

В.А. Богатов¹, А.Г. Крынин², П.А. Щур¹

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАТЕКАНИЯ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ НА ПАРАМЕТРЫ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ОКСИДА ТИТАНА

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-17-22

Исследовано влияние величины натекания в вакуумной камере на разрядное напряжение магнетрона в процессе реактивного нанесения покрытия оксида титана на ПЭТФ-пленку, скорость осаждения и показатель преломления покрытия.

Показано, что величина начального натекания в вакуумной камере может оказывать значительное влияние на параметры процесса реактивного магнетронного нанесения и оптические свойства покрытия оксида титана. Установлено, что при уменьшении величины начального натекания в вакуумной камере перед нанесением покрытия оксида титана среднее значение разрядного напряжения магнетрона уменьшается, а скорость реактивного магнетронного осаждения и показатель преломления покрытия оксида титана увеличиваются.

Ключевые слова: реактивное магнетронное осаждение, оптическое покрытие, оксид титана, полиэтилентерефталат, параметры процесса магнетронного осаждения, натекание в вакуумную камеру.

V.A. Bogatov¹, A.G. Krynin², P.A. Shchur¹

INFLUENCE OF THE LEAKAGE VALUE IN THE VACUUM CHAMBER ON THE PARAMETERS OF REACTIVE MAGNETRON DISCHARGE AND PROPERTIES OF TITANIUM OXIDE COATINGS

The influence of the magnitude of leakage in the vacuum chamber on the discharge voltage during reactive magnetron sputtering of titanium oxide coatings on the PET film, the deposition rate and refractive index of the coating are investigated.

The article shows that the initial value of leakage in the vacuum chamber can have a significant impact on the process parameters of reactive magnetron sputtering, and optical properties of the titanium oxide coating. It is found that in case of reducing the initial quantity of leakage in the vacuum chamber prior to applying the titanium oxide coating, the mean value of the discharge voltage of the magnetron decreases, while the reactive magnetron deposition rate and refractive index of the coating titanium oxide increase.

Keywords: magnetron reactive deposition, optical coating, titanium oxide, polyethylene-terephthalate, magnetron sputtering parameters, leakage into the vacuum chamber.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²ООО «Техноинфо» [Technoinfo ltd]; e-mail: info@technoinfo.ru

Введение

В современной авиационной технике широко применяются многофункциональные композиционные материалы, сочетающие высокую прочность, низкую плотность, а также специальные свойства [1–5]. Например, полимерные слоистые материалы остекления со специальными оптическими покрытиями наряду с высокими прозрачностью и удельной ударной прочностью позволяют обеспечить защиту экипажа и авионики от воздействия избыточных потоков излучения наземных и бортовых радиолока-

ционных станций, а также теплового солнечного излучения [6]. В настоящее время для нанесения оптических покрытий на полимерные материалы остекления применяют низкотемпературные методы магнетронного нанесения [7–12]. В состав специальных оптических покрытий, как правило, входят тонкие слои оксидов металлов, в частности оксидов титана и кремния, а также оксида индия, легированного оловом. К наиболее перспективным методам нанесения тонких слоев оксидов на полимерные материалы относится метод реактивного магнетронного распыления [9–14]. Этот метод позволяет получать покрытия высокого качества на полимерных материалах при высокой производительности и низкой энергоемкости процесса, что объясняет большой интерес исследователей к нему [15–22], несмотря на ряд технологических сложностей, связанных с эффектом «отравления» металлической мишени продуктами химической реакции материала мишени с реактивными газами [23–25].

Метод магнетронного распыления стремительно развивался в последние десятилетия и стал использоваться в качестве основного метода осаждения покрытий в различных областях науки и техники. Движущей силой при этом являлся высокий спрос на высококачественные функциональные покрытия. К настоящему времени магнетронное распыление превосходит по многим параметрам другие технологии так называемого физического осаждения в вакууме, к тому же с помощью магнетронного распыления возможно получать толстые покрытия (>1 мкм). Как следствие, магнетронное распыление оказывает существенное влияние на развитие таких материалов, как упрочняющие, водостойкие, антикоррозионные, антифрикционные покрытия и покрытия со специальными оптическими и электронными свойствами [23–25].

