

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 538.9+539.23

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-162-176>

Поступила в редакцию 22.11.2023

Received 22.11.2023

С. В. Константинов¹, Ф. Ф. Комаров¹, И. В. Чижов², В. А. Зайков²¹Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный университет, Республика Беларусь**ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НИТРИДНЫХ TiAlSiN И КАРБОНИТРИДНЫХ TiAlSiCN ПОКРЫТИЙ:
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ**

Аннотация. Актуальной является разработка тонкопленочных терморегулирующих покрытий для малых космических аппаратов. Покрытия на основе нитрида титана, в силу своей высокой устойчивости к облучению высокоэнергетическими частицами и термоциклированию, способны функционировать в неблагоприятных условиях ближнего и дальнего космоса. Методом реактивного магнетронного распыления сформированы наноструктурированные покрытия TiAlSiN, TiAlSiCN на подложках из оксида кремния SiO₂, ситалла СТ-1 и монокристаллического кремния Si(100). Проведено исследование электрофизических и оптических свойств сформированных покрытий. Покрытия демонстрируют хорошую отражательную способность в инфракрасном диапазоне спектра (700–2000 нм), что важно для снижения нагрева космического аппарата (КА) под воздействием прямых солнечных лучей. В видимом диапазоне (400–700 нм) наблюдается низкий уровень суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения. Это перспективно для спутников, предназначенных для наблюдений поверхности Земли. Получены значения коэффициентов солнечного поглощения α_s и коэффициентов переизлучения ϵ_0 , отношения α_s/ϵ_0 , а также равновесной температуры T_p для исследуемых образцов. Определены величины удельного $R_{\text{уд}}$ и поверхностного R_{\square} электросопротивления, концентрации электронов N и подвижности электронов μ . Установлено, что пленки TiAlSiN, TiAlSiCN являются электропроводящими: $R_{\text{уд TiAlSiN}} = (92 \div 4260) \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $R_{\text{уд TiAlSiCN}} = (51 \div 2360) \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Обнаружено, что добавление углерода в состав покрытия снижает их электросопротивление. Полученные наноструктурированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiCN представляют интерес для использования их в качестве структурных элементов терморегулирующих систем для малых космических аппаратов.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия TiAlSiN и TiAlSiCN, удельное электросопротивление покрытий, оптические свойства, реактивное магнетронное напыление, космическое материаловедение

Для цитирования. Оптические и электрофизические свойства нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий: влияние режимов реактивного магнетронного нанесения / С. В. Константинов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 162–176. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-162-176>

Stanislav V. Konstantinov¹, Fadei F. Komarov¹, Igor V. Chizhov², Valery A. Zaikov²¹A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus**OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NITRIDE TiAlSiN AND CARBONITRIDE TiAlSiCN COATINGS: INFLUENCE OF REACTIVE MAGNETRON DEPOSITION REGIMES**

Abstract. The development of thin-film thermal control coatings for small spacecraft is relevant. Coatings based on titanium nitride are capable of functioning in unfavorable conditions of near and deep space, due to their high resistance to the irradiation by high-energy particles. Using the reactive magnetron sputtering method, the nanostructured TiAlSiN and TiAlSiCN coatings were formed on the substrates of silicon oxide (SiO₂), glass-ceramic CT-1 and single-crystalline silicon (Si(100)). A study of the electrophysical and optical properties of the formed coatings was carried out. The deposited coatings demonstrate a good reflectivity in the infrared range of spectrum (700–2000 nm), what is important for reducing the overheating of the spacecraft (SC) under the influence of the direct sunlight. In the visible range of spectrum (400–700 nm), a low level of total R_{total} reflection is observed. This is promising for satellites designed to observe the Earth's surface. The values of solar absorption coefficients α_s , emissivity coefficients ϵ_0 , ratios α_s/ϵ_0 , as well as the equilibrium temperature T_p for the samples under study were obtained. The values of resistivity ρ and surface resistance R_{\square} , electron concentration N and electron mobility μ were determined. It has been discovered that TiAlSiN, TiAlSiCN films are electrically conductive: $\rho_{\text{TiAlSiN}} = (92 \div 4260) \cdot 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_{\text{TiAlSiCN}} = (51 \div 2360) \cdot 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. It has been found that adding carbon to the coating composition reduces the resistance. The obtained nanostructured coatings of TiAlSiN nitride and TiAlSiCN carbonitride can be used as temperature control coatings for small spacecrafts.

Keywords: nanostructured TiAlSiN and TiAlSiCN coatings, coatings resistivity, optical properties, reactive magnetron sputtering, space materials science

For citation. Konstantinov S. V., Komarov F. F., Chizhov I. V., Zaikov V. A. Optical and electrophysical properties of nitride TiAlSiN and carbonitride TiAlSiCN coatings: influence of reactive magnetron deposition regimes. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 162–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-2-162-176>

Введение. Нитридные покрытия TiAlSiN, TiAlSiCN демонстрируют высокую твердость, стойкость к ударным нагрузкам и сопротивляемость пластической деформации [1]. Кроме превосходных механических характеристик покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN, заслуживают внимания их оптические и электрофизические свойства. Такие покрытия могут быть перспективными в задачах терморегулирования малых космических аппаратов.

Показано, что варьированием соотношения компонент Ti/Al/N в осаждаемом покрытии возможно получить пленку с необходимыми оптическими характеристиками [2, 3]. Такое свойство покрытий TiAlN позволяет применять их в качестве материала, обеспечивающего пассивную терморегуляцию искусственных спутников Земли и малых космических аппаратов [4]. Терморегулирующее покрытие представляет собой слой материала, термооптические свойства которого дают возможность сохранить температуру поверхности в определенных пределах при воздействии солнечного потока или другого источника излучения [5]. Основными оптическими параметрами терморегулирующих покрытий являются оптическое поглощение α_s (также известное как солнечное поглощение) и коэффициент теплового излучения ϵ_N . Равновесная температура космического аппарата определяется соотношением α_s/ϵ_N . Увеличение содержания алюминия в составе покрытия TiAlN приводит к увеличению соотношения α_s/ϵ_N [2].

В ряде работ по покрытию TiAlSiN [6–8] была продемонстрирована их высокая жаростойкость, способность к селективному поглощению излучения, твердость, технологичность и возможность формирования методами физического осаждения из парогазовой фракции (PVD-методами). Высокая жаростойкость, стойкость к высокотемпературной коррозии покрытий с добавками кремния обеспечивается за счет формирующегося оксида SiO₂, функционирующего как эффективный диффузионный барьер для дальнейшего проникновения кислорода вглубь материала.

В [9] была разработана интеллектуальная многослойная структура – Smart Radiation Device (SRD) с изменяемым коэффициентом излучения ϵ_0 на основе VO₂ для задачи пассивной термической регуляции космических аппаратов. Сформированная структура способна изменять коэффициент излучения в зависимости от своей температуры ($\Delta\epsilon = 0,36 \div 0,48$). В статье указывается, что оптимизация толщины пленки SiO₂ позволяет достичь коэффициента излучения ϵ_H до 0,8 при сохранении большого диапазона изменения коэффициента излучения.

В [10] представлен параметрический анализ, в котором оценивается влияние параметров орбиты, таких как высота и угол наклона спутника на его тепловой режим. Отмечено, что, контролируя качество поверхности спутника и угол наклона космического аппарата, можно добиться теплового режима, наиболее подходящего для полезной нагрузки и аккумуляторов малого космического аппарата.

