

УДК 62-529

Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 11.03.2018

Принята к печати 12.04.2018

Пленочные покрытия сегодня позволяют создать большое количество разнообразных структур в электронике, микроэлектронике, оптике, архитектуре и строительстве. Лидирующими технологиями в этой области являются магнетронные технологии осаждения. Проблемой магнетронных методов осаждения является недостаточная воспроизводимость состава и свойств покрытий, обусловленная неустойчивостью параметров магнетронного разряда при наличии реактивного газа. Существуют системы стабилизации, которые позволяют получать воспроизводимые пленки, однако все они имеют ряд недостатков. Целью работы являлась разработка системы стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления для технологий нанесения пленочных покрытий, которая устранила бы описанные недостатки существующих систем.

Разработанная система стабилизации является модульной и состоит из датчиков, исполнительных устройств, микрокомпьютера с управляющим программным обеспечением, а также устройств, обеспечивающих взаимодействие датчиков и исполнительных устройств с микрокомпьютером. Датчиками системы могут выступать вакуумметры или датчики давления, датчики разрядного тока и напряжения распылителей, оптические датчики регистрации интенсивности спектральных элементов излучения плазмы магнетронного разряда. Исполнительными устройствами системы являются нагнетатели газов, а также клапана. Количество и тип датчиков и исполнительных устройств определяются исходя из конфигурации технологической установки и требований к проводимым процессам. Управляющее программное обеспечение позволяет гибко настраивать систему (формировать контуры управления, т.е. задавать в соответствии датчики и исполнительные устройства и выбирать алгоритм управления, задавать параметры и режимы работы контуров управления). Таким образом разработанная система является адаптируемой к широкому кругу технологических установок и проводимых процессов.

Работоспособность системы была подтверждена при проведении процесса магнетронного осаждения пленки оксида титана. Отклонение уровня сигналов датчиков от требуемых значений при проведении процесса не превышало 3 %, что позволяет получать качественные покрытия.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, система, управление.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

Адрес для переписки:

Столяров А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Address for correspondence:

Stoliarov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Для цитирования:

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.
Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 114–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

For citation:

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.
[System of stabilization of reactive magnetron sputtering process].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 114–120 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

System of stabilization of reactive magnetron sputtering process

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.

*Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus*

Received 11.03.2018

Accepted for publication 12.04.2018

Abstract

Film coatings today allow to create large number of diverse structures in electronics, microelectronics, optics, architecture and construction. Leading technologies in this area are magnetron deposition technologies. The problem of magnetron deposition methods is insufficient reproducibility of the composition and properties of coatings, caused by the instability of the parameters of a magnetron discharge in the presence of a reactive gas. There are stabilization systems that make it possible to make reproducible films, but all of them have a number of issues. The aim of the work was to develop a system for stabilizing the reactive magnetron sputtering process for film coating technologies that will eliminate the described shortcomings of existing systems.

The developed system of stabilization: automatic and cumulative of sensors, actuators, microcomputer with control software, as well as devices providing interaction of sensors and actuators with a microcomputer. The sensors of the system may be vacuum gauges or pressure sensors, discharge current and voltage sensors of sprays, optical sensors for recording spectral element processes, absorption of a plasma of a magnetron discharge. The actuators of the system are gas flowers, as well as valves. Number and type of sensors and actuators from existing technologies and requirements for ongoing processes. The control software allows to flexibly adjust the system (to form control loops, then to assign sensors and actuators in accordance and to choose control algorithms, to set parameters and operating modes of control loops). Thus, the developed system is adaptable to a wide range of process plants and processes.

System operability was confirmed by the process of magnetron deposition of a titanium oxide film. The deviation of the level of the sensor signals from the required values during the process did not exceed 3 %, which allows obtaining high-quality coatings.

