

4. В.В.Вязовецков «Экспериментальные результаты исследования герметизации сферических пар». Межвузовский сборник «Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП», М.1984 г., с.149-155.
5. A.J.W.Moore, “Deformation of metals in static and sliding contact”, Prjceedings of the royal society, Series A “Mathematical and Physical Sciences”, N1041, 7 December 1948, v.195, London.
6. T.H.C. Childs «The persistence of asperities in indentation experiments».–Wear, 1973, v.25, p.3-16.
7. Л.А. Галин «Контактные задачи теории упругости и вязко вязкоупругости». -М.: «Наука». 1980.-304 с.
8. Авторское свидетельство на изобретение № 1043411 А. Способ герметизации разъёмных криогенных трубопроводов. F 16L 19/00, F 16 L 23/00. Авторы: В.Г.Данченко,Ф.П.Савин, В.И.Косинский. Опубликовано в БИ № 33 1983г.

Оценка влияния мощности разряда магнетронной распылительной системы на энергетическую эффективность распыления

В.В. Тлявлин, П.В. Петухов, ЗауПхоАунг, Л.Л. Колесник
г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
kolesnik@bmstu.ru

В работе исследованы закономерности эволюции тепловых процессов в мишени и камере МРС, а также описан баланс энергии на катодном узле магнетрона на постоянном токе. Установлено, что основным источником энергии является ионный ток разряда, а наиболее существенные компоненты стока энергии – тепловое излучение, энергия, расходуемая на испарение и распыление, энергия отраженных частиц, энергия, отводимая системой охлаждения магнетрона.

Estimation of impact of magnetron sputtering system power discharge on energy efficiency of sputtering. V. Tlyavlin, P. Petuhov, Zaw Phyo Aung, L.Kolesnik. The laws governing the evolution of thermal processes in the target and the MSS chamber are investigated, and the energy balance at the cathode node of the magnetron at a constant current is described. It has been established that the main source of energy is the ion discharge current, and the most significant components of the energy drain are thermal radiation, energy consumed for evaporation and sputtering, energy of reflected particles, energy removed by the magnetron cooling system.

В работе исследованы закономерности эволюции тепловых процессов в мишени и камере МРС, а также описан баланс энергии на катодном узле магнетрона на постоянном токе. Установлено, что основным источником энергии является ионный ток разряда, а наиболее существенные компоненты стока энергии – тепловое излучение, энергия, расходуемая на испарение и распыление, энергия отраженных частиц, энергия, отводимая системой охлаждения магнетрона.

Актуальность работы обусловлена необходимостью нахождения зависимости энергетической эффективности распыления от варьирования режимов работы МРС для ее последующего усовершенствования.

В работе [2] для анализа энергетической эффективности этого типа устройств был предложен интегральный коэффициент энергетической эффективности $K_w = \frac{\Delta m}{tW}$, где Δm — полная масса распыленного материала катода, t — время распыления (мин), W — средняя интегральная мощность магнетронного разряда (Ватт).

Такой выбор размерности удобен при экспериментальном измерении данного параметра. Эксперименты проводились на вакуумной напылительной установке с безмасляной системой откачки. Все результаты получены на планарных магнетронах с дисковым катодом, магнитной системой на постоянных магнитах и в режиме постоянного тока.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента энергетической эффективности распыления Kw в планарном магнетронном распылительном устройстве на постоянном токе от условий напыления представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние различных факторов на параметр Kw .

Факторы	Влияние на параметр Kw
Эрозия мишени	До 40%
Давление рабочего газа	До 17%
Толщина катода	До 10%
Мощность разряда	Практически не зависит

В данной статье предложен альтернативный способ определения влияния условий напыления на его энергоэффективность, а именно мощности разряда.

Из уравнения баланса, через параметры, которые относительно просто контролировать, была выражена мощность потока распыленных с мишени атомов на подложку $Q_{расподл}$, характеризующая количество энергии, затрачивающиеся непосредственно на напыление. Автором был введен параметр $\varepsilon = \frac{Q_{расподл}}{P_d}$ как показатель энергетической эффективности процесса напыления.

Был проведен ряд опытов, при которых изменялась мощность разряда и материал мишени, остальные параметры оставались неизменными. Опыты проводились при значениях мощности разряда P_d равных 480 и 580 Ватт ,

В ходе экспериментов посредством термопары было установлено, как изменяется температура подложки во времени, с помощью разработанного устройства параллельно осуществлялся контроль разности температур входящего и выходящего потока воды. По описанным зависимостям [3] были найдены тепловой поток на подложку $Q_{подл}$, тепловой поток $Q_{охл}$, отводимый системой охлаждения МРС. Мощность теплового потока на подложку можно найти по следующей зависимости[1]:

$$Q_{подл} = mc_p A \quad (1)$$

где m , c_p – масса и удельная теплоемкость чувствительного элемента термопары соответственно.

