

## Исследование зависимости плотности пиковой мощности на магнетроне от параметров процесса импульсного магнетронного распыления

М.Ю. Акишин, Е.И. Малеванная, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев  
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5  
e-mail: akishinm1996@gmail.com

*В работе представлены эксперименты по влиянию коэффициента заполнения импульсного сигнала и его частоты на пиковую мощность при импульсном магнетронном распылении вольфрама, проведен полный факторный эксперимент с центральным ротатабельным планом, получена и проанализирована математическая модель.*

*Research of the influence of pulsed magnetron sputtering process parameters on magnetron peak power density. M.Y. Akishin, E.I. Malevannaya, D.D. Vasilev, K.M. Moiseev. Experiments on the duty ratio influence of a pulse signal and its frequency on the peak power at pulsed magnetron sputtering of tungsten are described, a full factorial experiment with a central rotational plan is carried out, a mathematical model is obtained and analyzed.*

### Введение

В плазме тлеющего разряда на поверхности катода магнетрона происходит ионизация как рабочего газа аргона, так и распыляемого материала. Вследствие чего напряжение смещения на подложке влияет на энергию осаждаемого материала и позволяет проводить ассистирование растущей пленки ионами аргона из плазмы, что влияет на характеристики получаемого покрытия [1, 2].

При одном и том же напряжении смещения интенсивность взаимодействия ионизированных частиц с подложкой зависит от их концентрации в плазме. Определение этой концентрации является весьма трудоемкой задачей, включающей в себя использование зонда Ленгмюра и снятие вольт-амперной характеристики для каждой точки, в которой проводится измерение. Однако в случае импульсного магнетронного распыления существует корреляция между степенью ионизации плазмы и пиковой мощностью, отнесенной к его площади (плотность пиковой мощности,  $S_A$ ) [3]. Таким образом, зная напряжение и пиковый ток на магнетроне, можно оценить степень ионизации плазмы. Управлять этими параметрами можно путем варьирования коэффициента заполнения импульсного сигнала и его частоты. Поэтому целью данной работы является определение зависимости пиковой мощности от частоты и коэффициента заполнения импульса.

### Эксперимент

Установка ВУП-11М [4] кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана оснащена блоком питания, который позволяет создавать импульсный сигнал с частотой от 1 кГц до 100 кГц и коэффициентом заполнения от 10% до 80%. Исходя предположения, что зависимость имеет нелинейный характер, в качестве метода исследования был выбран полный факторный эксперимент с центральным композиционным ротатабельным планом. Логично предположить, что при независимом уменьшении коэффициента заполнения и увеличении частоты сигнала, плотность пиковой мощности будет расти вследствие увеличения пикового тока. Следовательно, можно сделать вывод об отсутствии локальных экстремумов внутри области варьирования параметров блока питания и для эксперимента брать максимально возможную область. Помимо пределов возможностей используемого блока, область варьирования ограничивается нестабильной работой магнетрона при минимальной коэффициенте заполнения и максимальной частоте. Принимая во внимания вышеописанные суждения, в эксперименте коэффициент заполнения будем варьировать от 17% до 79%, а частоту сигнала – от 8 кГц до 80 кГц. Расположение экспериментальных точек представлено на рис. 1.

Эксперименты проводятся при остаточном давлении  $P_{ост} = 5,5 \cdot 10^{-5}$  мбар, рабочем давлении  $P_{раб} = 3 \cdot 10^{-3}$  мбар, потоке аргона в камеру  $Q_{Ar} = 1,56$  л/час и фиксированной мощности  $W = 120$  Вт на магнетроне диаметром 50 мм. Для регистрирования сигнала тока используется измерительный трансформатор тока Talema AC1005, схема подключения которого представлена на рис. 2. Трансформатор дает на выход ток, пропорциональный протекающему току на магнетроне. Сопротивление нагрузки  $R_n$  позволяет снимать напряжение, пропорциональное току, с помощью осциллографа Rigol DS1054Z. Одновременно снимается напряжение с магнетрона для сравнение со значением тока.