Keywords: reactive magnetron sputtering, system, control.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

Адрес для переписки:

Столяров А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Address for correspondence:

Stoliarov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Для цитирования:

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.
Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 114–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

For citation:

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.
[System of stabilization of reactive magnetron sputtering process].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 114–120 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

Введение

Магнетронные технологии в настоящее время занимают лидирующее положение среди технологий нанесения пленочных покрытий в электронике и микроэлектронике (металлизация, контактные структуры, ЖК-индикаторы, диэлектрические и защитные покрытия), оптике (интерференционные фильтры и зеркала, просветление, антибликовые и защитные покрытия), архитектуре и строительстве (декоративные и теплосберегающие покрытия), машиностроении (упрочняющие, защитные и трибологические покрытия) и др. Наиболее распространенные материалы покрытий: пленки металлов и полупроводников, а также пленки таких химических соединений как оксиды, нитриды, карбиды и карбонитриды, получаемые при использовании смеси инертного и реакционно-способного газа.

В процессах нанесения пленок химических соединений основной проблемой магнетронных технологий является недостаточная воспроизводимость состава покрытий, обусловленная неустойчивостью параметров магнетронного разряда при наличии реактивного газа [1–3]. Для стабилизации процесса нанесения необходимо обеспечить обратную связь между параметрами магнетронного разряда и расходом инертного и реактивного газов [4] путем автоматического управления расходом газов в реальном времени, используя характеристики разряда. Такое управление может базироваться на излучении разряда, регистрируемом методом оптической эмиссионной спектроскопии (оптическое управление), химическом составе плазмы разряда, регистрируемом методом масс-спектроскопии, или на электрических (ток, напряжение, мощность) параметрах разряда, регистрируемых традиционными измерительными устройствами. По ряду причин масс-спектроскопия не получила широкого распространения. Наиболее простым в реализации является управление по электрическим параметрам разряда, однако его применение ограничено в силу слабой или неоднозначной зависимости этих параметров от свойств плазмы магнетронного разряда. Известные системы стабилизации [5–7] реализующие указанные подходы имеют ряд общих недостатков:

– малое максимальное количество подключаемых датчиков и исполнительных устройств, что является недостаточным для сложных технологических установок с большим числом распылителей;

– цепи входных и выходных сигналов указанных систем подключаются к единому модулю, что вызывает определённые трудности с установкой устройств в случае крупногабаритных вакуумных камер и низкую помехозащищённость из-за длинных кабелей с аналоговыми сигналами.

Целью работы являлась разработка системы стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления для технологий нанесения пленочных покрытий, которая устранила описанные выше недостатки.

Осаждение пленочных покрытий сложного химического состава

В технологиях реактивного магнетронного распыления подача реактивного газа в вакуумную камеру значительно усложняет физические процессы, сопровождающие распыление катода и формирование пленочного покрытия [8, 9]. Магнетронный разряд становится неустойчивым, т. е. возможно самопроизвольное изменение параметров плазмы магнетронного разряда при сохранении на постоянном уровне характеристик процесса: мощности разряда, давления в вакуумной камере, расхода инертного и реактивного газов, скорости откачки газов из вакуумной камеры. Неустойчивость системы распыляемая мишень (катод) – плазма–пленка приводит к самопроизвольному ее переходу в одно из двух устойчивых состояний процесса даже при сохранении на постоянном уровне характеристик разряда. Первое состояние – это распыление с «металлической» мишенью, когда доля химического соединения в осаждаемом покрытии низка, т. е. реализуется осаждение практически металлического покрытия. Второе состояние – это распыление с «реактивной» мишенью, когда распыляемая поверхность катода (мишени) полностью покрыта пленкой химического соединения и осаждаемое покрытие состоит из этого соединения и растворенных в нем частиц реактивного газа. Для практики применения реактивных процессов в первую очередь интересны именно неустойчивые промежуточные состояния, так как в таких состояниях получают пленки требуемых свойств с максимальной скоростью их осаждения.

Наиболее эффективным методом управления реактивными магнетронными технологиями, подходящим для широкого круга процессов, является оптический метод, использующий излучение плазмы магнетронного разряда, а именно оптическую эмиссионную спектроскопию.

Общий подход к алгоритмам оптического управления процессами реактивного магнетронного распыления сводится к одновременной регистрации относительной интенсивности элементов эмиссионного спектра разряда (спектральных линий, молекулярных полос), которые однозначно характеризуют состав осаждаемого потока [10]. Используя интенсивности этих элементов, необходимо вырабатывать сигналы в реальном времени, управляющие параметрами разряда. При этом управляющие сигналы должны обеспечивать вывод химического состава плазмы на требуемые величины и его поддержание с необходимой точностью. Если расположить параметры разряда по степени их влияния на воспроизводимость свойств пленочного покрытия, то, в первую очередь, необходимо управлять расходом реактивного газа, затем мощностью разряда и далее давлением в вакуумной камере [10].