A находится из зависимости [1]:

$$\frac{T(t)}{dt} \approx A - CT \quad (2)$$

Определение мощности теплового потока $Q_{охл}$: [1]

$$Q_{охл} = Gc_p(t)\Delta t, \quad (3)$$

где Δt – разница температур между входящим и выходящими потоками, °С ;
 c_p – удельная теплоемкость воды, зависящая от температуры, $\frac{кДж}{кг \times ^\circ C}$;

G – расход воды, кг.

Зависимость удельной теплоемкости воды от температуры представлена в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость c_p от температуры.

Температура, °С	$c_p, \frac{кДж}{кг \times ^\circ C}$
10	4,191
20	4,183
30	4,174

Далее, зная материал мишени и то, что рабочий газ – аргон, рассчитывается мощность, уносимая распыленными частицами $Q_{рас}$ и мощность, уносимая отраженными частицами $Q_{отр.ионов}$.

Затем составляется уравнение баланса на мишени [4]:

$$P_i = Q_{охл} + Q_{рас} + Q_{излуч} \quad (4)$$

где P_i – мощность ионного тока, кДж;

$Q_{излуч}$ – мощность теплового излучения с поверхности мишени, кДж.

$$Q_{излуч} = Q_{охл} + Q_{рас} - P_i \quad (5)$$

$$Q_{излуч} = \varepsilon_{п} c_0 \left[\left(\frac{T_{миш}}{100} \right)^4 \right] \times F_1 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{п} = \frac{1}{1/\varepsilon_{миш} + 1/\varepsilon_{подл} - 1} \quad (7)$$

$$c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}^4} \quad (8)$$

где $\varepsilon_{миш}$ и $\varepsilon_{подл}$ – степень черноты мишени;

$\varepsilon_{подл}$ – степень черноты подложки.

Найдем мощность излучения на подложку [6]:

$$\begin{aligned} Q_{излподл} &= \varepsilon_{п} c_0 \left[\left(\frac{T_{миш}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{подл}}{100} \right)^4 \right] \times \frac{F_1 \times F_2}{\pi \times R^2} = \\ &= \varepsilon_{п} c_0 \left[\frac{Q_{излуч}}{F_1 \varepsilon_{п} c_0} - \left(\frac{T_{подл}}{100} \right)^4 \right] \times \frac{F_1 \times F_2}{\pi \times R^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Составим уравнение теплового баланса на подложке:

$$Q_{расподл} + Q_{излподл} = Q_{подл} \quad (10)$$

Из (9) и (10) найдем мощность теплового потока распыленных атомов на подложку:

$$Q_{расподл} = Q_{подл} - \varepsilon_{п} c_0 \left[\frac{(Q_{охл} + Q_{рас} + Q_{отр.ионов} - P_i)}{F_1 \varepsilon_{п} c_0} - \left(\frac{T_{подл}}{100} \right)^4 \right] \times \frac{F_1 \times F_2}{\pi \times R^2} \quad (11)$$

Для проведения необходимых вычислений пришлось принять некоторые допущения:

- 1) коэффициент излучения и инерционность нагрева чувствительного элемента термпары равны нулю;
- 2) мощность потока тепла, поступающего на мишень за счет светового излучения плазмы равна нулю;
- 3) мощность тепловыделения от прохождения электрических токов через вещество мишени (ток электрической цепи и ток, возникающий в результате эффекта Холла) равна нулю;
- 4) мощность, передаваемая нейтральными частицами из плазмы равна нулю;
- 5) излучение от стенок вакуумной камеры равно нулю;
- 6) мощность, уносимая отраженными ионами для «легких» мишеней незначительна и ее можно принята равной нулю.

Мощность ионного тока на поверхности мишени рассчитывается по формуле [4]:

$$P_i \approx 0,6 U_d \times 0,95 I_d = 0,57 P_d \quad (12)$$

где P_d – мощность разряда, кДж;

P_i – мощность ионного тока, кДж.

В таблице 3 указаны значения мощности разрядов, устанавливаемых при опытах и соответствующих им ионных токов.

Таблица 3. Мощность разрядов.

