

УНИФИЦИРОВАННЫЕ ШЛЮЗОВЫЕ ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю.В. Панфилов, Л.Л. Колесник

АННОТАЦИЯ

Проанализированы варианты шлюзовых загрузочных устройств для вакуумного технологического оборудования. Приведены результаты расчетов изменения давления и времени откачки рабочих камер для различных вариантов шлюзовых загрузочных устройств. Показаны способы уменьшения газовыделения из узлов трения сверхвысоковакуумных механизмов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ШЛЮЗОВЫЕ ЗАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА, ВЫСОКИЙ И СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ, УЗЛЫ ТРЕНИЯ, ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ, ВРЕМЯ ОТКАЧКИ

UNIFIED LOAD LOCK DEVICES FOR ULTRA-HIGH VACUUM EQUIPMENT

Y.V. Panfilov, L.L. Kolesnik

ABSTRACT

Types of load lock devices for vacuum technological equipment were analyzed. Calculation results of pressure and pumping time for different types of load lock devices were represented. Methods of gas desorption decrease from friction surfaces of ultra-high mechanisms were shown.

KEYWORDS

LOAD LOCK DEVICES, HIGH AND ULTRA-HIGH VACUUM, FRICTION PAIR, GAS DESORPTION, PUMPING TIME

Актуальность статьи связана с перспективой открытия Программы «Вакуумное оборудование для научных исследований» Федерального проекта «Научное приборостроение» [1], в которой предполагается создание четырех вакуумных технологических установок с унифицированными шлюзовыми загрузочными устройствами. Целью статьи является анализ структурно-компоновочных вариантов вакуумных установок по критерию минимального времени загрузки полупроводниковых подложек из атмосферы в высокий и сверхвысокий вакуум. Время загрузки в основном зависит от способа шлюзования (индивидуальное или групповое) и длительности откачки шлюза.

На рисунке 1 приведены схемы вакуумных технологических установки шлюзового типа, разработанных в НИИ точного машиностроения г. Зеленоград [2] со шлюзовой камерой на одну подложку (а), со шлюзованием кассеты (б) и с дополнительной шлюзовой камерой (в).

При индивидуальном шлюзовании подложек (см. рис. 1а) шлюзовая камера имеет небольшой объем, что обеспечивает небольшое время его откачки. Шлюзовая камера, в которую загружается кассета с подложками (см. рис. 1б) имеет существенно больший объем по сравнению с первым вариантом, и время ее откачки зависит от вместимости кассеты.

Выбор между первым и вторым вариантами шлюзовой загрузки можно вести по критерию минимального времени, затрачиваемому на доставку подложек из атмосферы в рабочую камеру.

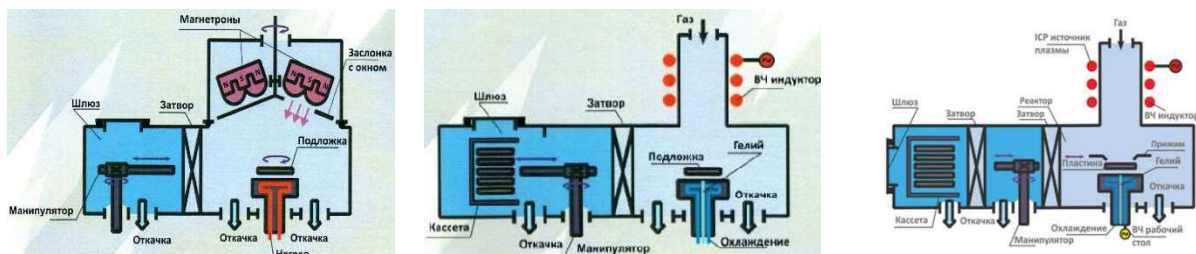


Рис. 1. Схемы установок: а – магнетронного распыления «Магна ТМ 200-01», б – плазмохимического травления «Плазма ТМ 200-01К», в – атомно-слоевого осаждения «Плазма ТМ 200-04К»

Методика сравнения способов шлюзовой загрузки и нахождение оптимального по критерию минимального времени загрузки варианта приведена в [3]. При определенном соотношении составляющих времени загрузки, не зависящих от количества n помещаемых в шлюз подложек t_n , например, времени перегрузки подложки из шлюза в рабочую камеру, кратно уменьшаемого времени t_k , например, времени открытия затвора (не закрывается пока не перегрузятся все подложки) и зависящих от количества помещаемых в шлюз подложек t_3 , например, длительности откачки шлюзовой камеры.

