

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25, № 2. С. 154—163.
DOI: 10.17073/1609-3577-2022-2-154-163

УДК 621.315:535.241.6

Возможности многоугловой спектrophотометрии для определения параметров пленок на однослойных структурах

© 2022 г. Н. С. Козлова✉, Е. А. Левашов, Ф. В. Кирюханцев–Корнеев,
А. Д. Сытченко, Е. В. Забелина

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: kozlova_nina@mail.ru

Аннотация. Методом магнетронного распыления постоянного тока изготовлены однослойные пленки Ta—Si—C—N на подложках из плавленого кварца. Структурное совершенство пленок исследовано методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда. Оптические параметры пленок определены методом многоугловой спектrophотометрии. Получены спектральные зависимости коэффициентов пропускания подложек и структур при нормальном падении света в диапазоне длин волн 200—2500 нм. Показано, что спектр коэффициентов пропускания образца имеет осциллирующий характер, который обусловлен интерференционными явлениями, характерными для слоистых структур.

Измерены спектральные зависимости коэффициентов отражения пленок и подложек в диапазоне длин волн 200—2500 нм при малых углах падения света. По величине разницы между коэффициентом отражения в максимуме интерференции пленки и соответствующим коэффициентом отражения подложки при этой же длине волны показано, что поглощение в пленке мало. Получена формула для определения коэффициента поглощения пленки по измеренным параметрам. На основании экспериментальных и расчетных данных построены спектральные зависимости коэффициентов поглощения подложки, структуры и пленки. Методом отражения при двух углах падения, основанном на определении положения интерференционных экстремумов на спектральных зависимостях коэффициентов отражения, рассчитаны дискретные значения коэффициентов преломления в диапазоне длин волн 400—1200 нм. Полученные величины аппроксимированы уравнением Коши. Рассчитана толщина пленки, которая составила $d_{пл.} = 1046 \text{ нм} \pm 13 \%$. Построены спектральные зависимости показателей ослабления пленки с учетом и без учета отражения. Представлена сводная таблица с полученными значениями коэффициентов преломления и показателей поглощения с учетом и без учета отражения.

Ключевые слова: многоугловые методы спектrophотометрии, спектральный коэффициент пропускания, спектральный коэффициент отражения, показатель поглощения, коэффициент преломления

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке госзадания FSME–2020–0031 (0718–2020–0031). Измерения проведены в МУИЛ Полупроводниковых материалов и диэлектриков «Монокристаллы и заготовки на их основе» (ИЛМЗ) НИТУ «МИСиС».

Для цитирования: Козлова Н.С., Левашов Е.А., Кирюханцев–Корнеев Ф.В., Сытченко А.Д., Забелина Е.В. Возможности многоугловой спектрофотометрии для определения параметров пленок на однослойных структурах. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2022; 25(2): 154–163. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-154-163>

The possibilities of multi–angle spectrophotometry for determining the parameters of films on single–layer structures

N. S. Kozlova✉, E. A. Levashov, Ph. V. Kiryukhantsev–Korneev,
A. D. Sytchenko, E. V. Zabelina

*National University of Science and Technology MISiS,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: kozlova_nina@mail.ru*

Abstract. Single–layer Ta–Si–C–N films on fused quartz substrates were made by direct current magnetron sputtering. The structural perfection of the film was investigated by X–ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and optical emission spectroscopy of glow discharge. The optical parameters of the films were determined by the method of multi–angle spectrophotometry. Spectral dependences of the transmission coefficients of substrates and structures at normal light incidence in the wavelength range of 200–2500 nm are obtained. It is shown that the transmission spectrum of the sample has an oscillating character, which is caused by interference phenomena characteristic of layered structures. Spectral dependences of the reflection coefficients of films and substrates in the wavelength range of 200–2500 nm at small angles of incidence of light are obtained. By the magnitude of the difference between the reflection coefficient at the maximum of the interference of the film and the corresponding reflection coefficient of the substrate at the same wavelength, it is shown that the absorption in the film is low. A formula is obtained for determining the absorption coefficient of a film from the measured parameters. Based on the experimental data obtained, spectral dependences of the absorption coefficients of the substrate, structure and film are constructed. The method of reflection at two angles of incidence, based on the determination of the position of the interference extremes on the spectral dependences of the reflection coefficients, calculated discrete values of the refractive coefficients in the wavelength range 400–1200 nm. The obtained values are approximated by the Cauchy equation. The film thickness was calculated, which was $d = 1046 \text{ nm} \pm 13\%$. Spectral dependences of the film attenuation indices with and without reflection are constructed. A summary table is presented with the obtained values of the refractive coefficients and absorption indices with and without reflection.

Keywords: multi–angle spectrophotometry methods, spectral transmission coefficient, spectral reflection coefficient, absorption index, refractive index

Acknowledgments. The studies were carried out with financial support within State Assignment FSME–2020–0031 (0718–2020–0031) at the Accredited Test Laboratory of Single Crystals and Stock on their Base of National University of Science and Technology MISiS.

For citation: Kozlova N.S., Levashov E.A., Kiryukhantsev–Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., Zabelina E.V. The possibilities of multi–angle spectrophotometry for determining the parameters of films on single–layer structures. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering.* 2022; 25(2): 154–163. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-154-163>

© 2022 National University of Science and Technology MISiS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Введение

В настоящее время прозрачные тонкие пленки оксидов широко используются для создания структур в устройствах нано- и микроэлектроники, оптоэлектроники, акустоэлектроники, сверхвысокочастотной электроники, а также солнечных элементов, оптических и защитных покрытий в авиации, космонавтике и др. [1—6].