Добавление углерода в состав покрытия может положительно повлиять на его эксплуатационные свойства. Однако карбонитридный вариант покрытия с добавкой кремния TiAlSiCN значительно в меньшей степени упоминается в литературе [11, 12]. В основном отмечается способность данного покрытия к селективному поглощению и переизлучению света, технологичность и возможность его формирования.

Электрическое сопротивление покрытий в первую очередь зависит от их элементного состава, соотношения между металлическими и неметаллическими компонентами [13], толщины пленки, сопротивления подложки и структурно-фазового состояния материала [14].

В [15] было обнаружено, что добавление AlN к TiN приводит к увеличению удельного электрического сопротивления, в силу того что AlN является изоляционным материалом и инициирует аморфизацию нитрида. В [16] было показано, что увеличение доли AlN в составе Ti_{1-x}Al_xN приводит к линейному росту электросопротивления от 84 до 300 мкОм · см. Помимо значитель-

ного изменения сопротивления, в пленках с добавлением Al наблюдается постепенная смена цвета с золотистого на темно-коричневый, а затем на фиолетовый. Также в работе приводятся значения $R_{уд}$ для объемного материала AlN со структурой вюрцита, который является широкозонным диэлектриком ($1 \cdot 10^7$ Ом · м), и для эпитаксиального TiN ($1,8 \cdot 10^{-7}$ Ом · м).

Таким образом, актуальной задачей является определение оптических и электрофизических свойств нано- и микроструктурированных покрытий из нитридов и карбонитридов титана и алюминия с добавками кремния Si, пригодных для применения в изделиях космической техники.

Материалы и методы исследования. Осаждение нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий методом реактивного магнетронного распыления производилось на модернизированной установке УВН-2М (рис. 1), оснащенной магнетронным распылителем и ионным источником «Радикал», системами нагрева подложек, подачи смещения на подложку и модульным комплексом управления расходом газов (МКУРГ) по ранее отработанному процессу [17].

Откачка вакуумной камеры, оснащенной азотной ловушкой, производилась с помощью форвакуумного и диффузионного паромасляного насосов. Вакуумная система позволяла получать предельное остаточное давление $9,0 \cdot 10^{-4}$ Па. Напыляемые подложки крепили на плоский нагреваемый подложкодержатель. Использовались подложки из монокристаллического кремния Si(100), из монокристаллического кремния с термически выращенным оксидом SiO₂ толщиной до 1,5 мкм и ситалла СТ-1. Разброс толщины пленки в зоне напыления не превышал 5 %. Все процессы напыления выполнены при значениях степени реактивности α от 0,605 до 0,421 [17, 18]. Покрытия состава, близкого к стехиометрическому, формировались в диапазоне значений степени реактивности α от 0,605 до 0,526; покрытия нестехиометрического состава, обогащенного металлическими Ti и Al компонентами, – в диапазоне значений степени реактивности α от 0,526 до 0,421. Для нанесения покрытий использовались мишени № 1 (Ti – 46 ат.%, Al – 46 ат.%, Si – 8 ат.%) и № 2 (Ti – 69 ат.%, Al – 23 ат.%, Si – 8 ат.%). Режимы осаждения и нумерация образцов покрытий в соответствии с технологическими условиями их формирования представлены в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид модернизированной установки реактивного магнетронного распыления УВН-2М

Fig. 1. Appearance of the upgraded UVN-2M reactive magnetron sputtering unit

Таблица 1. Режимы осаждения и нумерация образцов покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN в соответствии с технологическими параметрами их формирования

Table 1. Deposition modes and numbering of TiAlSiN and TiAlSiCN coatings samples in accordance with the technological parameters of their formation

Тип покрытия	TiAlSiN	TiAlSiN	TiAlSiN	TiAlSiN	TiAlSiN	TiAlSiCN	TiAlSiCN
Мишень	1	1	1	2	2	2	2
α	0,605	0,526	0,474	0,526	0,421	0,526	0,447
Ток разряда I , А	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Напряжение U , В	350–365	390–400	390–400	400–410	410–420	420–440	390–440
Давление P , Па	$7,0 \cdot 10^{-2}$						
$P_{N_2}/P_{C_2H_2}$	–	–	–	–	–	1/1	1/1
$U_{см}$, В	–150	–180	–200	–200	–200	–200	–200
$T_{подл}$, °С	370	350	370	380	380	380	380
Образец	1N1.27	1N1.30	1N2.32	2N1.30	2N2.34	2CN1.30	2CN2.33

Морфология и микроструктура полученных покрытий исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Hitachi SU3400 (Япония) в режиме вторичных электронов. Исследования оптических свойств покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN проводили с использованием спектрометра Lambda 1050. Спектрометр Lambda 1050 использовался в режимах измерения коэффициентов зеркального R , диффузного $R_{дифф}$ и суммарного $R_{сумм}$ отражения. Поверхностное сопротивление образцов измерялось посредством цифрового прибора ИУС-3 четырехзондовым методом. Измерения производились в центре образца при комнатной температуре. Определение значений поверхностного сопротивления образцов осуществлялось несколькими сериями. В каждой серии выполнялось по 10 измерений для получения усредненного значения. После серии измерений изменялось положение измерительных зондов на поверхности образца и делалась следующая серия измерений.

Электрофизические и оптические характеристики металлических и металлоподобных покрытий хорошо описываются классической теорией Друде – Лоренца [19], которая в последнее время активно развивается [20]. Исходя из представлений о свободных электронах как основных носителях тока в металлах, П. Друде разработал классическую теорию электропроводности металлов, которая затем была усовершенствована Х. Лоренцем.

Взаимодействие света с металлическими покрытиями и металлоподобными системами также хорошо описывается теорией Друде – Лоренца, которая качественно соответствует экспериментальным данным по отражению света в металлоподобных системах [21]. Обработка экспериментальных данных по влиянию микроскопической структуры поверхности на отражение света обычно производится в рамках так называемой трехслойной модели (воздух – покрытие – подложка), использованной в [20, 22]. В этой модели получают точные выражения для коэффициента отражения света (формулы Друде). В [23] показано, что плазменная частота соответствует точке перегиба на графике зависимости спектрального коэффициента отражения $R(\lambda)$ от длины волны λ зондирующего излучения. Формула (1) плазменной длины волны λ_p имеет вид

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi}{Nr_e}}, \tag{1}$$

где λ_p – плазменная длина волны, N – концентрация электронов, $r_e = 2,818 \cdot 10^{-15}$ м – радиус электрона.

Таким образом, уравнение (1) позволяет по величине плазменной длины волны λ_p , определяемой по точке перегиба на графике зависимости спектрального коэффициента отражения $R(\lambda)$ от λ , рассчитать концентрацию электронов в покрытии по формуле

$$N = \frac{\pi}{\lambda_p^2 r_e}, \tag{2}$$

где N – концентрация электронов, λ_p – плазменная длина волны, $r_e = 2,818 \cdot 10^{-15}$ м – радиус электрона.

Проведены расчеты концентрации электронов N в образцах покрытий по формуле (2) с использованием результатов определения плазменной длины волны λ_p . Последняя определялась из экспериментальных зависимостей спектрального коэффициента отражения $R(\lambda)$ от длины волны λ зондирующего излучения.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлен внешний вид поверхности образца 1N1.30 при увеличении $60,0 \cdot 10^3$ крат, полученный в режиме регистрации вторичных электронов, а также зависимость спектрального коэффициента диффузного $R_{\text{дифф}}$ и суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения от длины волны падающего излучения λ .