Степень зависимости m длительности откачки шлюзовой камеры от величины n определяет оптимальное количество одновременно загружаемых подложек $n_{\text{опт}}$, при котором время шлюзовой загрузки $t_{\text{ш}} = t_n + t_k/n + n^{m-1}t_3$ будет минимальным. Величину $n_{\text{опт}}$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$n_{\text{опт}} = \left[\frac{t_k}{t_3(m-1)} \right]^{1/m}.$$

Сокращение длительности откачки рабочей камеры до необходимого для проведения технологического процесса давления особенно актуально для сверхвысоковакуумного оборудования. При проектировании такого оборудования приходится решать следующую задачу: как при шлюзовой загрузке рассчитать время, необходимое для достижения в рабочей камере после закрытия вакуумного затвора давления, при котором можно начинать технологическую операцию. Для решения этой задачи необходимо разрешить противоречие между необходимостью проведения обезгаживающего прогрева рабочей камеры и достижением нужного давления без прогрева при минимальных потоках газовыделений со стенок шлюзовой и рабочей камер.

Характер изменения давления p в вакуумной камере зависит от эффективной скорости откачки S_0 и потока газовыделений Q_v со стенок камеры, причем и S_0 , и Q_v зависят от p . Наиболее характерно эта зависимость проявляется при сверхвысоком вакууме при давлении близком к предельному давлению насоса и при количестве адсорбированных на стенках вакуумной камеры молекул газа меньше числа молекул в одном монослое. Удельный поток десорбционных газовыделений с внутренних поверхностей стенок вакуумной камеры в зависимости от давления можно рассчитать по следующей формуле [4]:

$$q_v = \frac{p}{f + \frac{v}{a_m d m p^{m-1}}},$$

где $v=V/S_0$, $f=F/S_0$, V – объем вакуумной камеры, m^3 ; F – площадь внутренней поверхности стенок вакуумной камеры, m^2 ; a_m – количество адсорбированных молекул воды в монослое, $m^3/Па$; d и m – коэффициенты из уравнения Фрейндлиха. При определенных v и f удельный поток паров воды со стенок камеры может соответствовать представленному на рисунке 2 а.

При открытии вакуумного затвора между шлюзовой и рабочей камерами адсорбционное равновесие в камерах устанавливается очень быстро. Если в шлюзе было давление, например, 10^{-2} Па, то удельный поток паров воды со стенок рабочей камеры согласно рис. 2 а при определенных v и f может составлять $10^{-3} m^3/Па/(m^2c)$.

Время t образования монослоя сорбата зависит от давления p в вакуумной камере [5]:

$$t = 3 \cdot 10^{-4} / p,$$

т.е. при установившемся давлении p на стенках рабочей камеры монослой сорбата образуется за t секунд: при $p=10^{-2}$ Па – за $3 \cdot 10^{-2}$ с., при $p=10^{-3}$ Па – за 0,3 с, при $p=10^{-5}$ Па – за 30 с, при $p=10^{-6}$ Па – за 300 с. Если принять время перемещения изделия из шлюза в рабочую камеру 30 с, то монослой сорбата за это время образуется при давлении $p=10^{-5}$ Па.

Если рабочая камеры при давлении, например, 10^{-5} Па, находится более 30 с., то, согласно теории БЭТ, на ее стенках адсорбируется (сконденсируется) более одного монослоя молекул, а если менее 30 с или шлюз откачивается до более высокого вакуума, то, уравнения БЭТ переходят в уравнение Ленгмюра, и на стенках адсорбируется менее одного монослоя молекул. Это скажется на времени откачки рабочей камеры после закрытия затвора до начала проведения технологической операции.