Опыт работ по реактивному магнетронному нанесению покрытий показывает, что во время проведения технологического процесса наблюдается изменение параметров магнетрона, причем эти изменения неодинаковы для разных циклов нанесения покрытия. К таким изменениям относится изменение скорости распыления металлической мишени. Причина этого заключается в том, что степень «отравления» металлической мишени в процессе нанесения покрытия зависит от ряда труднопредсказуемых внешних факторов, таких как рабочее давление, температура внутри вакуумной камеры, влажность окружающей среды и др., которые влияют на количество и состав адсорбировавшихся на внутренней поверхности вакуумной камеры газов в период, когда вакуумная камера открыта для загрузки подложек. Задача отработки технологических режимов обычно сводится к определению такого диапазона изменения технологических параметров, при котором получают покрытия с заданными характеристиками и с наибольшей повторяемостью.

Перечисленные внешние факторы непредсказуемо влияют на зависимость натекания (скорость десорбции газов со стенок вакуумной камеры) от времени в процессе создания вакуума. Одним из способов учета влияния перечисленных факторов на режим вакуумного осаждения является контроль величины начального натекания, т. е. величины натекания перед началом технологического цикла. Увеличение времени предварительной откачки позволяет свести к минимуму начальное натекание и теоретически позволяет максимально стабилизировать процесс реактивного осаждения покрытий. Однако такой подход приводит к неоправданному увеличению трудоемкости и энергоемкости технологического процесса, а следовательно, и себестоимости продукции. В настоящее время не разработаны методики определения величины начального натекания, обеспечивающей оптимальное соотношение «цена–качество» при реактивном осаждении покрытий.

Цель данной работы состояла в исследовании влияния величины натекания в рабочей камере перед началом технологического цикла на параметры магнетронного распыления и оптические свойства покрытия оксида титана, получаемого методом реактивного магнетронного нанесения в вакуумной камере.

Материалы и методы

Исследование влияния величины натекания в рабочей камере перед началом технологического цикла на параметры магнетронного разряда и оптические свойства покрытия оксида титана выполняли на вакуумной установке УНИП-900П, схема которой приведена на рис. 1.

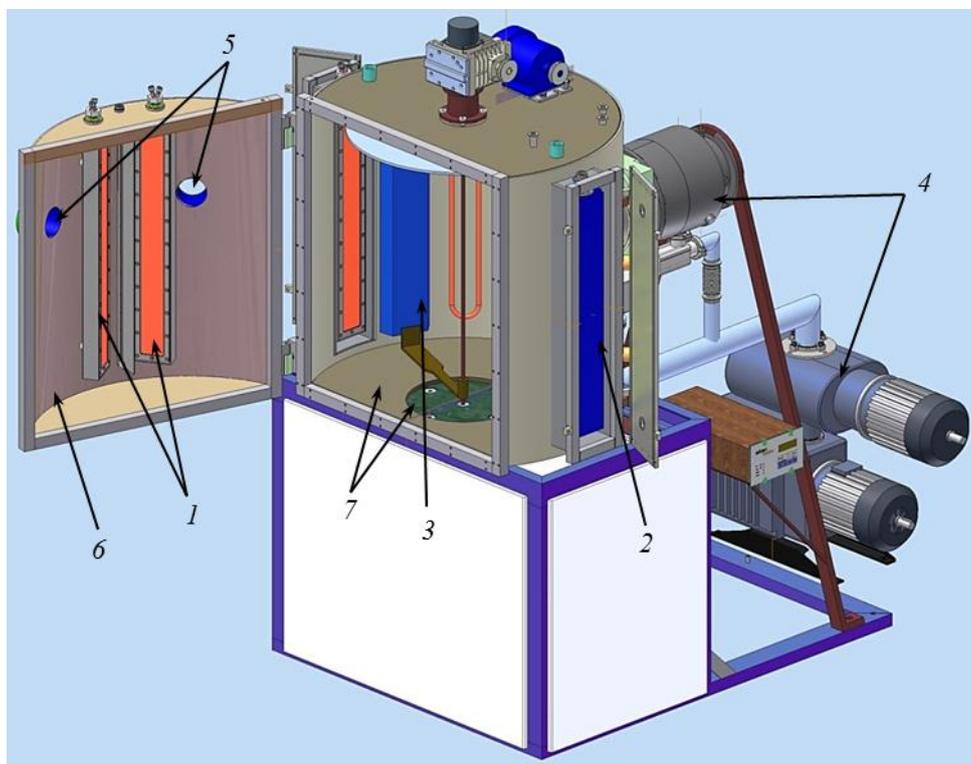


Рис. 1. Принципиальная схема установки УНИП-900П:

1 – комбинированная система реактивного магнетронного распыления; 2 – система ионной очистки; 3 – заслонка; 4 – откачной пост; 5 – смотровое окно; 6 – крышка вакуумной камеры; 7 – подложка

Вакуумная установка оснащена турбомолекулярным насосом типа Alcatel PR2300, форвакуумным агрегатом АВР-150, двумя регуляторами расхода газа РРГ-9, датчиком давления в рабочей камере марки АР2004 фирмы Adixen, комбинированной системой реактивного магнетронного распыления, системой ионной очистки и автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУТП). Объем вакуумной камеры составляет 900 литров.

