



УДК 621.793

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-37-43>

Научная статья

Research article



Исследование эрозионной стойкости защитных покрытий ZrBN, осажденных методом реакционного импульсного магнетронного распыления

А. Д. Чертова¹, А. В. Леванов², Б. Б. Мешков³,Е. А. Левашов¹, Ф. В. Кирюханцев-Корнеев¹ ¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Россия, 119991, г. Москва, Ломоносовский пр-т, 27, к. 4

³ АО «Научно-исследовательский институт технического стекла им. В. Ф. Солинова»

Россия, 117218, г. Москва, ул. Кржижановского, 29, к. 5

kiruhancev-korneev@yandex.ru

Аннотация. Покрытия ZrBN были получены методом реакционного импульсного магнетронного распыления с использованием мишени ZrB₂ при варьировании длительности импульса. Состав и структуру покрытий исследовали методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда и спектроскопии комбинационного рассеяния света, а также рентгенофазового анализа. Оптические свойства изучали методом спектрофотометрии. Эрозионную стойкость определяли при лазерном воздействии. Покрытия ZrBN были аморфными и характеризовались плотной бездефектной структурой и равномерным распределением элементов по толщине. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, покрытия содержали связи B–N и Zr–N. Покрытия характеризовались высоким оптическим коэффициентом пропускания 70–90 % в диапазоне длин волн 450–1300 нм. Коэффициент отражения покрытий составлял 9–26 %. Значение показателя преломления повышалось от 1,7 до 3,0 при увеличении длины волны от 200 до 1200 нм. Эрозионные испытания показали, что подложка из стекла хрупко разрушается при воздействии лазера мощностью 20–60 Вт. Все покрытия успешно защищают стеклянную подложку от эрозионного износа: ширина и глубина зоны эрозии стеклянной подложки уменьшаются в 1,3 и 4,5 раза соответственно. Покрытие, полученное при оптимальной длительности импульса, обладает лучшей эрозионной стойкостью, что может быть обусловлено его более высокой адгезионной прочностью.

Ключевые слова: импульсное магнетронное распыление, аморфные покрытия, ZrBN, оптические свойства, эрозионная стойкость

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-13-00085).

Для цитирования: Чертова А.Д., Леванов А.В., Мешков Б.Б., Левашов Е.А., Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Исследование эрозионной стойкости защитных покрытий ZrBN, осажденных методом реакционного импульсного магнетронного распыления. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(5):37–43.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-37-43>

Erosion resistance of ZrBN protective coatings deposited by reactive pulsed magnetron sputtering

A. D. Chertova¹, A. V. Levanov², B. B. Meshkov³,
E. A. Levashov¹, Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev¹ 

¹ National University of Science and Technology “MISIS”

1 Bld, 4 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

² M.V. Lomonosov Moscow State University

4 Bld, 27 Lomonosovskiy Prosp., Moscow 119991, Russia

³ JSC “Research Institute of Technical Glass n.a. V.F. Solinov”

5 Bld, 29 Krzhizhanovskiy Str., Moscow 117218, Russia

 kiruhancev-korneev@yandex.ru

Abstract. ZrBN coatings were deposited by reactive pulsed magnetron sputtering using a ZrB₂ target while varying the pulse duration. The composition and structure of the coatings were studied using scanning and transmission electron microscopy, energy dispersive, optical emission and glow discharge Raman spectroscopy, as well as X-ray diffraction. Optical properties were studied by spectrophotometry. Erosion resistance was determined under laser exposure. All coatings were amorphous, had a dense, defect-free structure and a uniform distribution of elements throughout the thickness. According to Raman spectroscopy, the coatings contain B–N and Zr–N bonds. The coatings were characterized by high optical transmittance of 70–90 % in the wavelength range 450–1300 nm. The reflectivity of coatings was 9–26 %. The refractive index value increases from 1.7 to 3.0 as the wavelength increases from 200 to 1200 nm. The glass substrate is fragile destroyed during erosion at a power of 20–60 W. All coatings successfully protect the glass substrate from erosive wear: the application of ZrBN coatings leads to a reduction in the width and depth of the erosion zone of the glass substrate by 1.3 and 4.5 times, respectively. The coating obtained at the optimal pulse duration has better erosion resistance, which may be due to its higher adhesive strength.