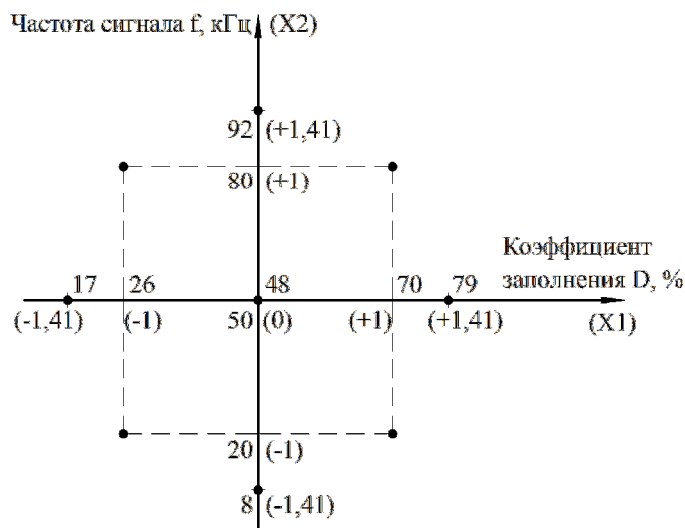


Рис. 1. Расположение экспериментальных точек.

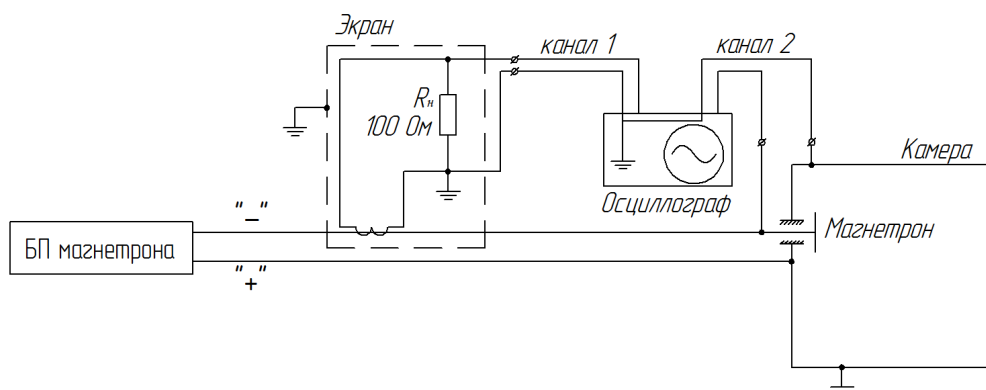


Рис. 2. Схема подключения измерительных приборов.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем:

- 1 Магнетрон запускается при значениях коэффициента заполнения и частоты сигнала по плану эксперимента.
- 2 Осциллограф снимает напряжение с резистора  $R_n$  и с магнетрона.
- 3 С осциллограммы снимается амплитуда напряжения.
- 4 Полученное значение напряжение пересчитывается в значение тока.

В каждой точке на периферии проводится 3 наблюдения, в центральной точке плана – 15 наблюдений. Для чистоты эксперимента предварительно проведена рандомизация последовательности проведения измерений.

### Результаты измерений

Результаты эксперимента представлены в таблице 1. Видео, что наибольшее значение плотности пиковой мощности наблюдается при значениях  $D = 17\%$ ,  $f = 50$  кГц и равняется  $85,44$  Вт/см<sup>2</sup>

Таблица 1. Результаты измерений.

Коэффициент заполнения D, %	Частота тока f, кГц	Плотность пиковой мощности S <sub>A</sub> , Вт/см <sup>2</sup> (среднее значение)
17	50	85,44
26	20	41,41
26	80	55,65
48	8	14,01
48	50	21,72
48	92	25,69
70	20	10,73
70	80	13,91
79	50	10,84

На рис. 3 представлены формы сигналов напряжения на магнетроне и на трансформаторе тока при минимальной и максимальной плотности пиковой мощности. Видно, что при большем коэффициенте заполнения и меньшей частоте ток устанавливается на определенной отметке, в то время как при меньшем коэффициенте заполнения и большей частоте ток не успевает вырасти до необходимого значения, поэтому сигнал имеет треугольную форму.