Вакуумные насосы обеспечивали откачку в рабочем объеме вакуумной камеры до остаточного давления не более 0,01 Па. Устройство для крепления и перемещения подложек было выполнено в виде барабана с вертикальной осью вращения. Скорость вращения барабана с образцами регулировалась от 0 до 20 об/мин.

Комбинированная система реактивного магнетронного распыления включала планарный магнетрон и источник ионов холловского типа [26, 27]. Размер катода-мишени планарного магнетрона составлял 730×70 мм. Источник ионов комбинированной системы реактивного распыления создавал в зоне подложки ионный пучок протяженностью 700 мм. Электропитание к магнетрону и источнику ионов комбинированной системы подводили от блоков питания типа ИВЭ-145. Двухканальная система подачи рабочих газов обеспечивала контролируемый напуск смеси аргона и реактивного газа (воздуха) через систему газораспределения источника ионов комбинированной системы. Плазмохимическую обработку полимерной подложки перед нанесением покрытия проводили вторым источником ионов холловского типа при разрядном напряжении до

2,5 кВ и токе разряда до 0,5 А с использованием блока электропитания ИВЭ-343 в течение 2–5 мин [6].

Применение импульсных источников питания магнетронов также является необходимым условием получения качественных покрытий, так как распыление при постоянном токе плотных, бездефектных и изолирующих материалов, таких как оксид титана, крайне затруднено. Процесс ограничен низкой скоростью распыления и частыми дугowymi пробоями, нарушающими структуру и морфологию мишени, в то время как при использовании импульсных источников, особенно среднечастотных (10–200 кГц), процесс проводится практически при полном отсутствии пробоев, что сказывается на стабильности процесса и качестве покрытий. При этом скорость распыления таких диэлектриков, как оксид титана, оказывается на уровне со скоростью распыления чистого металла [7]. В данной работе использовали систему с несбалансированным магнетроном и импульсным источником питания с частотой 40 кГц.

Монтаж магнитной системы магнетрона и настройка регуляторов расхода газа комбинированной системы выполнены в соответствии с рекомендациями работ [24, 25].

Для предварительных экспериментов выбраны следующие рабочие параметры реактивного магнетронного нанесения оксида титана:

- рабочее давление в вакуумной камере – $P=0,25$ Па (при данном давлении происходит стабильное зажигание плазмы магнетрона);
- расход аргона – $G_{Ar}=200$ см³/мин (возможно отклонение от данной величины в зависимости от используемых насосов и вакуумной арматуры);
- суммарный расход реактивного газа (воздуха) – $G_v=35$ см³/мин;
- соотношение расходов реактивного газа через верхнюю, центральную и нижнюю секции газораспределителя – $G_{в.с}=8,8$ см³/мин, $G_{ц.с}=14,5$ см³/мин, $G_{н.с}=11,7$ см³/мин соответственно;
- блоки питания ИВЭ-145 планарного магнетрона и источника ионов комбинированной системы включены в частотно-импульсном режиме с длительностью импульса 40 мкс и со стабилизацией тока разряда.

Перечисленные параметры нанесения покрытия подбирали таким образом, чтобы выполнялось условие прозрачности оксида титана в видимой области спектра, а показатель преломления на длине волны 550 нм был приблизительно равен 2,4.

Исследования проводили в диапазоне изменений величины натекания перед началом технологического цикла от 0,05 до 0,50 см³/мин. В качестве подложки для нанесения оксида титана использовали термостабилизированную полиэтилентерефталатную (ПЭТФ) пленку толщиной 100 мкм.

Толщину и показатель преломления покрытий оксида титана определяли спектрофотометрическим методом по спектральным зависимостям коэффициентов пропускания и отражения, полученным с помощью спектрофотометра Cary 5000. Методика и формулы для определения толщины и показателя преломления описаны в работах [24, 28]. Оптические константы термостабилизированной ПЭТФ-пленки для расчетов брали из работы [25].