Для сверхвысокого вакуума время откачки определяется скоростью удаления паров воды со стенок, а затем и из объема вакуумной камеры. Время откачки паров воды из камеры из нержавеющей стали при комнатной температуре до давления p можно рассчитать по следующей формуле [4]:

$$t = 8,6 \cdot 10^{-3} \frac{F}{S_0 \cdot p^{0,7}} c, \quad (1)$$

где F – площадь внутренней поверхности вакуумной камеры, m^2 ; S_0 – эффективная быстрота откачки, m^3/c ; p – давление в вакуумной камере, Па.

Кривые откачки паров воды для камер из нержавеющей стали представлены на рисунке 2 б, из которых следует, что большое влияние на характер кривых откачки оказывает параметр $f=F/S_0$, поэтому для типовых вакуумных камер ($v < 10$) влияние газов в объеме камеры сказывается только на первые 100 с откачки.

Для вакуумных камер с небольшой площадью внутренних стенок ($f=1$) время откачки t составляет: до $p=10^{-6}$ Па – 400 с, до $p=10^{-8}$ Па – 1100 с. С увеличением f , например, до 100 (см. Рис. 2 б) время откачки увеличится соответственно до 14300 с (4 часа) и до 70000 с (19,4 часа).

Для сокращения времени шлюзовой загрузки изделий в сверхвысоковакуумную рабочую камеру традиционным является способ уменьшения потоков газовыделений, в том

числе и паров воды, термическим прогревом стенок вакуумных камер. Однако, существует и другой способ сокращения времени достижения сверхвысокого вакуума в рабочей камере путем включения в состав установки дополнительной шлюзовой камеры (см рис. 1 в).

Согласно (1) время откачки 1-го шлюза от атмосферного давления до 10^{-1} Па может составить порядка 100 с, а время откачки рабочей камеры без прогрева от 10^{-1} до 10^{-8} Па при $f=10$ может составить порядка 11000 с (3 часа). Для второго шлюза, который постоянно откачан, например, до давления 10^{-5} Па, удельный поток газовыделения на два порядка меньше, чем в первом шлюзе (см. рис. 3), что дает возможность откачать его от 10^{-1} до 10^{-5} Па за 660 с. Соответственно, рабочую камеру после закрытия затвора между ней и вторым шлюзом можно откачать до давления 10^{-8} Па согласно (1) за 4400 с (1,2 часа).

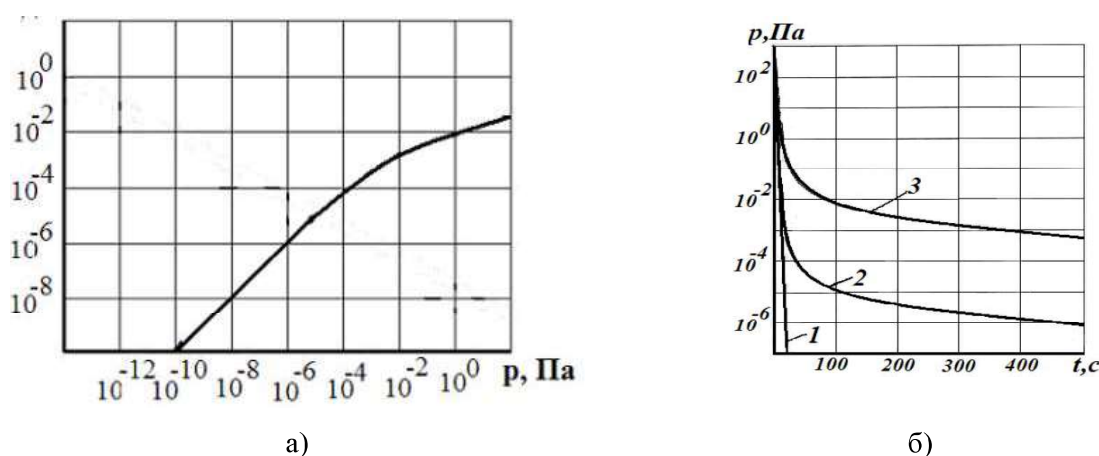


Рис. 2. Удельное десорбционное газовыделение паров воды с поверхности нержавеющей стали при 298 К (а) и кривые откачки паров воды из вакуумной камеры при температуре 298 К
 1 – $\nu=1, f=0$; 2 – $\nu=1, f=1$; 3 – $\nu=1, f=100$ (б) [4]

