

УДК 533.5:62-982

Создание сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве

В. А. Васин, Е. Н. Ивашов, П. С. Кузнецов, С. В. Степанчиков

Рассмотрены тенденции развития современного вакуумного оборудования и проблемы создания сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве. Приведены данные по минимальным размерам топологии микросхем и внутрикамерных устройств без узлов трения с использованием для формирования усилий и перемещений управляемой упругой деформации. Такой подход обеспечивает создание современной индустрии высоких вакуумных технологий.

PACS 07.30.Kf

Ключевые слова: сверхчистая вакуумная технологическая среда, вакуумное оборудование, привносимая дефектность, топология микросхем.

Введение

Анализ тенденций развития современного электронного производства в отечественной и зарубежной практике свидетельствует о непрерывном расширении масштабов применения высоких технологий и специального вакуумного технологического и аналитического оборудования для их реализации. В данной статье приводятся сведения о наиболее эффективных направлениях создания сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве.

Основные тенденции развития современного вакуумного оборудования

Одним из важнейших факторов, определяющих уровень и надежность оборудования этого класса, является снижение загрязнений привносимых при транспортировке изделий между функциональными устройствами оборудования, проводящими разные операции технологического процесса. Решение этой проблемы имеет следующие наиболее распространенные варианты.

Васин Владимир Анатольевич, доцент.

Ивашов Евгений Николаевич, профессор.

Кузнецов Павел Сергеевич, аспирант.

Степанчиков Сергей Валентинович, доцент.

Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет), МИЭМ, Россия, 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3
Тел. (8-495) 235-64-35.

E-mail: vacuumwa@list.ru; vacuumwa@ya.ru

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2010 г.

© Васин В. А., Ивашов Е. Н., Кузнецов П. С., Степанчиков С. В., 2010

- Создание “чистых комнат”. Этот вариант при достигнутой величине топологических размеров наиболее современных микросхем и сложности технологического цикла перестает себя оправдывать в связи с постоянным ростом чистых объемов и повышением класса чистоты.

- Выполнение технологического цикла без выхода изделий на атмосферу, достигаемое тремя разными способами.

1. Создание вакуумной линии с интегрированными в нее установками технологического процесса. Сейчас в линии и кластерные системы обычно объединены по несколько установок. Многие ведущие производители заявляют о создании проекта линий полного технологического цикла без выхода на атмосферу (с устройствами транспортирования и хранения изделий), но авторам не известны такие полностью реализованные действующие проекты.

2. Создание линии с контролируемой газовой средой, соединяющей установки технологического процесса. В линии создается давление газовой среды, незначительно превышающее атмосферное. Данное решение нашло широкое применение и является одним из перспективных в ближайшем будущем.

3. Создание стандартных механических интерфейсов (герметизированных контейнеров с поддерживаемым или неподдерживаемым вакуумом или контролируемой газовой средой для транспортирования и хранения изделий). Данное решение нашло широкое применение и является одним из перспективных с учетом возможности модернизации под него устаревшего оборудования и невысокой по сравнению с другими стоимостью реализации.

Эти решения обычно комбинируются в разных вариантах и кроме линий с контролируемой газовой средой не представлены нигде в чистом виде.