P_d	P_i
480 Ватт	273,6 Ватт
580 Ватт	330,6 Ватт

Эксперименты были выполнены в вакуумной камере объемом 0,01 м³, оснащенной плоским магнетроном диаметром 75 мм, работающим на постоянном токе. При проведении

опытов использовалась мишень из меди. Мишень была закреплена на водоохлаждаемой пластине по схеме, изображенной на рис. 1.

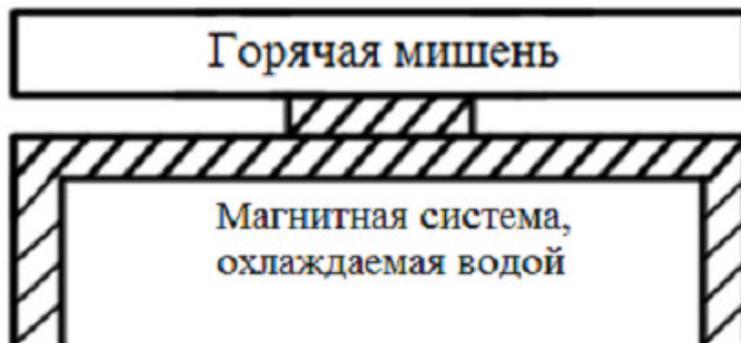


Рис. 1. Схема закрепления мишени.

Распыление проводилось в среде аргона при давлении $p = 2,4 \times 10^{-2}$ Торр. Источник электропитания для магнетронного распыления: АРЕL–М-ВР. Были проведены опыты с различными плотностями мощности разряда P_d . Мощность разряда P_d регулировалась на блоке питания магнетрона.

Для охлаждения магнетрона использовался чиллер GursuGrs 150 с расходом равным $G = 432 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 0.12(5) \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Весь процесс был разделен на несколько этапов:

- 1) закрепление пластины с термопарой на расстоянии $L=70$ мм от магнетрона;
- 2) откачка вакуумной системы до давления $p = 2.4 \times 10^{-2}$ Торр;
- 3) задание требуемой мощности на блоке питания (480, 580 Ватт) и времени работы магнетрона $\tau = 7$ мин;
- 4) контроль температуры подложки во время работы магнетрона посредством термопары;
- 5) контроль разности температур поступающего и выходящего потока воды во время работы магнетрона посредством разработанного устройства.

Для мощности разряда в 480 и 580 Ватт в течение работы магнетрона была измерена разница температуры между патрубками системы охлаждения магнетрона, которая изображена на рис. 2. На рис. 3 показано изменение температуры подложки от времени.



Рис. 2. Зависимость разности температур между патрубками от времени.

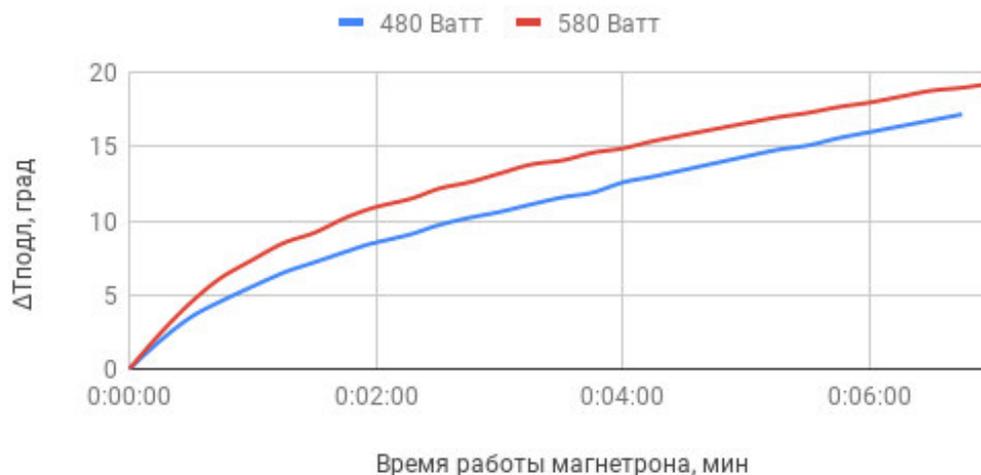


Рис. 3. Зависимость $\Delta T_{подл}$ от времени.

Таблица 4. Сводная таблица результатов.

