

PACS: 85.40.Sz, 52.77.Dq

Ю.М. Николаенко, А.С. Корнеевец, А.Б. Мухин, И.В. Жихарев

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МАГНЕТРОННОЙ ПРИСТАВКИ ВУП-5М НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 3 июня 2019 года

*Экспериментально изучены физические процессы и технические характеристики магнетронной приставки ВУП-5М при питании ее от штатного (импульсного) и дополнительного регулируемого источника питания постоянным током. Рассмотрены особенности периодически повторяемых процессов включения и выключения магнетронного разряда при распылении керамической мишени в импульсном режиме и технические решения, обеспечивающие работу устройства. Приведены данные по S-образной вольт-амперной характеристике (ВАХ) магнетрона и распределение температуры газовой среды в рабочем пространстве.*

**Ключевые слова:** магнетронная приставка ВУП-5М, вольт-амперная характеристика, термомпара, магнетронный разряд, тонкие пленки

Установка ВУП-5М благодаря недорогой, но удачной с точки зрения технических характеристик конструкции широко представлена в лабораториях многих высших учебных заведений и научных институтов стран европейского и азиатского пространства (стран СНГ) и используется, в частности, для изготовления покрытий и пленочных структур на основе перспективных оксидных материалов. Изначально ВУП-5М была предназначена для изготовления пленочных покрытий. Усовершенствование конструкции магнетронной приставки [1–4] позволило нам выполнить условия для получения высококачественных эпитаксиальных пленок на основе многокомпонентных оксидных материалов. В то же время конструкция магнетронной приставки содержит ряд компромиссных технических решений, которые выполняют свою функцию, но для понимания физики реализуемых процессов требуется изучение подробностей. В частности, режим работы на постоянном токе в ВУП-5М является на самом деле импульсным.

В отношении питания магнетрона задача заключается, во-первых, в обеспечении «мягкого» включения магнетронного разряда без образования лавинного пробоя в рабочем пространстве и, во-вторых, в поддержании стабильного разряда в течение длительного времени, необходимого для выращивания пленки. Мы изготовили регулируемый блок питания постоянным током и выяснили, что указанные выше условия хорошо выполняются при

включении в цепь питания мощного резистора сопротивлением  $\sim 4 \text{ k}\Omega$ . Примерно таким сопротивлением на постоянном токе характеризуется магнетрон в рабочем состоянии.

В штатном блоке питания используется другое техническое решение. Выпрямитель блока питания выполнен по двухполупериодной схеме без сглаживания. Магнетрон подключен к выпрямителю через резистор номиналом  $600 \Omega$ , а регулирующим элементом является оптически управляемый тиристор, который открывается на относительно короткое время с частотой  $100 \text{ Hz}$ .

На рис. 1 показана последовательность импульсов тока в рабочем состоянии магнетрона при питании от штатного источника. Наличие отдельных импульсов тока означает, что с такой же частотой появляется и исчезает магнетронный разряд. Возникает вопрос, каким образом достигается «мягкий» режим включения разряда в таких условиях?

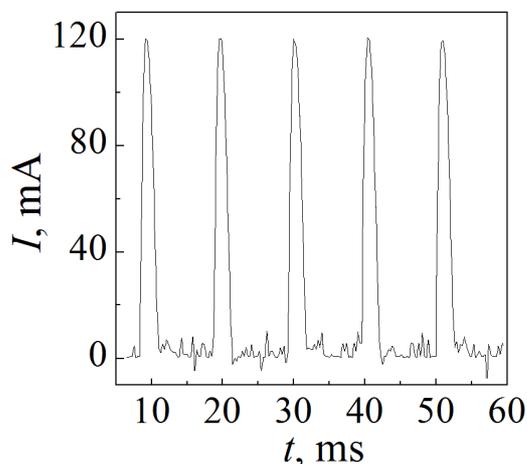


Рис. 1. Периодические импульсы тока в магнетроне

Временные зависимости напряжения, измеренные с помощью электрического зонда в режиме максимально короткого и более длительного питающего импульса, приведены на рис. 2. Значения напряжения в импульсах отрицательные, поскольку в конструкции магнетрона анод электрически соединен с корпусом установки, а потенциал контролируется с помощью электрического зонда, размещенного на расстоянии  $0.5 \text{ cm}$  от мишени. Временная зависимость изменения напряжения на катоде, представленная на рис. 2, в, по виду несколько отличается от зависимости на рис. 2, б, в частности большим изменением амплитуды напряжения. Общей для всех зависимостей, приведенных на рис. 2,