Разработка системы стабилизации

При разработке системы стабилизации, исходя из цели разработки, к ней предъявлялись следующие требования:

- реализовать алгоритмы управления процессами реактивного магнетронного осаждения;
- модульность системы для возможности адаптации её к различным технологическим установкам;
- гибкая настройка системы для возможности реализации широкого круга технологических процессов.

Исходя из вышеперечисленных требований нами была разработана модульная система, адаптируемая к широкому кругу технологических установок. На рисунке 1 представлена структурная схема возможной реализации системы стабилизации для наиболее распространенного случая проведения процесса реактивного магнетронного распыления.

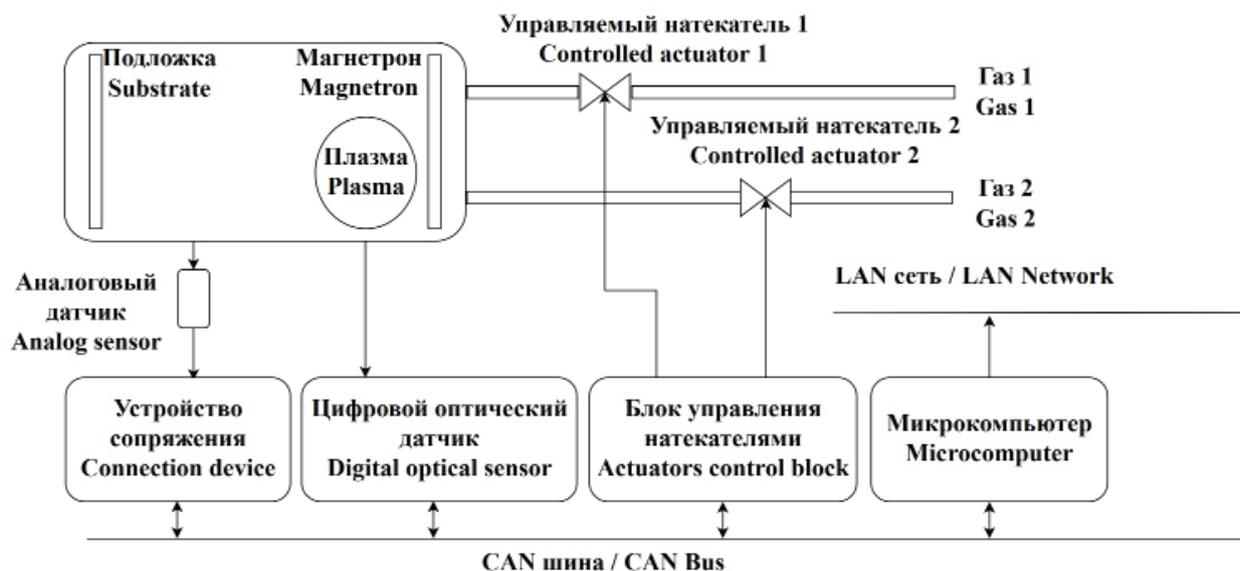


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления расходом газов
Figure 1 – Structural scheme of gas flow control system

Данная система состоит из аналогового датчика давления газа в вакуумной камере (ДА), устройства сопряжения (УС), цифрового оптического датчика (ДО), блока управления натекателями (БУН), управляемых натекателей (Н1, Н2) для подачи в вакуумную камеру инертного и реактивного газов соответственно, микрокомпьютера с управляющим программным обеспечением. Количество и тип датчиков, натекателей, устройств сопряжения, блоков управления натекателями определяются исходя из конфигурации технологической установки и требований к производимым процессам.

Аналоговыми датчиками системы могут выступать вакуумметры или датчики давления, датчики разрядного тока и напряжения распылителей. Устройство сопряжения служит для преобразования аналогового сигнала датчика в цифровую форму и передачи величины сигнала на шину CAN. К одному устройству сопряжения можно подключить до двух аналоговых датчиков.

