

Влияние акустических колебаний УЗ диапазона на скорость обезгаживания материалов в производстве электровакуумных приборов

***И.Ф.Ханбеков, *И.П.Ли, *В.С.Петров, *А.А. Полунина, *Д.Н.Локтев, **А.В.Глушченков
Москва, *АО Плутон
Москва, **МГТУ им. Н.Э. Баумана
E-mail: ivan.khan@ya.ru, i.li@pluton.msk.ru, vsempetrov@yandex.ru

Описываются основные этапы обезгаживания электровакуумных приборов. Приведен график термовакуумной обработки электровакуумного прибора, приведены графики акустической обработки медной штенгельной трубки во время обезгаживания, дано описание переноса атомов внедрения в кристаллической решетке металла упругой акустической волной.

Acoustic vibrations of ultrasonic range – their influence on the material outgassing rate by electrovacuum device production. I.F. Khanbekov, I.P. Lee, V.S. Petrov, A.A. Polunina, D.N. Loktev, A.A. Glushchenkov. The main stages of electric vacuum devices pumping are described. A graph of thermal vacuum treatment of an electro-vacuum device is given, graphs of acoustic treatment of a copper rod tube during pumping are given, a description of the introduction atoms transfer by an elastic acoustic wave in the metal crystal lattice is given.

Откачка электровакуумных приборов СВЧ диапазона (далее ЭВП) наиболее длительный, энергозатратный и ответственный технологический процесс, в ходе которого формируется работоспособность всего изделия. Продолжительность откачки (обезгаживания) электровакуумных приборов может составлять от нескольких десятков часов, до нескольких суток. Одним из основных критериев работоспособности изделия и его соответствие заявленным требованиям, таким как мощность, спектр генерируемого излучения и долговечность, является состав остаточных газов и их концентрация (остаточное давление).

Для описания этапов обезгаживания ЭВП рассмотрена откачка при комнатной температуре. Разумеется, такая откачка никогда не применялась в технологии производства ЭВП из-за ее низкой производительности и годится только для определения основных этапов сложного процесса. Однако, ее теоретическое описание, представленное графиками рис.1. является исходной физико-химической основой [1], относительно которой возможна разработка практической вакуумной технологии.

Штенгельная откачка ЭВП при комнатной температуре характеризуется теоретической последовательностью длительности циклов откачки.

Первый цикл описывает откачку свободного атмосферного газа, на откачном посту обеспечивается форвакуумным и высоковакуумным насосами от атмосферного давления 10^3 Торр до минимального технического давления остаточных газов 10^{-6} Торр в интервале длительности $0 - 10^3$ с ($0 - 16,7$ мин.). Изменение давления свободного газа P в функции от длительности τ , описывается уравнением $P = \exp(-\alpha\tau)$.

Окончание интервала длительности первого цикла откачки связано с возникновением «десорбционной» газовой нагрузки.

Второй цикл описывает откачку десорбционной газовой нагрузки, которая проявляется в интервале 10^3 с – 10^7 с ($16,7$ мин – $1,67 \cdot 10^2$ мин: 150 мин).

Откачка десорбционной газовой нагрузки осложнена наличием коллоидных (пылевидных) частиц с размерами несколько мкм. Наличие коллоидных частиц является препятствием для свободного вылета с поверхности атомарных и молекулярных частиц в вакуум, и, соответственно, препятствием для достижения минимально технически возможного давления остаточного газа.

Изменение давления свободного газа P в функции от длительности τ , описывается уравнением $P = \beta\tau^{-1}$.