В режиме регистрации вторичных электронов (ВЭ) работы сканирующего электронного микроскопа получаемое изображение весьма близко к обычному макроскопическому изображению рельефа объекта, освещаемого со всех сторон рассеянным светом; иначе говоря, формируется топографический контраст. Эмиссия ВЭ отличается наибольшей интенсивностью по сравнению с другими вторичными излучениями, и в этом режиме достигается максимальное разрешение.

Анализ микрофотографий поверхности всех исследованных образцов показывает, что поверхность всех образцов является гладкой, без разрывов и макровключений. Рельеф поверхности образцов, полученных с соотношением атомных долей металлов Ti : Al \approx 1 : 1, является более развитым, чем рельеф поверхности образцов, полученных из мишени № 2, с соотношением атомных долей металлов Ti : Al \approx 3 : 1.

Для покрытий, полученных при значении степени реактивности $\alpha = 0,605$ (покрытия состава, близкого к стехиометрическому), как на кремниевой подложке, так и на оксиде кремния, характерен более развитый рельеф поверхности. Средний размер кристаллитов в сформированных

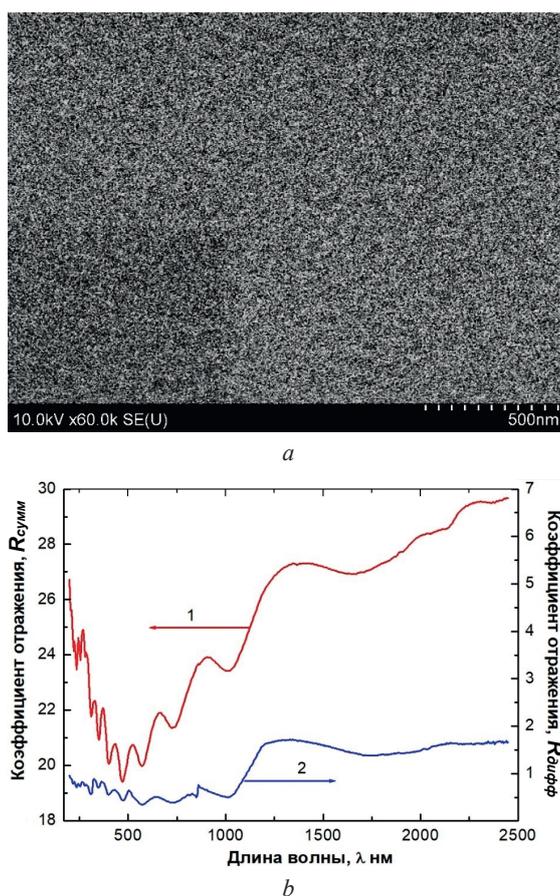


Рис. 2. Микрофотографии поверхности TiAlSiN (a) и спектральные коэффициенты суммарного $R_{\text{сумм}}$ (левая шкала) и диффузного $R_{\text{дифф}}$ (правая шкала) отражений (b). Образец – 1N1.30

Fig. 2. Micrographs of the TiAlSiN coatings surface (a) and spectral coefficients of the total R_{sum} (left scale) and diffuse R_{diff} (right scale) reflections (b). Sample – 1N1.30

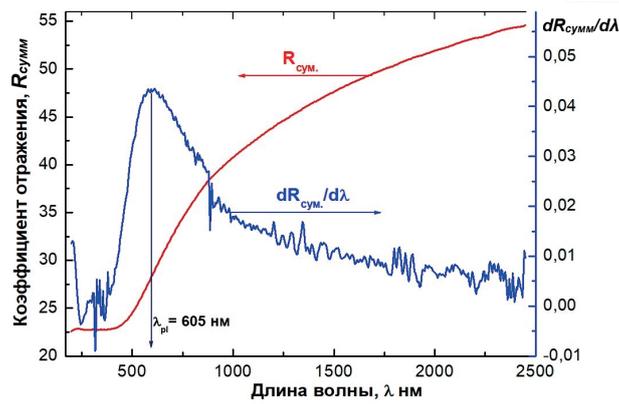


Рис. 3. Спектральный коэффициент суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения (левая шкала) и производная от суммарного $R_{\text{сумм}}$ коэффициента отражения (правая шкала). Образец – 1N1.27

Fig. 3. Spectral coefficient of total reflection R_{sum} (left scale) and the derivative of the total R_{sum} of the reflection coefficient (right scale). Sample – 1N1.27

нитридных покрытиях варьируется в диапазоне $(6–16) \pm 5$ нм. Для карбонитридных покрытий средний размер кристаллитов находится в диапазоне $(5–17) \pm 5$ нм.

Анализ зависимостей спектральных коэффициентов диффузного $R_{\text{дифф}}$ и суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражений показывает, что образцы 2N1.30, 2N2.34, 2CN1.30 и 2CN2.33, полученные из второй мишени, имеют металлический тип отражения. Только у образца 1N1.30 коэффициент отражения имеет смешанный характер поведения. Об этом свидетельствует волнистая с четко выраженной периодичностью зависимость спектрального коэффициента суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения. Это обозначает, что неметаллической компоненты в данном покрытии больше, чем металлической.

Коэффициенты диффузного $R_{\text{дифф}}$ отражения на всех образцах не превосходят величины 4–6,5 %. Наименьшее значение диффузного коэффициента $R_{\text{дифф}}$ отражения наблюдается для образца 1N1.30, которое не превосходит 2 %.

На рис. 3 представлен спектральный коэффициент суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения и производная от суммарного $R_{\text{сумм}}$ коэффициента отражения для образца 1N1.27. Производная бралась численно в программном комплексе Origin. На графике производной $dR_{\text{сумм}}/d\lambda$ наблюдается явно выраженный максимум, который и соответствует точке перегиба (максимальный угол наклона кривой) на зависимости спектрального коэффициента суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения от длины волны λ . Длина волны, соответствующая максимуму производной $dR_{\text{сумм}}/d\lambda$, соответствует плазменной длине волны λ_p .

Сдвиг спектрального коэффициента суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения, как правило, приводит к увеличению плазменной длины λ_p и уменьшению концентрации электронов N в покрытии, соответственно удельное сопротивление при этом растет.

Анализируя спектр суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения сформированных покрытий, можно заметить высокую отражательную способность в инфракрасном спектре (700–2000 нм), что позволит снизить нагрев космического аппарата (КА) под воздействием прямых солнечных лучей. В то же время в видимом спектре (400–700 нм) наблюдается низкий уровень суммарного $R_{\text{сумм}}$ отражения. Это перспективно для спутников, предназначенных для наблюдений поверхности Земли.

На основании полученных спектров суммарного отражения $R_{\text{сумм}}$ с использованием программного обеспечения, реализованного при помощи языка программирования Python3 согласно теории [24], авторами были получены коэффициенты солнечного поглощения α_s , коэффициенты излучения ϵ_0 , отношение α_s/ϵ_0 и равновесная температура T_p для покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN.

Спектральный коэффициент поглощения $A(\lambda)$ рассчитывался из закона сохранения энергии по формуле

$$A(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda), \tag{3}$$

где $T(\lambda)$ – пропускание (в нашем случае $T(\lambda) = 0$ во всем исследуемом спектральном интервале), $R(\lambda)$ – коэффициент отражения, λ – длина волны падающего излучения.

