

К. т. н. Ю. К. ВАСИЛЬЕВ, С. Б. НЕСТЕРОВ, Т. С. ВАСИЛЬЕВА

Россия, г. Москва, НИИ вакуумной техники им. С. А. Векшинского
E-mail: sbnesterov@niivt.ru

Дата поступления в редакцию
24.11 2009 г.

Оппонент к. т. н. С. М. ЗАВАДСКИЙ
(НИЧ БГУИР, г. Минск)

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ БЕЗМАСЛЯНОГО ВАКУУМА

Показано влияние развития полупроводниковой промышленности на основные современные тенденции развития вакуумной техники и рынка вакуумного оборудования.

Область применения вакуума постоянно расширяется, но до сих пор наиболее важным его применением остается электронная техника. В электровакуумных приборах вакуум является одним из основных условий их функционирования в течение всего срока службы. Для обеспечения работоспособности современного электронного оборудования к вакууму предъявляются все более жесткие и разнообразные требования. Прежде всего, это требования чистоты и уровня вакуума, особенно в полупроводниковых приложениях, где процессы нанесения тонких пленок, ионного травления, литографии обеспечивают получение элементов электронных схем субмикронных и нанометровых размеров. В последнее время активное развитие получили высокоточные и наукоемкие технологии с использованием чистого вакуума. Это, например, фотоэлектротехника (photovoltaics) и все, что связано с изготовлением и использованием фотоэлементной аппаратуры для солнечной энергетики, плоскопанельные дисплеи и т. п. В таких относительно новых областях применения вакуумной техники формируются собственные требования к оборудованию — повышенный уровень надежности при длительной непрерывной работе и повышенной газовой нагрузке, толерантность к пыли и твердым частицам, высокая производительность в диапазоне давлений 10^3 — 10^{-4} мбар.

Тенденции развития рынка безмасляного вакуумного оборудования

В [1] приведены основные направления развития приложений, в которых применяется вакуумное оборудование. Например, один из наиболее емких рынков в мире — японский — показывает распределение потребителей, приведенное на рис. 1.

Как видно из диаграммы, по состоянию на 2001 год основной потребитель здесь — полупроводниковая промышленность. В настоящий момент она заметно потеряла свои позиции, при этом доля производителей плоскопанельных дисплеев существенно выросла — примерно до 2 млрд. долларов США в 2008 году,

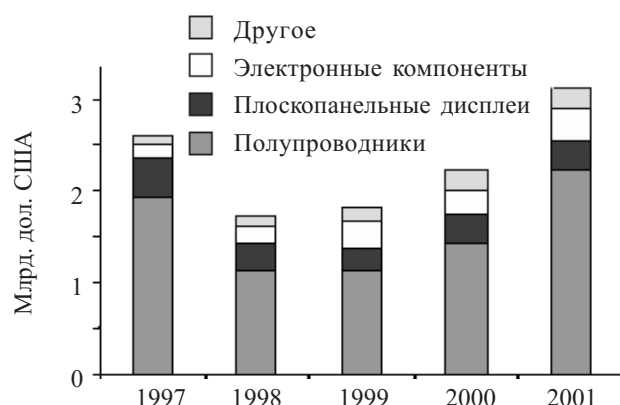


Рис. 1. Распределение японского рынка вакуумного оборудования в 1997—2001 гг.

причем только в Японии. Кроме того, активное развитие получила отрасль, связанная с выращиванием кристаллов и созданием на их основе фотоэлектрических панелей. Например, компания Sharp строит в Японии самый большой в мире завод по выращиванию монокристаллического кремния для создания фотопанелей для солнечной энергетики.

На рис. 2 видно, что среди потребителей вакуумной техники доминирующее положение занимает Азия. Это неудивительно, поскольку именно там сконцентрирована большая часть мирового производства полупроводников, а в последнее время активно развиваются и другие области — фотоэлектротехника, производство плоскопанельных дисплеев и пр.

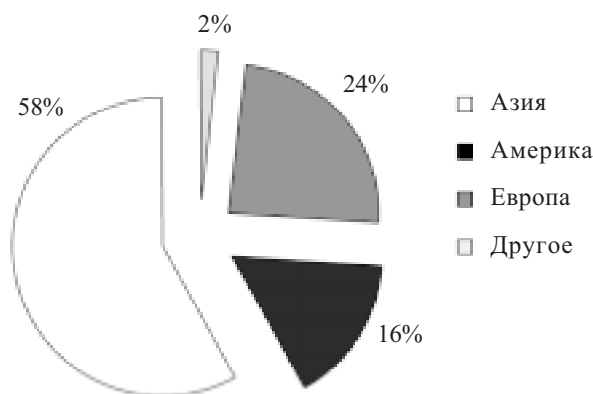


Рис. 2. Распределение по регионам совокупного оборота крупнейших поставщиков вакуумного оборудования