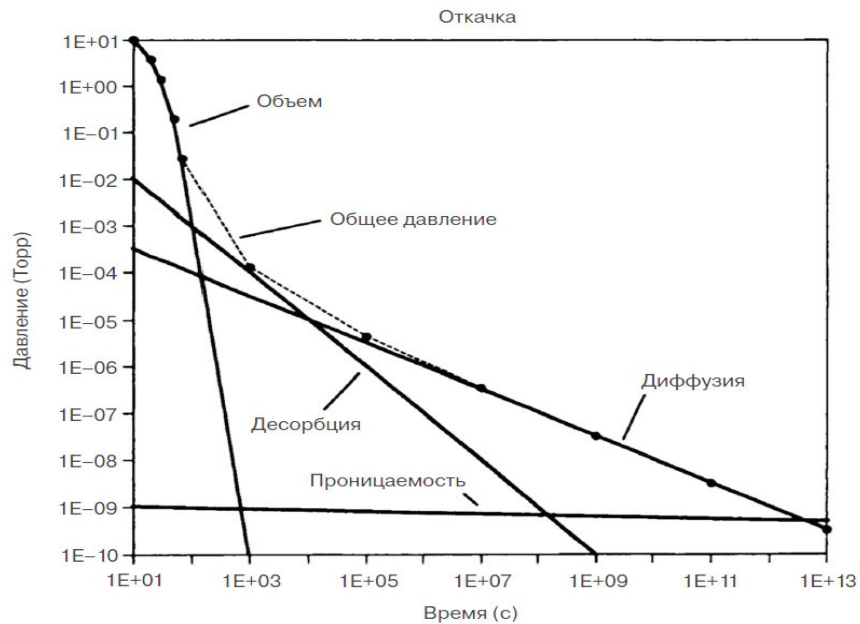


Рис.1. Теоретическая зависимость уменьшения давления P , Торр от длительности откачки свободного воздуха из корпуса ЭВП при комнатной температуре, где «объем» - изменение давления при откачке исходного свободного газа, «десорбция» и «диффузия» - изменение давления технологического газа, «общее давление» - изменение давления смеси исходного и технологического газов, «проницаемость» изменение давления при натекании атмосферы из внешней среды.

Изменение давления свободного газа P в функции от длительности τ , описывается уравнением $P = \beta\tau^{-1}$.

После окончания интервала откачки «десорбционной» газовой нагрузки возникает «диффузионно-десорбционная» газовая нагрузка. Исходная концентрация адсорбированных на поверхности газовых молекул является стационарной и отражает условия взаимодействия деталей внутренней арматуры с атмосферным воздухом при сборке магнетрона. При откачке происходит уменьшение стационарной концентрации физически адсорбированных молекул на поверхности деталей внутренней арматуры до нуля при снижении давления остаточных газов с 10^{-2} Торр до 10^{-5} Торр.

Третий цикл описывает откачку диффузионно-десорбционной газовой нагрузки, он формируется за интервал длительности 10^7 с – 10^{13} с ($1,67 \cdot 10^4$ мин или 278 час) при снижении давления остаточных газов с 10^{-5} Торр до 10^{-8} Торр.

Механизм образования диффузионно-десорбционной газовой нагрузки состоит в формировании динамической концентрации газовых молекул на поверхности, которая зависит от диффузионных параметров газовых атомов в объеме деталей внутренней арматуры при комнатной температуре. Диффузионные параметры, в свою очередь, зависят от характеристик твердого раствора внедрения «металл - газ» и от концентрации в нем газового компонента.

При термической откачке ЭВП все вышеперечисленные процессы протекают с большей скоростью, но, тем не менее, диффузионно-десорбционный цикл имеет малую скорость и занимает не менее $\frac{3}{4}$ всего времени обезгаживания изделия рис.2. Стоит, также отметить, что в поликристаллах существует несколько взаимосвязанных путей диффузии, так что общее перемещение диффузанта определяется суммой массопереноса, происходящего по каждому из этих путей. Как правило, поток диффузанта по этим путям учитывается путем введения эффективного коэффициента диффузии в виде

$$D_{eff} = f_c D_c + f_g D_g + f_d D_d$$

где D_c, D_g и D_d - коэффициенты диффузии при диффузии по кристаллической решетке, по границам зёрен и по дислокациям, соответственно, и f_c, f_g и f_d – соответствующие доли атомов,

диффундирующие по этим путям.[2] Коэффициент диффузии по границам зерен характеризуется размером зерен и размером границ зерен, также на скорость диффузии влияет геометрическая форма обезгаживаемых деталей и их материал.

Повышение температуры нагрева корпуса выше 550 С, с целью ускорения газовыделения невозможно, ввиду того, что это разрушит или повредит электровакуумный прибор. Применение акустической стимуляции во время термо-обезгаживания не оказывает разрушающего воздействия на ЭВП, но ускоряет газовыделение.