Так как пропускание $T(\lambda) = 0$, соотношение между спектральными коэффициентами отражения $R(\lambda)$, излучения $\varepsilon(\lambda)$ и поглощения $A(\lambda)$ можно определить с помощью закона Кирхгофа [24]

$$\varepsilon(\lambda) = A(\lambda) = 1 - R(\lambda). \quad (4)$$

Коэффициенты солнечного поглощения α_s и коэффициенты излучения ε_0 для покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN рассчитывались, согласно теории [24], по формулам

$$\alpha_s = \frac{\int_0^{\infty} A(\lambda) P_{\lambda}^i d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}^i d\lambda}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) P_{\lambda}^{bb}(T) d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}^{bb}(T) d\lambda}, \quad (6)$$

где P_{λ}^i – спектральная плотность мощности падающего солнечного излучения, $P_{\lambda}^{bb}(T)$ – спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела (АЧТ), $A(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения, $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент излучения, λ – длина волны падающего излучения.

Спектральная плотность мощности излучения АЧТ рассчитывалась по формуле Планка

$$P_{\lambda}^{bb}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (7)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, T – температура АЧТ.

Не менее важной особенностью расчетов коэффициента солнечного поглощения α_s является зависимость мощности солнечного излучения P_{λ}^i от пропускной способности атмосферы. Для расчетов α_s использовался спектр излучения Солнца за пределами атмосферы (воздушная масса AM0).

В табл. 2 приведены параметры для образцов нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiCN, нитрида титана TiN, черных красок Vel-Black и Ebanol C Black, белой краски Catalic White Paint, металлического покрытия Black Nickel и солнечной батареи TRW Solar Cell [25]. Для обеспечения полноценного функционирования спутника без системы принудительной терморегуляции отрицательная температура T_p (°C) является нежелательной по причине значительного снижения емкости аккумуляторных батарей, охрупчивания пластиковых деталей и снижения надежности пайки электронных компонентов. Чрезмерно высокая температура также оказывает пагубное влияние на полезную нагрузку космического аппарата. Оптимальной, по расчетам авторов, считается температура в диапазоне 30–50 °C. Это позволит иметь наиболее эффективный температурный интервал, препятствующий значительному переохлаждению во время затенения космического аппарата планетой.

Важной характеристикой терморегулирующих защитных покрытий для космической техники является электрическое сопротивление. Покрытия, обладающие низким поверхностным сопротивлением, будут препятствовать локальному скоплению заряда, способного повредить бортовую электронику космического аппарата [26]. Поверхностное сопротивление R_{\square} исследуемых покрытий определялось из выражения

$$R_{\square} = 4,53 \cdot U/I, \quad (8)$$

где I – ток, пропускаемый через два внешних зонда (для измерений выбирался рабочий ток $I = 20$ мА), U – напряжение, измеряемое между двумя внутренними зондами с помощью вольтметра с высоким входным сопротивлением.

Таблица 2. Коэффициенты солнечного поглощения α_s и коэффициенты излучения ϵ_0 , отношения α_s/ϵ_0 и равновесная температуры T_p для различных терморегулирующих покрытий

Table 2. Solar absorption coefficients α_s and emission coefficients ϵ_0 , the ratio α_s/ϵ_0 and the equilibrium temperature T_p for various temperature-regulating coatings

Материал	α_s	ϵ_0	α_s/ϵ_0	T_p , °C	Источник
Образец:					
1N1.30 SiO ₂	0,77	0,7	1,1	11,8	–
2N1.30 Si	0,6	0,35	1,71	44,9	–
2N1.30 SiO ₂	0,61	0,36	1,69	44,0	–
2N1.30 ситалл	0,62	0,37	1,68	43,7	–
2N2.34 Si	0,56	0,34	1,64	41,9	–
2N2.34 SiO ₂	0,62	0,66	0,95	1,4	–
2N2.34 ситалл	0,55	0,34	1,6	40,0	–
2CN1.30 Si	0,6	0,35	1,73	46,2	–
2CN1.30 SiO ₂	0,59	0,33	1,79	48,5	–
2CN1.30 ситалл	0,54	0,33	1,61	40,3	–
2CN2.33 ситалл	0,54	0,33	1,61	40,3	–
Покрытие TiN	0,52	0,11	4,73	137,2	[25]
Vel-Black	0,99	0,95	1,04	8,0	[25]
Ebanol C Black	0,97	0,73	1,33	25,6	[25]
Catalic White Paint	0,24	0,9	0,27	-73,2	[25]
Black Nickel	0,91	0,66	1,38	28,4	[25]
TRW Solar Cell	0,86	0,82	1,05	8,5	[25]

При известных толщинах покрытий и значениях их поверхностного сопротивления можно определить удельное сопротивление $R_{уд}$ по формуле

$$R_{уд} = R_{\square} \cdot h, \tag{9}$$

где h – толщина пленки.

В табл. 3 представлены усредненные значения поверхностного сопротивления R_{\square} , толщина сформированных структур и значения удельного сопротивления $R_{уд}$ нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий. Отклонение значения сопротивления в зависимости от места измерения является незначительным для всех исследуемых образцов, что свидетельствует об однородности сформированных покрытий. Градиентный адгезионный подслои не оказывает значительного влияния на сопротивление сформированных нанопокровтий.

Таблица 3. Усредненные значения поверхностного R_{\square} и удельного $R_{уд}$ сопротивления, толщина h покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN, сформированных на подложках из ситалла СТ-1, оксида кремния SiO₂ и кремния Si

Table 3. Average values of surface resistance R_{\square} and resistivity ρ , thickness h of TiAlSiN, TiAlSiCN coatings formed on substrates of glass ceramics ST-1, silicon oxide SiO₂ and silicon Si

Подложка Образец	Ситалл		SiO ₂		Si		h , нм
	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, 10 ⁻⁸ Ом·м	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, 10 ⁻⁸ Ом·м	R_{\square} , Ом/□	$R_{уд}$, 10 ⁻⁸ Ом·м	
1N1.30	–	–	21,1	15 400	–	–	1370
1N1.30 gr.	21,0	15 300	23,8	17 300	14,3	10 400	1320
1N1.32	–	–	28,9	21 900	–	–	1370
1N1.32 gr.	30,2	22 900	30,6	23 200	–	–	1320
2N1.30	35,4	40 200	37,5	42 600	–	–	880
2N2.34	7,5	920	–	–	–	–	880
2CN1.30	7,2	16 800	–	–	–	–	823
2CN1.30 gr.	10,2	23 600	7,3	17 000	–	–	430
2CN2.33	4,2	510	–	–	–	–	430
2CN2.33 gr.	4,6	560	–	–	4,2	510	823