Keywords: pulsed magnetron sputtering, ZrBN, amorphous films, optical properties, erosion resistance

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-13-00085).

For citation: Chertova A.D., Levanov A.V., Meshkov B.B., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. Erosion resistance of ZrBN protective coatings deposited by reactive pulsed magnetron sputtering. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(5):37–43. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-37-43>

Введение

Одной из актуальных проблем при эксплуатации элементов оптической техники (линзы, призмы, зеркала, интерферометры и т.д.) является износ в результате эрозионного воздействия, что оказывает сильное влияние на их срок службы. Поэтому важным направлением при разработке новых устройств точной оптики можно считать разработку оптических покрытий [1]. Оптические покрытия должны обладать не только высоким коэффициентом пропускания, хорошей отражательной способностью, но и повышенной эрозионной стойкостью [2].

Для защиты деталей оптических устройств, подверженных износу, наиболее часто применяются оксидные покрытия ZrO₂, Ta₂O₅ и др., обладающие достаточно широкой прозрачной областью спектра и высокими показателями преломления [3; 4]. Однако оксидные покрытия обладают низкой твердостью, ГПа: 7 (Nb₂O₅) [5], 8 (TiO₂) [6], 10 (SiO₂) [7] и 13 (In₂O₃) [8], а также имеют плохую стойкость к образованию царапин и характеризуются структурой с повышенной дефектностью, что оказывает негативное влияние

на износостойкость [9]. В последнее время все большее внимание уделяется исследованию нитридов переходных металлов – таких, как Ti, Zr, Cr, Nb, Mo, Ta и т.д., которые обладают удовлетворительными оптическими свойствами в комбинации с хорошей износостойкостью [10]. Сравнительное исследование твердых покрытий TiN и TiAlN показало, что легирование алюминием способствует росту износостойкости в условиях теплового воздействия [11]. Среди TiN, HfN и ZrN покрытие из нитрида циркония обладает более высокими оптическими характеристиками [12]. Введение бора в состав покрытий ZrN позволяет повысить твердость и износостойкость, а также улучшить оптические характеристики покрытий.

Ранее нами были разработаны износостойкие покрытия ZrBN с высокой термической стабильностью и высоким оптическим коэффициентом пропускания (до 90 %) [13], что было связано с высокой объемной долей фазы BN. Установлены закономерности влияния частоты и длительности импульсов при осаждении покрытий ZrBN методом импульсного магнетронного распыления (PMS) на их структуру, оптические свойства, твердость, упруго-пла-

стические характеристики, износостойкость в условиях трения–скольжения и абразивного воздействия [14; 15]. Защитные свойства покрытий ZrBN в условиях эрозионного воздействия требуют дополнительного изучения. Важно отметить, что покрытие ZrBN является хорошей модельной композицией, на базе которой могут быть разработаны в дальнейшем более сложные многокомпонентные структуры на основе перспективной гетерофазной керамики [16].

Целью настоящей работы являлось исследование структуры, оптических характеристик и стойкости к эрозионному воздействию покрытий ZrBN, полученных методом PMS.

Материалы и методы исследований

Покрытия Zr–B–N были нанесены методом реакционного импульсного магнетронного распыления (PMS) с использованием мишени ZrB₂. Для осаждения покрытий применялась установка на базе откачивающей системы УВН-2М, принципиальная схема которой представлена в работе [17]. В качестве рабочей газовой среды использовался азот (99,999 %), давление которого составляло 0,1–0,2 Па.

Электропитание магнетрона осуществлялось с помощью блока «Pinnacle Plus 5×5» (Advanced Energy, USA). Его мощность составляла 1 кВт, сила тока и напряжение находились на уровне 2 А и 400–500 В соответственно, частота была равна 350 кГц, а длительность импульсов составляла, мкс: 0,4 (покрытие 1), 0,7 (покрытие 2) и 1,1 (покрытие 3). Распыление проводилось в течение 40 мин.

В качестве подложек применялись пластины из бесцветного оптического стекла К8. Перед нанесением покрытий подложки подвергались очистке в ультразвуковой установке в течение 5 мин в среде изопропилового спирта. Ионная очистка подложек проводилась потоком ионов Ar⁺ с использованием ионного источника щелевого типа при ускоряющем напряжении 2,5 кВ в течение 20 мин. Время осаждения покрытий составляло 40 мин.