Основными физическими параметрами, характеризующими пленки и определяющими возможность их использования для конкретных применений, являются [1, 2, 7—15]: коэффициент преломления ($n_{\text{пл.}}$), толщина ($d_{\text{пл.}}$) и поглощение пленки, которое выражается в виде показателя поглощения ($\alpha_{\text{пл.}}$, см^{-1}) [16, 17] или коэффициента экстинкции $k_{\text{пл.}}$ [16, 18—20], связанных между собой следующим соотношением:

$$\alpha_{\text{пл.}}(\lambda) = -\frac{\ln(T_{\text{пл.}}(\lambda))}{d_{\text{пл.}}} = \frac{k_{\text{пл.}}(\lambda)4\pi n_{\text{пл.}}}{\lambda}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пл.}}$ — спектральный коэффициент пропускания пленки, %; λ — длина волны света, нм.

Точный контроль этих параметров является критически важным для установления соответствия полученных пленок заданным оптическим характеристикам конечных изделий [4]. Это является особенно сложным в тех случаях, когда пленку невозможно отделить от подложки [5]. Кроме того, подобные измерения надо проводить, не нарушая целостность пленки [2], что обуславливает необходимость разработки надежных, быстрых, простых и неразрушающих методов определения параметров тонких пленок.

Для оценки толщины пленки используют методы интерферометрии, профилометрии, электронную и атомно-силовую микроскопию [1]. Для определения толщины и коэффициента преломления применяют неразрушающие методы спектрофотометрии. Известно [1, 4, 6, 13—15, 22—24], что и коэффициент преломления, и толщины пленок могут быть получены путем анализа максимумов и минимумов на спектральных зависимостях коэффициента пропускания (T , %) или отражения (R , %) света, обусловленных его интерференцией в плоскопараллельном слое (пленке). Однако определение поглощения в пленках является более сложной задачей. Так, в работе [5] для определения коэффициента экстинкции в пленках предложен метод решения обратных задач, а в работе [8] — метод возбуждения волноводных мод.

Цель работы — развитие неразрушающих методов многоугловой спектрофотометрии для определения оптических характеристик и толщины пленки в однослойных структурах пленка—подложка.

Образцы и методы исследования

Мишень для распыления состава TaSi_2 — 30 % SiC изготавливали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Магнетронное распыление мишени проводили в режиме постоянного тока в среде N_2 (99,9995 %) на установке УВН-2М [25] при следующих параметрах: ток 2 А, напряжение 500 В, остаточное и рабочее давление 0,005 и 0,2 Па соответственно. Источник питания Pinnacle Plus (Advanced Energy, США) поддерживал мощность магнетрона на уровне 1 кВт. Покрытия осаждали в течение 15 мин. В качестве подложек использовали пластины из кварца. Перед нанесением покрытий подложки подвергали ультразвуковой очистке в изопропиловом спирте в течение 5 мин на установке УЗДН-2Т. Дополнительную очистку ионами Ar^+ проводили непосредственно в вакуумной камере в течение 2 мин. Микроструктуру и элементный состав покрытий оценивали методом растровой электронной микроскопии (**РЭМ**) на микроскопе Hitachi S-3400 с энергодисперсионным спектрометром (**ЭДС**) Noran 7 Thermo. Профили распределения элементов получали с помощью оптического эмиссионного спектрометра тлеющего разряда (**ОЭСТР**) Profiler-2 HORIBA-JY. Дифрактометр D2 Phaser Bruker с CuK_α излучением использовали для рентгеноструктурного анализа (**РФА**).

Измерения спектрально-угловых зависимостей коэффициентов пропускания и отражения проводили в аккредитованной испытательной лаборатории «Монокристаллы и заготовки на их основе» НИТУ «МИСиС» на спектрофотометре Cary 5000 фирмы Agilent Technologies с автоматической универсальной измерительной приставкой UMA (Universal Measurement Accessory). В приставке UMA реализована схема, состоящая из неподвижного источника света, предметного столика, вращающегося на 360° , и независимого детектора, который перемещается вокруг предметного столика в горизонтальной плоскости в диапазоне углов от 10° до 350° . Эта приставка позволяет получать спектрально-угловые зависимости пропускания и отражения света в диапазоне длин волн 200—2500 нм с минимальным шагом $0,02^\circ$.

Результаты и их обсуждение

Исследованные образцы можно представить в виде модели однослойной структуры: однородная пленка толщиной $d_{\text{пл.}}$ с коэффициентом преломления $n_{\text{пл.}}$ и показателем поглощения $\alpha_{\text{пл.}}$ нанесена на однородную подложку толщиной $d_{\text{подл.}}$ с коэффициентом преломления $n_{\text{подл.}}$ и показателем поглощения $\alpha_{\text{подл.}}$. Схематичное изображение описанной структуры представлено на рис. 1. Луч света рас-