Скорость осаждения покрытия оксида титана рассчитывали как отношение толщины покрытия к продолжительности его нанесения.

Результаты

При исследовании влияния величины начального натекания в рабочей камере на рабочие параметры комбинированной системы магнетронного распыления получены зависимости средней величины разрядного напряжения U и величины изменения ΔU разрядного напряжения магнетрона и источника ионов в процессе нанесения покрытия от величины начального натекания (рис. 2 и 3).

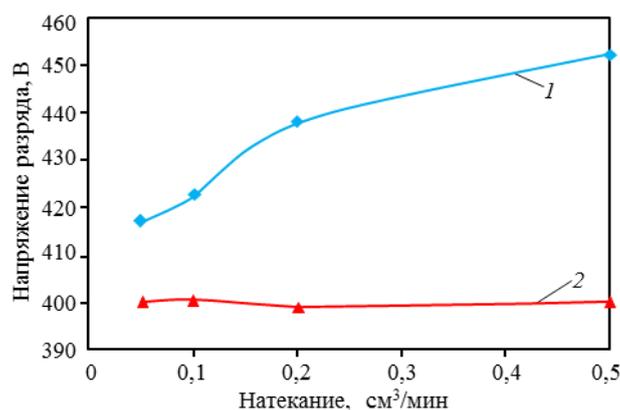


Рис. 2. Зависимость среднего разрядного напряжения магнетрона U_M (1) и источника ионов $U_{и}$ (2) комбинированной системы магнетронного распыления от величины начального натекания

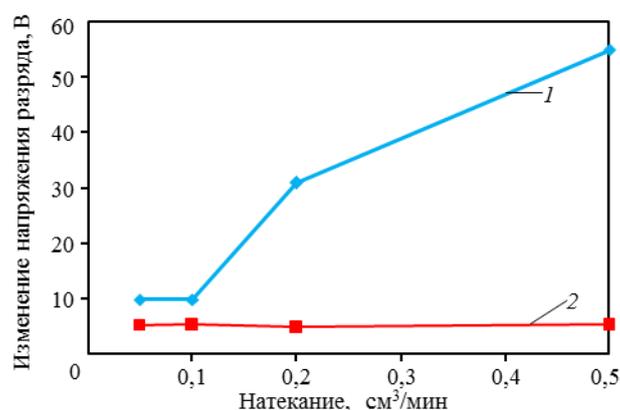


Рис. 3. Зависимость изменения разрядного напряжения магнетрона ΔU_M (1) и источника ионов $\Delta U_{и}$ (2) комбинированной системы магнетронного распыления в процессе нанесения покрытия оксида титана от величины начального натекания

Среднее значение разрядного напряжения магнетрона U_M , а также величина изменения ΔU_M в процессе нанесения покрытия оксида титана уменьшается при уменьшении величины начального натекания в вакуумную камеру. Это свидетельствует об уменьшении степени «отравления» поверхности титановой мишени в процессе нанесения покрытия оксида титана при снижении величины начального натекания в вакуумной камере. «Отравлением» поверхности мишени магнетрона в процессе реактивного распыления называют образование на ней слоя химического соединения материала мишени с реактивным газом. Чем больше толщина этого слоя, тем больше степень «отравления» и меньше скорость нанесения.

При величине начального натекания в вакуумную камеру, не превышающей величину $G_H=0,10$ см³/мин, диапазон изменения величины разрядного напряжения магнетрона в процессе осаждения покрытия оксида титана значительно меньше, чем при более высоких величинах натекания, и составил $\Delta U_M=8-13$ В, в то время как при $G_H=0,20$ см³/мин изменение величины разрядного напряжения магнетрона в процессе осаждения покрытия оксида титана составило $\Delta U_M=26-35$ В, а при $G_H=0,50$ см³/мин – $\Delta U_M=50-57$ В.

На изменение средней величины разрядного напряжения источника ионов ($U_{и}$) в процессе осаждения покрытия оксида титана начальное натекание в вакуумной камере практически не влияет. Во всем исследованном диапазоне начальных значений величины натекания от 0,05 до 0,50 см³/мин средняя величина разрядного напряжения источ-

ника ионов и ее изменение оставались практически постоянными и составляли ~ 400 и ~ 5 В соответственно.

