

Ионный обрабатывающий центр для изготовления плёночных элементов наноградиентной оптики и метаматериалов

*+*** О.Д. Вольпян, ** А.И. Кузьмичёв, *** Д.В. Чуриков

* ООО «НПП Фотрон-Авто», РФ, 115191, Москва, ул. Тульская М, д.45 «А», кор. 6
E-mail: fotron-auto@mail.ru

** НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», 03056,
Украина, Киев, пр. Победы, 37, КПИ-2230, E-mail: a.kuzmichev@kpi.ua

*** ФГБУН «Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН»
117342, Россия, Москва, ул. Бутлерова, 15

Представлена разработка автоматизированного ионно-плазменного вакуумного оборудования для изготовления плёночных элементов наноградиентной оптики и метаматериалов методом физико-химического синтеза покрытий из оксидов и нитридов. Оборудование выполнено в виде обрабатывающего центра на базе магнетронных ионных распылителей твёрдых металлических мишеней и ВЧ индукционного активатора реакционных газов. Электрическое и газовое питание центра осуществляется в импульсном среднечастотном режиме. Функционирование центра организовано на принципах цифровых технологий.

Ion processing center for fabrication of film elements of nanogradient optics and metamaterials. O.D. Volpian, A.I. Kuzmichev, D.V. Churikov. The development of automatic ion-plasma vacuum facilities for manufacturing film-like elements of nanogradient optics and metamaterials by physical-chemical synthesis of oxide and nitride coatings are presented. The facilities are fulfilled as a processing center on the base of magnetron ion sputters and RF induction activator of reactive gases. Electrical and gas supplying is in mid-frequency pulsed mode. The center function is managed on the digital technology principles.

Технология нанесения микро- и нанослоёв необходима для получения плёночных систем различного назначения, включая оптические изделия и метаматериалы. При этом наряду с многослойными изотропными тонкоплёночными системами всё большее значение приобретают градиентные структуры, т. е. структуры с плавным изменением их локальных характеристик [1, 2]. В оптике это приводит к плавному, но по определённому закону, изменению показателя преломления n [1], что позволяет создавать оптические метаматериалы с уникальными свойствами. Применение градиентных структур существенно улучшает оптические приборы в отношении спектральных параметров, лазерной прочности, стойкости к климатическим и механическим воздействиям [3]. Поскольку природные материалы дают только дискретный набор значений n , то для получения промежуточных значений необходимо создавать структуры с переменным химическим составом, используя смесь из нескольких исходных веществ. Для реализации такого процесса требуется соответствующее оборудование, его созданию посвящена наша работа. Исходя из тенденций развития современного производства, в новом оборудовании должны реализовываться принципы цифровых технологий.

Для нанесения прецизионных градиентных тонкоплёночных структур применяют два базовых процесса – подачу на подложку плёнокообразующих веществ и физико-химический синтез из них требуемой структуры. Как показывает мировой опыт [1,4-6], сочетание высокой производительности при высоком качестве изделий обеспечивает метод магнетронного распыления металлов в комбинации с обработкой конденсата на подложке активированным реакционным газом. В качестве газа чаще всего применяют кислород или его смесь с азотом, поскольку оксиды и оксинитриды обладают востребованными оптическими свойствами. Для уменьшения «отравления» мишеней магнетронных ионных распылителей (МИР) их изолируют от зоны обработки реакционным газом. Использование металлических мишеней, а не диэлектрических, оправдано тем, что можно применять среднечастотные (10-100 кГц) импульсные источники питания и получать более высокие скорости распыления и осаждения

покрытий, чем при ВЧ (10-100 МГц) питания МИР, и при этом успешно подавлять дугообразование на мишенях, которое является серьёзной проблемой при распылении в реакционном газе на постоянном токе. Подложки большого диаметра (> 25 см) обрабатывают индивидуально, а подложки меньшего размера – групповым способом с применением подложкодержателей барабанного или дискового типа. Имеются также установки конвейерного типа. Применяют шлюзовые камеры для загрузки-выгрузки подложек с целью стабилизации условий обработки.