Структурные исследования покрытий выполняли с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на микроскопе «Hitachi S-3400N», оснащенный прибором «NORAN 7 Thermo», просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа JEM-2100 (Jeol), а также оптической спектроскопии тлеющего разряда (ОЭСТР) на установке PROFILER-2 (Horiba Jobin Yvon) [18]. Ламели покрытий для ПЭМ-исследований были подготовлены методом ионного травления на высокоточной двухлучевой ионно-травящей установке PIPS II (Gatan Inc., США). Спектры комбинационного рассеяния света были получены с помощью

прибора «LabRam HR800» (Horiba JY), оснащенного источником зеленого (514 нм) лазерного луча. Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществляли в CuK_α-излучении ($\lambda = 0,154$ нм) на дифрактометре «Phaser D2» (Bruker). Оптические характеристики определялись в диапазоне длин волн 380–1300 нм с помощью спектрофотометра «Photon-RT».

Исследование стойкости покрытий к эрозионному воздействию проводилось на лабораторной установке «LaserPRO Spirit». Мощность CO₂-лазера устанавливалась на уровне 20, 40 и 60 Вт. Отрезок и время воздействия составляли 10 мм и 2 с соответственно. Дорожки были исследованы с помощью оптического микроскопа «Axiovert 25» (Carl Zeiss) и оптического профилометра «WYKO-NT1100 Veeco».

Результаты и их обсуждение

Все элементы в покрытиях были равномерно распределены по глубине, уровень примесей (С и О) находился в пределах 0,7–1,8 ат. %. Все покрытия, независимо от длительности импульсов, имели близкий элементный состав, ат. %: 14 ± 2 Zr, 46 ± 2 В, 40 ± 2 N. Толщина и скорость роста покрытий составляли 1,3–1,5 мкм и 32–39 нм/мин соответственно. Покрытия Zr–B–N обладали плотной однородной структурой без выраженных столбчатых элементов, характерных для азотсодержащих ионно-плазменных покрытий [19].

На рис. 1 представлены типичные электронограмма и светлопольное изображение структуры, рентгенограмма и спектр комбинационного рассеяния света для покрытия 2.

На электронограммах (рис. 1, а) наблюдалось широкое кольцо, что свидетельствует о наличии аморфной фазы. На рентгенограмме (рис. 1, б) отмечено гало в диапазоне $2\theta = 20 \div 40^\circ$, что также подтверждает аморфное состояние покрытий. Для уточнения фазового состава покрытий использовалась спектроскопия комбинационного рассеяния света (рис. 1, в). На спектре присутствуют выраженные пики в положениях 1360 и 1490 см⁻¹, которые можно отнести к фазе BN [20]. В диапазоне длин волн $\lambda = 600 \div 1200$ см⁻¹ наблюдаются пики, соответствующие фазе ZrN [21].

На рис. 2, а, б представлены спектрально-угловые зависимости коэффициентов пропускания (T) и отражения (R) от длины волны (λ) для покрытия 2. Спектры T и R имеют колебательный характер, что связано с эффектом интерференции. Покрытия ZrBN характеризовались показателем $T = 70 \div 87$ % в диапазоне длин волн 450–1300 нм (рис. 2, а). При этом значения R находились в пределах 9–26 % в зависимости от длины волны. Стоит отметить, что коэффициент пропускания покрытий ZrBN сравним с его значениями для традиционных оксидных покрытий Zr–O,