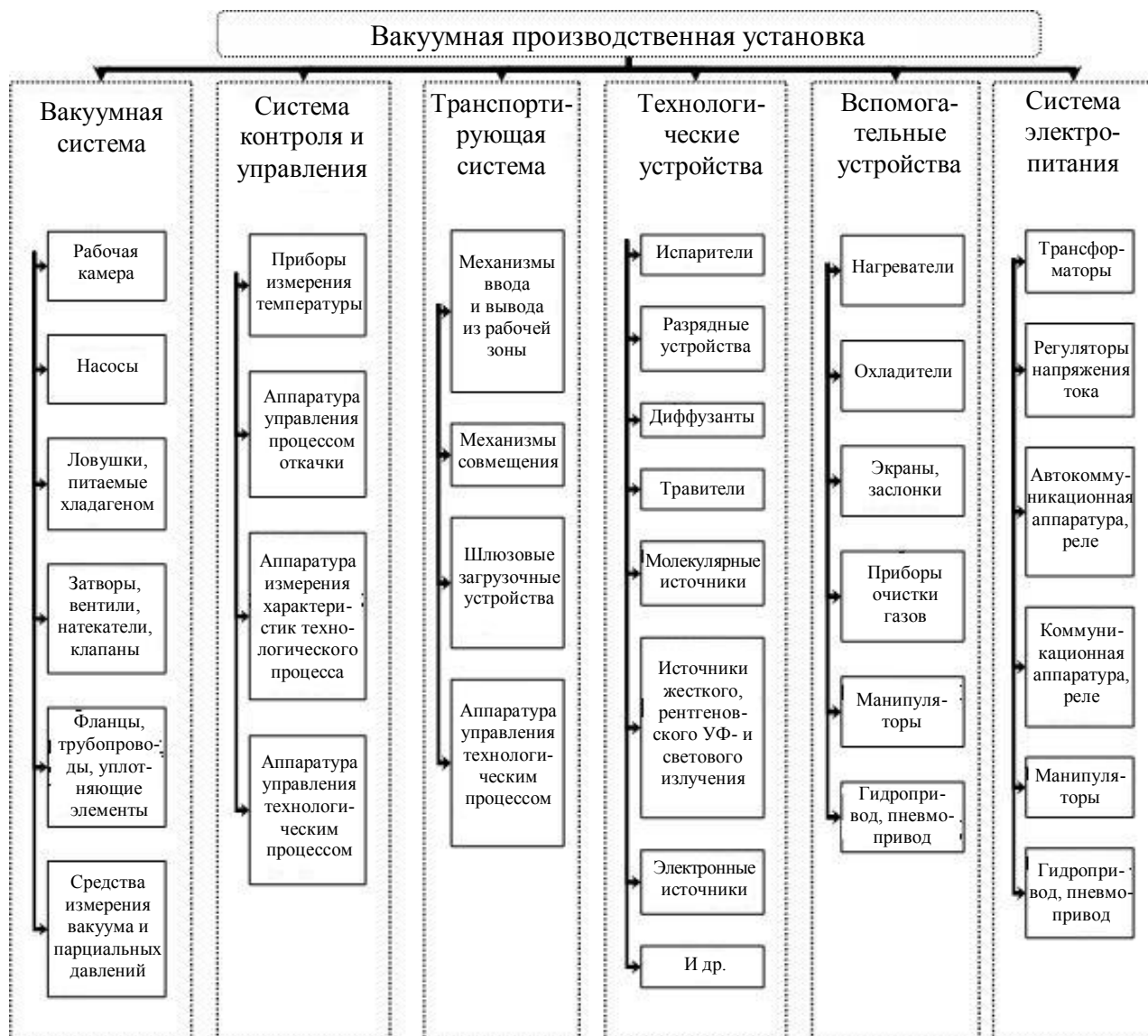
Другим важнейшим фактором является не только способность оборудования формировать необходимые для соответствующих технологических процессов вакуумные условия, но и сохранять их стабильными в течение технологического цикла.

Сохранение сверхчистой вакуумной технологической среды 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, их транспортирования и межкамерного шлюзования в многомодульных системах и т. д., является достаточно сложной комплексной задачей (рисунк).

Рабочая камера служит основным рабочим пространством в котором проводятся процессы вакуумных 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, натекателей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, а также средств измерения разрежения или скоростей газовых потоков. Эти устройства должны обеспечивать высокую производительность откачки при высокой герметичности систем, не допускающей "натекание" при отключении средств откачки.



Состав вакуумной установки электронного производства

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 компьютер 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. рисунок).

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.

Одним из направлений уменьшения привносимой дефектности в вакуумной технологической среде является применение устройств с минимальным количеством узлов трения, построенных на принципе бесконтактного магнитного взаимодействия.

Полностью устранить генерацию микрочастиц износа трущихся пар возможно только в случае их полного исключения в конструкциях 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. Величиной создаваемых давления и соответственно 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 применение 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, действующих 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 в числе прочих задач еще более высокой чистоты технологических вакуумных сред с исключением, в том числе наиболее опасного вида загрязнения — микрочастицами износа, распространяющимися из пар трения функциональных механизмов.