Изложенные соображения были учтены при создании нового оборудования для нанесения градиентных наноструктур на оптические изделия. В нём был реализован принцип интегрирования разных обработок подложек ионами и плазмой в едином технологическом пространстве, поэтому данное оборудование следует определить, как “ионный обрабатывающий центр”. Такой термин-определение был предложен в своё время проф. В. П. Белевским [7]. Перечень выполняемых обработок определяется технологией получения структур с заданными параметрами, но обязательно включает обезгаживание и финишную очистку поверхности подложек, собственно нанесение градиентной (наноградиентной) структуры, финишную обработку. При этом вакуумное и ионно-плазменное технологическое оборудование должно отвечать критериям высокого уровня автоматизации, прецизионного мониторинга процесса и адаптивного управления при минимальном участии оператора, т.е. критериям цифровой технологии. Структурная блок-схема ионно-плазменного обрабатывающего центра на базе МИР представлена на рис. 1. В нём реализуются импульсные режимы работы базовых модулей (узлов), комплект которых обеспечивает широкий диапазон параметров импульсных воздействий и обработок.

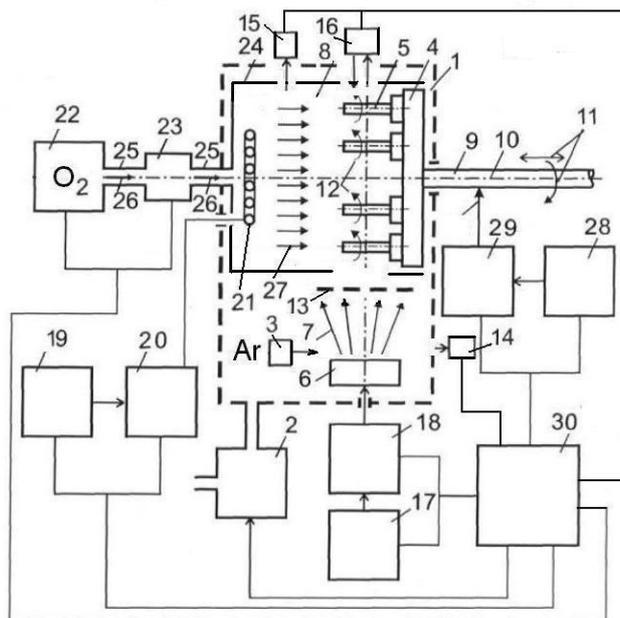


Рис. 1. Блок-схема ионно-плазменного обрабатывающего центра для нанесения градиентных покрытий: 1 – вакуумируемое рабочее технологическое пространство, 2 – система безмасляной откачки, 3 – источник распыляющего газа (Ar), 4 – держатель подложек 5, 6 – МИР, 7 – поток распылённого вещества, 8 – И-АРГ, 9 – вал-шток, 10 – главная ось, 11 – направления перемещения и вращения вала-штока и держателя подложек, 12 – направление вращения подложек, 13 – заслонка, 14 – спектрофотометр для контроля распыляющего разряда, 15 – спектрофотометр для контроля разряда, активирующего реакционный газ, 16 – лазерный спектровизор для контроля параметров покрытия, 17 – блоки питания для МИР, 18 – импульсный модулятор, 19 – блок питания для И-АРГ, 20 – импульсный модулятор, 21 – электрод (индуктор) И-АРГ, 22 – источник реакционного газа (O₂), 23 – импульсный клапан, 24 – оболочка И-АРГ, 25 – газопровод, 26 – поток реакционного газа (O₂), 27 – поток активированного реакционного газа, 28 – источник отрицательного напряжения, 29 – импульсный модулятор, 30 – управляющий компьютер