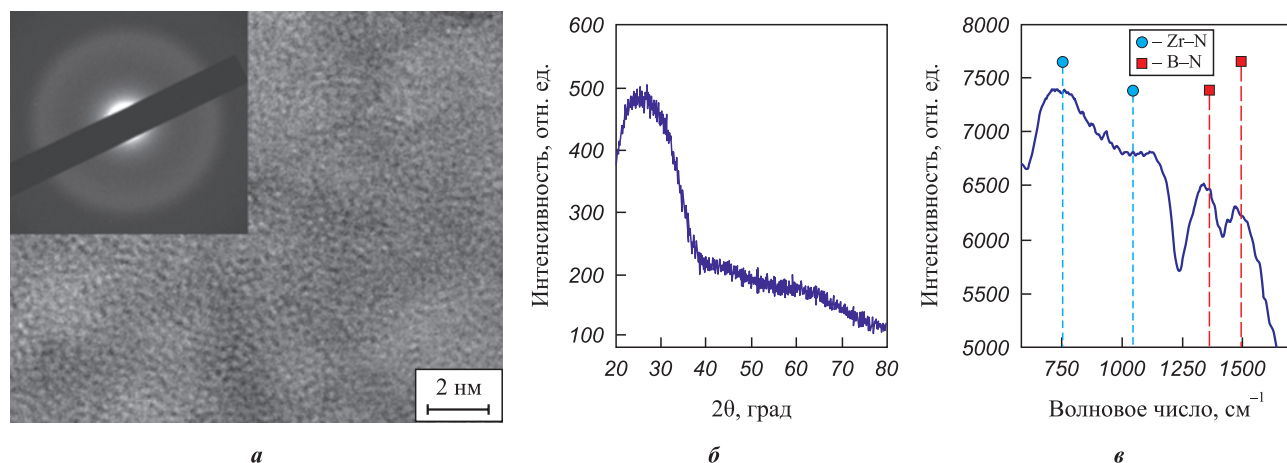


Рис. 1. Светлопольное изображение структуры и электронограмма (а), рентгенограмма (б) и спектр комбинационного рассеяния света (в) для покрытия 2

Fig. 1. BF TEM image, SAED (a), XRD pattern (б), and Raman spectra (в) for coating 2

Zr–Al–O и нитридных цирконийсодержащих покрытий ZrSiN ($T = 70 \div 90$ %) [22; 23].

Интерференционный характер кривых пропускания и отражения позволил определить дисперсионные зависимости показателя преломления (n) (рис. 2, в). По мере увеличения длины волны от 400 до 900 нм показатель преломления постепенно снижался с 2,29 до 2,06, что указывает на сильное поглощение видимого света за счет свободных электронов и более слабое поглощение инфракрасного излучения. Можно отметить, что покрытия ZrN характеризуются более слабым поглощением видимого света: значение показателя преломления возрастает с 1,7 до 3,0 при увеличении длины волны от 200 до 1200 нм [19].

СЭМ-изображения поверхности образцов непокрытой подложки и покрытий 1–3 после эрозионного воздействия мощностью 20 Вт представлены на рис. 3, а. Ширина дорожки для непокрытой подложки составляла 222 мкм. Нанесение покрытий 1, 2 и 3 привело к снижению ширины дорожки на 5, 7 и 21 % соответственно. При увеличении мощности до 40 и 60 Вт (рис. 3, б, в) на поверхности подложки

наблюдалось образование трещин и сколов по границе дорожек, в то время как для покрытий, испытанных в аналогичных условиях, трещины и отслоения отсутствовали. Минимальной шириной дорожки 222 и 237 мкм при мощностях 40 и 60 Вт характеризовалось покрытие 3, при этом для подложки фиксировались значения 292 и 296 мкм (рис. 3).

Таким образом, за счет осаждения покрытия 3 ширина дорожки снизилась в 1,3 раза по сравнению с подложкой из стекла.

Дорожки после эрозионного воздействия также были исследованы методом оптической профилометрии. Наиболее яркие результаты представлены на рис. 4. Из двухмерных профилей видно, что непокрытая подложка из стекла разрушается неравномерно. Более интенсивное разрушение материала происходит в заключительный момент сканирования (рис. 4, а, область отмечена стрелкой). Данный эффект может быть обусловлен повышенной хрупкостью, низкими термостойкостью и теплопроводностью стеклянной подложки. Максимальная глубина в центральной части дорожки составляла ~9 мкм (рис. 4, а).