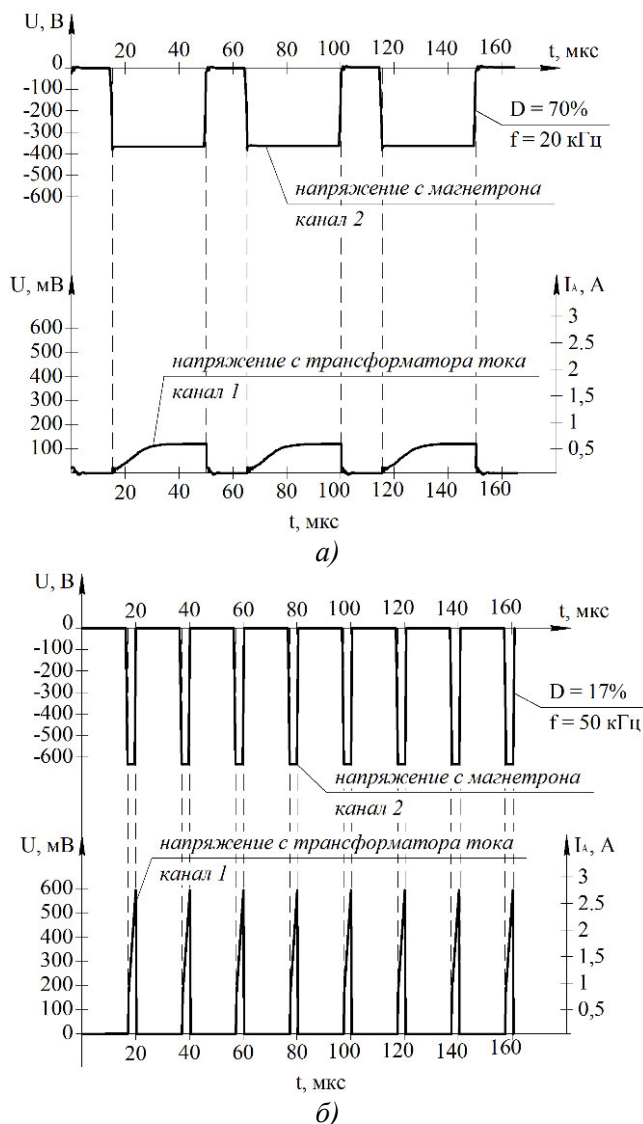


Рис. 3. Вид сигналов тока и напряжения при: а – минимальной пиковой мощности; б – максимальной пиковой мощности.

Проверка полученных результатов на воспроизводимость и адекватность по критериям Кохрена и Стьюдента дает положительный результат, а их обработка позволяет получить зависимость (1):

$$S_A = 106,693 - 3,246 \cdot D + 0,526 \cdot f - 0,004 \cdot D \cdot f + 0,025 \cdot D^2 - 0,002 \cdot f^2, \quad (1)$$

где  $S_A$  – плотность пиковой мощности, Вт/см<sup>2</sup>  
 $D$  – коэффициент заполнения импульсного сигнала, %  
 $f$  – частота импульсного сигнала, кГц

Полученная математическая модель адекватно описывает изменение плотности пиковой мощности и подтверждает предположение о том, данный параметр растет с увеличением частоты сигнала и уменьшением его коэффициента заполнения. Сравнения коэффициентов уравнения (1) по критерию Стьюдента показало, что наиболее значимым фактором является коэффициент заполнения импульсного сигнала. Наименьшее влияние на плотность пиковой мощности оказывает взаимодействие варьируемых факторов.

### **Выводы**

- 1 Для исследуемой пары «блок питания-магнетрон» максимальная плотность пиковой мощности равна 85,44 Вт/см<sup>2</sup>.
- 2 Плотность пиковой мощности растет с уменьшением коэффициента заполнения импульсного сигнала и увеличением его частоты.
- 3 Коэффициент заполнения импульсного сигнала в диапазоне от 17% до 92% оказывает в 6 раз большее влияние на плотность пиковой мощности, чем частота импульсного сигнала в диапазоне от 8 кГц до 92 кГц.

### **Заключение**

В дальнейшем для перехода к степени ионизации плазмы планируется снимать вольт-амперную характеристику плазмы с помощью зонда Ленгмюра. Данный способ позволит определить концентрацию заряженных частиц в плазме и сопоставить ее с плотностью пиковой мощности.

### **Литература**

- 1 Гусева М.Б. Ионная стимуляция в процессе образования тонких плёнок на поверхности твёрдого тела // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – No10. – С. 106-112.
- 2 Manova D., Gerlach J.W., Mändl S. Thin film deposition using energetic ions // Materials. – 2010. – № 3. – P. 4109-4141.
- 3 Study of the plasma parameters in a high-current pulsed magnetron sputtering system / A.N. Odivanova, V.G. Podkovyrov, N.S. Sochugov, K.V. Oskomov. – Plasma Physics Reports. – 2011. – Vol. 37, № 3. – P. 239-243.
- 4 Моисеев К.М. Многопозиционные вакуумные технологические установки // Наноинженерия. – 2014. – № 8. – С. 18-21.