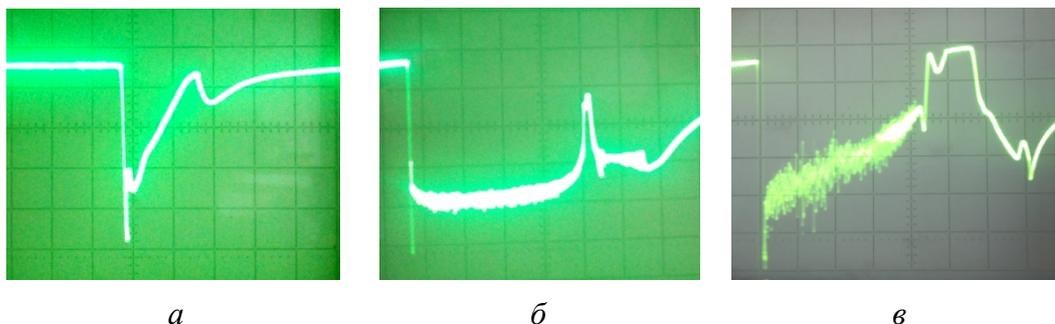


Рис. 2. Эпюры временного изменения потенциала в рабочем пространстве магнетрона при минимально коротком (а) и относительно длинном (б) импульсах питающего напряжения; в – временные изменения потенциала на катоде магнетрона

является особенностью начального фронта импульса, заключающаяся в наличии короткого выброса напряжения на аноде с амплитудой  $> 400$  V. Она отражает процесс образования магнетронного разряда, в котором проявляется нелинейная ВАХ магнетрона, обусловленная как механизмом самого газового разряда, так и тепловыми эффектами в мишени [5,6].

На рис. 3 показана ВАХ магнетрона, измеренная в режиме его питания постоянным током с помощью АЦП с относительно невысоким быстродействием (около 60 ms на регистрацию точки). Как видно, для реализации магнетронного разряда в газовой среде аргон–кислород при заданном давлении  $\sim 10\text{--}20$  мТорр необходима разность потенциалов между анодом и катодом  $\sim 300$  V. Возникновение газового разряда, который также можно контролировать по характерному свечению плазмы, вызывает резкое понижение сопротивления магнетрона. В результате наблюдается S-образная ВАХ с отрицательным участком  $dI/dU$ . Далее, после переходного процесса, наблюдается монотонный участок постепенного увеличения тока в зависимости от приложенного напряжения, на котором выбирается рабочая точка.

Обратная ветвь ВАХ при снижении напряжения питания не совпадает с прямой ветвью. Факт наличия гистерезиса между прямой и обратной ветвями ВАХ является известным результатом. Он наблюдается также при вариации не только питающего напряжения, но и, например, давления газовой среды [5]. Это можно объяснить изменением условий после включения газового разряда. В процессе работы магнетрона в его рабочем пространстве происходит нагрев мишени и газовой среды. Для предотвращения чрезмерного нагрева мишени в магнетронной приставке предусмотрено принудительное водяное охлаждение. Тем не менее ее поверхность нагревается до температур выше  $100^\circ\text{C}$ . В результате на обратной ветви ВАХ газовый разряд исчезает при более низком значении напряжения, чем значение, при котором он возникает.

На рис. 4 приведены значения температуры термопары (железо–константан), размещенной в плазме магнетронного разряда, в зависимости от расстояния от мишени вдоль ее цилиндрической оси при нескольких значениях тока. Как видно, максимальная температура достигается в окрестности мишени и плавно понижается при удалении от нее. В зависимости от тока магнетрона температура повышается практически пропорционально величине

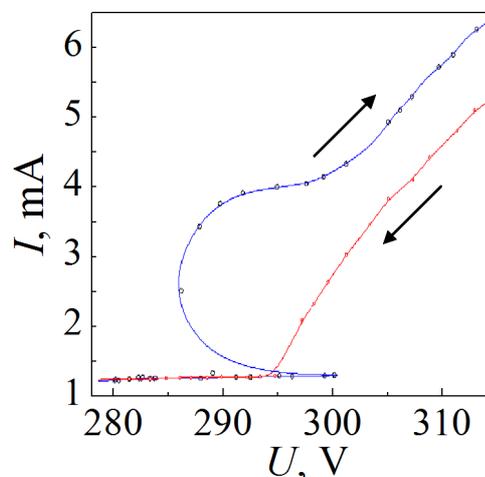
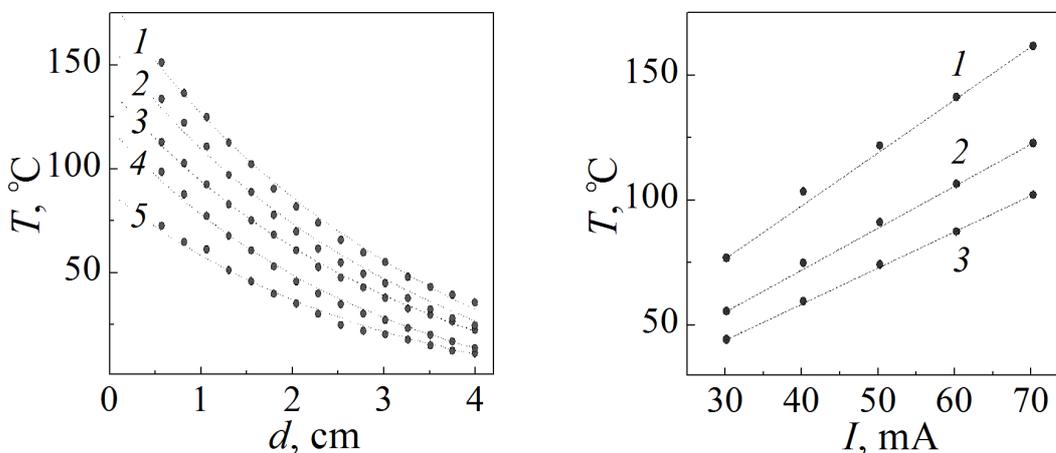