	$P_d=480$ Ватт	$P_d=580$ Ватт
P_i	273,6 Ватт	330,6 Ватт
$Q_{излуч}$	138 Ватт	164,22 Ватт
$Q_{охл}$	115 Ватт	141,7 Ватт
$Q_{рас}$	19,68 Ватт	23,78 Ватт
$Q_{подл}$	8,11 Ватт	10 Ватт
$Q_{излподл}$	0,313 Ватт	0,373 Ватт
$Q_{расподл}$	7,8 Ватт	9,627 Ватт
ε	0,01625	0,01659

1) была определена мощность потока тепла отводимого системой охлаждения магнетрона $Q_{охл}$, во время его работы. $P_d=480$ Ватт $Q_{охл} = 115$ Ватт, что составляет 0,239 P_d , при $P_d=580$ Ватт $Q_{охл} = 141,7$ Ватт, что составляет 0,244 P_d ;

2) было составлено уравнение теплового баланса системы и из него выражена мощность излучения со всей поверхности мишени $Q_{излуч}$ $P_d=480$ Ватт $Q_{излуч} = 138$ Ватт, что составляет 0,2875 P_d , при $P_d=580$ Ватт $Q_{излуч} = 164,22$ Ватт что составляет 0,2831 P_d . Была определена мощность излучения с мишени на подложку $Q_{излподл}$, $P_d=480$ Ватт $Q_{излподл} = 0,313$ Ватт, при $P_d=580$ Ватт $Q_{излподл} = 0,373$ Ватт;

3) поток тепла излучаемого с поверхности мишени на подложку $Q_{излподл}$ незначителен, ввиду малых размеров мишени и подложки;

4) зависимость мощности потока тепла излучаемого с поверхности мишени на подложку $Q_{излподл}$ от изменения температуры на ней пренебрежительно мало;

5) было составлено уравнение теплового баланса на подложке и из него определена мощность теплового потока расплывённых атомов;

6) определена зависимость между мощностью теплового потока расплывённых атомов $Q_{расподл}$ и устанавливаемой мощностью разряда магнетрона P_d во время работы магнетрона:

$$\varepsilon = \frac{Q_{расподл}}{P_d} = \frac{7,8 \text{ Ватт}}{480 \text{ Ватт}} = 0,01625$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{расподл}}{P_d} = \frac{9,627 \text{ Ватт}}{580 \text{ Ватт}} = 0,01659$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что мощность теплового потока распылённых атомов при распылении мишени практически не зависит от мощности разряда, что согласуется с исследованием [2].

Литература

1. Кузьмичёв, А.И. Магнетронные распылительные системы [Текст]/ А.И. Кузьмичёв – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.
2. А.В. Рогов, Ю.В. Капустин, Ю.В. Мартыненко, «Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации», 2014
3. Минжулина Е.А. Изучение процесса нагревания мишени магнетрона по результатам измерения температуры подложки [Текст] / В.В. Смирнов, А.А. Козин, В.И. Шаповалов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. - №2. – С. 543-546.
4. Юрьева А.В. Баланс энергии на катодном узле магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью [Текст] / А.В. Юрьева, Г.А. Блейхер, О.М. Степанова, Ю.Н. Юрьев // Известия ВУЗов. Физика. – 2014. – №3 – С. 276-280.
5. Юрьева А.В. Осаждение металлических покрытий с помощью магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью: дис. ... канд. техн. наук. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 2017.
6. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст]/ М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.

Состояние работ по созданию МЭМС вакуумметров

*Р.Э. Кувандыков, Р. А.Тетерук, А.А. Чернышенко
Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Московский пр., д. 19,
E-mail: vacuum@vniim.ru*

В статье описывается текущее состояние работ по созданию во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» вакуумметров по технологии МЭМС.

Current state of researches in MEMS vacuum gauges creation. R.E. Kuvandykov, R.A.Teteruk, A.A. Chernyshenko. The article describes the current state of researches in creating of MEMS vacuum gauges in D.I. Mendeleev Institute for Metrology.

В настоящее время в области измерений абсолютных давлений существует ряд проблем, связанных, в первую очередь, с отсутствием на рынке высокоточных отечественных средств измерений (СИ) низких абсолютных давлений. Можно обозначить следующие основные проблемы:

- отсутствие серийно выпускаемых отечественных высокоточных СИ, соответствующих эталонам 1 и 2 разрядов согласно ГОСТ 8.107-81 [1] и ГОСТ Р 8.840-2013 [2];
- отсутствие отечественных эталонов сравнения для проведения сличений между государственными первичными эталонами давлений РФ, проведения межлабораторных сравнительных испытаний, а также проведения международных сличений;
- санкционные ограничения, введенные западными странами, не позволяют осуществлять закупку целого ряда высокоточных СИ иностранного производства.

Для решения указанных проблем ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» было предложено разработать отечественные вакуумметры в рамках концепции «Эталон на столе». Эта концепция предполагает реализацию различных новых и существующих принципов измерений давлений, в том числе абсолютных принципов, в компактном и удобном для