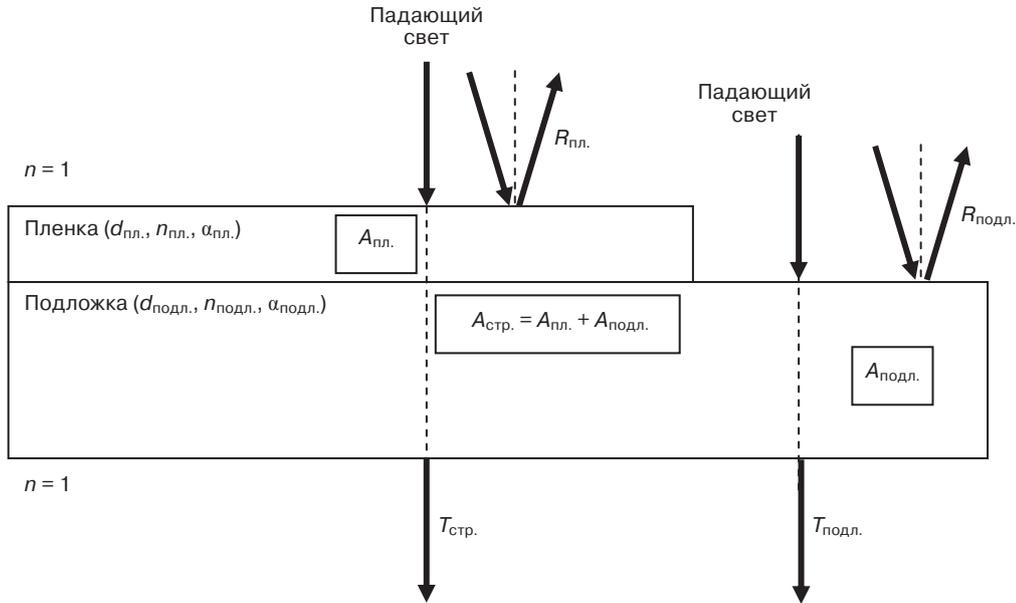


Рис. 1. Модель однослойной структуры (пленка на подложке) и схема взаимодействия с ней света
 Fig. 1. Model of a single layer structure (film on substrate) and light interaction schematic

пространяется из внешней непоглощающей среды (воздух) с коэффициентом преломления $n = 1$.

В общем виде энергетические процессы взаимодействия структуры пленка—подложка с падающим светом можно описать следующим уравнением [16, 18, 26, 27]:

$$\Phi_0 = \Phi_T + \Phi_A + \Phi_S + \Phi_R, \quad (2)$$

где Φ_0 — поток излучения, падающий на образец; Φ_T — поток излучения, прошедшего через образец; Φ_A — поток излучения, поглощенный образцом; Φ_S — поток излучения, рассеянный образцом; Φ_R — поток излучения, отразившийся от образца.

В нашем случае величиной рассеяния можно пренебречь в силу ее малости и с учетом формы системы. Тогда формулу (2) можно переписать в виде

$$\Phi_0 = \Phi_T + \Phi_A + \Phi_R, \quad (3)$$

Все эти параметры характеризуют процесс взаимодействия материала с падающим светом, а не свойство самого материала. Выразив эти величины через интенсивности, перейдем к параметрам материала:

$$1 = T + A + R \quad (4)$$

где T, A, R — спектральные коэффициенты пропускания, поглощения и отражения.

Спектральные зависимости пропускания типичной структуры $T_{стр.}$ и подложки из плавленного кварца $T_{подл.}$ при нормальном падении света представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что спектр коэффициентов пропускания образца имеет осци-

лирующий характер, который обусловлен интерференционными явлениями, что характерно для слоистых структур.

Измерив коэффициент отражения структуры $R_{стр.}$ со стороны пленки, можно оценить коэффициент поглощения структуры $A_{стр.}$ по формуле [27]

$$A_{стр.} = 1 - T_{стр.} - R_{стр.} \quad (5)$$

Полученные результаты представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что кварцевая подложка характеризуется низким поглощением во всем исследованном диапазоне. Исследуемый образец

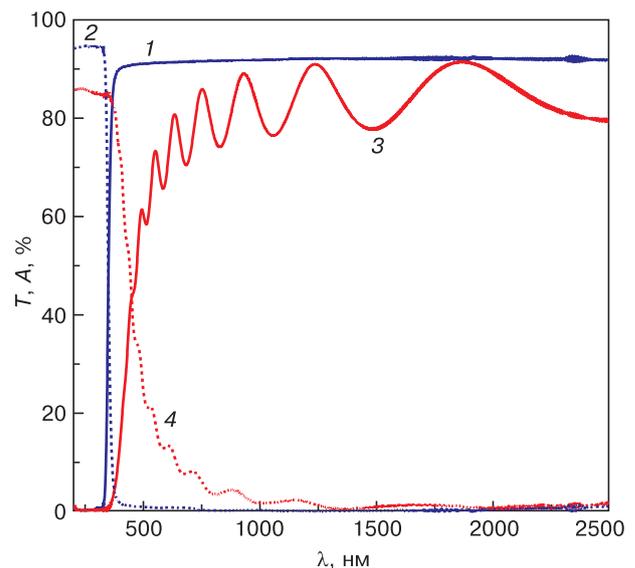


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания (1, 3) и поглощения (2, 4) типичной структуры (3, 4) и подложки (1, 2)
 Fig. 2. (1 and 3) Transmittance and (2 and 4) absorption spectra of (1 and 2) substrate and (3 and 4) typical structure

слабо поглощает в ИК-диапазоне длин волн, в видимом диапазоне поглощение увеличивается с уменьшением длины волн.

В самом простом случае без учета рассеяния и отражения уравнение (4) может быть записано в следующем виде:

$$1 = A_{стр.} + T_{стр.} \tag{6}$$

Тогда коэффициент поглощения структуры может быть выражен следующим образом:

$$A_{стр.} = A_{пл.} + A_{подл.} \tag{7}$$

где $A_{пл.}$, $A_{подл.}$ — коэффициенты поглощения пленки и подложки соответственно.

$$\begin{aligned} A_{стр.} &= 1 - T_{стр.}; \quad A_{пл.} = 1 - T_{пл.}; \\ A_{подл.} &= 1 - T_{подл.}, \end{aligned} \tag{8}$$

где $T_{пл.}$, $T_{подл.}$ — коэффициенты пропускания пленки и подложки соответственно.