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика магнетрона в режиме включения и выключения газового разряда

тока (рис. 5). Показания термопары отражают в основном температуру газовой среды, а также нагрев сплавного контакта за счет рассеяния на нем относительно крупных заряженных и нейтральных частиц мишени, имеющих направленное движение.



**Рис. 4.** Распределение температуры термопары  $T$ , расположенной в рабочем пространстве магнетрона вдоль цилиндрической оси мишени, в зависимости от расстояния от мишени  $d$  при нескольких значениях тока  $I$ , mA: 1 – 30, 2 – 40, 3 – 50, 4 – 60, 5 – 70

**Рис. 5.** Зависимость температуры термопары  $T$  от тока магнетрона  $I$  для трех расстояний от мишени  $d$ , cm: 1 – 0.25, 2 – 1, 3 – 1.5

Возвращаясь к зависимостям, приведенным на рис. 2, отметим, что использование импульсного режима управления является неоптимальным. Во-первых, это связано с периодическим повторением переходного процесса через каждые 10 ms, а во-вторых – с изменением питающего напряжения в пределах импульса (рис. 2,в). Отсутствие лавинного пробоя в момент образования газового разряда отчасти обеспечивается наличием балластного резистора. Кроме того, после открытия тиристора и появления тока часть напряжения падает на сопротивлении выпрямительных диодов и обмотки трансформатора. То есть выходное сопротивление блока питания превышает 600  $\Omega$ . Это в некоторой степени стабилизирует процесс работы магнетрона при питании его напряжением, изменяющимся в пределах каждого импульса, но не способствует стабильной работе устройства.

Поскольку физические процессы в плазме и динамика частиц в рабочем пространстве характеризуются значительно меньшими временами, чем длительность питающих импульсов, распыление мишени фактически следует считать периодическим повторением работы магнетрона на постоянном токе. Отличие заключается в присутствии переходных процессов при возникновении и исчезновении газового разряда.

1. Ю.М. Николаенко, А.Б. Мухин, В.А. Чайка, В.В. Бурховецкий, ЖТФ **80**, № 8, 115 (2010).
2. Патент Украины на полезную модель № 49697, Вакуумная установка для магнетронного распыления мишеней, Ю.М. Николаенко, А.Б. Мухин, Опубл. 11.05.2010 г., Бюл. № 9.
3. Yu.M. Nikolaenko, A.N. Artemov, Yu.V. Medvedev, N.B. Efros, I.V. Zhikharev, I.Yu. Reshidova, A.A. Tikhii, S.V. Kara-Murza, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 375302 (2016).
4. Ю.М. Николаенко, А.С. Корнеевец, Н.Б. Эфрос, В.В. Бурховецкий, И.Ю. Решидова, Письма в ЖТФ **45**, вып. 13, 44 (2019).
5. Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман, Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением, Техносфера, Москва (2014).
6. П.В. Каштанов, Б.М. Смирнов, Р. Хипплер, УФН **177**, 473 (2007).

*Yu.M. Nikolaenko, A.S. Korneevets, A.B. Mulin, I.V. Zhikharev*

## FEATURES OF THE OPERATION OF THE VUP-5M MAGNETRON IN DC REGIME

The physical processes and technical characteristics of the VUP-5M magnetron have been investigated experimentally for pulse and steady DC power supply. Consideration includes the features of periodically repeating processes of switching on and off of a magnetron plasma discharge for sputtering of a ceramic target in a pulsed mode and technical solutions ensuring the operation of the device. The data on the S-shaped current-voltage characteristic (CVC) of the magnetron and the distribution of temperature of the gaseous medium in the working space are given.

**Keywords:** magnetron device VUP-5M, current-voltage characteristic, thermocouple, magnetron discharge, thin films

**Fig. 1.** Periodic current pulses in the magnetron

**Fig. 2.** Plots of time dependences of the potential in the working space of the magnetron at minimally short (*a*) and relatively long (*b*) supply voltage pulse; *b* – time dependences of the potential at the cathode of the magnetron

**Fig. 3.** Current-voltage characteristic of the magnetron in the on and off mode of the gas discharge

**Fig. 4.** Temperature distribution of the thermocouple located in the working space of the magnetron along the cylindrical axis of the target depending on the distance from the target *d* at several current values *I*, mA 1 – 30, 2 – 40, 3 – 50, 4 – 60, 5 – 70

**Fig. 5.** Dependence of the thermocouple temperature *T* on the magnetron current for three distances from the target *d*, cm: 1 – 0.25, 2 – 1, 3 – 1.5