Цифровые оптические датчики служат для регистрации интенсивности спектральных элементов (линий и молекулярных полос) оптического спектра излучения плазмы магнетронного разряда. Выбор этих элементов и их количество

определяется алгоритмом управления конкретного процесса нанесения пленочного покрытия. ДЦ состоит из светофильтра, выделяющего необходимый спектральный элемент из излучения плазмы разряда [11], фотодиода и контроллера, обеспечивающего передачу величины сигнала интенсивности на шину CAN. Для регистрации интенсивности каждого спектрального элемента используется по одному ДЦ.

Исполнительными устройствами системы являются натекатели газов, регулирующие расход каждого рабочего газа и формирующие требуемую смесь газов, а также клапана, коммутирующие газовую смесь на распылители.

БУН обеспечивает выработку электрических сигналов управления устройствами подачи газов. В составе системы могут использоваться два вида БУН в зависимости от типа устройств газового напуска:

1. БУН для управления вибронатекателями. Блок содержит пять выходов, к каждому из которых может быть подключен вибронатекатель или клапан.

2. БУН для управления регуляторами расхода газа (РРГ). Блок содержит четыре аналоговых выхода, к каждому из которых можно подключить РРГ либо натекатель, управляемый уровнем напряжения постоянного тока. В данном виде БУН имеется один дополнительный выход, к которому может быть подключен вибронатекатель или клапан.

Управление вибронатекателями осуществляется ШИМ сигналом напряжением 24 В и частотой 15 Гц. Открытие клапанов осуществляется постоянным напряжением 24 В. Управление РРГ осуществляется постоянным напряжением, изменяемым в диапазоне 0–5 В или 0–10 В. Использование выходного сигнала БУН с такими характеристиками делает возможным управление не только расходом газа, но и параметрами блока питания магнетронного разряда (ток или напряжение).

Корпуса устройств сопряжения и блоков управления натекателями предназначены для установки на DIN-рейку, цифровых оптических датчиков – на стенку вакуумной камеры. Питание УС, ДЦ, БУН осуществляется от стабилизированного блока питания напряжением 24 В.

Обмен информацией между микрокомпьютером, устройствами сопряжения, цифровыми оптическими датчиками и блоками управления натекателями происходит посредством высо-

конадежной помехозащищённой шины CAN, использование которой позволяет располагать устройства на значительном удалении друг от друга исходя из минимизации длины цепей аналоговых сигналов. В целях дополнительного повышения помехозащищённости входы УС и выходы БУН гальванически изолированы от шины CAN. Используемый протокол обмена между устройствами позволяет использовать до 127 датчиков и исполнительных устройств на шине CAN.

Задачей микрокомпьютера является опрос сигналов с датчиков и управление исполнительными устройствами по алгоритмам, обеспечивающим воспроизводимость свойств покрытий [10]. Микрокомпьютер предоставляет пользовательский интерфейс, а также интерфейс для удаленного управления. Разработано клиентское приложение пользовательского интерфейса, которое доступно из сети по адресу устройства. Программное обеспечение позволяет гибко настраивать систему управления (формировать контуры управления, т.е. задавать соответствие датчиков и исполнительных устройств и выбирать алгоритм управления, задавать параметры и режимы работы контуров управления).

Тестирование системы

Работоспособность реализации системы управления, представленной на рисунке 1, была проверена при проведении процессов магнетронного осаждения пленок оксида титана. Использовался планарный магнетронный распылитель с титановой мишенью диаметром 15 см и типичной мощностью разряда 1,5 кВт. В качестве датчика давления ДА выступал вакуумметр ВИТ-3. В оптическом датчике ДЦ применен светофильтр, выделяющий группу спектральных линий титана в диапазоне длин волн 511–523 нм. Вибронатекатель Н1 задавал расход аргона, Н2 – кислорода. В программном обеспечении микрокомпьютера было сконфигурировано два контура управления:

1. ДА–Н1 – контур поддержания общего давления в камере путём управления расходом аргона по величине сигнала давления.

2. ДЦ–Н2 – контур, реализующий для процесса осаждения оксида титана одноканальный алгоритм управления [10] расходом кислорода по интенсивности спектральных линий титана.