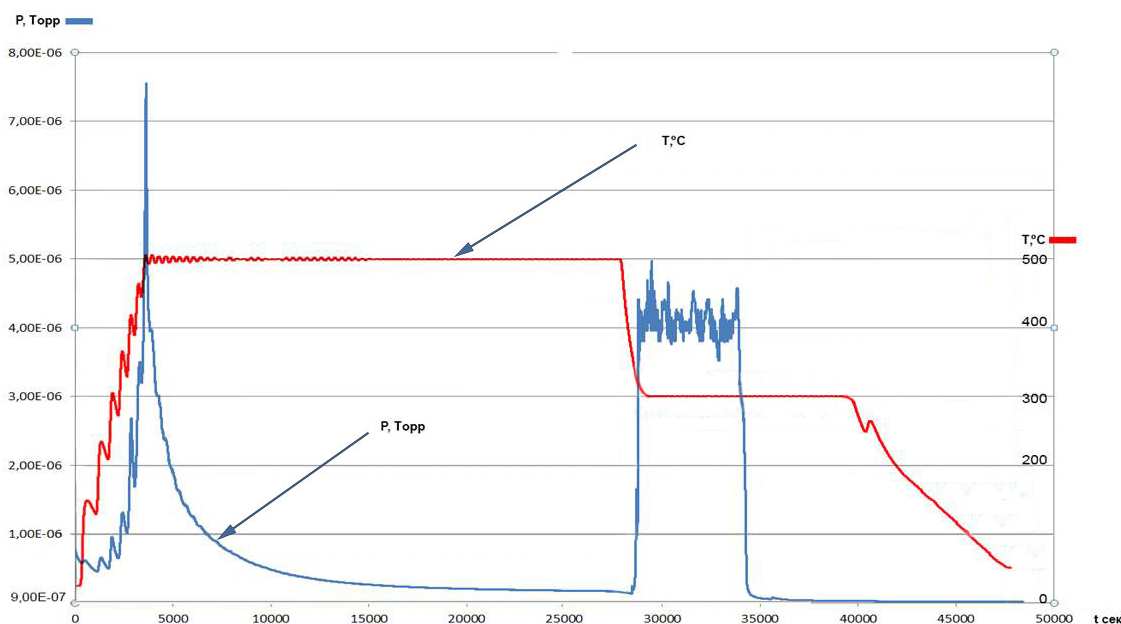


Рис.2.График термовакуумной обработки электровакуумного прибора на откачном посту.

В α – твердых растворах металлических кристаллов происходит перенос атомов внедрения упругой волной, создаваемой пьезоактивными пластинами, механически прикрепленными к корпусу электровакуумного прибора. Для возбуждения объемной и поверхностной акустических волн применяются монокристаллы лантан галлиевого силиката $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, лантан галлиевого танталата $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$.

Если при этом корпус магнетрона нагрет до 550°C, возникает эффект термоакустического переноса. Пластины из монокристаллов ЛГС и ЛГТ не теряют своих пьезоэлектрических свойств при нагревании вплоть до 1500°C, что подходит для применения в термоакустической обработке.

При термоакустическом переносе атомы внедрения перемещаются в объеме кристаллической решетки металлов в условиях вынужденной диффузии с большей скоростью чем при термическом воздействии. Следовательно, условие связывающей границы будет выполняться более эффективно, и адсорбция, и конденсация атомов внедрения на поверхности деталей внутренней арматуры электровакуумного прибора в таких условиях будут характеризоваться меньшим временем жизни на поверхности.

Кроме того, акустическая волна способна эффективно удалять с поверхности коллоидные частицы, очищая адсорбированные слои газовых молекул от дополнительного гидравлического сопротивления, образующегося при сборке корпуса на атмосфере.

Для сравнения приведены графики зависимости парциальных давлений газов от времени при откачке медной штенгельной трубки с ультразвуковой обработкой на частотах 100кГц и 55кГц.