Коэффициент пропускания пленки можно выразить из уравнений (6)–(8):

$$T_{пл.} = 1 - T_{подл.} + T_{стр.} \tag{9}$$

Поглощение пленки определяется по формуле (1), которая с учетом уравнения (9) может быть преобразована, и для показателя поглощения без учета отражения получим следующее выражение:

$$\alpha_{пл.} = \frac{\ln \frac{1}{T_{пл.}}}{d_{пл.}} = \frac{\ln \frac{1}{1 - T_{подл.} + T_{стр.}}}{d_{пл.}} \tag{10}$$

Показатель поглощения α с учетом отражения записывается в виде [28–30]

$$\alpha = - \frac{\ln \left[\frac{T}{(1-R)^2} \right]}{d} \tag{11}$$

Таким образом, с учетом отражения формула (10) преобразуется следующим образом:

$$\alpha_{пл.} = - \frac{\ln \left(\frac{T_{пл.}}{(1-R_{стр.})^2} \right)}{d_{пл.}} = - \frac{\ln \left(\frac{1 - T_{подл.} + T_{стр.}}{(1-R_{стр.})^2} \right)}{d_{пл.}} \tag{12}$$

Коэффициенты пропускания подложки и структуры и коэффициент отражения структуры со стороны пленки могут быть измерены на спектрофотометре. Результаты измерения представлены на рис. 3. Однако толщина пленки неизвестна.

Для расчета толщины и коэффициентов преломления пленок может быть использован спектрофотометрический метод отражения при двух

углах падения [15]. Этот метод применим только в спектральной области, где пленка прозрачна, или ее поглощение настолько мало, что им можно пренебречь. Чем выше поглощение в пленке, тем больше разница между коэффициентом отражения в максимуме интерференции пленки и коэффициентом отражения подложки при одинаковой длине волны. Для выявления этой области были получены спектральные зависимости отражения пленки и подложки при угле падения света 10° (рис. 4).

На спектрах отражения образцов (см. рис. 4) хорошо видны экстремумы, связанные с интер-

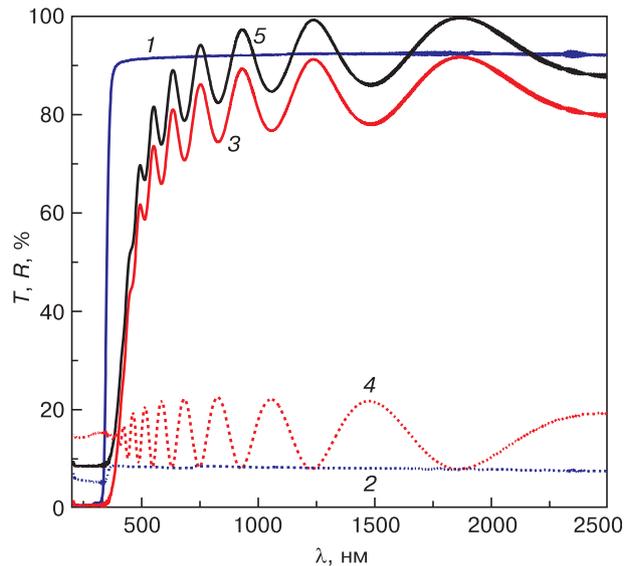


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания (1, 3, 5) и отражения (2, 4) типичной структуры (3, 4), подложки (1, 2) и пленки (5)

Fig. 3. (1, 3 and 5) Transmittance and (2 and 4) reflectance spectra of (3 and 4) typical structure, (1 and 2) substrate and (5) film

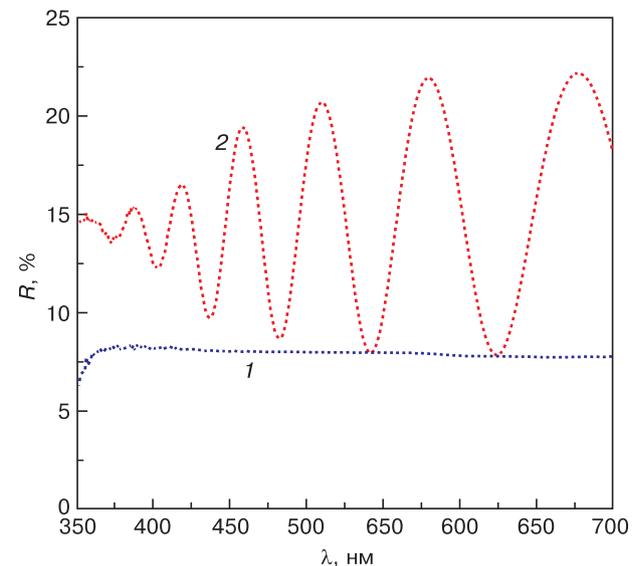


Рис. 4. Результаты измерения отражения света при угле падения 10° на образец со стороны пленки (2) и подложки из плавненого кварца (1)

Fig. 4. Light reflection measurement data for 10 deg incidence angle on specimen taken at (1) fused quartz substrate side and (2) film side