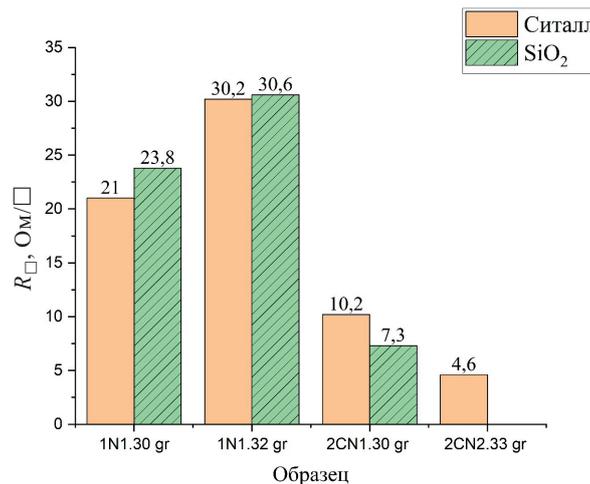


Рис. 4. Показатели поверхностного сопротивления R_{\square} покрытий с градиентным адгезионным подслоем на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂

Fig. 4. Indicators of surface resistance R_{\square} of coatings with a gradient adhesion sublayer on substrates made of glass-ceramic and silicon oxide SiO₂

Поверхностное сопротивление для образцов, нанесенных с использованием первой мишени, находится в пределах $R_{\square} = 21 \div 30,6$ Ом/□. Для второй мишени значение поверхностного сопротивления составляет $R_{\square} = 4,2 \div 37,5$ Ом/□. Покрытия, сформированные без добавления углерода, имеют $R_{\square} = 7,5 \div 37,5$ Ом/□. Наноккомпозит с добавкой углерода демонстрирует поверхностное сопротивление в рамках $R_{\square} = 4,2 \div 10,2$ Ом/□. Образцы со стехиометрией имеют поверхностное сопротивление в диапазоне $R_{\square} = 7,2 \div 37,5$ Ом/□, а нестехиометрические – $R_{\square} = 4,2 \div 7,5$ Ом/□.

Сформированные нитридные TiAlSiN и карбонитридные TiAlSiCN покрытия являются проводящими (по критерию $R_{\square} \leq 250$ кОм/□ [26]) и способны препятствовать локальному скоплению заряда. Это свидетельствует о том, что покрытия являются пригодными для применения в задачах космической техники в качестве защитных электропроводящих структур.

На рис. 4 показаны показатели поверхностного сопротивления покрытий с градиентным адгезионным подслоем на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂. Минимальное значение поверхностного сопротивления R_{\square} демонстрирует образец 2CN2.33 gr (4,6 Ом/□). Максимальное значение обнаружено у образца 1N1.32 gr на подложке из оксида кремния SiO₂ (30,6 Ом/□). Образцы покрытий, полученные с использованием мишени № 1, как правило, демонстрируют большее поверхностное сопротивление, чем полученные при помощи мишени № 2. Это обусловлено преобладанием металлической компоненты над неметаллической в составе сформированных покрытий из мишени № 2. Образец 1N1.30 на подложке ситалла с градиентным адгезионным подслоем обладает на 51,4 % большим сопротивлением, по сравнению с образцом 2CN1.30 на аналогичной подложке.

Показатели поверхностного сопротивления покрытий без градиентного адгезионного подслоя на подложках из ситалла и оксида кремния SiO₂ представлены на рис. 5. Минимальное значение поверхностного сопротивления R_{\square} демонстрирует образец 2CN2.33 ($R_{\square} = 4,2$ Ом/□). Максимальное значение обнаружено у образца 2N1.30 на подложке из оксида кремния SiO₂ ($R_{\square} = 37,5$ Ом/□). Чем выше доля металла в составе покрытия (Ti+Al ат.%), тем ниже поверхностное сопротивление покрытия.

Добавки меди Cu и кремния Si в нитридных (TiAlSiN и TiAlCuN) и карбонитридных покрытиях (TiAlSiCN и TiAlCuCN) сегрегируют по границам зерен в межкристаллитной прослойке, сдерживая рост кристаллитов TiAlN, TiAlCN [17]. Это приводит к повышению электрического сопротивления материала в сравнении с чистым нитридом титана TiN (табл. 4) для случая добавки кремния и понижению для случая добавки меди.

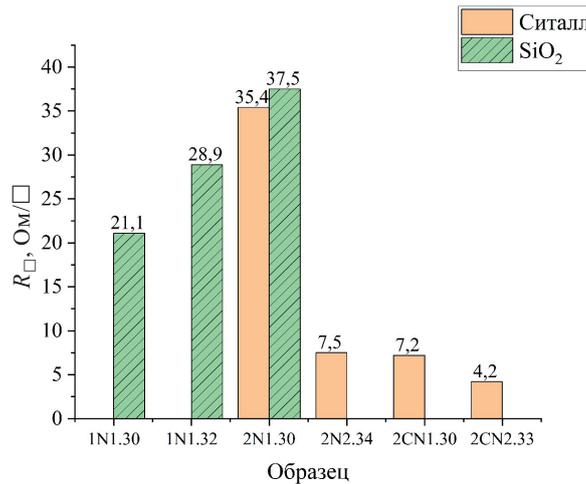


Рис. 5. Показатели поверхностного сопротивления R_{\square} покрытий без адгезионного подслоя на подложках из ситалла и оксида кремния SiO_2

Fig. 5. Indicators of surface resistance R_{\square} of coatings without an adhesive sublayer on substrates made of glass-ceramic and silicon oxide SiO_2

Сопротивление нитрида $TiAlCuN$ ниже, чем сопротивление $TiAlSiN$, что обусловлено лучшей электропроводностью межкристаллитной прослойки, содержащей медь Cu ($R_{уд} = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [27]), в отличие от межкристаллитной прослойки с добавкой кремния Si ($R_{уд} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [28]). Значение сопротивления $TiAlSiN$ в среднем в 6 раз больше, чем сопротивление $TiAlCuN$. Добавление углерода для нанокompозита $TiAlSiCN$ в общем случае понижает сопротивление в $\approx 1,8$ раза в сравнении с покрытием без добавления углерода $TiAlSiN$.

Значения удельных сопротивлений покрытий TiN [29], $TiCN$ [29], TiC [29], $TiAlSiN$, $TiAlSiCN$, $TiAlCuN$ (данные авторов), $TiAlCN$ [30], $TiAlN$ [31] представлены в табл. 4. Покрытия с различными добавками (углерода C , алюминия Al , кремния Si , меди Cu) демонстрируют большее удельное сопротивление, чем чистый нитрид титана TiN . Сопротивление композита $TiAlSiN$ значительно больше, чем сопротивление чистого нитрида титана TiN и $TiAlN$. Это обусловлено изменением кристаллической структуры, ее искажением, снижением среднего размера кристаллитов и большим сопротивлением материалов, входящих в состав покрытия.

Таблица 4. Значения удельного сопротивления $R_{уд}$ для нитрида титана TiN , карбонитрида титана $TiCN$, карбида титана TiC , нитрида титана $TiAlSiN$, карбонитрида титана $TiAlSiCN$, нитрида титана $TiAlSiCuN$, карбонитрида титана $TiAlCN$ и нитрида титана $TiAlN$

Table 4. Values of resistivity ρ for titanium nitride TiN , titanium carbonitride $TiCN$, titanium carbide TiC , titanium nitride $TiAlSiN$, titanium carbonitride $TiAlSiCN$, titanium nitride $TiAlSiCuN$, titanium carbonitride $TiAlCN$ and titanium nitride $TiAlN$

Тип покрытия	$R_{уд}, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	Me/C+N	Источник
TiN	25	1,22	[39]
$TiCN$	42÷71	1,01÷1,24	[39]
TiC	100	1,22	[39]
$TiAlSiN$	920÷42600	0,74÷1,12	–
$TiAlSiCN$	510÷23600	1,11÷2,18	–
$TiAlCuN$	156÷6378	0,98÷1,79	–
$TiAlCN$	1982÷3169	0,8÷2,25	[36]
$TiAlN$	616÷1171	0,2÷1,0	[40]

Далее по формуле (2) были проведены расчеты концентрации носителей заряда (электронов) N в образцах покрытий. Удельное сопротивление $R_{уд}$ вычислялось по формуле (9) на ос-

новании измеренных четырехзондовым методом поверхностного сопротивления R_{\square} и толщины покрытия h , полученной из микрофотографий покрытий на сколах.