На рис. 4 показаны зависимости скорости нанесения и показателя преломления покрытий оксида титана от величины начального натекания в вакуумной камере, полученные на оборудовании, использованном в данной работе.

Видно (рис. 4, а), что величина начального натекания в вакуумной камере может оказывать значительное влияние на скорость нанесения покрытия оксида титана. Например, рост величины начального натекания в вакуумной камере с 0,1 до 0,2 $\text{см}^3/\text{мин}$ приводит к снижению скорости осаждения покрытия оксида титана приблизительно на 20%. В то же время при уменьшении величины начального натекания в вакуумную камеру наблюдалось увеличение показателя преломления оксида титана с величины 2,34–2,38 при $G_n=0,5$ $\text{см}^3/\text{мин}$ до величины 2,48–2,54 при $G_n=0,05$ $\text{см}^3/\text{мин}$.

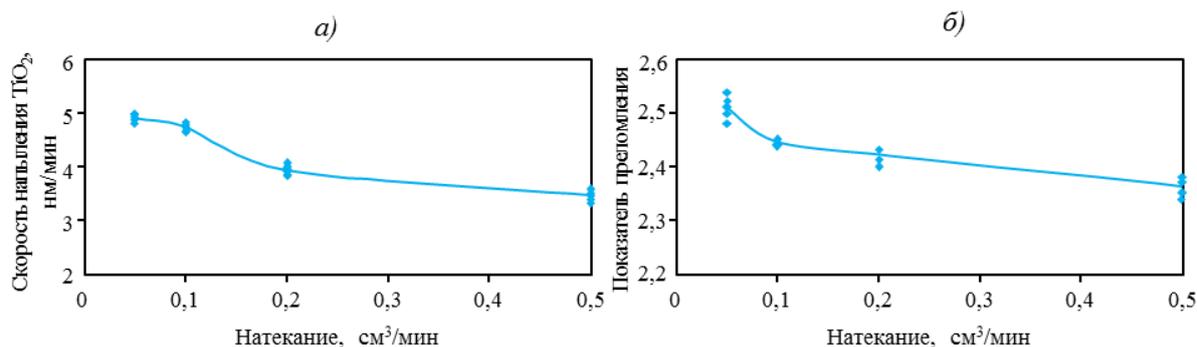


Рис. 4. Зависимость скорости нанесения (а) и показателя преломления (б) покрытия оксида титана от величины начального натекания в вакуумной камере

Наблюдаемое в экспериментах изменение скорости нанесения покрытия связано с изменением степени «отравления» поверхности титановой мишени. Известно, что коэффициент распыления оксида титана в несколько раз меньше коэффициента распыления чистого титана, поэтому увеличение степени «отравления» поверхности мишени в процессе реактивного магнетронного нанесения, сопровождающееся ростом толщины оксидного слоя, приводит к уменьшению коэффициента ее распыления.

Представленное на рис. 4, б изменение показателя преломления покрытия объясняется изменением стехиометрического состава оксида титана, который зависит от скорости нанесения покрытия.

Обсуждение и заключения

Экспериментальное исследование, выполненное в данной работе, показало, что величина начального натекания в вакуумной камере может оказывать значительное влияние на параметры процесса реактивного магнетронного нанесения и оптические свойства покрытия оксида титана. Установлено, что при уменьшении величины начального натекания в вакуумной камере перед нанесением покрытия оксида титана:

- среднее значение разрядного напряжения магнетрона уменьшается;
- скорость реактивного магнетронного осаждения и показатель преломления покрытия оксида титана увеличиваются.

Применительно к вакуумному оборудованию, используемому в данной работе, минимальное отклонение, а следовательно, лучшая воспроизводимость технологических параметров системы реактивного магнетронного распыления наблюдались при величине натекания в рабочей камере перед началом технологического цикла $G_n \leq 0,10$ $\text{см}^3/\text{мин}$.

Следует отметить, что для уменьшения величины начального натекания с 0,2 до 0,1 $\text{см}^3/\text{мин}$ требовалось увеличение продолжительности откачки вакуумной камеры на

25–30 мин, а для уменьшения начального натекания с 0,20 до 0,05 см³/мин продолжительность откачки увеличивается на 130–140 мин, что приводит к неоправданному снижению производительности технологического процесса.