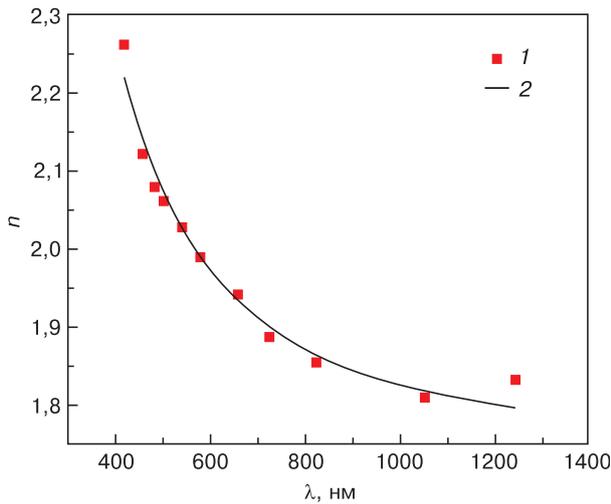


Рис. 5. Дисперсионная зависимость коэффициента преломления типичного образца:
 1 — результаты, полученные путем расчета по формуле (15); 2 — аппроксимация по уравнению Коши (16)

Fig. 5. Dispersion dependence of refractive index of typical specimen: (1) data obtained by calculation using Eq. (15) and (2) Cauchy approximation Eq. (16)

ференцией двух лучей, отраженных от границ раздела «среда—пленка» и «пленка—подложка». Для исследуемого образца метод отражения при двух углах падения применим только в диапазоне длин волн свыше 425 нм, так как здесь поглощение минимально.

Для оценки показателя преломления нанесенного слоя использовали спектральные зависимости отражения света, полученные при двух различных углах падения неполяризованного света, в данном случае при $\varphi_1 = 10^\circ$ и $\varphi_2 = 20^\circ$.

В первую очередь определяются значения коэффициента преломления. Для этого на полученных спектрах выбирают длины волн λ_{φ_1} и λ_{φ_2} , соответствующие одному и тому же интерференционному экстремуму, для каждого интерференционного экстремума.

Далее определяется коэффициент преломления пленки в узком диапазоне длин волн $\lambda_{\varphi_1} - \lambda_{\varphi_2}$ по формуле

$$\left(\frac{n_{\text{пл.}}}{n}\right)^2 = \frac{\sin^2 \varphi_1 - \beta \sin^2 \varphi_2}{1 - \beta}, \quad (13)$$

где β — коэффициент, который определяется следующим образом:

$$\beta = \left(\frac{\lambda_{\varphi_1}}{\lambda_{\varphi_2}}\right)^2. \quad (14)$$

Окончательно значение коэффициента преломления пленки определяется по формуле

$$n_{\text{пл.}} = \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \varphi_1 - \beta \sin^2 \varphi_2}{1 - \beta}\right)}. \quad (15)$$

В результате вычислений имеем дискретный набор коэффициентов преломления. Дисперсионную

зависимость коэффициента преломления получают путем аппроксимации вычисленных значений с использованием, например, уравнения Коши вида

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (16)$$

где A, B, C — материальные константы.

Оптическая толщина пленки ($d_{\text{пл.}} \times n_{\text{пл.}}$) определяется по следующей формуле

$$d_{\text{пл.}} n_{\text{пл.}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{k(\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad (17)$$

где λ_1, λ_2 — длины волн соседних интерференционных экстремумов на интерференционной зависимости, измеренной при одном угле падения света, нм; k — коэффициент, $k = 2$, если берутся два ближайших максимума, или $k = 4$, если берутся соседние максимум и минимум.

С учетом значений коэффициента преломления пленки, полученных по формуле (15), толщина пленки может быть вычислена следующим образом:

$$d_{\text{пл.}} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{k n_{\text{пл.}} (\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (18)$$

Результаты оценки коэффициентов преломления прозрачной пленки образца, полученные спектрофотометрическим методом отражения при двух углах падения, и результаты аппроксимации полученных значений с использованием уравнения Коши (16) представлены на рис. 5. Толщина пленки образца, определенная по уравнению (18), составила $d_{\text{пл.}} = 1046 \text{ нм} \pm 13 \%$. Спектральные зависимости показателей поглощения с учетом и без учета отражения, полученные по формулам (10)

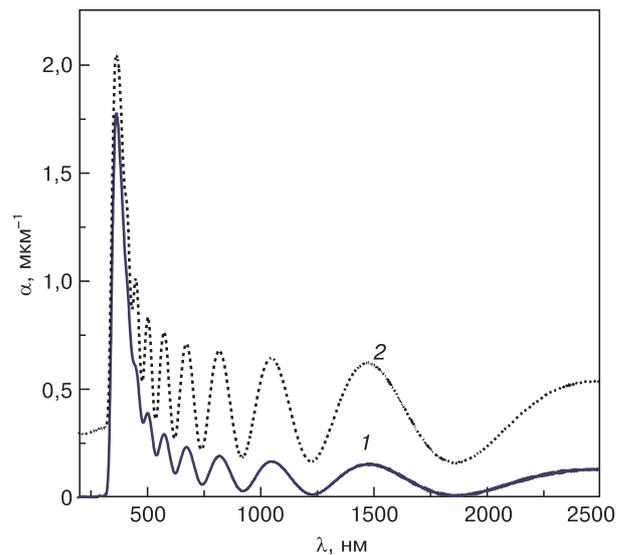


Рис. 6. Спектральные зависимости показателей поглощения пленки без учета (1) и с учетом (2) отражения

Fig. 6. Film absorption spectra (1) without and (2) with allowance for reflection

и (12) соответственно, представлены на рис. 6. Сводные данные по коэффициентам преломления и показателям поглощения представлены в таблице.

Заключение

Методом магнетронного распыления получены пленки Ta—Si—C—N на подложках из плавленого кварца. Структурное совершенство пленок исследовано методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и оптико-эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда.