В обобщающей табл. 5 приведены результаты измерений и расчета поверхностного сопротивления R_{\square} , толщины покрытия h , удельного сопротивления $R_{уд}$, плазменной длины λ_p , концентрации электронов N и подвижности электронов μ нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий на подложках SiO₂.

Значения подвижности μ рассчитывались по формуле [31]

$$\mu = 1 / (e \cdot N \cdot R_{уд}), \quad (10)$$

где μ – подвижность, e – заряд электрона, N – концентрация электронов $R_{уд}$ – удельное сопротивление.

Из анализа данных, представленных в табл. 5, следует, что удельное сопротивление $R_{уд}$ покрытий больше для образцов состава, близкого к стехиометрическому (образцы 1N1.30 и 2N1.30). Кроме этого, отмечается, что концентрация электронов N выше для режимов осаждения с избытком металла в покрытии (образец 2N2.34). Выявлено, что покрытия с добавлением углерода имеют более высокую подвижность электронов μ (образцы 2CN1.30 и 2CN2.33).

Таблица 5. Поверхностное сопротивление R_{\square} , толщина покрытия h , удельное сопротивление $R_{уд}$, плазменная длина волны λ_p , концентрация электронов N , подвижность электронов μ , нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий на подложках SiO₂

Table 5. Surface resistance R_{\square} , coating thickness h , resistivity ρ , plasma wavelength λ_p , electron concentration N , electron mobility μ of nitride TiAlSiN and carbonitride TiAlSiCN coatings on the SiO₂ substrates

Образец	α	R_{\square} , Ом/□	h , мкм	$R_{уд}$, 10^{-8} Ом · м	λ_p , мкм	N , 10^{22} см ⁻³	μ , см ² /В · с
1N1.30	0,605	21,1	1,37	2891	0,996	0,112	1,92
2N1.30	0,605	35,4	0,853	3020	0,581	0,315	0,66
2N2.34	0,474	7,5	0,823	617,3	0,402	0,644	1,57
2CN1.30	0,605	7,2	0,430	309,6	0,807	0,171	11,80
2CN2.33	0,474	4,2	0,823	345,7	0,602	0,307	5,88

На основании изучения электрофизических свойств можно сделать следующий вывод: сформированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiCN с добавлением кремния Si имеют небольшие значения поверхностных сопротивлений ($R_{\square} = 4,2\text{--}37,5$ Ом/□) и являются проводящими. Выявлено, что чем выше доля металла в составе покрытия (Ti+Al, ат, %), тем ниже сопротивление получаемой структуры. Обнаружено, что наименьшие значения R_{\square} и $R_{уд}$ наблюдались у образца 2CN2.33 с наибольшей концентрацией металлов титана Ti и алюминия Al в составе ($R_{\square} = 4,2$ Ом/□, $R_{уд} = 345,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м). Установлено, что формирование градиентного адгезионного подслоя не оказывает значительного влияния на поверхностное сопротивление нитридных и карбонитридных пленок.

Покрытия на основе нитрида титана способны функционировать в неблагоприятных условиях ближнего и дальнего космоса в силу своей высокой устойчивости к высокоэнергетическому корпускулярному облучению [32–34]. Сформированные покрытия могут найти применение в качестве электропроводящих терморегулирующих структур для малых космических аппаратов.

Заключение. Сформированы образцы нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены их структурные свойства и морфология.

С помощью метода спектрофотометрирования определены коэффициенты отражения $R_{сумм}$ и $R_{дифф}$ для покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN в видимом, ближнем инфракрасном и ближнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн $\lambda = 200\text{--}2500$ нм излучения. Построены зависимости коэффициентов отражения от длины волны. Обнаружено, что зависимость коэффициентов отражения демонстрирует металлический тип, который хорошо описывается теорией Друде – Лоренца. Проведены измерения поверхностного R_{\square} и удельного $R_{уд}$ сопротивления нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN четырехзондовым методом при помощи цифрового при-

бора ИУС-3. Установлено, что все сформированные покрытия нитрида TiAlSiN и карбонитрида TiAlSiCN с добавлением кремния Si имеют небольшие значения поверхностных сопротивлений $R_{\square} = 4,2\text{--}37,5 \text{ Ом}/\square$ и являются проводящими. Обнаружено, что чем выше доля металла в составе покрытия (Ti+Al ат.%), тем ниже сопротивление получаемой структуры. Выявлено, что наименьшие значения R_{\square} и $R_{уд}$ наблюдались у образца 2CN2.33 с наибольшей концентрацией металлов титана Ti и алюминия Al в составе ($R_{\square} = 4,2 \text{ Ом}/\square$, $R_{уд} = 510 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Установлено, что формирование градиентного адгезионного подслоя не оказывает значительного влияния на поверхностное сопротивление нитридных и карбонитридных пленок. На основании совместного анализа результатов спектрального коэффициента отражения $R_{сумм}$, $R_{дифф}$ и электрофизических измерений определены плазменная длина волны λ_p , концентрация свободных электронов N и значения подвижности электронов μ в покрытиях TiAlSiN и TiAlSiCN. Рассчитаны коэффициенты солнечного поглощения α_s и коэффициенты излучения ϵ_0 , отношения α_s/ϵ_0 , а также равновесная температура T_p для исследуемых покрытий.

Полученные оптические и электрофизические свойства сформированных нано- и микроструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN представляют интерес для прогнозирования и разработки систем пассивной терморегулировки для применения в космическом приборостроении.

