

- [1] Bondar Yu.F., Gomonko A.A., Mkhaidze G.P. et al. // Proc. 7th Int. Conf. High Power Particle Beams, Karlsruhe, W.G. 1988. P. 939.
- [2] Бондарь Ю.Ф., Гоманько А.А., Мхейдзе Г.П. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 6. С. 139.
- [3] Гочелашвили К.С., Климов В.И., Прохоров А.М. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 12. С. 1515.
- [4] Елецкий Л.В., Смирнов Б.М. Физические процессы в газовых лазерах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [5] Helps A.V., Van Brunt R.J.H. J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 9. P. 4269.
- [6] Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. - М.: Мир, 1967.
- [7] Бычков В.А., Елецкий А.В., Ушаговский В.А. // Физика плазмы, 1988. Т. 14. № 12. С. 1497.
- [8] Башурин В.П., Великанов В.П., Довчий А.Я. и др. // ДАН СССР. 1986. Т. 283. № 3. С. 614.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
28 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 6

26 марта 1990 г.

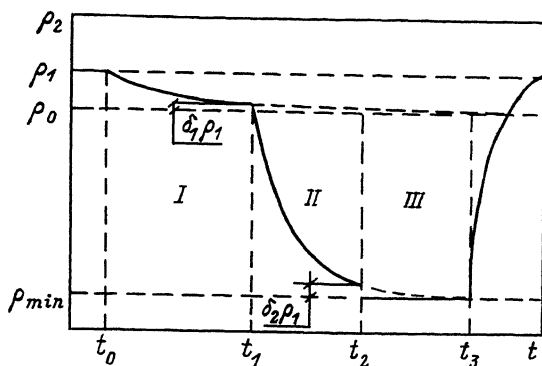
12

© 1990

О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ В КВАЗИЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

А.В. Гришанов, В.Л. Ласка

Одним из основных требований, предъявляемых к антикоррозионным, сверхпроводящим, жаропрочным покрытиям, является чистота, т.е. отсутствие в составе посторонних элементов. При этом концентрация загрязнений не должна превышать десятых, а в ряде случаев сотых долей атомного процента, что обуславливает необходимость использования вакуумных методов нанесения. Наилучшие результаты достигаются на сверхвысоковакуумном технологическом оборудовании, однако его дефицитность и низкая производительность ограничивают возможности широкого применения.



Изменение плотности остаточных газов в квазизамкнутом объеме. I — период установления состояния динамического равновесия в режиме термомолекулярного течения, II — период достижения минимальной плотности остаточных газов в квазизамкнутом объеме (период геттерирования), III — период соответствующий нанесению покрытия.

В условиях масляного и безмасляного вакуума $10^{-3} \dots 10^{-5}$ Па удается значительно повысить чистоту наносимых слоев, применяя метод квазизамкнутого объема (КЗО) [1]. Суть метода состоит в том, что испарение и конденсация исходного материала осуществляются в небольшой дополнительной камере (квазизамкнутом объеме), которая помещается в основную технологическую камеру и сообщается с нею отверстием малой проводимости. При интенсивном испарении вещества плотность остаточных газов в КЗО может быть значительно снижена по отношению к плотности остаточных газов в основной технологической камере за счет необратимого захвата (геттерирования) газов наносимой на внутреннюю поверхность стенок, постоянно обновляющейся пленкой материала покрытия. Натекание остаточных газов из окружающего вакуума затрудняется малой проводимостью соединительного отверстия и эффектом паровой пробки.

Следуя общим представлениям молекулярно-кинетической теории газов, можно предположить, что улучшение чистоты покрытий, наносимых в КЗО, может быть достигнуто при интенсивном испарении материалов, обладающих высокими геттерирующими свойствами, а также при обеспечении высокого разрежения в основной технологической камере.

Целью настоящей работы является получение аналитического выражения, определяющего предельные возможности геттерирования остаточных газов в КЗО и его анализ с точки зрения обеспечения оптимальных параметров технологического процесса и конструктивных решений.

При анализе процессов, приводящих к изменению плотности остаточных газов в КЗО, можно пренебречь газоотделением из его стенок в связи с замуровыванием выделяющихся газов непрерывно конденсирующейся на поверхности геттерирующей пленкой. Тогда динамическое газовое равновесие в КЗО установится в результате свободного газообмена с окружающим вакуумом (перетекание через соединительное отверстие) и геттерирования остаточных газов на стенках. В связи с тем, что в процессе испарения стенки КЗО могут нагреваться теплоизлучением расплавленной ванны при резистивном испарении, а также высокоэнергетичными вторичными электронами при электронно-лучевом испарении газообмен через соединительное отверстие будет осуществляться в виде термомолекулярного перетекания. Для удобства рассуждений будем считать (см. рис. 1), что геттерирование в КЗО начинается после установления состояния динамического равновесия при термомолекулярном течении остаточных газов из КЗО в окружающий вакуум и обратно в молекулярном режиме.

Параметры, характеризующие газовую среду в КЗО, могут быть вычислены при решении уравнения баланса масс:

$$V \cdot d\rho_2(t) = u_{12} \rho_1 dt - u_{21} \rho_2 dt - u_r \rho_2 dt, \quad (1)$$

где V — величина КЗО, $\rho_2(t)$ — переменная плотность остаточных газов в КЗО, u_{12} — проводимость соединительного отверстия в направлении из окружающего вакуума в КЗО, u_{21} — проводимость соединительного отверстия в противоположном направлении, ρ_1 — неизменная плотность остаточных газов в основной технологической камере, u_r — проводимость гипотетического отверстия, вытекание остаточных газов через которое эквивалентно описывает их геттерирование в КЗО. Здесь

$$u_{12} = k \cdot S_{отв} \sqrt{\frac{T_1}{M}}; \quad u_{21} = k \cdot S_{отв} \sqrt{\frac{T_2}{M}}; \quad u_r = \alpha_{пл} \cdot S_{см} \cdot \sqrt{\frac{T_2}{M}},$$

k — коэффициент Клаузинга, T_2 — температура стенок КЗО, T_1 — температура стенок основной технологической камеры, $\alpha_{пл}$ — коэффициент прилипания молекул остаточных газов к свеженаносимой пленке материала покрытия, $S_{см}$ — площадь поверхности конденсации пленки на стенках КЗО, $S_{отв}$ — площадь соединительного отверстия, M — масса газовой молекулы.