Тип насоса	Основные производители	Предельный вакуум, мбар	Производительность, м ³ /ч
Когтевой (со ступенью Рутса)	Busch, Edwards	0,05	80—600
Винтовой	Busch, Ebara, Edwards, Hanbell, Kashiyama, Leybold (LOT Vacuum), Pfeiffer, Shinko Seiki, Sterling SIHI, Toyota, Ulvac	0,001	75—1300
Многоступенчатый Рутса	Adixen (Alcatel), Kashiyama	0,01	90—220

Рынок форвакуумных средств откачки

Как уже было отмечено, развитие вакуумной техники несколько сместило потребности разработчиков — от высоковакуумных систем к форвакуумным и системам, обеспечивающим средний вакуум (как правило, 10^{-4} мбар).

Основной особенностью развития вакуумной техники на протяжении последних лет является стремление избавиться от вакуумных масел и других рабочих жидкостей. Главными преимуществами замены паромасляных и традиционных механических насосов с масляным уплотнением на безмасляные системы откачки на базе сухих механических насосов [2] является существенное энергосбережение и простота эксплуатации, отсутствие проблемы утилизации рабочих жидкостей и, наконец, другой качественный уровень получаемой продукции.

В таблице приведены типичные характеристики основных типов безмасляных механических форвакуумных насосов для промышленного использования.

Многие производители устанавливают на форвакуумный насос дополнительный насос Рутса, в результате чего примерно на порядок вырастает предельный вакуум и до нескольких раз — производительность. Так, характерная производительность таких систем составляет 600—2500 м³/ч, а предельный вакуум — 0,005—0,0001 мбар. Кроме того, существуют специальные решения для откачки камер больших объемов или для работы с высокими газовыми нагрузками с производительностью в десятки тысяч м³/ч.

Также существенной частью рынка потребителей безмасляных механических форвакуумных систем являются производители установок выращивания различных кристаллических структур — поли- и моно-

кристаллического кремния для изготовления подложек микроэлектронной техники, солнечных батарей и плоскостовых дисплеев, сапфира для разнообразных промышленных применений и т. п. При этом предъявляются повышенные требования к надежной безостановочной работе средств откачки в условиях высоких газовых нагрузок и при наличии твердых примесей в откачиваемом газе.

Лидирующими типами насосов в данной области являются когтевые, винтовые и многоступенчатые насосы Рутса. Это полностью бесконтактные насосы, откачка в которых обеспечивается вращением роторов специальной формы (рис. 3—5), зазоры между которыми очень малы — до микрометров, поэтому уровень обратного потока газа крайне мал.

Когтевой насос выполняется в виде многоступенчатой (обычно из трех или четырех ступеней) машины, где одной из ступеней является двухроторная ступень Рутса, остальные — когтевые. Главной фигурой здесь и обладателем патента на данную конструкцию является компания Edwards.