Таким образом, можно сделать вывод, что правильный выбор величины натекания в вакуумную камеру для начала процесса реактивного нанесения тонкопленочных покрытий, в частности оптических покрытий оксида титана, позволяет снизить энергоемкость и повысить производительность процесса нанесения покрытия за счет снижения среднего значения разрядного напряжения магнетрона и увеличения скорости нанесения покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
6. Крынин А.Г., Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Кисляков П.П. Прозрачные интерференционные покрытия для функциональных материалов остекления // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №11. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2018).
7. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
8. Gorjanca T.C., Leonga D., Py C., Rotha D. Room temperature deposition of ITO using r.f. magnetron sputtering // Thin Solid Films. 2002. Vol. 413. P. 181–185.
9. Jeong S.H., Lee J.W., Lee S.B., Boo J.H. Deposition of aluminum-doped zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties // Thin Solid Films. 2003. Vol. 435. P. 78–82.
10. Zhanga K., Wena M., Chengb G. et al. Reactive magnetron sputtering deposition and characterization of niobium carbide films // Vacuum. 2014. Vol. 99. P. 233–241.
11. Ellmer K., Welzel T. Reactive magnetron sputtering of transparent conductive oxide thin films: Role of energetic particle (ion) bombardment // Journal of Materials Research. 2012. Vol. 27. No. 05. P. 765–779.
12. Elinson V.M., Shchur P.A., Kirillov D.V. et al. Study of the Mechanical Characteristics of Single-Layer and Multilayer Nanostructures Based on Carbon and Fluorocarbon Coatings // Pleiades Publishing, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. Vol. 12. No. 2. P. 342–345.
13. Кисляков П.П., Хохлов Ю.А., Крынин А.Г., Кондрашов С.В. Получение и применение полимерной пленки с прозрачным электропроводящим покрытием на основе оксида индия, легированного оловом // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2018).
14. Комлев А.Е., Шаповалов В.И., Шутова Н.С. Магнетронный разряд в среде аргона и кислорода при осаждении пленки оксида титана // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. №7. С. 134–136.
15. Navabpoura P., Ostovarpourb S., Hampshirea J. et al. The effect of process parameters on the structure, photocatalytic and self-cleaning properties of TiO₂ and Ag–TiO₂ coatings deposited using reactive magnetron sputtering // Thin Solid Films. 2014. Vol. 571. Part 1. P. 75–83.
16. Leóna J.J., Garretta M.P., Zhanga J., Kobayashi N.P. Aluminum titanium oxide alloys: Deposition of amorphous, transparent, corrosion-resistant films by pulsed DC reactive magnetron sputtering with RF substrate bias // Materials Science in Semiconductor Processing. 2015. Vol. 36. P. 96–102.

17. Stana G.E., Botea M., Bonia G.A. et al. Electric and pyroelectric properties of AlN thin films deposited by reactive magnetron sputtering on Si substrate // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 353. P. 1195–1202.
18. Fakhouri H. et al. Control of the visible and UV light water splitting and photocatalysis of nitrogen doped TiO₂ thin films deposited by reactive magnetron sputtering // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2014. Vol. 144. P. 12–21.
19. Juškevičius K. et al. High-rate reactive magnetron sputtering of zirconia films for laser optics applications // *Applied Physics A*. 2014. Vol. 116. No. 3. P. 1229–1240.
20. Солован М.Н., Брус В.В., Марьянчук П.Д. и др. Кинетические свойства тонких пленок TiN, полученных методом реактивного магнетронного распыления // *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. №11. С. 20–25.
21. Иевлев В.М., Куцев С.Б., Латышев А.Н. и др. Спектры поглощения тонких пленок TiO₂, синтезированных реактивным высокочастотным магнетронным распылением титана // *Физика и техника полупроводников*. 2014. Т. 48. №7. С. 14–19.
22. Быкова Ю.В., Морозова Н.С., Конищев М.Е. Исследование поверхностных свойств покрытий на основе оксинитридов титана, осажденных методом реактивного магнетронного распыления // *Сб. трудов XVIII Междунар. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»*. Томск, 2012. С. 129–130.
23. Марченко В.А. Процессы на поверхности мишени при реактивном распылении V в Ar–O₂ средах // *Известия Российской академии наук. Сер.: Физическая*. 2009. Т. 73. №7. С. 920–923.
24. Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Крынин А.Г. Влияние распределения магнитного поля на свойства ИТО покрытия, получаемого на полимерной пленке методом реактивного магнетронного осаждения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №12. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-11-11.
25. Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Березин Н.М., Крынин А.Г. Реактивное магнетронное осаждение ИТО покрытия на полимерную пленку с применением секционированной системы напуска газов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №5. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-7-7.
26. Гришин С.Д., Мамонов В.И., Марахтанов М.К., Хохлов Ю.А. Определение энергии ионов в плазме разряда с азимутальным дрейфом электронов // *Физика и химия обработки материалов*. 1986. №2. С. 131–132.
27. Гришин С.Д., Марахтанов М.К., Понкратов А.Б., Хохлов Ю.А. К расчету энергетических характеристик ускорителя с азимутальным дрейфом электронов // *Физика плазмы*. 1985. Т. 11. №2. С. 206–210.
28. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Shestoy tekhnologicheskij uklad [The sixth technological structure] // *Nauka i zhizn*. 2010. №4. S. 2–7.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030] // *Aviacionnye materialy i tehnologii*. 2012. №5. S. 7–17.
3. Kablov E.N. Materialy novogo pokoleniya – osnova innovatsiy, tekhnologicheskogo liderstva i natsional'noy bezopasnosti Rossii [Materials of the new generation - the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia] // *Intellekt i tekhnologii*. 2016. №2 (14). S. 16–21.
4. Kablov E.N. Iz chego sdelat budushcheye? Materialy novogo pokoleniya, tekhnologii ikh sozdaniya i pererabotki – osnova innovatsiy [What to make the future from? Materials of the new generation, technologies of their creation and processing – the basis of innovation] // *Krylya Rodiny*. 2016. №5. S. 8–18.
5. Kablov E.N. Materialy novogo pokoleniya [New generation materials] // *Zashchita i bezopasnost*. 2014. №4. S. 28–29.