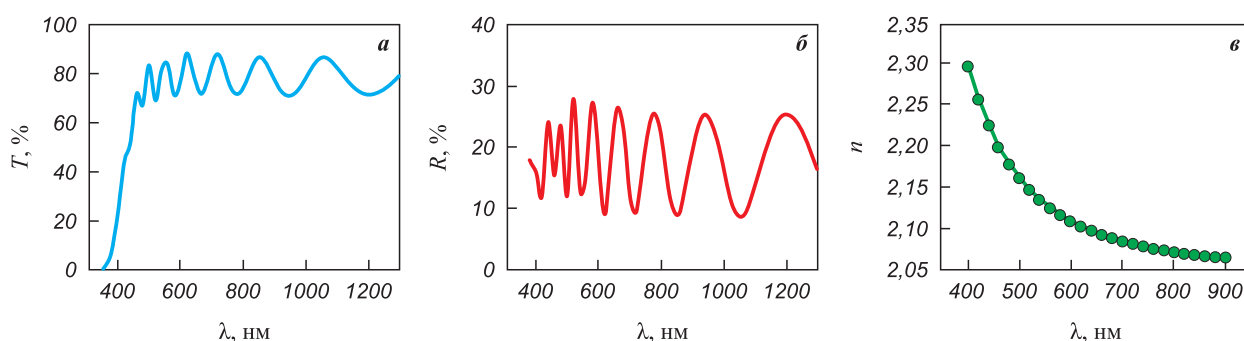


Рис. 2. Коэффициенты оптического пропускания (а) и отражения (б), показатель преломления (в) для покрытия 2

Fig. 2. Transmittance (a), reflection (б), and the refractive index (в) of coating 2

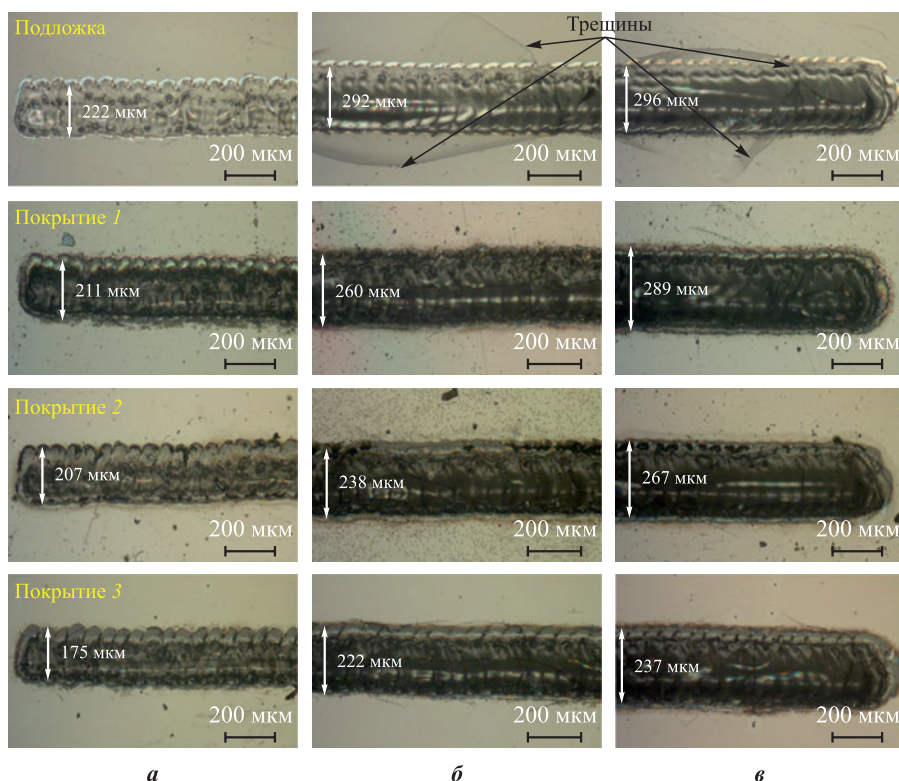


Рис. 3. СЭМ-изображения дорожек после эрозионных испытаний для непокрытой подложки и покрытий ZrBN 1, 2, 3 при мощности эрозионного воздействия 20 (а), 40 (б) и 60 (в) Вт

Fig. 3. SEM-images of tracks after erosion test for uncoated substrate and ZrBN coatings 1, 2, 3 for 20 (a), 40 (б) and 60 (в) W