Левая часть уравнения (1) описывает общее изменение массы газа в КЗО за время dt , а слагаемые правой части характеризуют физические процессы, приводящие к этому изменению. Это уравнение может быть приведено к виду:

$$\frac{dy}{dt} = A - B \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} y, \quad (2)$$

где $y = \frac{\rho_2(t)}{\rho_1}$, $A = \frac{\alpha_{12}}{V}$; $B = \frac{\alpha_{12}}{V} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_n \cdot S_{cm}}{S_{отв}}\right)$.

Для периода термомолекулярного течения решения уравнения (2) при начальном условии $y_T(0) = 1$ имеет вид

$$y_T = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} + \left(1 - \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}\right) \exp\left(-A\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot t\right).$$

Время установления состояния динамического равновесия в режиме термомолекулярного течения может быть определено из условия

$$y_T(\tau_1) - y_T(\infty) = \left(1 - \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}\right) \cdot \exp\left(-A\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot \tau_1\right) \leq \delta_1,$$

где $\tau_1 = t_1 - t_0$, δ_1 - произвольная малая величина, характеризующая степень приближения $y_T(t)$ к асимптотическому значению

$$y_T(\infty) = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}.$$

С учетом геттерирования решение уравнения (2) с начальным условием $y_T(0) = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$ имеет вид

$$y_T = \frac{A}{B} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} + \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \left(1 - \frac{A}{B}\right) \cdot \exp\left(-B\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot t\right). \quad (3)$$

Время достижения минимальной плотности остаточных газов в КЗО $\tau_2 = t_2 - t_1$ может быть найдено из условия:

$$y_T(\tau_2) - y_T(\infty) = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \left(1 - \frac{A}{B}\right) \cdot \exp\left(-B\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \cdot \tau_2\right) \leq \delta_2,$$

где δ_2 - произвольная малая величина, аналогичная по смыслу с δ_1 .

Выражение (3) позволяет определить предельно достижимую минимальную плотность остаточных газов в КЗО:

$$\rho_{min} = \rho_1 \cdot \frac{S_{отв}}{S_{отв} + \alpha_n \cdot S_{cm}} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}. \quad (4)$$

Полученная зависимость дает возможность наметить пути уменьшения плотности газообразных загрязнений в пленках, наносимых в КЗО:

1. Как уже отмечалось выше, необходимо обеспечивать высокое разрежение в основной технологической камере, т.е. минимальную плотность остаточных газов в ней ρ_1 , а также реализовывать условия, при которых коэффициент прилипания остаточных газов к свеженаносимой пленке α_n будет максимальным, что достигается при испарении материалов с высокими геттерирующими свойствами и увеличением скорости конденсации.

2. Уменьшение температуры остаточных газов в основной технологической камере T_1 . Это обуславливает малую частоту попадания газовых частиц в створ соединительного отверстия со стороны окружающего вакуума, т.е. минимальное натекание в КЗО.

3. Обеспечение оптимальной температуры остаточных газов в КЗО. С ростом T_2 увеличивается поток газа, вытекающего из КЗО через соединительное отверстие при термомолекулярном течении. Однако при этом возрастает частота соударений газовых частиц с наносимой на подложки пленкой, а самое главное — значительный нагрев стенок КЗО приводит к увеличению потока газоотделения и уменьшению коэффициента прилипания.

4. Обеспечение оптимальных пропорций между площадью соединительного отверстия и площадью стенок КЗО. Величина $S_{отв}$ должна быть разумно малой с точки зрения ограничения натекания остаточных газов в КЗО из основной технологической камеры, но достаточной для эффективной предварительной откачки КЗО и обеспечения минимального времени установления динамического равновесия в процессе термомолекулярного перетекания τ_1 . Площадь стенок КЗО должна быть значительной с точки зрения увеличения геттерирующей поверхности, однако увеличение $S_{ст}$ приводит к падению скорости конденсации, уменьшению эффективности геттерирования и возрастанию величины КЗО V , что, в свою очередь, увеличивает время достижения минимальной плотности остаточных газов в КЗО τ_2 .

Расчет с помощью выражения (4) степени разрежения по остаточным газам в реальных технологических конструкциях КЗО при вакууме в основной технологической камере $\sim 10^{-3}$ Па, $S_{отв} = 1 \text{ см}^2$, $S_{ст} = 10^3 \text{ см}^2$, $T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 450 \text{ К}$, $\alpha_n = 0.8$ дает величину давления в КЗО $\sim 10^{-6}$ Па. Данная оценка находится в хорошем соответствии с известными экспериментальными данными [2].

Авторы выражают благодарность О.Г. Вендику за ценные замечания и постоянный интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кондратов А.В., Потапенко А.А. Термическое испарение в вакууме при производстве изделий радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1986.
- [2] Ledovskoi V.P., Potsar N.A., Laska V.L. // Superconducting Properties of Nb Films Deposited in Quasi-Closed Volum Phys. Stat. Sol. (a). V. 54. 1979. P. 37-40.

Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию
6 декабря 1989 г.