Таким образом, по приблизительным расчетам при соотношении размеров вакуумной камеры и эффективной быстроты откачки $f=10$ сравнение времени загрузки подложек из атмосферы в сверхвысоковакуумную рабочую камеру с одним (рис. 1 б) (порядка 3 часов) и двумя (рис. 1 в) (1,43 часа) шлюзами показывает возможное сокращение времени загрузки при втором варианте более, чем на 50 %.

Для перемещения изделий из шлюзовых камер в сверхвысоковакуумные камеры широко используются магнитные манипуляторы, передающие движение через сплошную стенку и имеющие минимальное количество пар трения. Магнитные манипуляторы не заменимы с точки зрения минимального потока газовыделений, но имеют существенный недостаток, связанный с очень малой жесткостью передачи движения, что не позволяет использовать их в качестве прецизионных механизмов с высокой плавностью перемещения и точностью позиционирования.

Сверхвысоковакуумная установка молекулярно-лучевой эпитаксии «Цна» (Рис. 3 а), разработанная в НИТИ г. Рязань в 80-е годы прошлого столетия, имела как магнитные манипуляторы для загрузки и выгрузки изделий в рабочие камеры, так и электромеханические приводы для перемещения изделий между шлюзовой и рабочими камерами. Для надежной работы транспортных механизмов и манипуляторов в рабочих камерах было разработано твердосмазочное покрытие на основе дисульфида молибдена [6], которое наносилось на детали узлов трения магнетронным распылением мишени из MoS_2 . Основными достоинствами такого покрытия были сверхнизкий коэффициент трения скольжения (до 0,002) в

сверхвысоком вакууме и очень низкий поток газовыделений из пар трения манипуляторов и направляющих скольжения с полным отсутствием в его спектре даже при температуре 773 К следов серы и ее соединений (Рис. 3 б), что оказалось приемлемо для процессов молекулярно-лучевой эпитаксии.

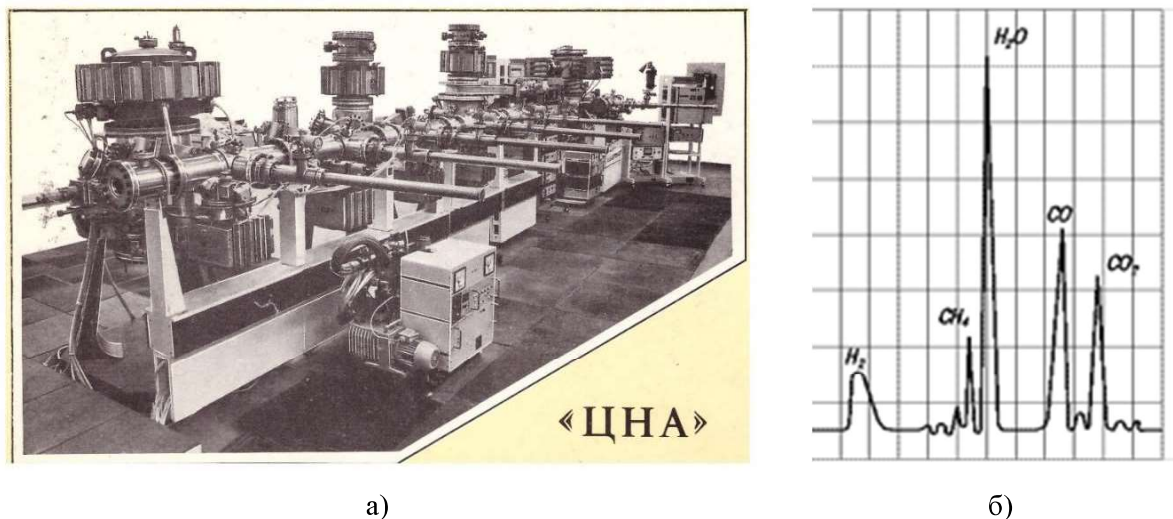


Рис. 3. Фотография установки молекулярно-лучевой эпитаксии «Цна» (а) и спектр газовой выделения покрытий из MoS_2 после 1 часа прогрева при $T=773$ К

Примером привода для манипулятора перемещения и загрузки изделий в сверхвысоковакуумном оборудовании может служить привод линейного манипулятора, разработанный в ООО «Электривакуумные технологии».