Количество 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 по формуле

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

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

Вероятность попадания на поверхность подложки микрочастиц из зоны трения имеет вид

$$P_{2ij} = \frac{S_{nij}}{S_{kij}K},$$

где S_{nij} — площадь подложки;
 S_{kij} — площадь днища вакуумной камеры;
 K — количество кристаллов на подложке.

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

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

где α_{ij} — угол между нормалью к поверхности подложки и направлением движения частицы;
 β_{ij} — угол наклона подложки к горизонтали.

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 (указаны в 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; 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 η "привносимой дефектности" выражается следующей зависимостью [1]:

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

где D — доза привносимой дефектности;
 A — площадь кристалла;
 v — 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:

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

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. Если обозначить вероятность безотказной работы оборудования $P(t)$, то:

$$P(t) = \prod_{i=1}^K P_i(t) \cdot U \cdot [\Phi(t) - \Phi_{доп}],$$

где K — количество механизмов;
 $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го механизма в составе оборудования, размещенного в вакуумной камере;
 $\Phi(t) - \Phi_{доп}$ — текущее и допустимое значение уровня привносимой дефектности;
 $U[\Phi(t) - \Phi_{доп}]$ — функция при $\Phi(t) = \Phi_{доп}$ 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 некото-

рого 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.

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

1. Всевозможное упрощение структуры и оптимизация геометрии вакуумных систем.
2. Максимальный вынос оборудования из технологической вакуумной среды и его экранирование, в том числе сальфонами 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 развитии уровня 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, по факту, применяются ведущими зарубежными и отечественными производителями вакуумной техники. Наиболее популярна сейчас концепция "сухого" вакуума.

Применение приводов на основе управляемой упругой деформации в высоком вакууме позволяет 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 различным законом 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 виду траектории применяют три вида приводных элементов: с незамкнутым контуром; с замкнутым контуром, образованным герметично соединенными между собой дугами упруго-деформированных 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.

Начиная с 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 создания сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве.

Заключение

Рассмотренные тенденции развития современного вакуумного оборудования и намеченные пути решения проблем создания сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве обеспечивают создание современной индустрии высоких вакуумных технологий.

Л и т е р а т у р а

1. Вакуумная техника: Справочник/Е. С. Фролов, В. Е. Миничев, А. Т. Александрова и др. — М.: Машиностроение, 1992. — 480 с.
2. Александрова А. Т. Теоретические основы расчета и конструирования функциональных устройств и систем оборудования высоких вакуумных технологий на основе приводов управляемой упругой деформации: Учеб. пособие. — М.: Московский государственный институт электроники и математики. 2003. — 48 с.
3. Александрова А. Т., Васин В. А., Горюнов А. А. и др. Патент 2206913 "Устройство позиционирования и привод вращения для него" по заявке № 2001118067/28 от 03.07.2001; Оpubл. 20.06.2003 в Бюл. № 17.
4. Александрова А. Т., Ивашов Е. Н., Степанчиков С. В. и др. А. с. 1366389 "Механизм для перемещения и ориентации деталей" по заявке № 4090039/31 от 28.05.1986; Оpubл. 30.10.1985 в Бюл. № 40.
5. Александрова А. Т., Ивашов Е. Н., Степанчиков С. В. и др. А. с. 1187980 "Исполнительный орган манипулятора" по заявке № 3780740/25 от 10.05.1984; Оpubл. 15.01.1988 в Бюл. № 2.

Creation of the superpure vacuum technological environment in electronic manufacture

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

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 3 B. Trekhsvyatitel'skiy al., Moscow, 109028, Russia
E-mail: vacuumwa@list.ru; vacuumwa@ya.ru

Consideration is given to tendencies of development of the modern vacuum equipment and problem of creation of the superpure vacuum technological environment in electronic manufacture. The data on the minimum sizes of topology of microcircuits and intrachamber devices without knots of a friction with use for formation of efforts and movings of operated elastic deformation is cited. Such approach provides creation of the modern industry of high vacuum technologies.

PACS 07.30.Kf

Keywords: superpure vacuum technological environment, vacuum equipment, introduced deficiency, topology of microcircuits.

Bibliography — 5 references.

Received April 23, 2010