключением пар трения движения, отсутствием привносимой дефектности в виде микрочастиц износа и высоким быстродействием на уровне 0,1–0,2 с.

Основой приводных элементов этого типа являются тонкостенные герметичные пневматические полые пружины с различными законами изменения радиуса кривизны центральной оси и некруглой формой нормального поперечного сечения.

Давление, подаваемое во внутреннюю полость приводных элементов, вызывает его деформирование, которое не должно выходить за пределы упругой области.

В зависимости от требуемого исполнительного перемещения по величине и форме траектории применяют три вида приводных элементов: с незамкнутым контуром; с замкнутым контуром, образованным герметично соединенными между собой дугами упругодеформированных целых элементов, создающих единую полость; с прямолинейной осью гладкого и спиралевидного типа [3–5].

Приводные элементы с незамкнутым контуром характеризуются возможностью моделирования конфигурации центральной оси по определенному закону для получения требуемого направления траектории перемещения свободного конца и последовательно соединенных с ними элементов механизма. В ряде случаев эта возможность очень важна. Наиболее распространенным и технологичным является приводной элемент с постоянным радиусом кривизны центральной оси. Витые и винтовые приводы позволяют получить угловое перемещение свободного конца по траектории, близкой к окружности [5].

Развитие и совершенствование новых технологических процессов предъявляет новые, все более жесткие требования к оборудованию, что обеспечивает непрерывное функционирование рассматриваемого направления.

На основе разработки и исследования приводов управляемой упругой деформации на основе трубчатых элементов, был создан комплекс исполнительных устройств для работы в технологическом объеме в условиях вакуума: от коммутационных устройств до форвакуумных насосов с образованием родственных направлений в области производства радиоэлектронной и вакуумной техники.

## Литература

1. Фролов Е.С., Минайчев В.Е., Александрова А.Т. и др. Вакуумная техника: Справочник / под общ. ред. Е.С. Фролова и В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение. 1992.
2. Александрова А.Т. Теоретические основы расчета и конструирования функциональных устройств и систем оборудования высоких вакуумных технологий на основе приводов управляемой упругой деформации. М.: Московский государственный институт электроники и математики. 2003.
3. Александрова А.Т., Васин В.А., Горюнов А.А., и др. Патент № 2206913 «Устройство позиционирования и привод вращения для него». Заявка № 2001118067/28 от 03.07.2001. Опубликовано 20.06.2003. Бюлл. № 17.
4. Александрова А.Т., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. и др. Авт. свид. № 1366389 «Механизм для перемещения и ориентации деталей». Заявка № 4090039/31 от 28.05.1986. Опубликовано 30.10.1985. Бюлл. № 40.
5. Александрова А.Т., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. и др. Авт. свид. № 1187980 «Исполнительный орган манипулятора». Заявка № 3780740/25 от 10.05.1984. Опубликовано 15.01.1988. Бюлл. № 2.

Поступила 6 июля 2010 г.

## Features of designing of the vacuum process equipment of the radio-electronic industry

© Authors, 2011

V. A. Vasin, E. N. Ivashov S. V. Stepanchikov

The paper deals with reducing the amount of particulate pollution incident on the products of electronic equipment in their handling, transport and storage interoperational. It is noted that the automation of complex manufacturing processes requires placement of workers in the vacuum volume of mechanical devices, which often become sources of generation of particulate wear in the presence of functional mechanisms of friction units - sliding or rolling. Eliminate the generation of particulate wear of rubbing pairs is possible only if their total exclusion from the process equipment by using various actuators and systems is based on the principle of controlled elastic deformation. An approach to determining the probability that microparticles are situated on the substrate surface is presented. Presents data on the minimum size of the topology of the chip and the corresponding critical size particulate pollution, achieved a number of leading world companies. An expression for determining the coefficient of yield chips according to the criterion «introduced by defects» is proposed. The use of actuators based on controlled elastic deformation of the vacuum technology equipment allows you to create sealed mechanisms for various applications with the complete exclusion of friction pairs of motion, high speed at the level of 0.1 – 0.2 sec. and leads to the absence of defects.

### Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» вышла в свет книга



**Меркин Г.В.**

**Системы наблюдения:  
новые принципы построения**

ISBN 978-5-88070-265-7

Рассмотрены новые принципы построения фотоприемных систем, а также радиосистем с малой длиной волны, предназначенных для приема как пространственной, так и временной информации.

*Для специалистов в области радиоэлектроники и оптоэлектроники, может быть полезна аспирантам и студентам вузов соответствующих направлений.*

По вопросам заказа и приобретения книг обращаться по адресу:

107031 г. Москва, Кузнецкий мост, 20/6.

Тел./факс: (495) 625-92-41, тел.: (495) 625-78-72, 621-48-37

<http://www.radiotec.ru>; e-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)