Топология обрабатывающего центра была ранее частично апробирована в установке нанесения покрытий на лопатки газотурбинных двигателей [8]. В рабочем вакуумированном пространстве 1 размещены подложкодержатель 4 с подложками 5, блок распылителей 6 ($P = 1 \dots 10$ кВт), а также ионизатор-активатор реакционного газа (И-АРГ) 8. Под оболочкой 24 И-АРГ размещён индуктор 21 для возбуждения разряда на $f = 13,5$ МГц и плазменной активации реакционного газа (генерации ионов и радикалов кислорода). Напротив индуктора 21 расположен подложкодержатель 4 для постоянного нахождения подложек 5 в потоке активированного реакционного газа 27. Оболочка 24 имеет отверстия для прохождения потока распылённого материала 7 к поверхности подложек 5. Подложкодержатель 4 может вращаться вокруг оси 10, а подложки 5 могут дополнительно вращаться вокруг своих осей для улучшения однородности толщины покрытия на подложках. Подложкодержатель 4 загружается и выгружается в шлюзовой камере. Газовые источники 3 и 22 подают распыляющий газ (Ag) в блок МИР и реакционный газ (O_2) в И-АРГ. Для мониторинга технологического процесса введены спектрофотометры 14 и 15 излучений из распыляющих и активирующего газ разрядов, а также спектровизор 16 для текущего контроля параметров наносимой структуры. Импульсные модуляторы 18, 20, 29 обеспечивают импульсную модуляцию ($\tau = 5-100$ мкс, частота повторения – десятки килогерц) напряжений, подаваемых на блоки МИР 6, индуктор 21 и подложкодержатель 4. Модуляция напряжений, подаваемых на индуктор и подложкодержатель, применяется для управления средней мощностью газового разряда, генерируемого индуктором, и ионным воздействием на подложку. Последнее используется для тепловой обработки и финишной очистки подложки, а также управления свойствами конденсата (покрытия). Предусмотрена импульсная подача реакционного газа в И-АРГ для расширения диапазона управления вакуумными условиями в технологической камере.

Рис. 2 показывает варианты взаимного расположения подложек и МИР: *а* – раздельное осаждение распылённых материалов из двух МИР, при этом текущий химический состав конденсата управляется либо электрическим режимом МИР, либо положением заслонок-диссекторов 13; *б* – на подложку одновременно поступают потоки распыленных материалов из обоих МИР, а соотношение потоков регулируется изменением геометрического положения МИР.

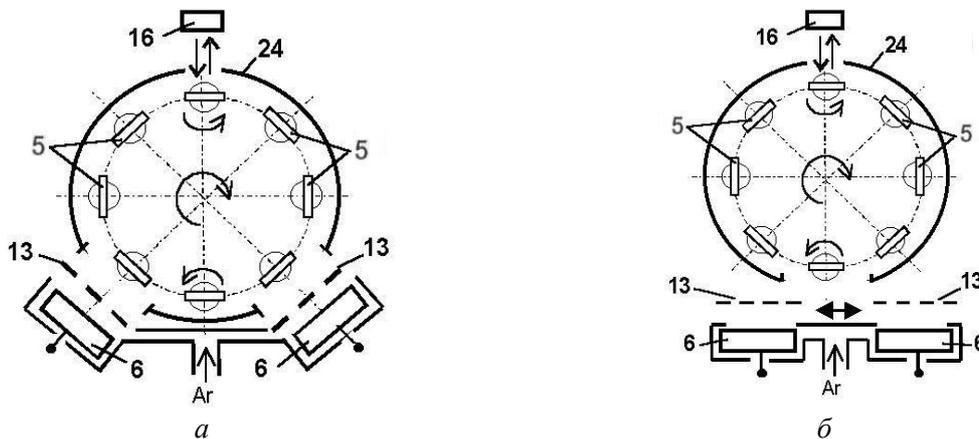


Рис. 2. Варианты взаимного расположения подложек (5) и магнетронных ионных распылителей (6). Остальные позиции определены в подписи к рис. 1

Также был создан и успешно испытан вариант конструкции активатора реакционного газа в виде безэлектродного СВЧ газоразрядного устройства со скрещенными полями, работающего на частоте 2,45 ГГц, в том числе в режиме электронного циклотронного резонанса [9].