Список использованных источников

1. Структура и микромеханические свойства покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN, сформированных методом реактивного магнетронного распыления / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 241–252. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-241-252>
2. Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry / J. Jyothi [et al.] // Appl. Phys. A. – 2017. – Vol. 123. – Art. ID 496. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1103-2>
3. Spacecraft Thermal Control Handbook. Volume 1: Fundamental Technologies / ed. D. G. Gilmore. – El Segundo, California: 2nd The Aerospace Press, 2002. – 836 p. <https://doi.org/10.2514/4.989117>
4. Titanium-aluminum-nitride coatings for satellite temperature control / M. Brogren [et al.] // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 370. – P. 268–277. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00914-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00914-7)
5. Терморегулирующее покрытие К-208СР. Технология получения, свойства и их изменения в процессе эксплуатации при воздействии факторов космического пространства / В. П. Свечкин [и др.] // Космич. техника и технология. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 99–107.
6. Zhang, J. The microstructural, mechanical and thermal properties of TiAlVN, TiAlSiN monolithic and TiAlVN/TiAlSiN multilayered coatings / J. Zhang, L. Chen, Y. Kong // J. Alloys Compd. – 2022. – Vol. 899. – P. 163332. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163332>
7. Thermal stability, mechanical properties, and tribological performance of TiAlXN coatings: understanding the effects of alloying additions / W. Y. H. Liew [et al.] // J. Mat. Res. Technol. – 2022. – Vol. 17. – P. 961–1012. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.005>
8. A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications / K. Xu [et al.] // J. Materiomics. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.12.012>
9. VO₂-based smart coatings with improved emittance-switching properties for an energy-efficient near room-temperature thermal control of spacecrafts / A. Hendaoui [et al.] // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2013. – Vol. 117. – P. 494–498. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.07.023>
10. Analytical and numerical models for thermal related design of a new pico-satellite / M. Bonnici [et al.] // Appl. Therm. Eng. – 2019. – Vol. 159. – P. 113908. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113908>
11. Effects of Si addition on structure and mechanical properties of TiAlSiCN coatings / X. Zhang [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2019. – Vol. 362. – P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.056>
12. Understanding the wear failure mechanism of TiAlSiCN nanocomposite coating at evaluated temperatures / F. Guo [et al.] // Trib. Int. – 2021. – Vol. 154. – P. 106716. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106716>
13. Valleti, K. Functional multi-layer nitride coatings for high temperature solar selective applications / K. Valleti, D. M. Krishna, S. V. Joshi // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2014. – Vol. 121. – P. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.10.024>
14. Effects of deposition and post-annealing conditions on electrical properties and thermal stability of TiAlN films by ion beam sputter deposition / S.-Y. Lee [et al.] // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 515, № 3. – P. 1069–1073. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.172>
15. Electrical and Corrosion Properties of Titanium Aluminum Nitride Thin Films Prepared by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition / E.-Y. Yun [et al.] // J. Mater. Sci. Technol. – 2017. – Vol. 33, № 3. – P. 295–299. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.11.027>

16. Crystal growth and microstructure of polycrystalline $Ti_{1-x}Al_xN$ alloy films deposited by ultra-high-vacuum dual-target magnetron sputtering / U. Wahlström [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1993. – Vol. 235, № 1–2. – P. 62–70. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90244-J](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90244-J)
17. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions // F. F. Komarov [et al.] // *RSC Advanced*. – 2023. – № 13. – P. 18898–18907. <https://doi.org/10.1039/D3RA02301J>
18. Структурно-фазовые состояния и микромеханические свойства наноструктурированных покрытий TiAlCuN / С. В. Константинов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 101–110. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-101-110>
19. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – Т. 2. – 419 с.
20. Optimization of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ solar absorber coatings / L. An [et al.] // *Sol. Energy*. – 2015. – Vol. 118. – P. 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.042>
21. Бродский, А. Ж. Влияние микроскопической структуры поверхностей металлов на их оптические свойства / А. Ж. Бродский, М. И. Урбах // УФН. – 1982. – Т. 138, вып. 3. – С. 413–453.
22. Wainstein, D. L. Control of optical properties of metal-dielectric planar plasmonic nanostructures by adjusting their architecture in the case of TiAlN/Ag system / D. L. Wainstein, V. O. Vakhrushev, A. I. Kovalev // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 857. – Art. ID 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012054>
23. Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry / J. Jyothi [et al.] // *Appl. Phys. A*. – 2017. – Vol. 123. – Art. ID 496. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1103-2>
24. Veszelei, M. Optical properties and equilibrium temperatures of titanium-nitride-and graphite-coated Langmuir probes for space application / M. Veszelei, E. Veszelei // *Thin Solid Films*. – 1993. – Vol. 236, № 1–2. – P. 46–50. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90640-b](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90640-b)
25. Kauder, L. *Spacecraft Thermal Control Coatings References* / L. Kauder. – NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD, United States, 2005. – 130 p.
26. Климович, И. М. Влияние температуры нагрева подложек и потенциала смещения на оптические характеристики Ti–Al–C–N покрытий / И. М. Климович, Ф. Ф. Комаров, В. А. Зайков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 415–422. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-415-422>
27. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* / ed. W. M. Haynes. – 95th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 2704 p. <https://doi.org/10.1201/b17118>
28. Eranna, G. *Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI* / G. Eranna. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 430 p. <https://doi.org/10.1201/b17812>
29. Solid state properties of group IVb carbonitrides. / W. Lengauer [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 1995. – Vol. 217, № 1. – P. 137–147. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01315-9](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01315-9)
30. Electrophysical properties of TiAlN coatings prepared using controlled reactive magnetron sputtering / I. M. Klimovich [et al.] // *Materials and Structures of Modern Electronics: Collection of Scientific Works: proc. of the 6th Int. sci. and tech. conf., Minsk, Oct. 8–9, 2014, BSU. – Minsk, 2014. – P. 5–8.*
31. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS / W. Tillmann [et. al.] // *Surf. Coat. Technol.* – 2021. – Vol. 406. – P. 126664. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126664>
32. Effects of Proton Irradiation on the Structural-Phase State of Nanostructured TiZrSiN Coatings and Their Mechanical Properties / F. F. Komarov [et al.] // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2021. – Vol. 94, № 6. – P. 1609–1618. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02442-2>
33. Konstantinov, S. V. Effects of nitrogen selective sputtering and flaking of nanostructured coatings TiN, TiAlN, TiAlYN, TiCrN, (TiHfZrVNb)N under helium ion irradiation / S. V. Konstantinov, F. F. Komarov // *Acta Phys. Pol. A*. – 2019. – Vol. 136, № 2. – P. 303–309. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.136.303>
34. Wear resistance and radiation tolerance of He⁺-irradiated magnetron sputtered TiAlN coatings / S. V. Konstantinov [et al.] // *High Temp. Mater. Proc.* – 2014. – Vol. 18, № 1–2. – P. 135–141. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2015015569>

References

1. Konstantinov S. V., Komarov F. F., Chizhov I. V., Zaikov V. A. The structure and micromechanical properties of TiAlSiN, TiAlSiCN coatings formed by the method of reactive magnetron sputtering. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 241–252 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-241-252>
2. Jyothi J., Biswas A., Sarkar P., Soum-Glaude A., Nagaraja H. S., Barshilia H. C. Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics A*, 2017, vol. 123, art. ID 496. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1103-2>
3. Gilmore D. G. (ed.). *Spacecraft thermal control handbook. Volume I: Fundamental Technologies*. El Segundo, California: 2nd The Aerospace Press, 2002. 836 p. <https://doi.org/10.2514/4.989117>
4. Brogren M., Harding G. L., Karmhag R., Ribbing C. G., Niklasson G. A., Stenmark L. Titanium-aluminum-nitride coatings for satellite temperature control. *Thin Solid Films*, 2000, vol. 370, pp. 268–277. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)00914-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)00914-7)