Тестирование системы проводилось следующим образом:

1. В предварительно откачанную вакуумную камеру до давления порядка 10^{-3} Па производился напуск аргона, давление которого поддерживалось на постоянном уровне $0,5$ Па с помощью контура управления ДА–Н1.

2. Включение магнетронного разряда в среде аргона и напуск кислорода в вакуумную камеру. Управление расходом кислорода производилось с помощью контура управления ДЦ–Н2, который обеспечивал вывод интенсивности спектральных линий титана на заданный уровень, соответствующий осаждению плёнки оксида титана стехиометрического состава.

Для контроля за ходом процесса фиксировалась динамика изменения интенсивности спектральных линий магнетронного разряда с помощью спектрометра S100 [12]. На рисунке 2 изображена динамика интенсивности спектральных линий кислорода $777,3$ нм и титана $519,3$ нм, начиная с момента подачи кислорода в вакуумную камеру. Эти линии являются характерными для процесса нанесения оксида титана, так как их интенсивности пропорциональны концентрации атомов кислорода и титана в осаждаемом потоке, следовательно, в формируемой пленке. Выход интенсивностей этих линий на постоянное значение и поддержание этого значения говорит о качественном проведении процесса. Системой обеспечивалось постоянство давления и состава смеси инертного и реактивного газов при магнетронном осаждении покрытий. Отклонение (колебания) уровня сигналов датчиков от требуемых значений при проведении процесса не превышало 3% .

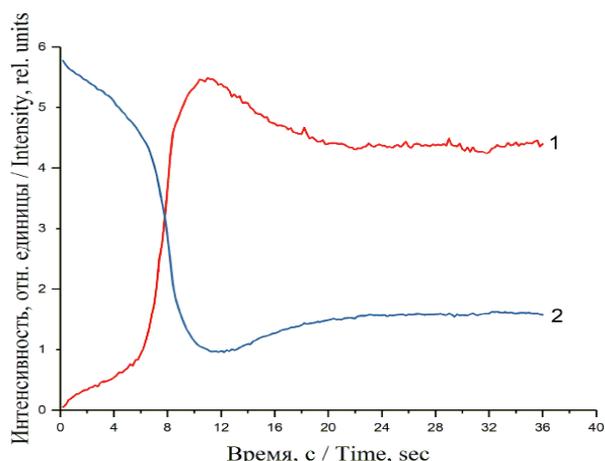


Рисунок 2 – Динамика изменения относительной интенсивности спектральных линий OI (1) и TiI (2) при проведении процесса магнетронного нанесения оксида титана
Figure 2 – Dynamics of changes in the relative intensity of spectral lines OI (1) and TiI (2) during the process of magnetron deposition of titanium oxide

Заклучение

Разработана модульная система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления с возможностью реализации широкого круга технологических процессов и адаптируемая к различным технологическим установкам. Система состоит из датчиков, исполнительных устройств, микрокомпьютера с управляющим программным обеспечением, а также устройств, обеспечивающих взаимодействие датчиков и исполнительных устройств с микрокомпьютером. Системой обеспечивается постоянство давления и состава смеси инертного и реактивного газов при магнетронном осаждении покрытий.

Работоспособность системы была подтверждена при проведении процесса магнетронного осаждения пленки оксида титана. Отклонение уровня сигналов датчиков от требуемых значений при проведении процесса не превышало 3% , что позволяет получать качественные покрытия.

Список использованных источников

1. Berg, S. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes / S. Berg, T. Nyberg // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 476, no. 2. – P. 215–230.
2. Берлин, Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман. – Москва: Техносфера, 2010. – 528 с.
3. Brudnik, A. Plasma-emission-controlled magnetron sputtering of TiO_2 x thin films / A. Brudnik, H. Czternastek, K. Zakrzewska // *Thin Solid Films*. – 1991. – Vol. 199, no. 1. – P. 45–58. doi: 10.1016/0040-6090(91)90051-X
4. Sproul, W.D. Control of reactive sputtering processes / W.D. Sproul, D.J. Christie, D.C. Carter // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 491, no. 1/2. – P. 1–17. doi: 10.1016/j.tsf.2005.05.022
5. Регулятор расхода газа [Электронный ресурс] / ООО «ВТТ». – Режим доступа: <https://vacuumtt.all.biz/regulyator-rashoda-gaza-g627980>. – Дата доступа: 14 февраля 2018 г.
6. Plasma monitor and process control systems [Electronic resource] / PLASUS Spectroscopic plasma monitor and process control systems. – Mode of access: http://www.plasus.de/index.php?page=system_allgemein&lang=en. – Date of access: 14.02.2018.
7. Speedflo [Electronic resource] / Gencoa. – Mode of access: <http://www.gencoa.com/speedflo>. – Date of access: 14.02.2018.
8. Свадковский, И.В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий: Монография / И.В. Свадковский; под ред. А.П. Досатанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 214 с.