Рис. 4. Ротаторы винтового насоса

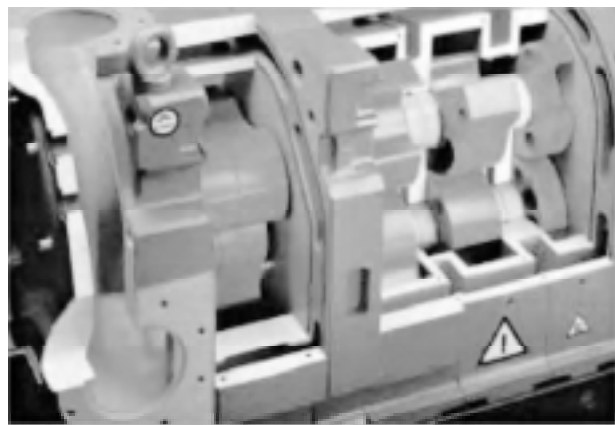


Рис. 3. Когтевой форвакуумный насос

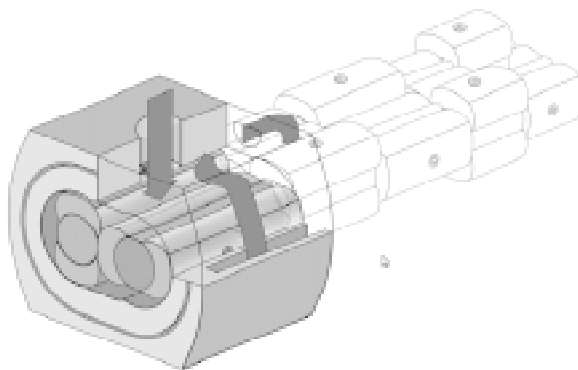


Рис. 5. Многоступенчатый насос Рутса

Винтовые насосы имеют несколько вариантов конструкции — с переменным и постоянным шагом, с напуском газа в торце и в центре роторов, вертикальные и горизонтальные. Такое многообразие конструкций обусловлено тем, что данное направление развивалось наиболее бурно, т. к. развитие когтевой конструкции было ограничено патентом Edwards. В настоящий момент винтовые насосы обеспечивают, пожалуй, наилучшие технические и эксплуатационные характеристики среди всех безмасляных конструкций (см. таблицу), что косвенно признает и главный апологет когтевой конструкции компания Edwards, поскольку первой начала выпуск и винтовых насосов. Наиболее заметными производителями в данной области являются японские компании Ebara и Ulvac, имеющие хорошие позиции в Японии и Азии, корейская LOT Vacuum — в Южной Корее и Европе (под брендом Leybold), а также тайваньский «азиатский тигр» — компания Hanbell, стремительно занимающая лидирующие позиции в Тайване, где сконцентрировано сейчас основное производство полупроводников, кремниевых пластин и плоскостельных дисплеев, в Китае, где активно развиваются данные отрасли, а также выходит на рынки Европы и США.

Еще одна конструкция безмасляных форвакуумных насосов для промышленного использования — объединяющая несколько ступеней Рутса. Основными производителями здесь являются японская компания Kashiyama и французская Adixen (Alcatel). Данное решение не получило такого активного развития как винтовая конструкция в силу своей наибольшей среди других «чувствительности» к грязным и сложным, с эксплуатационной точки зрения, технологическим процессам. Оно предполагает достаточно сложную и длинную конструкцию вакуумных трактов между ступенями, где могут накапливаться конденсат и чужеродные частицы, откачиваемые вместе с рабочим газом.

Указанные типы насосов широко применяются в промышленности в таких отраслях как металлургия, химическая промышленность, полупроводники, установки роста кристаллов, плоскостельные дисплеи и др.

Для лабораторных и «чистых» приложений используются безмасляные форвакуумные спиральные насосы (рис. 6). Поскольку их развитие ограничивает-



Рис. 6. Безмасляный форвакуумный спиральный насос

ся в основном, лабораторными системами, характерный диапазон производительности составляет от 3 до 35 м³/ч. Предельный вакуум, обеспечиваемый такими насосами, обычно составляет 10⁻² мбар. Наиболее весомым производителем здесь является компания Anest Iwata (родоначальник данной конструкции насосов), имеющая самую широкую линейку с производительностью до 60 м³/ч, а также Varian, Edwards, Busch, тоже занимающие заметную долю этого рынка. Надо сказать, что многие компании предлагают насосы Anest Iwata под собственными брендами — такие как, например, Leybold (Oerlikon) и Ulvac.

Конкурирующие решения для лабораторных и «чистых» приложений предлагают компании Adixen — многоступенчатые насосы Рутса малой производительности (от 14 до 38 м³/ч), Pfeiffer и Leybold (Oerlikon) — поршневые безмасляные насосы с производительностью от 15 до 40 м³/ч.

В приложениях, где необходим вакуум уровня 1 мбар и хуже, используют диафрагменные (мембранные) безмасляные насосы — для «чистых» и химико-технологических лабораторных применений; пластинчато-роторные безмасляные насосы для промышленных установок средней производительности — до 200—300 м³/ч; двухроторные (Рутса) и вихревые газодувки для больших промышленных систем нефтехимической, энергетической и других областей, где необходима откачка больших объемов газа до давления уровня 100—500 мбар с производительностью в десятки тысяч м³/ч.

Наряду с вышеизложенным, во всем мире продолжается использование и классических форвакуумных средств откачки с масляным уплотнением, однако оно сокращается, а в таких отраслях как полупроводниковая промышленность и ряде других высокотехнологичных областей практически полностью прекращено. Главным ограничителем повсеместного перехода на безмасляные средства откачки, как правило, является их более высокая стоимость. Однако, как показывает практика, за счет меньших затрат на обслуживание и утилизацию рабочих жидкостей, особенно в промышленных приложениях, стоимость содержания безмасляных систем оказывается ниже, чем масляных.