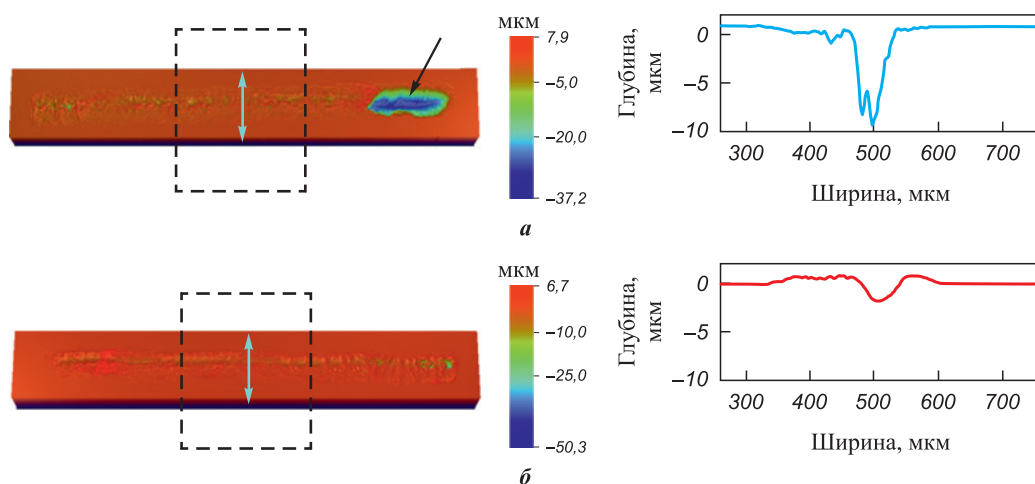


Fig. 4. 3D и 2D-профили дорожек после эрозионных испытаний для непокрытой подложки (а) и покрытия 3 (б)

Fig. 4. 3D and 2D track profiles after erosion test for uncoated substrate (a) and coating 3 (б)

Для покрытий ZrBN, на примере образца 3 (рис. 4, б), хрупкого разрушения не наблюдалось, дорожка была равномерной.

Максимальная глубина по центру дорожки для всех покрытий составляла около 2 мкм, что в 4,5 раза ниже данных, полученных для непокрытой подложки из стекла.

Таким образом, все покрытия успешно защищают стеклянную подложку от эрозионного воздействия.

Наилучшей стойкостью обладает покрытие 3, что может быть связано с его более высокими трещиностойкостью и адгезионной прочностью [15].

Заключение

Методом импульсного магнетронного распыления при варьировании длительности импульсов были получены аморфные покрытия ZrBN тол-

щиной 1,3–1,5 мкм. Покрытия характеризовались плотной однородной структурой. Коэффициенты пропускания и отражения в диапазоне длин волн 450–1300 нм составили 70–87 % и 9–26 % соответственно. Показатель преломления находился в интервале от 2,29 до 2,06 в диапазоне $\lambda = 400\div 900$ нм. Эксперименты по определению эрозионной стойкости показали, что подложка из стекла растрескивается и интенсивно разрушается в процессе эксперимента. Нанесение покрытий ZrBN препятствует растрескиванию подложки, а также снижает ширину и глубину зоны эрозии в 1,3 и 4,5 раза соответственно.