9. Достанко, А.П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники: в 3-х т. / А.П. Достанко; под ред. А.П. Достанко. – Минск : ФУАинформ, 2000. – 495 с.

10. Бурмаков, А.П. Алгоритмы оптического управления реактивным магнетронным осаждением пленочных покрытий / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79, № 3. – С. 430–435. **doi:** 10.1007/s10812-012-9616-0

11. Бурмаков, А.П. Монохроматизация излучения для спектрального контроля плазменных технологических процессов / А.П. Бурмаков, А.А. Лабуда, Н.Н. Никифорова // Журнал прикладной спектроскопии. – 1998. – Т. 65, № 4. – С. 587–589. **doi:** 10.1007/BF02675656

12. Компактный широкодиапазонный спектрометр Модель S100 [Электронный ресурс] / SOLAR Laser Systems. – Режим доступа: <https://solarlaser.com/ru/products/compact-spectrometers/compact-wide-range-spectrometer-model-s100/>. – Дата доступа: 14.02.2018 г.

References

1. Berg S., Nyberg T. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes. *Thin Solid Films*, 2005, vol. 476, no. 2, pp. 215–230. **doi:** 10.1016/j.tsf.2004.10.051

2. Berlin E.V., Seydman L.A. *Ionno-plazmennyye processy v tonkoplennoy tehnologii* [Ion-plasma processes in thin film technology]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2010. 528 p. (in Russian).

3. Brudnik A., Czernastek H., Zakrzewska K. Plasma-emission-controlled magnetron sputtering of TiO₂ x thin films. *Thin Solid Films*, 1991, vol. 199,

no. 1, pp. 45–58. **doi:** 10.1016/0040-6090(91)90051-X

4. Sproul W.D., Christie D.J., Carter D.C. Control of reactive sputtering processes. *Thin Solid Films*, 2005, vol. 491, no. 1/2, pp. 1–17. **doi:** 10.1016/j.tsf.2005.05.022

5. *Gas consumption regulator*. Available at: <http://vacuumtt.com/en/gas-consumption-regulator-g627980> (accessed 14.02.2018).

6. *Plasma monitor and process control systems*. Available at: http://www.plasus.de/index.php?page=system_allgemein&lang=en (accessed 14.02.2018).

7. *Speedflo*. Available at: <http://www.genco.com/speedflo> (accessed 14.02.2018).

8. Svadkovskiy I.V. *Ionno-plazmennyye metody formirovaniya tonkoplennoyh pokrytiy: Monografiya* [Ion-plasma methods of thin film coatings forming: Monograph]. Minsk, Bestprint Publ., 2002. 214 p. (in Russian).

9. Dostanko A.P. *Plazmennyye processy v proizvodstve izdeliy elektronnoy tehniki: v 3 h t.* [Plasma processes in production of electronic technics goods: in 3 vol.]. Minsk, FUAinform Publ., 2000. 495 p. (in Russian).

10. Burmakou A.P., Kuleshov V.N. Algorithms for optical control of reactive magnetron deposition of film coatings. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 3, pp. 410–415. **doi:** 10.1007/s10812-012-9616-0

11. Burmakov A.P., Labuda A.A., Nikiforenko N.N. Monochromatization of radiation for spectral control of plasma technological processes. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1998, vol. 65, no. 4, pp. 611–613. **doi:** 10.1007/BF02675656

12. *Compact Wide-Range Spectrometer Model S100*. Available at: <https://solarlaser.com/en/products/compact-spectrometers/compact-wide-range-spectrometer-model-s100/> (accessed 14.02.2018).