6. Krynin A.G., Hohlov Yu.A., Bogatov V.A., Kislyakov P.P. Prozhachnye interferencionnye pokrytiya dlya funktsionalnykh materialov ostekleniya [Transparent interferential coatings for functional materials of glazing] // Trudy VIAM : elektron. nauch.-tenhich. zhurn. 2013. №11. St. 05. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed at: September 21, 2018).
7. Kuzmichev A.I. Magnetronnyye raspylitelnyye sistemy. Kn. 1. Vvedeniye v fiziku i tekhniku magnetronnogo raspyleniya [Magnetron sputtering systems. Book 1. Introduction to the physics and technology of magnetron sputtering]. Kiyev: Avers, 2008. 244 s.
8. Gorjanca T.C., Leonga D., Py C., Rotha D. Room temperature deposition of ITO using r.f. magnetron sputtering // Thin Solid Films. 2002. Vol. 413. P. 181–185.
9. Jeong S.H., Lee J.W., Lee S.B., Boo J.H. Deposition of aluminum-doped zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties // Thin Solid Films. 2003. Vol. 435. P. 78–82.
10. Zhanga K., Wena M., Cheng G. et al. Reactive magnetron sputtering deposition and characterization of niobium carbide films // Vacuum. 2014. Vol. 99. P. 233–241.
11. Ellmer K., Welzel T. Reactive magnetron sputtering of transparent conductive oxide thin films: Role of energetic particle (ion) bombardment // Journal of Materials Research. 2012. Vol. 27. No. 05. P. 765–779.
12. Elinson V.M., Shchur P.A., Kirillov D.V. et al. Study of the Mechanical Characteristics of Single-Layer and Multilayer Nanostructures Based on Carbon and Fluorocarbon Coatings // Pleiades Publishing, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2018. Vol. 12. No. 2. P. 342–345.
13. Kislyakov P.P., Hohlov Yu.A., Krynin A.G., Kondrashov S.V. Poluchenie i primeneniye polimernoy plenki s prozhachnym elektroprovodyashhim pokrytiem na osnove oksida indiya, legirovannogo olovom [Receiving and application of polymer film with transparent electroconducting coating on the basis of the indium oxide alloyed by tin] // Trudy VIAM : elektron. nauch.-tenhich. zhurn. 2013. №11. St. 06. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed at: September 21, 2018).
14. Komlev A.E., Shapovalov V.I., Shutova N.S. Magnetronnyy razryad v srede argona i kisloroda pri osazhdenii plenki oksida titana [Magnetron discharge in argon and oxygen in the deposition of a film of titanium oxide] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2012. T. 82. №7. S. 134–136.
15. Navabpoura P., Ostovarpourb S., Hampshire J. et al. The effect of process parameters on the structure, photocatalytic and self-cleaning properties of TiO₂ and Ag–TiO₂ coatings deposited using reactive magnetron sputtering // Thin Solid Films. 2014. Vol. 571. Part 1. P. 75–83.
16. Leóna J.J., Garretta M.P., Zhanga J., Kobayashi N.P. Aluminum titanium oxide alloys: Deposition of amorphous, transparent, corrosion-resistant films by pulsed DC reactive magnetron sputtering with RF substrate bias // Materials Science in Semiconductor Processing. 2015. Vol. 36. P. 96–102.
17. Stana G.E., Boteaa M., Bonia G.A. et al. Electric and pyroelectric properties of AlN thin films deposited by reactive magnetron sputtering on Si substrate // Applied Surface Science. 2015. Vol. 353. P. 1195–1202.
18. Fakhouri H. et al. Control of the visible and UV light water splitting and photocatalysis of nitrogen doped TiO₂ thin films deposited by reactive magnetron sputtering // Applied Catalysis B: Environmental. 2014. Vol. 144. P. 12–21.
19. Juškevičius K. et al. High-rate reactive magnetron sputtering of zirconia films for laser optics applications // Applied Physics A. 2014. Vol. 116. No. 3. P. 1229–1240.
20. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D. i dr. Kineticheskiye svoystva tonkikh plenok TiN, poluchennykh metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya [Kinetic properties of TiN thin films obtained by the method of reactive magnetron sputtering] // Fizika tverdogo tela. 2013. T. 55. №11. S. 20–25.
21. Ievlev V.M., Kushchev S.B., Latyshev A.N. i dr. Spektry pogloshcheniya tonkikh plenok TiO₂, sintezirovannykh reaktivnym vysokochastotnym magnetronnym raspyleniyem titana [Absorption spectra of thin TiO₂ films synthesized by reactive high-frequency magnetron sputtering of titanium] // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2014. T. 48. №7. S. 14–19.
22. Bykova Yu.V., Morozova N.S., Konishchev M.E. Issledovaniye poverkhnostnykh svoystv pokrytiy na osnove oksinitridov titana, osazhdennykh metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya [Investigation of the surface properties of coatings based on titanium oxynitrides, precipitated by the method of reactive magnetron sputtering] // Sb. trudov XVIII Mezhdunar. nauch.-