Список литературы / References

1. Hu C., Guo K., Li Y., Gu Z., Quan J., Zhang S., Zheng W. Optical coatings of durability based on transition metal nitrides. *Thin Solid Films*. 2019;688:137339. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.05.058>
2. Mishra S.K., Kumar V., Tiwari S.K., Mishra T., Angula G., Adhikari S. Development and degradation behavior of protective multilayer coatings for aluminum reflectors for solar thermal applications. *Thin Solid Films*. 2016;619:202–207. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.10.067>
3. Zhu Y., Ma M., Zhang P., Cai W., Li D., Xu C. Preparation of sol-gel ZrO₂ films with high laser-induced damage threshold under high temperature. *Optics Express*. 2019;27(26):37568–37578. <https://doi.org/10.1364/OE.27.037568>
4. Zhang P., Lin D., Zhu Y., Cai W., Li D., Xu C. In-situ high temperature laser-induced damage of sol-gel Ta₂O₅ films with different dual additives. *Thin Solid Films*. 2020;693:137723. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137723>
5. Mazur M., Szymańska M., Kaczmarek D., Kalisz M., Wojcieszak D., Domaradzki J., Placido F. Determination of optical and mechanical properties of Nb₂O₅ thin films for solar cells application. *Applied Surface Science*. 2014;301:63–69. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.144>
6. Krishna D.S.R., Sun Y., Chen Z. Magnetron sputtered TiO₂ films on a stainless steel substrate: selective rutile phase formation and its tribological and anti-corrosion performance. *Thin Solid Films*. 2011;519(15):4860–4864. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.042>
7. Mazur M., Wojcieszak D., Kaczmarek D., Domaradzki J., Song S., Gibson D., Placido F., Mazur P., Kalisz M., Poniedzialek A. Functional photocatalytically active and scratch resistant antireflective coating based on TiO₂ and SiO₂. *Applied Surface Science*. 2016;380:165–171. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.226>
8. Yang L., Zhu J., Bai J., Zhu Y., Dai B., Yu H., Jia Z., Han J. Plasma exposure inducing crystallization of indium oxide film with improved electrical and mechanical properties at room temperature. *Journal of Materials Science*. 2014;49:5955–5960. <https://doi.org/10.1007/S10853-014-8314-0>
9. Fryauf D.M., Phillips A.C., Kobayashi N.P. Corrosion barriers for silver-based telescope mirrors: comparative study of plasma-enhanced atomic layer deposition and reactive evaporation of aluminum oxide. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. 2015;1(4):044002. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.4.044002>
10. Gaković B.M., Trtica M., Nenadović T., Gredić T. Transversely excited atmospheric CO₂ laser-induced damage of TiN and (Ti,Al)N coatings. *Applied Surface Science*. 1999;143(1-4):78–84. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00903-9](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00903-9)
11. Jafari M., Rogström L., Andersson J.M., Birch J., Gibmeier J., Jösaar M.J., Kiefer D., Odén M. Thermal degradation of TiN and TiAlN coatings during rapid laser treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2021;422:127517. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127517>
12. Patsalas P. Zirconium nitride: A viable candidate for photonics and plasmonics? *Thin Solid Films*. 2019;688:137438. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137438>
13. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Sytchenko A.D., Kozlova N.S., Zabelina E.V., Skryleva E.A., Kaplansky Y.Y., Vakhrushev R.A., Levashov E.A. Structure and properties of protective amorphous ZrBN coating. *Surface and Coatings Technology*. 2022;448:128849. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128849>
14. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Levashov E.A. Transparency effect in Zr–B–N coatings obtained by magnetron sputtering of ZrB₂ target. *Technical Physics Letters*. 2020;46(2):179–181. <https://doi.org/10.1134/S1063785020020224>
15. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Sytchenko A.D., Levashov E.A. The effect of pulse duration on the structure and mechanical, tribotechnical, and optical characteristics of Zr–B–N coatings obtained by the PMS method. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021;57(6):1222–1230. <https://doi.org/10.1134/S2070205121060125>
16. Houska J., Steidl P., Vlcek J., Martan J. Thermal, mechanical and electrical properties of hard B₄C, BCN, ZrBC and ZrBCN ceramics. *Ceramics International*. 2016;42(3):4361–4369. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.115>
17. Kiryukhantsev-Korneev P.V., Sytchenko A.D., Sviridova T.A., Sidorenko D.A., Andreev N.V., Klechkovskaya V.V., Polčák J., Levashov E.A., Effects of doping with Zr and Hf on the structure and properties of Mo–Si–B coatings obtained by magnetron sputtering of composite targets. *Surface and Coatings Technology*. 2022;442:128141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128141>
18. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Анализ элементного состава покрытий с использованием высокочастотной оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012;48(5):488–494.
Kiryukhantsev-Korneev P.V. Elemental analysis of coatings by high-frequency glow discharge optical emission spectroscopy. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2012;48(5):585–590. <https://doi.org/10.1134/S207020511205005X>