Методом многоугловой спектрофотометрии в диапазоне длин волн 200—2500 нм измерены спектральные зависимости коэффициентов пропускания структур и подложки из плавленого кварца при нормальном падении света и спектральные зависимости отражения при углах падения света 10° и 20°.

Получена формула для определения коэффициента поглощения пленки по измеренным параметрам. На основании экспериментальных и расчетных данных построены спектральные зависимости коэффициентов поглощения подложки, структуры и пленки. Оценены значения показателей поглощения пленок с учетом и без учета отражения.

С использованием экспериментальных методов, основанных на измерении положений интерференционных экстремумов на спектральных зависимостях отражения, оценена толщины пленки, которая составила 1046 нм ± 13 %, и получены дискретные величины коэффициентов преломления пленки. Проведена аппроксимация полученных значений с использованием уравнения Коши.

Библиографический список

1. Кондрашин В.И. Определение толщины тонких оптически прозрачных пленок SnO₂ конвертным методом. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2016; 38(2): 93—101. https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn8216
2. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Бакуи А. Измерение параметров нанометровых пленок оптическими и радиоволновыми методами. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2010; 83(3(83)): 44—50. <https://elibrary.ru/mngzfd>
3. Киселев Д.А., Жуков Р.Н., Быков А.С., Малинкович М.Д., Пархоменко Ю.Н., Выговская Е.А. Иницирование поляризованного состояния в тонких пленках ниобата лития, синтезированных на изолированные кремниевые подложки. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2012; (2): 25—29. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2012-2-25-29>
4. Журавлева П.Л., Щур П.А., Мельников А.А. Изучение структурных параметров тонких пленок аналитическими методами. *Труды ВИАМ*. 2019; 78(6): 104—113. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-6-104-113>
5. Шаяпов В.Р. Комплексный подход к определению физических свойств тонких пленок. В сб. материалов:

Значения коэффициентов преломления и показателей поглощения с учетом и без учета отражения типичного образца в диапазоне длин волн 450—1200 нм

Refractive and absorption indices with and without allowance for reflection for a typical specimen in the 450–1200 nm region

λ, нм	n	α _{пл.} , МКМ ⁻¹	
		без учета отражения	с учетом отражения
450	2,153	0,603	0,959
500	2,075	0,367	0,744
550	2,018	0,192	0,391
600	1,974	0,222	0,553
650	1,940	0,157	0,471
700	1,913	0,191	0,580
750	1,891	0,057	0,221
800	1,873	0,160	0,591
850	1,858	0,161	0,578
900	1,846	0,054	0,244
950	1,835	0,041	0,237
1000	1,826	0,116	0,495
1050	1,818	0,160	0,629
1100	1,812	0,138	0,544
1150	1,806	0,075	0,345
1200	1,801	0,022	0,188

«Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы». Москва, 21–24 ноября 2017 г. М.: ООО «Буки Веди»; 2017: 386. <https://elibrary.ru/xnvfyt>

6. Брус В.В., Ковалюк З.Д., Марьянчук П.Д. Оптические свойства тонких пленок TiO₂–MnO₂, изготовленных по методу электронно-лучевого испарения. *Журнал технической физики*. 2012; 82(8): 110—113. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10683>
7. Бобровников Ю.А., Козарь А.В., Попов К.В., Тихонов А.Н., Тихонравов А.В., Трубецков М.К. Исследование неоднородности тонких пленок спектрофотометрическими методами. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, Астрономия*. 1997; (4): 24—27. <http://vnu.phys.msu.ru/file/1997/4/97-4-24.pdf>
8. Соколов В.И., Марусин Н.В., Панченко В.Я., Савельев А.Г., Семиногов В.Н., Хайдуков Е.В. Определение показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины тонких пленок методом возбуждения волноводных. *Квантовая электроника*. 2013; 43(12): 1149—1153. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&rjrnid=qe&paperid=15272&option_lang=rus
9. Ванюхин К.Д., Захарченко Р.В., Каргин Н.И., Сейдман Л.А. Технологические особенности формирования прозрачных проводящих контактов из пленки ИТО для светодиодов на основе нитрида галлия. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2013; (2): 60—64. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2013-2-60-64>
10. Абгарян К.К., Бажанов Д.И., Мутигуллин И.В. Теоретическое исследование электронных и геометри-

ческих характеристик тонких пленок AlN. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2015; 18(1): 48—51. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-1-48-51>

11. Хомченко А.В., Сотский А.Б., Романенко А.А., Глазунов Е.В., Шульга А.В. Волноводный метод измерения параметров тонких пленок. *Журнал технической физики*. 2005; 75(6): 98—106. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8584>

12. Сахбиев Т.Р. Двухчастотные методы определения толщины и диэлектрических параметров тонких пленок. *Новое слово в науке: перспективы развития*. 2015; 4(6): 171—172. <https://elibrary.ru/xxxxsbv>

13. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V., DeBell G., Pervak V., Krasilnikova-Sytchkova A., Grilli M.L., Ristau D. Optical parameters of oxide films typically used in optical coating production. *Applied Optics*. 2011; 50(9): C75—C85. <https://doi.org/10.1364/AO.50.000C75>

14. Tikhonravov A.V., Amotchkina T.V., Trubetskov M.K., Francis R.J., Janicki V., Sancho-Parramon J., Zorc H., Pervak V. Optical characterization and reverse engineering based on multiangle spectroscopy. *Applied Optics*. 2012; 51(2): 245—254. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000245>

15. Аюпов Б.М., Зарубин И.А., Лабусов В.А., Суляева В.С., Шаяпов В.Р. Поиск начального приближения при решении обратных задач в эллипсометрии и спектрофотометрии. *Оптический журнал*. 2011; 78(6): 3—9. <https://elibrary.ru/tpoocz>

16. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М.: Техносфера; 2007. 362 с.