Рынок высоковакуумных средств откачки

Здесь также четко прослеживается стремление избавиться от масел и рабочих жидкостей. Например, несмотря на дешевизну диффузионных насосов, их использование пытаются максимально сократить во многих областях, до последнего времени считавшихся нечувствительными к остаточным парам рабочих жидкостей в вакуумной камере (электротермическое оборудование, вакуумные печи и т. п.). Там, где полный отказ невозможен или слишком дорог, используются различные ловушки, снижающие количество масляных паров в рабочей области [3].

Наиболее активно развивающимися высоковакуумными безмасляными средствами откачки являются турбомолекулярные и криовакуумные насосы. Магниторазрядные насосы в последние годы разви-

ложений их использования и ограниченности их производительности в 1000—1200 л/с. Следует, однако отметить, что данный тип насосов активно используется в приложениях, где необходимо получать высокий и сверхвысокий вакуум (до 10^{-10} Торр) и удерживать его длительное время, например несколько месяцев (ускорительно-накопительные системы, физика элементарных частиц и т. п.).

В области турбомолекулярных насосов можно отметить несколько тенденций:

— активное распространение так называемых гибридных конструкций, объединяющих турбомолекулярную и молекулярную ступени. Это позволяет лучше откачивать легкие газы, такие как гелий и водород, и увеличивать максимально допустимое давление в форлиннии. В настоящий момент доступны модели насосов, имеющие штатное постоянное давление в форлиннии до 10—12 мбар;

— доминирование насосов с магнитным подвесом ротора (**рис. 7**). Данная конструкция позволяет существенно увеличить наработку на отказ подшипников ротора, поскольку он вращается, левитируя в вакууме в магнитном поле, при этом полностью отсутствует трение. Поскольку в таких насосах смазка отсутствует, при их использовании технологический процесс гарантирован от попадания даже единичных молекул смазки. (Отметим, что турбомолекулярные насосы обычно тоже называют безмасляными, поскольку при их работе крайне низка вероятность попадания даже одиночных молекул смазки в откачиваемый объем — смазка здесь находится внутри закрытых керамических подшипников и обладает крайне малым давлением насыщенных паров (обычно уровня 10^{-14} мбар), однако такая конструкция все же допускает теоретическое попадание одиночных молекул в откачиваемый объем.) Насосы с магнитным подвесом ротора чувствительны к резкому росту давления в вакуумной камере («прорыву атмосферы»), поскольку их роторы испытывают ударную нагрузку при посадке на полной скорости на резервные подшипники. Обычно производители оговаривают характерное количество таких аварийных посадок до возникновения необходимости проведения технического обслуживания — оно может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен.

В данном сегменте рынка свою долю имеют все ведущие производители вакуумного оборудования —



Рис. 7. Турбомолекулярный насос с магнитным подвесом ротора

Alcatel, Busch, Edwards, Leybold, Pfeiffer, Osaka Vacuum, Shimadzu, Ulvac, Varian.

В сегменте криовакуумных насосов развитие происходит в направлении, прежде всего, увеличения надежности работы криоголовки и компрессора, а также создания «ударных» моделей и, соответственно, завоевание того или иного сектора рынка. Например, компания Suzuki Shokan разработала и производит крионасос с диаметром условного прохода (Ду) 320 мм, производительность которого в 1,5 раза выше, чем у конкурентов. Это позволило в относительно короткий срок занять доминирующее положение на полупроводниковом рынке Японии и Юго-восточной Азии в области оборудования для создания полупроводниковых приборов на подложках диаметром 300 мм, а наличие одних из лучших по производительности и надежности компрессоров и криоголовок и для насосов других размеров дает возможность компании на равных соперничать с таким признанным лидером японской вакуумной техники как Ulvac, которой подобный подход в свое время позволил завоевать лидирующие позиции в области оборудования для 200 мм подложек. На рынках США и Европы лидером является компания CTI Cryogenics, заметные позиции также имеют Austin Scientific и SHI Cryogenics.

В области крионасосов большой производительности с Ду более 500 мм (**рис. 8**) свои решения предлагают такие компании, как HSR, Leybold, PHPK, Suzuki Shokan, Ulvac.



Рис. 8. Крионасос Ду 600 мм с двумя рефрижераторами Гиффорда–МакМагона

Рынок аналитического вакуумного оборудования

В области измерения вакуума одной из заметных тенденций является развитие универсальных решений, рассчитанных на широкий диапазон давлений. Практически все производители вакуумметров предлагают широкодиапазонные датчики для измерения в области от 10^3 до 10^{-9} — 10^{-10} мбар, которые обычно совмещают два преобразователя в одном корпусе — преобразователь сопротивления (Пирани) в области от 10^3 до 10^{-3} мбар и ионизационный или инверсно-

магнетронный в области от 10^{-3} до 10^{-9} — 10^{-10} мбар. Непосредственно в корпусе датчика интегрирована вся необходимая для преобразования сигнала электроника, и он имеет, как правило, линейный аналоговый и/или цифровой выход, а зачастую и интегрированный дисплей. Данные приборы компактны и обеспечивают точность 15—30% от значения показания во всем диапазоне измерений.