5. Svehkin V. P., Savelyev A. A., Sokolova S. P., Borozdina O. V. Thermal control coating K-208CP. Technology, properties and their changes in the operation process under the effect of space factors. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii = Space Engineering and Technology*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 99–107 (in Russian).
6. Zhang J., Chen L., Kong Y. The microstructural, mechanical and thermal properties of TiAlVN, TiAlSiN monolithic and TiAlVN/TiAlSiN multilayered coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 899, pp. 163332. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163332>
7. Liew W. Y. H., Lim H. P., Melvin G. J. H., Dayou J., Jiang Z.-T. Thermal stability, mechanical properties, and tribological performance of TiAlXN coatings: understanding the effects of alloying additions. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 17, pp. 961–1012. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.005>
8. Xu K., Du M., Hao L., Mi J., Yu Q., Li S. A review of high-temperature selective absorbing coatings for solar thermal applications. *Journal of Materiomics*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.12.012>
9. Hendaoui A., Émond N., Dorval S., Chaker M., Haddad E. VO₂-based smart coatings with improved emittance-switching properties for an energy-efficient near room-temperature thermal control of spacecrafts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, vol. 117, pp. 494–498. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.07.023>
10. Bonnici M., Mollicone P., Fenech M., Azzopardi M. A. Analytical and numerical models for thermal related design of a new pico-satellite. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 159, pp. 113908. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113908>
11. Zhang X., Li J., Xiao J., Pi J., He G., Chen L., Zeng Y., Jiang J. Effects of Si addition on structure and mechanical properties of TiAlSiCN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 362, pp. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.056>
12. Guo F., Li K., Huang X., Xie Z., Gong F. Understanding the wear failure mechanism of TiAlSiCN nanocomposite coating at evaluated temperatures. *Tribology International*, 2021, vol. 154, pp. 106716. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106716>
13. Valleti K., Krishna D. M., Joshi S. V. Functional multi-layer nitride coatings for high temperature solar selective applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, vol. 121, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.10.024>
14. Lee S.-Y., Wang S.-C., Chen J.-S., Huang J.-L. Effects of deposition and post-annealing conditions on electrical properties and thermal stability of TiAlN films by ion beam sputter deposition. *Thin Solid Films*, 2006, vol. 515, no. 3, pp. 1069–1073. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.172>
15. Yun E.-Y., Lee W.-J., Wang Q. M., Kwon S.-H. Electrical and Corrosion Properties of Titanium Aluminum Nitride Thin Films Prepared by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33, no. 3, pp. 295–299. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.11.027>
16. Wahlström U., Hultman L., Sundgren J.-E., Adibi F., Petrov I., Greene J.E. Crystal growth and microstructure of polycrystalline Ti_{1-x}Al_xN alloy films deposited by ultra-high-vacuum dual-target magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 1993, vol. 235, no. 1–2, pp. 62–70. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90244-J](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90244-J)
17. Komarov F. F., Konstantinov S. V., Chizhov I. V., Zaikov V. A., Zubar T. I., Trukhanov A. V. Nanostructured TiAlCuN and TiAlCuCN coatings for spacecraft: effects of reactive magnetron deposition regimes and compositions. *RSC Advanced*, 2023, no. 13, pp. 18898–18907. <https://doi.org/10.1039/D3RA02301J>
18. Konstantinov S. V., Komarov F. F., Chizhov I. V., Zaikov V. A. Structural-phase states and micromechanical properties of nanostructured tialcun coatings TiAlCuN. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 2, pp. 101–110 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-101-110>
19. Ashcroft N., Mermin N. *Physics of Solid State. Volume 2*. Moscow, Mir Publ., 1979. 419 p. (in Russian).
20. An L., Ali S. T., Søndergaard T., Nørgaard J., Tsao Y.-C., Pedersen K. Optimization of TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ solar absorber coatings. *Solar Energy*, 2015, vol. 118, pp. 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.042>
21. Brodskii A. M., Urbakh M. I. The effect of the microscopic structure of metal surfaces on their optical properties. *Soviet Physics Uspekhi*, 1982, vol. 25, pp. 810–832. <https://doi.org/10.1070/pu1982v025n11abeh004661>
22. Wainstein D. L., Vakhrushev V. O., Kovalev A. I. Control of optical properties of metal-dielectric planar plasmonic nanostructures by adjusting their architecture in the case of TiAlN/Ag system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 857, art. ID 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012054>
23. Jyothi J., Biswas A., Sarkar P., Soum-Glaude A., Nagaraja H. S., Barshilia H. C. Sarkar Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics A*, 2017, vol. 123, art. ID 496. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1103-2>
24. Veszelei M., Veszelei E. Optical properties and equilibrium temperatures of titanium-nitride-and graphite-coated Langmuir probes for space application. *Thin Solid Films*, 1993, vol. 236, no. 1–2, pp. 46–50. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90640-b](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90640-b)
25. Kauder L. *Spacecraft Thermal Control Coatings References*. NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD, United States, 2005. 130 p.
26. Klimovich I. M., Komarov F. F., Zaikov V. A. Influence of substrate heating and bias potential on the Ti–Al–C–N coatings optical characteristics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 415–422 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-415-422>
27. Haynes W. M. (ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 95th Ed. Boca Raton, CRC Press, 2014. 2704 p. <https://doi.org/10.1201/b17118>
28. Eranna G. *Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI*. Boca Raton, CRC Press, 2014. 430 p. <https://doi.org/10.1201/b17812>

29. Lengauer W., Binder S., Aigner K., Ettmayer, P., Guillou A., Buigne J., Groboth G. Solid state properties of group IVb carbonitrides. *Journal of Alloys and Compounds*, 1995, vol. 217, no. 1, pp. 137–147. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)01315-9](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)01315-9)

30. Klimovich I. M., Zaikov V. V., Komarov F. F., Romanov I. A., Pilko V. V., Ludchik O. R. Electrophysical properties of TiAlN coatings prepared using controlled reactive magnetron sputtering. *Materials and Structures of Modern Electronics: Collection of Scientific Works. Proceedings of the 6th International scientific and technical conference, Minsk, October 8–9, 2014, BSU*. Minsk, 2014, pp. 5–8.

31. Tillmann W., Grisales D., Stangier D., Thomann C., Debus J., Nienhaus A., Apel D. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 406, pp. 126664. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126664>

32. Komarov F. F., Konstantinov S. V., Zaikov V. A., Pil'ko V. V. Effects of Protone Irradiation on the Structural-Phase State of Nanostructured TiZrSiN Coatings and Their Mechanical Properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 6, pp. 1609–1618. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02442-2>

33. Konstantinov S. V., Komarov F. F. Effects of nitrogen selective sputtering and flaking of nanostructured coatings TiN, TiAlN, TiAlYN, TiCrN, (TiHfZrVNb)N under helium ion irradiation. *Acta Physica Polonica A*, 2019, vol. 136, no. 2, pp. 303–309. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.136.303>

34. Konstantinov S. V., Komarov F. F., Pilko V. V., Kukareko V. A. Wear resistance and radiation tolerance of He⁺-irradiated magnetron sputtered TiAlN coatings. *High Temperature Material Processes*, 2014, vol. 18, no. 1–2, pp. 135–141. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2015015569>

Информация об авторах

Константинов Станислав Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории элионики, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 7, Минск, 220045, Республика Беларусь). E-mail: svkonstantinov@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-4489-8751>

Комаров Фадей Фадеевич – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией элионики, Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 7, Минск, 220045, Республика Беларусь). E-mail: komarovF@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0001-8292-8942>

Чижов Игорь Викторович – аспирант, Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igorchizhovwork@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4455-2128>

Зайков Валерий Александрович – старший научный сотрудник кафедры физической электроники и нанотехнологий, Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zaikov@bsu.by

Information about the authors

Stanislav V. Konstantinov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher of the Elionics Laboratory, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus) E-mail: svkonstantinov@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-4489-8751>

Fadei F. Komarov – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Elionics Laboratory, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus) E-mail: komarovF@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0001-8292-8942>

Igor V. Chizhov – Postgraduate Student, Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igorchizhovwork@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4455-2128>

Valery A. Zaikov – Senior Researcher at the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies, Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zaikov@bsu.by