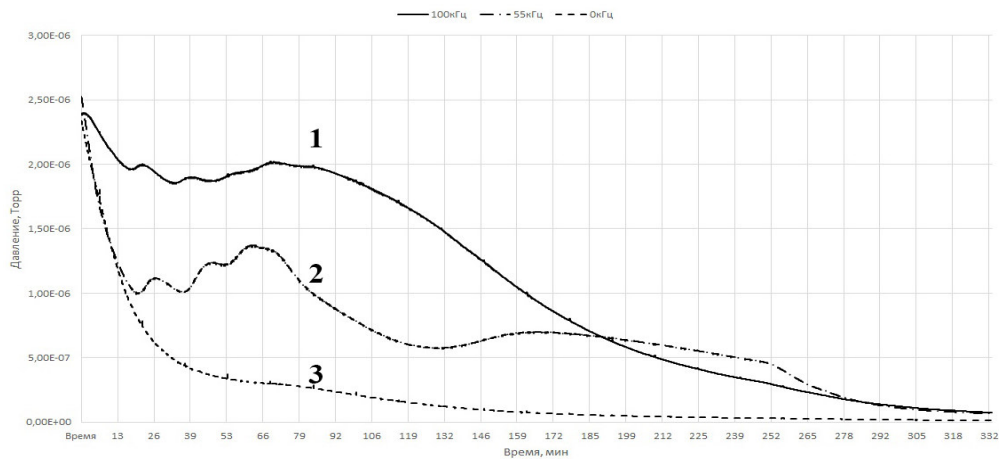


Рис.3. График зависимости изменения парциального давления воды (18 а.е.м) во время откачки при различных частотах УЗ колебаний. Кривые: 1 – 100кГц, 2 – 55кГц, 3 – без УЗ.

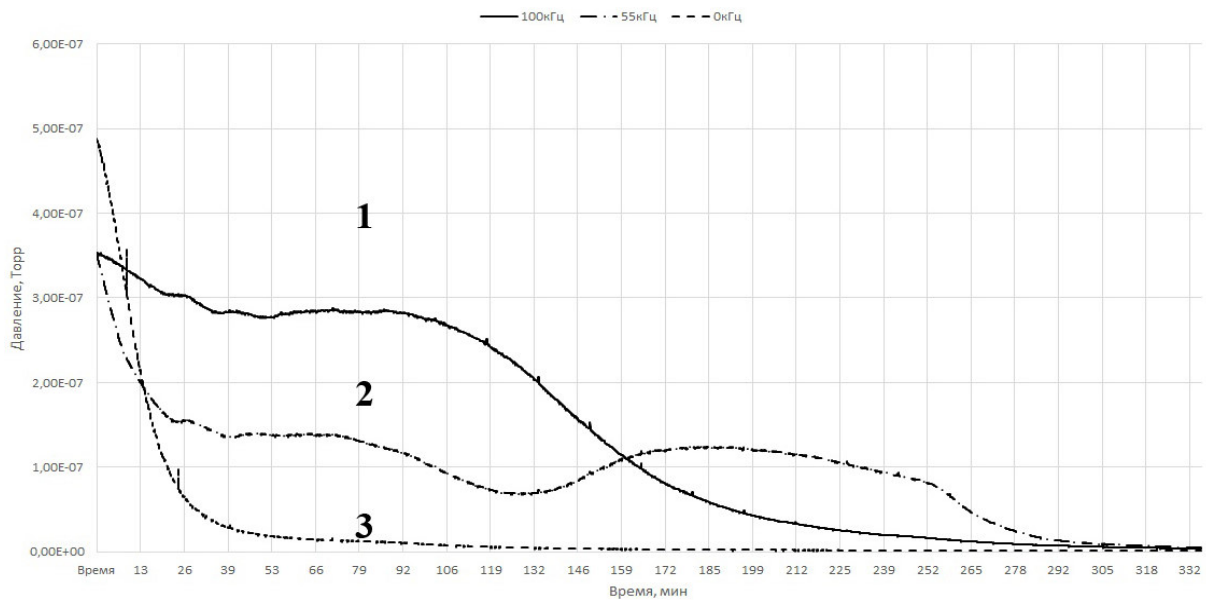


Рис.4. График зависимости изменения парциального давления водорода (2 а.е.м) во время откачки при различных частотах УЗ колебаний. Кривые: 1 – 100кГц, 2 – 55кГц, 3 – без УЗ.