19. Pilloud D., Dehlinger A.S., Pierson J.F., Roman A., Pichon L. Reactively sputtered zirconium nitride coatings: structural, mechanical, optical and electrical characteristics. *Surface and Coatings Technology*. 2003; 174–175:338–344.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00613-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00613-3)
20. Chang J., Zhang H., Cao J. Ultrahigh sensitive and selective triethylamine sensor based on h-BN modified MoO₃ nanowires. *Advanced Powder Technology*. 2022;33(2): 103432. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103432>
21. Rizzo A., Valerini D., Capodieci L., Mirengi L., Di Benedetto F., Protopapa M.L. Reactive bipolar pulsed dual magnetron sputtering of ZrN films: the effect of duty cycle. *Applied Surface Science*. 2018;427(A):994–1002.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.032>
22. Musil J., Sklenka J., Cerstvy R. Transparent Zr–Al–O oxide coatings with enhanced resistance to cracking. *Surface and Coatings Technology*. 2012;206(8-9):2105–2109.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.09.035>
23. Pilloud D. Influence of the silicon concentration on the optical and electrical properties of reactively sputtered Zr–Si–N nanocomposite coatings. *Materials Science and Engineering: B*. 2006;131(1-3):36–39.
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.03.017>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Алина Дмитриевна Чертова – к.т.н, мл. науч. сотрудник лаборатории «*In situ* диагностика структурных превращений» Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСИС–ИСМАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)

 **ORCID:** 0000-0002-8668-5877

 **E-mail:** alina-sytchenko@yandex.ru

Александр Владимирович Леванов – к.х.н, доцент химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

 **ORCID:** 0000-0003-1529-717X

 **E-mail:** chem.alexander@yandex.ru

Борис Борисович Мешков – к.т.н, начальник лаборатории оптических покрытий АО «Научно-исследовательский институт технического стекла им. В. Ф. Солинова»

 **E-mail:** meshkov-bb@yandex.ru

Евгений Александрович Левашов – д.т.н, проф., акад. РАЕН, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП) НИТУ МИСИС, директор НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН

 **ORCID:** 0000-0002-0623-0013

 **E-mail:** levashov@shs.misis.ru

Филипп Владимирович Кирюханцев-Корнеев – д.т.н, профессор кафедры ПМиФП НИТУ МИСИС, зав. лабораторией «*In situ* диагностика структурных превращений» НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН

 **ORCID:** 0000-0003-1635-4746

 **E-mail:** kiruhancev-korneev@yandex.ru

Alina D. Chertova – Cand. Sci. (Eng.), Junior Research Scientist of the Laboratory “*In situ* Diagnostics of Structural Transformations” of Scientific-Educational Center of Self-Propagating High-Temperature Synthesis (SHS-Center) MISIS–ISMAN, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”)

 **ORCID:** 0000-0002-8668-5877

 **E-mail:** alina-sytchenko@yandex.ru

Alexander V. Levanov – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Chemistry, M.V. Lomonosov Moscow State University

 **ORCID:** 0000-0003-1529-717X

 **E-mail:** chem.alexander@yandex.ru

Boris B. Meshkov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Optical Coatings Laboratory, JSC “Research Institute of Technical Glass n. a. V. F. Solinov”

 **E-mail:** meshkov-bb@yandex.ru

Evgeniy A. Levashov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Acad. of the Russian Academy of Natural Science, Head of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings (PM&FC) NUST “MISIS”, Director of SHS-Center of MISIS–ISMAN

 **ORCID:** 0000-0002-0623-0013

 **E-mail:** levashov@shs.misis.ru

Philipp V. Kiryukhantsev-Korneev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of PM&FC of NUST “MISIS”, Head of the Laboratory “*In situ* Diagnostics of Structural Transformations” of SHS-Center of MISIS–ISMAN

 **ORCID:** 0000-0003-1635-4746

 **E-mail:** kiruhancev-korneev@yandex.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. Д. Чертова – проведение структурных исследований, анализ результатов исследований, подготовка текста статьи.

А. В. Леванов – проведение исследований методом комбинационного рассеяния света.

Б. Б. Мешков – исследование оптических свойств.

Е. А. Левашов – постановка цели, корректировка текста статьи, формулировка выводов.

Ф. В. Кирюханцев-Корнеев – нанесение покрытий методом магнетронного распыления, корректировка текста, обсуждение результатов, общее руководство.

A. D. Chertova – conducting structural studies, analysis of research results, preparation of the text, formulation of conclusions.

A. V. Levanov – Raman study.

B. B. Meshkov – study of optical properties.

E. A. Levashov – tasks establishing, correction of manuscript and conclusions.

Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev – coating deposition by magnetron sputtering, correction of manuscript, discussion of the results, general management.

Статья поступила 05.09.2024 г.
Доработана 24.09.2024 г.
Принята к публикации 26.09.2024 г.

Received 05.09.2024
Revised 24.09.2024
Accepted 26.09.2024