На рис. 3 приведена градуировочная кривая распылительной системы, представленной на рис. 2б. Она показывает, как изменяется значение коэффициента преломления n при смещении обоих МИР относительно вертикальной оси системы в случае осаждения на подложках смеси $SiO_2-Ta_2O_5$ и сохранении постоянного расстояния между МИР.

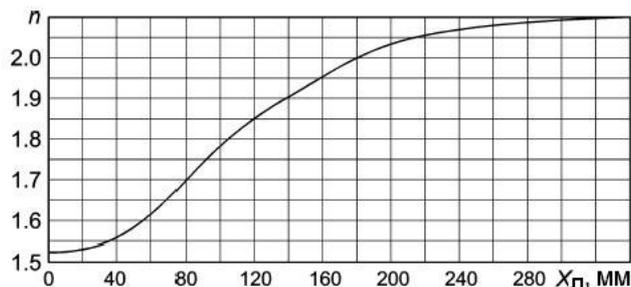


Рис. 3. Зависимость коэффициента преломления n от положения левого МИР относительно вертикальной оси системы, показанной на рис. 2б, при осаждении смеси $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ и постоянном расстоянии между левым и правым МИР

Градиентные оптические системы с многослойной периодической наноструктурой в системе $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$, изготовленные с помощью макета ионного обрабатывающего центра [10], подтвердили его эффективность и перспективность применения в оптической технологии. В настоящее время выполняется доработка центра для реализации в полной мере принципов цифровой технологии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Соглашение № 075-02-2018-155 «Оборудование и цифровые технологии изготовления элементов наноградиентной оптики и из метаматериалов для приборов индивидуализированной медицины, технологий здоровьесбережения и космической фотоники». Уникальный идентификатор RFMEFI60718X0206.

Литература

1. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И. Наноградиентные оптические покрытия // Российский химический журнал. – 2012. – Т. 56. – № 1-2. – С. 58-69.
2. PLATIT. Gradient Coating. Nanogradients. <http://www.platit.com>.
3. Volpian O., Kuzmichev A., Ermakov G., Obod Yu., Silin N., and Shkatula S. Thin film dielectric gradient optical structures for space photonics. – Proc. PIERS-2015, Prague, Czech Republic, 2015. – P. 1498-1501.
4. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И., Обод Ю.А. Магнетронная технология градиентных оптических покрытий // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – № 3. – С. 25-32.
5. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. – М.: Техносфера, 2014. – 256 с.
6. Willey R.R. Practical design and production of optical thin films. – N.-Y., Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002. – 568 p.
7. Белевский В.П. Интегрированные ионные процессы в тонкопленочных технологиях микроэлектроники // ВАНТ. – 1998. – Вып. 4(5)-5(6). – С. 67-72.
8. Кузьмичёв А.И., Цыбульский Л.Ю. Устройство для нанесения покрытий в вакууме с ионно-плазменной активацией. Патент Украины № 101342. МПК С23С 14/00 // Бюл., 2015. – № 17.
9. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И., Перевертайло В.В. Безэлектродный активатор реакционного газа для тонкопленочной оптической технологии. – Мат. 9-й Междунар. н.-техн. конф. «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, Сокольники, 2014. – С. 30-33.
10. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И., Ermakov G.F., Krikunov A.I., Obod Yu.A., Silin N.V., and Shkatula S.V. Magnetron discharge sputtering for fabrication of nanogradient optical coatings // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 652. – P. 012009.