Внешний вид манипулятора представлен на рис. 4.

Основные технические характеристики манипулятора:

- Максимальный вылет штока от присоединительного фланца — 200 мм;
- Вид штока — комбинированный цилиндрический облегченный;
- Внешний диаметр штока — $22 \pm 0,1\%$ мм;
- Тип перемещения штока — линейное вдоль оси симметрии;
- Точность позиционирования штока по оси перемещения — не хуже 10 мкм;
- Изгиб края штока (провисание) в любом положении при максимальной величине хода — не более 200 мкм;
- Максимальная поперечная и продольная нагрузка на шток — не менее 1 кг.
- Шток съемный, крепится к фланцу корпуса;
- Присоединительный фланец штока — DN40CF;
- Тип уплотнения (корпуса) — тарельчатый сильфон;
- Манипулятор оснащается моторизованным приводом и управляется с помощью панели оператора.

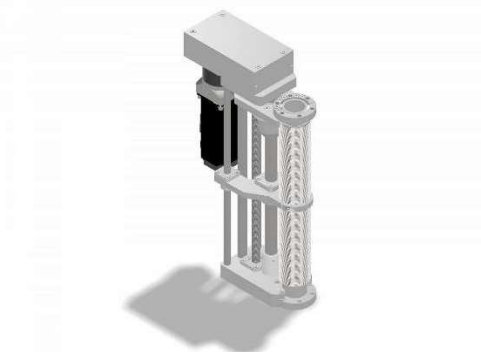


Рис. 4. Внешний вид привода высоковакуумного манипулятора, разработанного в ООО «Электровакуумные технологии»

Анализ структурно-компоновочных вариантов вакуумных установок показал, что для уменьшения времени подготовки рабочей камеры сверхвысоковакуумной установки к работе не обязательно применять обезгаживающий прогрев. Приведенные в статье расчеты показывают, что использование двух последовательных шлюзовых камер может вдвое сократить время шлюзовой загрузки по сравнению с однократным шлюзованием без применения обезгаживающего прогрева. Хорошо показали себя твердосмазочные покрытия на основе дисульфида молибдена, нанесенные магнетронным распылением, что позволяет электромеханическому приводу конкурировать с точки зрения работы в сверхвысоком вакууме с магнитными манипуляторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панфилов Ю.В., Родионов И.А., Колесник Л.Л., Бабурин А.С. Стратегические проекты развития МГТУ им. Н.Э. Баумана и импортозамещение вакуумного оборудования / Вакуумная техника и технология – 2022 /Труды 29-й всероссийской науч.-тех. конф. с междунар. участием, СПб, 2022, С. 68 – 72
2. www.niitm.ru
3. Панфилов Ю.В., Хрусталева И.И. Влияние способа загрузки подложек на производительность автоматизированного вакуумного технологического оборудования / Электронная техника. Серия 7 ТОПО. Вып. 1 (158), 1990, С. 36 – 40
4. Вакуумная техника: учебник для вузов / Л.Н. Розанов. 3-е издание, перераб. и доп. – М.: Высшая шк., 2007. – 391 с.
5. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова и Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
6. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Улучшение антифрикционных свойств поверхностей вакуумными технологическими методами / Электронные, ионные и плазменные технологии /Приложение №1 к журналу «Справочник. Инженерный журнал», 2000, №1, С. 22 – 24

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ю.В. Панфилов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных технологий в машиностроении, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: panfilov@bmstu.ru

Л.Л. Колесник – кандидат технических наук, доцент кафедрой электронных технологий в машиностроении, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; генеральный директор ООО «Электровакуумные технологии», г. Москва\$ e-mail: kolesnik@bmstu.ru; l.kolesnik@m-i.ru