- praktich. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Sovremennyye tekhnika i tekhnologii». Tomsk, 2012. S. 129–130.
23. Marchenko V.A. Protsessy na poverkhnosti misheni pri reaktivnom raspylenii V v Ar–O₂ sredakh [Processes on the target surface during reactive sputtering of V in Ar – O₂ environment] // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Ser.: Fizicheskaya. 2009. T. 73. №7. S. 920–923.
 24. Khokhlov Yu.A., Bogatov V.A., Krynin A.G. Vliyaniye raspredeleniya magnitnogo polya na svoystva ITO pokrytiya, poluchayemogo na polimernoy plenke metodom reaktivnogo magnetronnogo osazhdeniya [An influence of the magnetic field distribution on properties of ITO coating deposited on a polymer film by reactive magnetron sputtering method] // Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn. 2014. №12. St. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 21, 2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-11-11.
 25. Khokhlov Yu.A., Bogatov V.A., Berezin N.M., Krynin A.G. Reaktivnoye magnetronnoye osazhdeniye ITO pokrytiya na polimernuyu plenku s primeneniym sektionirovannoy sistemy napuska gazov [Reactive magnetron deposition of ITO coating on the polymer film using a sectionalized gas feed system] // Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn. 2015. №5. St. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 21, 2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-7-7.
 26. Grishin S.D., Mamonov V.I., Marakhtanov M.K., Khokhlov Yu.A. Opredeleniye energii ionov v plazme razryada s azimutalnym dreyfom elektronov [Determination of ion energy in a discharge plasma with azimuthal electron drift] // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 1986. №2. S. 131–132.
 27. Grishin S.D., Marakhtanov M.K., Ponkratov A.B., Khokhlov Yu.A. K raschetu energeticheskikh kharakteristik uskoritelya s azimutal'nym dreyfom elektronov [Calculation of the energy characteristics of an accelerator with an azimuthal electron drift] // Fizika plazmy. 1985. T. 11. №2. S. 206–210.
 28. Krylova T.N. Interferentsionnyye pokrytiya [Interference Coverage]. L.: Mashinostroyeniye, 1973. 224 s.