17. Кларк Э.Р., Эберхардт К.Н. Микроскопические методы исследования материалов. М.: Техносфера; 2007. 376 с.

18. Бёккер Ю. Спектроскопия. М.: Техносфера; 2009. 528 с.

19. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие. 6-е изд. М.: Физмалит; 2006. 848 с.

20. Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В., Валяшко Е.Г. Оптические свойства кристаллов. Минск: Навука і гэхніка; 1995. 302 с.

21. Толмачев Г.Н., Ковтун А.П., Захарченко И.Н., Алиев И.М., Павленко А.В., Резниченко Л.А., Вербенко И.А. Синтез, структура и оптические характеристики тонких пленок ниобата бария-стронция. *Физика твердого тела*. 2015; 57(10): 2050—2055. <http://journals.ioffe.ru/articles/42276>

22. Аюпов Б.М., Румянцев Ю.М., Шаяпов В.Р. Особенности определения толщины диэлектрических пленок, полученных в поисковых экспериментах. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2010; (5): 100—105. <https://elibrary.ru/msqej>

23. Manificier J.C., Gasiot J., Fillard J.P. A simple method for the determination of the optical constants n , h and the thickness of a weakly absorbing thin film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1976; 9(11): 1002—1004. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/9/11/032>

24. Swanepoel R. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1983; 16(12): 1214—1223. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/16/12/023>

25. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., Sviridov 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: 128141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128141>

26. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука; 1970. 855 с.

27. Карамалиев Р.А., Каджар Ч.О. Оптические свойства композитных тонких пленок, содержащих наночастицы серебра. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2012; 79(3): 424—429. <https://elibrary.ru/oxoqwf>

28. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учебник. М.: Энергия; 1971. 400 с.

29. Ефимов А.М. Оптические свойства материалов и механизмы их формирования: учеб. пособие. СПб.: СПбГУИТМО; 2008. 103 с.

30. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / пер. с англ. М.: Мир; 1986. 664 с.

References

1. Kondrashin V.I. Determination of SnO₂ thin optically transparent films' thickness by the envelope method. *University Proceedings. Volga Region. Engineering Sciences*. 2016; 38(2): 93—101. (In Russ.). https://izvuz_tn.pnzgu.ru/tn8216

2. Usanov D.A., Skripal A.I.V., Skripal A.N.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Bakui A. Measurement of parameters of nanometer films by optical and radio wave methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2010; 83(3(83)): 44—50. (In Russ.). <https://elibrary.ru/mngzfd>

3. Kiselev D.A., Zhukov R.N., Bykov A.S., Malinkovich M.D., Parkhomenko Yu.N., Vygovskaya E.A. Initiation of polarized state in lithium niobate thin films synthesized on isolated silicon substrates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2012; (2): 25—29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2012-2-25-29>

4. Zhuravleva P.L., Shchur P.A., Melnikov A.A. Study of the structural parameters of thin films by analytical

methods. *Trudy VIAM*. 2019; 78(6): 104—113. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-6-104-113>

5. Shayapov V.R. An integrated approach to the determination of the physical properties of thin films. In: *Third interdisciplinary youth scientific forum with international participation "New Materials"*. Moscow; 2017. 386 p. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xnvfyt>

6. Brus V.V., Kovalyuk Z.D., Maryanchuk P.D. Optical properties of TiO₂-MnO₂ thin films fabricated by electron-beam evaporation. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2012; 82(8): 110—113. (In Russ.). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10683>

7. Bobrovnikov Yu.A., Kozar' A.V., Popov K.V., Tikhonov A.N., Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. Investigation of the inhomogeneity of thin films by spectrophotometric methods. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika, Astronomiya*. 1997; (4): 24—27. (In Russ.). <http://vmu.phys.msu.ru/file/1997/4/97-4-24.pdf>

8. Sokolov V.I., Marusin N.V., Panchenko V.Ya., Saveleyev A.G., Seminogov V.N., Khaidukov E.V. Determination of refractive index, extinction coefficient and thickness of

thin films by the method of waveguide mode excitation. *Kvantovaya elektronika*. 2013; 43(12): 1149—1153. (In Russ.). http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=15272&option_lang=eng

9. Vanyukhin K.D., Zakharchenko R.V., Kargin N.I., Seidman L.A. Peculiarity of forming transparent conducting films on basis of oxides indium–tin for contacts on GaN-based light emitting diodes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2013; (2): 60—64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2013-2-60-64>

10. Abgaryan K.K., Bazhanov D.I., Mutigullin I.V. Theoretical investigation of electronic and structural properties of AlN thin films. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2015; 18(1): 48—51. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-1-48-51>

11. Khomchenko A.V., Sotsky A.B., Romanenko A.A., Glazunov E.V., Shulga A.V. Waveguide method for measuring the parameters of thin films. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2005; 75(6): 98—106. (In Russ.). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8584>

12. Sakhbiev T.R. Two-frequency methods for determining the thickness and dielectric parameters of thin films. *Novoye slovo v nauke: perspektivy razvitiya*. 2015; 4(6): 171—172. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xxxxsbv>

13. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V., DeBell G., Pervak V., Krasilnikova–Sytchkova A., Grilli M.L., Ristau D. Optical parameters of oxide films typically used in optical coating production. *Applied Optics*. 2011; 50(9): C75—C85. <https://doi.org/10.1364/AO.50.000C75>

14. Tikhonravov A.V., Amotchkina T.V., Trubetskov M.K., Francis R.J., Janicki V., Sancho–Parramon J., Zorc H., Pervak V. Optical characterization and reverse engineering based on multiangle spectroscopy. *Applied Optics*. 2012; 51(2): 245—254. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000245>

15. Ayupov B.M., Zarubin I.A., Labusov V.A., Sulyaeva V.S., Shayapov V.R. Searching for the starting approximation when solving inverse problems in ellipsometry and spectrophotometry. *Journal of Optical Technology*. 2011; 78(6): 350—354. <https://doi.org/10.1364/jot.78.000350>

16. Shmidt V. Optical spectroscopy for chemists and biologists. Moscow: Tekhnosfera; 2007. 362 p. (In Russ.)

17. Klark E.R., Eberkhardt K.N. Microscopic methods for studying materials. Moscow: Tekhnosfera; 2007. 376 p. (In Russ.)

18. Bokker U. Spectroscopy. Moscow: Tekhnosfera; 2009. 528 p. (In Russ.)

19. Landsberg G.S. Optics: textbook for universities. Moscow: Fizmatlit; 2006. 848 p. (In Russ.)

20. Konstantinova A.F., Grechushnikov B.N., Bokut B.V., Valyashko E.G. Optical properties of crystals. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. 303 p. (In Russ.)

21. Tolmachev G.N., Kovtun A.P., Pavlenko A.V., Zakharchenko I.N., Aliev I.M., Reznichenko L.A., Verbenko I.A. Synthesis, structure, and optical characteristics of barium–strontium niobate thin films. *Physics of the Solid State*. 2015; 57(10): 2106—2111. <https://doi.org/10.1134/S1063783415100339>

22. Ayupov B.M., Rummyantsev Yu.M., Shayapov V.R. Particular features of determination of the thickness of dielectric films obtained in researches. *Poverkhnost'. rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniy*. 2010; (5): 100—105. (In Russ.). <https://elibrary.ru/msqej>

23. Manificier J.C., Gasiot J., Fillard J.P. A simple method for the determination of the optical constants n, h and the thickness of a weakly absorbing thin film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1976; 9(11): 1002—1004. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/9/11/032>

24. Swanepoel R. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1983; 16(12): 1214—1223. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/16/12/023>

25. Kiryukhantsev–Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., Sviridov T.A., Sidorenko D.A., Andreev N.V., Klechkovskay V.V., Polčak 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: 128141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128141>

26. Born M., Vol'f E. Fundamentals of optics. Moscow: Nauka; 1970. 855 p. (In Russ.)

27. Karamaliyev R.A., Qajar C.O. Optical properties of composite thin films containing silver nanoparticles. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2012; 79(3): 404—409. <https://doi.org/10.1007/s10812-012-9615-1>

28. Shalimova K.V. Physics of semiconductors. Moscow: Energiya; 1971. 400 p. (In Russ.)

29. Efimov A.M. Optical properties of materials and mechanisms of their formation: textbook. Saint Petersburg: SPbGUITMO; 2008. 103 p. (In Russ.)

30. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons, Inc.; 1983. 545 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Козлова Нина Семеновна — канд. физ.–мат. наук, ведущий эксперт; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Левашов Евгений Александрович — докт. техн. наук, акад. РАН, профессор, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий, директор Научно-учебного центра самораспространяющегося высокотемпературного синтеза МИСиС–ИСМАН; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0623-0013>; e-mail: levashov@shs.misis.ru

Nina S. Kozlova — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Expert; National University of Science and Technology MISiS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4057-9718>; e-mail: kozlova_nina@mail.ru

Evgeny A. Levashov — Dr. Sci. (Eng.), Acad. RANS, Professor, Head of Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, Director of the Scientific–Educational Center of SHS (Self-Propagating High-Temperature Synthesis); National University of Science and Technology MISiS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0623-0013>; e-mail: levashov@shs.misis.ru

Кирюханцев-Корнеев Филипп Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, заведующий лабораторией «In situ диагностика структурных превращений» Научно-учебного центра самораспространяющегося высокотемпературного синтеза МИСиС–ИСМАН; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1635-4746>; e-mail: kiruhancev-korneev@yandex.ru

Сытченко Алина Дмитриевна — младший научный сотрудник, Научно-учебный центр самораспространяющегося высокотемпературного синтеза МИСиС–ИСМАН; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8668-5877>; e-mail: alina-sytchenko@yandex.ru

Забелина Евгения Викторовна — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misis.ru

Philipp V. Kiryukhantsev-Korneev — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, Head of the Laboratory “In situ Diagnosis of Structural Transformations” of the Scientific–Educational Center of SHS (Self–Propagating High–Temperature Synthesis); National University of Science and Technology MISiS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1635-4746>; e-mail: kiruhancev-korneev@yandex.ru

Alina D. Sytchenko — Junior Researcher, Scientific–Educational Center of SHS (Self–Propagating High–Temperature Synthesis); National University of Science and Technology MISiS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8668-5877>; e-mail: alina-sytchenko@yandex.ru

Evgenia V. Zabelina — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher; National University of Science and Technology MISiS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-5673>; e-mail: zabelina.ev@misis.ru

Поступила в редакцию 20.05.2022; поступила после доработки 06.06.2022; принята к публикации 17.07.2022
Received 20 May 2022; Revised 6 June 2022; Accepted 17 July 2022

* * *