Экспериментальные данные показали, что частота УЗ колебаний влияет на скорость не только общего потока, но и непосредственно на конкретные газы. На рис.4 рис.5 приведены графики изменения парциальных давлений для воды (18 а.е.м) и молекулярного водорода 2 (а.е.м) в зависимости от частоты УЗ, в данном случае наибольшая скорость десорбции наблюдалась при частоте 100кГц – кривые 1, при этом график суммарного парциального давления Рис.5 показывает что десорбция остальных газовых компонентов наиболее активно протекала при частоте 55кГц – кривая 2. Подобное явление объясняется зависимостью скоростей диффузионно-десорбционных процессов для различных компонентов внедрения от частоты УЗ колебаний, вероятно частота 100кГц оказалась более подходящей для стимуляции десорбции воды и водорода, но менее подходящей для прочих газов.

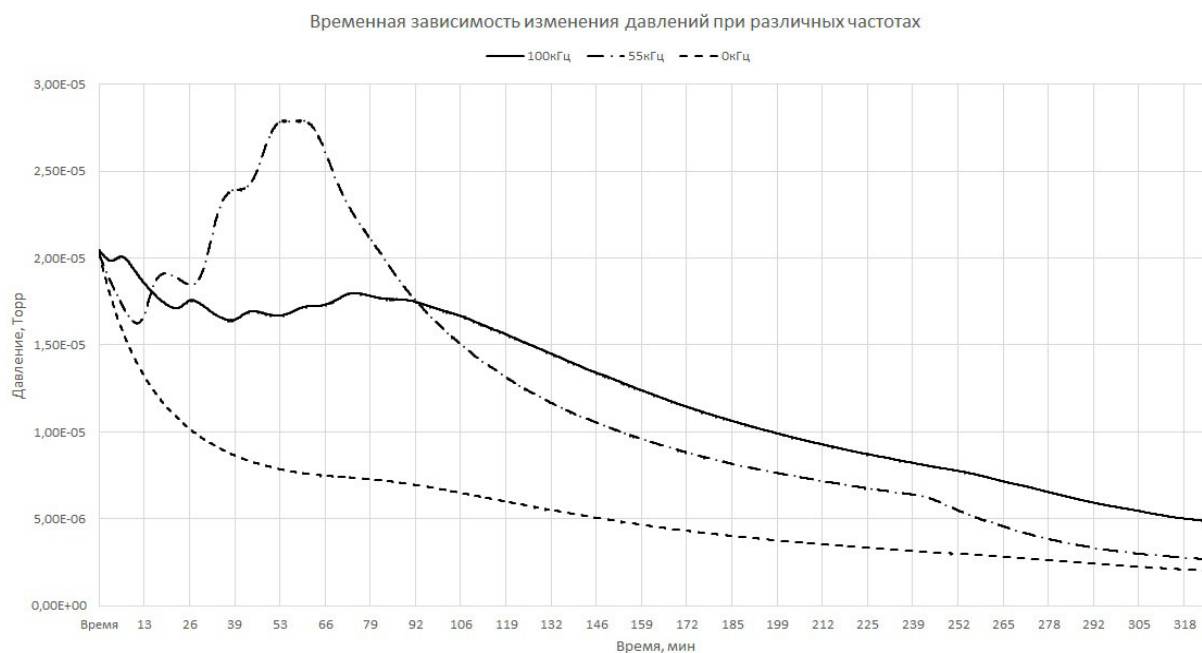


Рис.5. График зависимости изменения суммарного парциального давления во время откачки при различных частотах УЗ колебаний. Кривые: 1 – 100кГц, 2 – 55кГц, 3 – без УЗ.

Создание адаптивной технологии обезгаживания ЭВП предполагает последовательное применение нескольких частот УЗ колебаний во время откачки изделия, такая технология предполагает увеличение не только общего газового потока но и управление десорбцией и диффузией конкретных газовых компонентов, являющихся наиболее вредными для нормальной работы ЭВП. В настоящий момент основным критерием качества технологического процесса откачки ЭВП служит остаточное давление, при реализации управляемой технологии откачки к имеющемуся критерию добавится еще один – предсказуемый состав остаточной атмосферы.

Литература

1. Хоффман Д, Сингх Б, Томас Дж. Справочник по вакуумной технике и технологиям 2011. Перевод с английского Ю.Л. Цвирко под редакцией В.А. Романько, С.Б. Нестерова.
2. Бекман И Н2016 Математика диффузии. 189.