В области форвакуумных измерений основным типом преобразователя является преобразователь Пирани, обеспечивающий точность 10—15% от показания в области от 10^3 до 10^{-4} мбар.

Такие преобразователи предлагают практически все крупные производители вакуумного оборудования, однако, не производя их, а поставляя оборудование своих OEM- и ODM-партнеров. Самыми заметными в данном сегменте рынка являются компании, специализирующиеся на производстве вакуумметров и аналитического оборудования — Canon Anelva, Thyracont, Inficon, Granville-Phillips, MKS Instruments, Varian и другие.

Другим направлением, получившим развитие в последнее время, являются вакуумметры на базе емкостного преобразователя. Этот тип датчиков позволяет определять давление газа с точностью 0,25—0,08% от показания. Обычно такие датчики покрывают диапазон в четыре декады, например от 10^3 до 10^{-1} мбар. Диапазон измеряемых давлений с помощью вакуумметров данного типа — от 10^4 до 10^{-6} мбар. Основными производителями данного оборудования являются MKS Instruments, Setra, Inficon, Canon Anelva.

В области средств течеискания обычно предлагаются два типа решений:

— традиционные гелиевые масс-спектрометрические течеискатели, которые предлагают практически

все крупные поставщики вакуумного оборудования — Adixen, Leybold, Pfeiffer, Ulvac, Varian. Также свою долю имеют компании, специализирующиеся на аналитическом оборудовании — Shimadzu, Canon Anelva, VIC, Inficon, MKS Instruments. Обычно такие масс-спектрометры имеют чувствительность по минимально фиксируемому потоку гелия до 10^{-12} мбар·л/с и достаточно компактное исполнение — масса системы варьируется в диапазоне 30—60 кг;

— средства течеискания, основанные на отличиях от масс-спектрометра принципах определения индикаторного газа. Обладают более низкой чувствительностью, чем масс-спектрометрические течеискатели — обычно до 10^{-7} мбар·л/с, однако характеризуются большей компактностью и меньшей массой — от 1,5 до 15 кг и работают в режиме щупа, забирая пробы при атмосферном давлении. Кроме компактности к их достоинствам нужно отнести возможность использования в качестве индикаторного не гелия, а другой газ. Поэтому данные течеискатели активно используют для поиска течей в криогенных трубопроводах, рефрижераторах, газовых трактах и т. п. Здесь заметные позиции занимают компании Varian, Ulvac, Adixen, Ion Science.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Васильев Ю. К., Нестеров С. Б., Васильева Т. С. Анализ современного состояния рынка оборудования систем создания и поддержания вакуума // Вакуумная техника и технология.— 2006.— Т. 16, № 1.— С. 55—62.
2. Перспективные технологии вакуумирования // НМ-оборудование.— 2004.— № 2.— <http://www.nmet.ru/i/2/last.html>
3. Васильев Ю. К., Нестеров С. Б. Современные пути оптимизации откачных вакуумных систем на базе диффузионных насосов // Материалы IV МНТК «Вакуумная техника, материалы и технология».— Россия, г. Москва.— 2009.— С. 81—84.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Экспериментальное доказательство экситонно-плазменного фазового перехода Мотта. (Германия, г. Штутгарт)
- Цифровой метод измерения коэффициента отражения поверхности. (Украина, г. Одесса)
- Устройство формирования элементов оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды. (Украина, г. Донецк)
- Оптоэлектронные сенсоры газов на основе многоэлементных источников ИК-излучения. (Украина, г. Мукачево)
- Оптимизация струйной технологии изготовления коммутационных элементов печатных плат. (Украина, г. Львов; Германия, г. Нюрнберг)
- Измерительные преобразователи на основе ионоселективных полевых транзисторов для ферментного анализа токсичных примесей в водных растворах. (Украина, г. Киев)
- Микропроцессоры звездобразной структуры с расширенными функциональными возможностями. (Украина, г. Одесса)



- Многоканальные устройства цифровой обработки сигналов с ранжированной архитектурой. (Украина, г. Одесса)
- Тепловизионный приемник для средней инфракрасной области спектра на основе матричного КРТ ФПУ формата 128×128. (Украина, г. Киев)
- Технология создания перестраиваемой линии задержки СВЧ-диапазона на основе сегнетоэлектрических и алмазных пленок. (Россия, г. Фрязино)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции